Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA
Società Italiana di Geologia Ambientale

Supplemento al n. 4/2018
ISSN 1591-5352









Atti del convegno nazionale

Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione

Roma, 1 dicembre 2017

A cura di
FRANCESCA BOZZANO
EUGENIO DI LORETO
STEFANIA NISIO
MARIO PARISE

Poste Italiane S.p.a. - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n° 46) art. 1 comma 1 - DCB Roma

Società Italiana di Geologia Ambientale
Associazione di protezione ambientale a carattere nazionale riconosciuta dal Ministero dell'ambiente, della tutela del territorio e del mare con D.M. 24/5/2007 e con successivo D.M. 11/10/2017

PRESIDENTE
Antonello Fiore

CONSIGLIO DIRETTIVO NAZIONALE
Danilo Belli, Lorenzo Cadrobbi, Franco D'Anastasio (*Segretario*), Daria Duranti (*Vicepresidente*), Antonello Fiore (*Presidente*), Sara Frumento, Fabio Garbin, Enrico Gennari, Giuseppe Gisotti (*Presidente onorario*), Gioacchino Lena (*Vicepresidente*), Luciano Masciocco, Michele Orifici, Vincent Ottaviani (*Tesoriere*), Angelo Sanzò, Livia Soliani

Geologia dell'Ambiente
Periodico trimestrale della SIGEA

Supplemento al n 4/2018
Anno XXVI - settembre-dicembre 2018

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229
del 31 maggio 1994

DIRETTORE RESPONSABILE
Giuseppe Gisotti

COMITATO SCIENTIFICO
Mario Bentivenga, Aldino Bondesan, Giancarlo Bortolami, Giovanni Bruno, Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado, Gioacchino Lena, Giacomo Prosser, Giuseppe Spilotro

COMITATO DI REDAZIONE
Fatima Alagna, Federico Boccalaro, Giorgio Cardinali, Francesco Cancellieri, Valeria De Gennaro, Fabio Garbin, Gioacchino Lena, Maurizio Scardella

REDAZIONE
SIGEA: tel. 06 5943344
Casella Postale 2449 U.P. Roma 158
info@sigeaweb.it

PROCEDURA PER L'ACCETTAZIONE DEGLI ARTICOLI
I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione, dopo che sia stata verificata la loro pertinenza con i temi di interesse della Rivista, saranno sottoposti ad un giudizio di uno o più Referees

UFFICIO GRAFICO
Pino Zarbo (Fralerighe Book Farm)
www.fralerighe.it

PUBBLICITÀ
SIGEA

STAMPA
Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

La quota di iscrizione alla SIGEA per il 2018 è di € 30 e da diritto a ricevere la rivista "Geologia dell'Ambiente". Per ulteriori informazioni consulta il sito web all'indirizzo www.sigeaweb.it

Sommario

Introduzione
Antonello Fiore e Arcangelo Francesco Violo 9

SESSIONE A
CENSIMENTO E CATALOGAZIONE CAVITÀ

Catasto speleologico nazionale delle cavità artificiali (CA). Classificazione, interventi di tutela e monitoraggio conseguiti grazie ai dati speleologici e prospettive future
Michele Betti, Roberto Bixio, Carla Galeazzi, Sandro Galeazzi, Carlo Germani, Mario Mazzoli, Marco Meneghini, Giovanni Belvederi, Mario Parise, Stefano Saj 13

L'inventario delle cavità di origine antropica e la Banca Dati Territoriale online del territorio della Città Metropolitana di Napoli
Paolo Maria Guarino, Roberta Carta, Daniela Maria Antonia, Mauro Roma, Rocco Mari, Marco Soravia, Paola Napolitano, Giuseppe Palma, Fortunato Sgariglia, Antonio Santo 19

Primo contributo alla realizzazione della Carta delle Cavità Sotterranee di Roma
Fabrizio Bisconti, Giancarlo Ciotoli, Gianluca Ferri, Roberto Fiore, Maurizio Lanzini, Stefania Nisio, Mauro Roma, Riccardo Paolucci, Ivano Stranieri, Claudio Succhiarelli, Maurizio Allevi 25

Cavità sotterranee nell'area portuense a Roma
Cianfriglia Laura, Matteucci Renato, Rosa Carlo, Sebastiani Renato 33

Le cavità sotterranee scomparse di Roma: la catacomba di San Felice scomparsa sulla Via Portuense
Giancarlo Ciotoli, Stefania Nisio 48

Le cave di pozzolana a Roma e nel territorio nelle fonti archivistiche settecentesche
Orietta Verdi, Gianluigi Giannella, Carlo Rosa 57

Cave sotterranee nel Colle Aventino. Cartografia storica, documenti di archivio e nuove indagini geoarcheologiche
Letizia Rustico, Roberto Narducci 63

Note preliminari sulle indagini speleologiche e geologiche dell'acquedotto "Fontana" di Velletri (Roma)
Pio Bersani, Carlo Germani, Carla Galeazzi, Ruggero Bottiglia, Sandro Galeazzi 72

Il censimento delle cavità naturali e artificiali della Riserva Naturale Regionale Lago di Vico (Viterbo)
Andrea Sasso 76

Censimento e catalogazione delle cavità di origine antropica mediante prospezioni geofisiche integrate nell'area de "Il Piano" (Isola d'Elba, Italia)
Maria Di Nezza, Michele Di Filippo, Flavio Cecchini, Siro Margottini, Caris De Martino, Veronica Pazzi, Tommaso Carlà, Federica Bardi, Federico Marini, Katia Fontanelli, Emanuele Intrieri, Riccardo Fanti 81

Censimento e interesse storico e speleologico delle fortificazioni militari della Nurra (Sardegna)
Pierpaolo Dore, Eleonora Dallocchio 91

Censimento e mappatura della rete di cavità che sottende il paese di Castelnuovo, San Pio delle Camere (AQ)
Federica Durante, Giorgio Pipponzi, Emanuele del Monte, Alessandro Ghinelli, Vidan Ilic, Marco Nocentini, Marco Tallini 95

Altamura memoria del paesaggio: le cave per l'estrazione del materiale lapideo. Dal censimento alla valorizzazione dei percorsi dell'industria estrattiva
Emma Capurso, Teresa Ninivaggi, Giovanni Ragone 103

Cavità sotterranee di origine antropica in Francia
Maria Luisa Felici 108

SESSIONE B
ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ TERRITORIALE

Ricostruzione del modello tridimensionale di una cavità sotterranea nel Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo (Napoli) mediante l'utilizzo di laser scanner manuale
Vincenzo Allocca, Anna Claudia Angrisani, Silvio Coda, Maria Danzi, Pantaleone De Vita, Umberto Del Vecchio, Diego Di Martire, Domenico Massa, Gianluca Minin, Giosafatte Nocerino, Domenico Calcaterra 113

Le acque nelle cavità sotterranee di Roma
Pio Bersani, Stefania Nisio, Luca Pizzino 117

Il fattore *nshape* dei pilastri di cave sotterranee e il loro fattore di sicurezza a compressione desunto da analisi di regressione multivariata
Giovanni Bruno 126

Analisi sistemica per una valutazione della suscettibilità al dissesto di territori dell'Agro Nolano (provincia di Napoli) con presenza di cavità antropiche in tufo
Gianfranco Caccavale, Domenico Calcaterra, Massimo Ramondini 135

Analisi contestuale di cavità di origine antropica nel Parco Archeologico delle Terme di Baia (Campania, Italia)
Marco Corvi, Norma Damiano, Paolo Maria Guarino, Ivana Guidone 155

Nuove metodologie di rilievo di ambienti ipogei tramite laser scanner: l'esempio di una cavità artificiale in provincia di Napoli
Maria Danzi, Umberto Del Vecchio, Gianluca Minin, Valentina Barone 164

Relazioni tra caratteristiche petrografiche e parametri geotecnici nelle rocce tenere carbonatiche in Puglia
Vincenzo Festa, Antonio Fiore, Maria Nilla Miccoli, Luigi Spalluto 168

Considerazioni sulla stabilità morfologica della cavità rocciosa che ospita l'eremo (IX sec) dedicato a San Michele Arcangelo – Monti Aurunci (Lazio Meridionale)
Paolo Miele 185

Criteri di verifica dei pilastri di cave di pozzolana abbandonate
Marco Mizzoni, Gianluigi Giannella, Filippo Virgili, Eutizio Vittori 195

Analisi geostrutturale su nuvola di punti acquisita con laser scanner 3d: applicazione alla Grotta di Cocceio, Bacoli (Campania, Italia)
Marco Pagano, Biagio Palma, Mario Parise, Anna Ruocco 201

Studio numerico parametrico per la definizione di abachi per la valutazione preliminare della stabilità di cavità sotterranee in calcarenite tenera
Michele Perrotti, Piernicola Lollino, Nunzio Luciano Fazio, Luca Pisano, Giovanna Vessia, Mario Parise, Antonello Fiore, Michele Luisi, Maria Nilla Miccoli, Luigi Spalluto 209

Analisi speditiva del quadro fessurativo caraterizzante gli ambienti sotteranei della "Ricerca Buca del Serpente" (Campiglia Marittima, Toscana)
Emilio Poggetti, Luca Tinagli 214

Preesistenze di natura antropica in una delle regioni più antiche delle Catacombe dei SS. Marcellino e Pietro a Roma
Monica Ricciardi, Raffaella Giuliani, Dominique Castex 219

L'utilizzo di fotografie aeree dell'Aerofototeca Nazionale degli anni precedenti l'urbanizzazione del suburbio romano per l'individuazione e catalogazione di cavità di crollo connesse alla evoluzione perniciosa di cavità sotterranee legate ad attività estrattive
Carlo Rosa, Gianluigi Giannella 225

SESSIONE C
TECNICHE E PROCEDURE DI MONITORAGGIO E CONSOLIDAMENTO

Le tecniche per operare in sicurezza in spazi confinati applicate nel progetto di studio e recupero "*Forma Aquae Maxentii*"
Elettra Santucci, Luca Girardo, Stefano Adornato, Susanna Basso 245

Sviluppi nelle tecniche e tecnologie di indagine e monitoraggio delle cavità in venti anni di applicazione nel laboratorio naturale dell'Orvieto ipogea
Endro Martini, Claudio Soccodato, Filippo M. Soccodato, Angelo Celano, Michele Curuni, Valentina Albano 252

Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nel Cratere Sismico Aquilano
Giorgio Pipponzi, Emanuela Ferrini, Francesco Mattucci 258

Cavità di origine antropica e sicurezza degli edifici scolastici nella città di Roma: i casi di studio di via Asmara (Municipio II) e via Diana (Municipio V)
Alessio Argentieri, Maria Di Nezza, Michele Di Filippo, Maria Piro, Giovanni Rotella, Flavio Cecchini, Siro Margottini 263

Nuovi studi sulle necropoli etrusche di Tarquinia (VT) con GPR e Geoelettrica
Greta Brancaleoni, Silvia Castellaro, Luigi Perricone 271

Il metodo B&B ottimizzato per la definizione dell'area tributaria dei pilastri in cave sotterranee
Giovanni Bruno, Luigi Bobbo, Maria Dolores Fidelibus 277

Monitoraggio e caratterizzazione idrogeologica di alcuni qanat nelle vicinanze della Città di Yazd (Iran centrale)
Ezio Burri, Andrea Del Bon, Angelo Ferrari, Hossein Ghafori, Ali Asghar Semsar Yazdi, Labbaf Majid Khaneiki, Arnaldo Pierleoni, Pietro Ragni 283

Gaeta: analisi qualitativa dei fenomeni di instabilità ed interventi per la riqualificazione ambientale della spiaggia di Fontania
Ilaria Falconi 287

GIS e Drone per la gestione emergenziale delle cavità sotterranee
Filippo Massimiliano Gagliano 294

Esperienze nell'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto nell'esplorazione, documentazione e monitoraggio di cavità artificiali sotterranee
Mario Mazzoli, Isidoro Bonfà, Francesco Marsala 300

Esplorazione e documentazione di cavità artificiali sommerse: rischi, cautele esplorative, procedure consolidate in ambito speleo subacqueo
Mario Mazzoli, Carla Galeazzi, Marco Vitelli 304

Consolidamento di cavità e monitoraggio rupe di Orvieto
Pierfranco Ventura 310

Analisi di stabilità e progetto esecutivo per la messa in sicurezza di aggrottati nell'area urbana di Ragusa Ibla
Michele Zocco, Cristina Licitra 315

SESSIONE D
VALORIZZAZIONE E FRUIZIONE

Pollino UNESCO Geoparco Mondiale. Valorizzazione e tutela di una cavità antropica, identificata quale geosito
Luigi Bloise, Egidio Calabrese 327

Tutelare e valorizzare il sottosuolo. La ricostruzione 3D della miniera di grotta della "Buca della Faina di Poggio all'Aione" (Regione Toscana)
Debora Brocchini, Luca Deravignone, Emilio Poggetti 331

La città di Shahrood (Iran nord-orientale) e il suo approvvigionamento idrico tramite i qanat
Ezio Burri, Andrea Del Bon, Doulati Ardejani Faramarz, Angelo Ferrari, Karami Gholam Hossein, Pietro Ragni 338

Gli ipogei in Puglia tra conservazione e innovazione
Antonella Calderazzi, Rosa Pagliarulo 343

Gli ipogei di San Dana (LE). Un sistema rupestre marginale nel Salento meridionale
Stefano Calò, Daniela Longo 348

Privata traiani domus. Elaborazioni 3D, ricerca e fruizione
Elisabetta Carnabuci, Federica Michela Rossi, Stefano Calò, Elettra Santucci 356

Il sentiero dell'acqua di Sinalunga
Gianfranco Censini, Pierpaolo Dore, Eleonora Dallocchio 363

Il complesso ipogeo in località San Fortunato - Marsciano (PG)
Valerio Chiaraluce 369

Potenzialità delle cavità ex-estrattive
tra recupero ambientale e nuovi usi:
applicazioni nel Parco dell'Appia Antica
Paola Veronica Dell'Aira, Carlo Esposito,
Paola Guarini 374

Gli ipogei di Bagnoregio e Civita (Viterbo):
una ricchezza (quasi) sconosciuta
Giovanni Maria Di Buduo, Valerio Chiaraluce,
Luca Costantini, Tommaso Ponziani 381

Cavità sotterranee di Roma: procedure regionali
per la valutazione della pericolosità geologica e attività
di monitoraggio e conservazione della biodiversità
Eugenio Di Loreto, Lorenzo Liperi, Stefania Nisio,
Ivana Pizzol, Federica Roscioli, Elena Santini,
Alessandra Tomassini 387

Siracusa ipogea: carta di censimento e classificazione
dei principali sistemi ipogei di Acradina Neapolis
ed Ortigia
Anna Maria Di Maio, Gaetano Bordone,
Maria Giompapa, Claudio Miraglia, Luciano Arena 392

Conservazione alimentare in ambiente ipogeo:
l'esempio delle cave in sotterraneo della Val di Non
Antonio Galgaro, Giorgia Dalla Santa,
Matteo Cultrera, Michele De Carli, Stefano Daz,
Marco Fauri, Alessandra De Lullo, Simonetta Cola,
Paolo Scotton, Fabrizio Conforti, Andrea Fuganti 403

Il sistema ipogeo di "Kolymbethra - Porta V" nel Parco
Archeologico della Valle dei Templi di Agrigento: un
esempio di fruizione turistica di una cavità artificiale
Giuseppe Lombardo, Giovanni Noto, Marco Interlandi,
Elisabetta Agnello, Eugenio Vecchio 412

Progetto Norchia '16-'18. Scavi nella necropoli
di Norchia, (VT), in località Guado di Sferracavallo
Simona Sterpa 420

Le gallerie delle sorgenti termali di Porretta:
rilievi, monitoraggi, azioni di valorizzazione
Stefano Vannini, Alessandro Stefani 427

Aspetti geomorfologici e cavità d'origine antropica del
territorio dell'Ecomuseo della Tuscia Rupestre (Viterbo)
Andrea Sasso 435

COMITATO SCIENTIFICO

Gianfranco Andriani (Università degli Studi di Bari)
Mario Bentivenga (Università degli Studi della Basilicata)
Michele Betti (Commissione Nazionale Cavità Artificiali, Società Speleologica Italiana - SSI)
Francesca Bozzano (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Scienze della Terra e Centro di Ricerca - CERI)
Giovanni Bruno (Politecnico di Bari, Società Italiana di geologia Ambientale - Sigea)
Giancarlo Ciotoli (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria - CNR-IGAG, Roma)
Eugenio Di Loreto (Società Italiana di Geologia Ambientale - Sigea)
Carlo Esposito (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Scienze della Terra e Centro di Ricerca - CERI)
Gianluca Ferri (Ufficio Dissesti Idrogeologici e Sottosuolo Comune di Roma)
Antonello Fiore (Autorità di Bacino Distrettuale AM, Società Italiana di Geologia Ambientale - Sigea)
Carla Galeazzi (Egeria CRS-Hypogea)
Daniele Giordan (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Torino)
Giuseppe Gisotti (Società Italiana di Geologia Ambientale - Sigea)
Maurizio Lanzini (Società Italiana di Geologia Ambientale - Sigea)
Gioacchino Lena (Società Italiana di Geologia Ambientale - Sigea)
Lorenzo Liperi (Regione Lazio)
Piernicola Lollino (Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR-IRPI, Bari)
Luciano Masciocco (Università di Torino, Società Italiana di Geologia Ambientale - Sigea)
Roberto Mazza (Università degli Studi di Roma 3, Dipartimento di Scienze)
Mario Mazzoli (ASSO-Hypogea)
Antonio Monte (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali - CNR-IBAM, Lecce)
Gabriele Scarascia Mugnozza (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Scienze della Terra e Centro di Ricerca - CERI)
Stefania Nisio (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA)
Mario Parise (Università degli Studi di Bari)
Giuseppe Spilotro (Università degli Studi della Basilicata, Scuola di Ingegneria)
Paolo Tommasi (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria - CNR-IGAG, Roma)

Prentazione del volume

A cura di
Antonello Fiore e Arcangelo Francesco Violo

Gli atti che presentiamo in questo volume sono il risultato di un percorso che la Sigea e il Consiglio Nazionale dei Geologi, in collaborazione con gli ordini professionali territoriali e altre associazioni culturali, hanno svolto nel corso del 2017. Il convegno nazionale *"Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi delle pericolosità, monitoraggio e valorizzazione"*, organizzato in sinergia tra la Sigea e il Consiglio Nazionale dei Geologi, è stato preceduto da un percorso di disseminazione e discussione sui temi affrontati in dicembre a Roma.

Nel corso dell'anno, come avvicinamento al convegno nazionale di Roma, sono stati organizzati incontri regionali a Massafra (TA) con l'Ordine dei Geologi della Puglia, l'Ordine degli Architetti PPC della Provincia di Taranto e l'Archeoclub *"Il patrimonio storico culturale delle cavità di origine antropica pugliesi. Analisi delle pericolosità per la giusta valorizzazione"*; a Melfi (PZ) con l'Ordine dei Geologi della Basilicata, l'Ordine degli Architetti PPC della Provincia di Potenza e l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Potenza, Archeoclub *"Il patrimonio storico culturale delle cavità di origine antropica lucane"*; a Orvieto (TR) con l'Alta Scuola e l'Ordine degli ingegneri della Provincia di Terni *"Condizioni di stabilità di cavità ipogee ed edifici storici sovrastanti"*; a Genova con il Centro Studio Sotterranei, la Commissione Nazionale Cavità Artificiali, la Delegazione Speleologica Ligure, l'Ordine Regionale Geologi della Liguria e la Società Speleologica Italiana *"Le cavità artificiali della Liguria, conoscenza, valorizzazione e fruizione tra impatti e rischi"*.

Le cavità sotterranee di origine antropica suscitano notevole interesse, sia dal punto di vista della ricerca scientifica sia dal punto di vista professionale per il supporto che i tecnici professionisti forniscono alle amministrazioni pubbliche e ai privati, per i gravi fenomeni di sprofondamento del suolo indotti dal collasso improvviso di calotte, pilastri o setti di roccia che costituiscono gli ipogei. Il loro interesse è anche storico culturale che, grazie all'attuazione di politiche di valorizzazione, comportano positive ricadute socio economiche sulle popolazioni locali. Infatti, alcune cavità sono sistematicamente inserite nel tessuto socio/economico e territoriale per l'interesse culturale, storico, paesaggistico e turistico. Molte di esse sono aperte al pubblico per scopi turistici o religiosi (chiese rupestri, santuari, catacombe, frantoi ipogei e cantine).

Sono diverse le regioni italiane (come Lazio, Campania, Puglia, Basilicata, Sicilia, Sardegna, Umbria e Liguria) che vedono la presenza diffusa di cavità di origine antropica che spesso destano grande preoccupazione per la pubblica e privata incolumità.

La ricerca scientifica e gli studi storico-culturali suggeriscono l'adozione di politiche di valorizzazione e utilizzo con ricadute socio economiche importanti. Un utilizzo che non deve trascurare gli aspetti della sicurezza. Questo richiede un forte impegno volto alla definizione delle geometrie dei vuoti sotterranei, dei modelli geologici, dei modelli geotecnici, delle infrastrutture presenti sopra le cavità e dell'uso del suolo nelle aree circostanti, delle analisi di stabilità e del loro controllo e monitoraggio nel tempo.

Le attività convegnistiche intraprese nel corso del 2017, anno in cui, tra l'altro, la Sigea ha festeggiato il suo 25° anno di attività, hanno attivato un percorso di confronto scientifico-culturale-tecnico, rivolto agli addetti ai lavori, su alcuni importanti aspetti legati alle cavità sotterranee di origine antropica, offrendo la possibilità di raccogliere le nuove ricerche e le procedure aggiornate di censimento e valutazione della pericolosità territoriale.

Nello stesso tempo è stata fornita ai professionisti tecnici ogni informazione utile per la messa in sicurezza del territorio e per una valorizzazione consapevole del patrimonio storico-culturale.

Il volume di 440 pagine è strutturato in quattro sessioni come quelle del convegno:

- Censimento e catalogazione delle cavità;
- Analisi della pericolosità territoriale;
- Tecniche e procedure di monitoraggio e consolidamento;
- Valorizzazione e fruizione.

Il volume raccoglie 59 articoli che dimostrano il grande interesse e l'ampia diffusione culturale e geografica dei vari argomenti trattati.

Il nostro ringraziamento va a tutti quelli che con i loro articoli hanno contribuito a questa crescita collettiva che parte dal confronto delle esperienze svolte, al comitato scientifico e ai quattro curatori degli atti che con dedizione, professionalità e passione hanno coordinato i lavori tra gli autori e il comitato scientifico.

A questo volume, disponibile liberamente online, hanno contribuito 199 autori, alcuni dei quali presentando anche più lavori; la riuscita di questa impresa di conoscenza e condivisone della conoscenza è un lavoro articolato e partecipato che necessita del sostegno anche delle Istituzioni. Azioni come queste sono necessarie a rafforzare la cultura della condivisone, della partecipazione che fungono anche da volano per gli aspetti tecnico-professionali con ricadute socio economiche.

Su questo tema, come sugli altri argomenti d'interesse multidisciplinare, si deve partire dalle conoscenze acquisite storico-culturali e tecnico-scientifiche per garantire una valorizzazione degli ambienti ipogei nel rispetto dei principi di sicurezza degli addetti ai lavori e dei visitatori. Sono molte le cavità di origine antropica che, rivestendo un interesse culturale, storico/religioso, paesaggistico/turistico (chiese rupestri, santuari, catacombe, frantoi ipogei, cantine ecc.), rappresentano un potenziale da tutelare e valorizzare.

Ancora grazie a tutti i protagonisti di questo volume e buona lettura.

SESSIONE A

CENSIMENTO E CATALOGAZIONE CAVITÀ

TOMA ABELE TRIVELLAZIONI s.r.l.

M A T E R A

www.tomaabeletrivellazioni.com

Attestazioni SOA:

Cat.	Class.
OS 20B	IV
OS 21	III bis



Catasto speleologico nazionale delle cavità artificiali (CA). Classificazione, interventi di tutela e monitoraggio conseguiti grazie ai dati speleologici e prospettive future

Italian speleological register of Artificial Cavities. Classification, protection and monitoring actions achieved through speleological data and future perspectives

Michele Betti[1], Roberto Bixio[2], Carla Galeazzi[3], Sandro Galeazzi[4], Carlo Germani[5], Mario Mazzoli[6], Marco Meneghini [7], Giovanni Belvederi[7], Mario Parise[8], Stefano Saj[9]

[1] Coordinatore Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana
[2] Centro Studi Sotterranei
[3] Egeria Centro Ricerche Sotterranee - Sigea
[4] Geometra libero professionista – Egeria Centro Ricerche Sotterranee
[5] Curatore Catasto Cavità Artificiali del Lazio SSI/ Federazione Hypogea - Sigea
[6] General Manager A.S.S.O. – Hypogea Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali
[7] Curatori Catasto Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana
[8] Geologo, Università Aldo Moro di Bari – Presidente *Artificial Cavities Commission International Union of Speleology*
[9] Presidente Centro Studi Sotterranei - Direttore rivista Opera Ipogea *Journal of Speleology in Artificial Cavities*

E-mail autore riferimento: carla.galeazzi3@alice.it

Parole chiave (*key words*): Catasto delle cavità artificiali italiane (*Register of Italian artificial cavities*), Albero delle tipologie (*typological tree of the artificial cavities*), Speleologia (*Speleology*), censimento delle opere antropiche (*inventory of anthropic works*), censimenti speleologici tematici (*thematic speleological inventories*), Società Speleologica Italiana (*Italian Speleological Society*)

RIASSUNTO

Gli speleologi italiani, a partire dagli anni '60 del secolo scorso hanno censito e documentato migliaia di sotterranei artificiali di interesse storico e antropologico realizzati dall'uomo o da esso riadattati alle proprie necessità. Alla fine degli anni '80 fu varato dalla Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana un censimento dedicato, sviluppato su base regionale, denominato "Catasto delle cavità artificiali italiane". Parallelamente fu predisposta una classificazione tipologica delle cavità artificiali in base alla funzione (destinazione d'uso) a cui la struttura sotterranea era adibita, che ne identifica in modo sintetico la natura. Dal 2012 tale classificazione è stata ufficialmente acquisita anche in ambito internazionale dalla UIS - *International Union of Speleology*, organizzazione mondiale di riferimento per la speleologia. Il contributo ha per obiettivo la condivisione in ambito geologico della classificazione tipologica delle cavità artificiali. Presenta inoltre alcuni esempi di interventi di monitoraggio, tutela e valorizzazione conseguiti grazie ai dati speleologici e le future prospettive di condivisione del *database* nel rispetto della proprietà intellettuale del lavoro sin qui svolto.

ABSTRACT

Since 1960's Italian speleologists have inventoried and documented thousands of underground sites of historical and anthropological interest, realized or re-worked by man, in function of his needs. At the end of 1980s the National Commission on Artificial Cavities of the Italian Speleological Society started a specific inventory, developed on a regional basis, denominated "Register of the Italian Artificial Cavities". At the same time, a typological classification of the artificial cavities was defined, based upon their function, that officially marks its origin of the cavity itself. Since 2012 this classification has been adopted also at an international level by UIS - International Union of Speleology. This contribution has as main goal to share with geologists the typological classification of the artificial cavities. Further, it presents some examples of actions of monitoring, safeguard, and valorization, obtained thanks to availability of the speleological data, and the future perspectives of sharing the national database, taking into the due account the respect of the intellectual property of the data.

INTRODUZIONE

La Speleologia è la scienza che studia le grotte, la loro origine ed evoluzione, i fenomeni fisici, biologici e antropici che vi si svolgono e le attività connesse con la loro esplorazione. È intrinsecamente correlata con molte discipline: geologia, archeologia, mineralogia, geografia, meteorologia, zoologia, paleontologia, botanica, microbiologia, paletnologia, folclore ecc.; la sua definizione nel tempo si è pertanto ampliata fino a comprendere "ogni azione tesa alla ricerca, esplorazione, osservazione diretta, studio e documentazione di un ambiente sotterraneo naturale o artificiale".

La Società Speleologica Italiana è l'associazione nazionale di riferimento per l'esplorazione e la documentazione del mondo sotterraneo, è un Ente di protezione ambientale riconosciuto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, componente dell'*International Union of Speleology* - organizzazione speleologica mondiale di riferimento - e della Federazione Speleologica Europea. Nel 2008 la Società Speleologica Italiana è entrata a far parte della Commissione Italiana per il coordinamento dell'IYPE - Anno Internazionale del Pianeta Terra.

A partire dal 1955 l'esperienza tecnica e scientifica maturata nella esplorazione delle grotte naturali ha sviluppato sinergie anche con altre discipline (storia, architettura, antropologia, archeologia, urbanistica) dando origine alla Speleologia in cavità artificiali (Chimenti&Consolini, 1958; Dolci, 1958). Nel 1981 viene istituita la Commissione Nazionale Cavità Artificiali, organismo permanente della Società Speleologica Italiana, composto da speleologi che svolgono attività tecniche e scientifiche nel settore. Ad essa è attribuita la funzione di conservazione dei dati censiti nel Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali Italiane; essa inoltre promuove censimenti tematici, edita la rivista Opera Ipogea - *Journal of Speleology in Artificial Cavities*, promuove e coordina attività esplorative e di studio scientifico in Italia e all'estero in collaborazione con i relativi Ministeri ed Università e svolge attività di consulenza presso gli Enti Locali interessati alla conoscenza sulla dislocazione e tipologia delle Cavità Artificiali.

DEFINIZIONE DI CAVITÀ ARTIFICIALI

Convenzionalmente, in ambito speleologico internazionale, per strutture sotterranee



Figura 1 – Indicazione delle diverse tecniche costruttive/realizzative ai fini del censimento nel Catasto Nazionale Cavità Artificiali SSI

di origine antropica, altrimenti dette "cavità artificiali", si intendono le opere di interesse storico, archeologico, geologico e antropologico realizzate dall'uomo o riadattate alle proprie necessità, diffuse in ogni parte del mondo, diversificate per tecnica costruttiva (*Fig.* 1), epoca (*Fig.* 2) e destinazione d'uso (*Tab.* 1).

Si tratta dunque di ambienti scavati nel sottosuolo, spesso anche in profondità, per abitarci, per conservare le derrate alimentari, per estrarre minerali, per rifornire di acqua gli insediamenti, per bonificare campi e rive lacustri, per rendere sicure le fortezze e le città cinte di mura, per pregare e seppellire i defunti e, in tempi più recenti, per proteggere le popolazioni civili dagli effetti devastanti dei bombardamenti aerei ed altri usi ancora (Galeazzi, 2011; Parise&Sammarco, 2015).

IL CATASTO NAZIONALE DELLE CAVITÀ ARTIFICIALI

In Italia il termine "catasto" indica uno strumento tecnico-fiscale inizialmente utilizzato per inventariare gli immobili. Gli scopi del registro sono al giorno d'oggi numerosi: fiscale, sociale, amministrativo, legale e topografico. All'inizio del XX secolo, parallelamente all'incremento dell'attività esplorativa gli speleologi italiani hanno intuito l'utilità di registrare le posizioni e le caratteristiche di ogni cavità sotterranea, naturale e artificiale. Senza questa attenzione sarebbe stato impossibile conservarne la memoria poiché molte di esse non sono facilmente localizzabili e sono soggette a cambiamenti anche sostanziali nel corso degli anni.

x = >	non rilevabile
a = preistoria >	3.500 a.C.
b = protostorica >	3.500 a.C. - 750 a.C.
c = età antica >	750 a.C. - 476 d.C.
d = età medievale >	476 d.C. - 1492
e = età moderna >	1492 - 1789
f = età contemporanea >	1789 - 1899
g = >	novecento

Figura 2 – Schema delle epoche di realizzazione

Nel 1927 Eugenio Boegan, uno dei padri dell'esplorazione speleologica nel nostro paese, fornì una risposta concreta a questa esigenza istituendo il Catasto delle Grotte Naturali. Sfortunatamente durante la guerra del 1940-45 l'intero archivio fu trasferito in Germania e vi rimase fino al dopoguerra. Gli speleologi italiani seppero reagire rapidamente ricostituendo il *database* e dando nuovo impulso alla Società Speleologica Italiana (SSI) (Cappa, 2000). In seguito la registrazione nel "catasto" è stata estesa anche alle Cavità Artificiali, alle aree carsiche e gradualmente ai cosiddetti "censimenti tematici": antichi acquedotti sotterranei, emissari artificiali, grotte a rischio di inquinamento ambientale, doline antropogeniche, insediamenti trogloditici, ecc.

Il Catasto Nazionale della Cavità Artificiali è stato istituito nel 1989 come diretta emanazione della Commissione Nazionale Cavità Artificiali della SSI; è un *database* speleologico nazionale, articolato su base regionale (Guglia, 2004), in cui confluiscono i dati inediti degli ipogei artificiali studiati e catalogati da speleologi e da studiosi indipendenti di varie discipline.

Il Catasto Nazionale CA ha lo scopo di assicurare la conservazione delle informazioni

raccolte nelle esplorazioni e studi eseguiti nelle Cavità Artificiali, mettendole a disposizione della comunità speleologica e scientifica. Uno dei principi fondanti è che i dati catastali sono di proprietà di chi li ha prodotti ed elaborati nel rispetto delle vigenti normative e secondo i criteri dettati dal regolamento del Catasto Cavità Artificiali (Meneghini, 2006; Galeazzi&Meneghini, 2007).

Si tratta quindi di un importante strumento di conoscenza del territorio per la prevenzione di dissesti in aree urbane ed extraurbane (Parise, 2013), la pianificazione territoriale, la progettazione di opere strutturali, la gestione di reti sotterranee e, non ultima, la conoscenza di un patrimonio culturale affascinante e sconosciuto. Da qualche tempo la Società Speleologica Italiana è impegnata nello sviluppo del *Web Information System* del Catasto (Galeazzi, 2010), con lo scopo di rendere disponibili in rete i dati delle cavità censite da parte di utenti registrati, a diversi livelli di fruizione.

MAPPARE E CENSIRE: CONCETTI APPARENTEMENTE SIMILI, IN REALTÀ MOLTO DIVERSI

Il censimento delle cavità naturali ed artificiali da parte del mondo speleologico ed il relativo inserimento nei due Catasti (Cavità Naturali e Cavità Artificiali) viene spesso erroneamente inteso come mappatura del mondo sotterraneo. Per mappatura deve intendersi l'acquisizione di tutti i dati di una o più strutture sotterranee note, pertinenti ad una determinata area circoscritta di interesse, a seguito di eventi particolari (voragini) e/o richieste di enti (comune, soprintendenza, ecc.). Il censimento è invece l'iscrizione a catasto di tutti i dati inediti derivanti da campagne di studio condotte da speleologi. Pertanto il Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali è un censimento e i dati vengono inseriti a catasto solo dopo il completamento dello studio.

CLASSIFICAZIONE DELLE CAVITÀ ARTIFICIALI SECONDO LO STANDARD DELLA COMMISSIONE NAZIONALE CAVITÀ ARTIFICIALI DELLA SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA

Le architetture antropiche ipogee sono particolarmente ampie e diversificate (Bixio&Galeazzi, 2007; Meneghini, 2011; Galeazzi, 2013; Meneghini, 2013). Sovente si sovrappongono utilizzi diversi nel corso del tempo.

La struttura scelta per identificarne in modo sintetico la natura è organizzata ad albero, basata su sette tipologie principali a loro volta suddivise in sottoclassi (Parise *et al.*, 2013). L'utilizzo, ai fini dell'inserimento a catasto, è facilitato da codici alfanumerici.

La codifica tipologica della Società Speleologica Italiana, in vigore da molti anni, ha permesso di censire con successo le cavità artificiali secondo schemi consolidati che hanno reso coerenti anche le innumerevoli pubblicazioni fin qui prodotte.

Nel corso degli anni è stato possibile integrare alcune tipologie, senza tuttavia intervenire sulla struttura di base. Le proposte di eventuali integrazioni possono essere inviate alla Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana che le valuterà congiuntamente alla *Artificial Cavities Commission* della *International Union of Speleology.*

Tabella 1 – L'albero tipologico delle Cavità Artificiali

A. OPERE IDRAULICHE
A.1 regimazione/bonifica
A.2 captazione
A.3 trasporto
A.4 cisterne
A.5 pozzi
A.6 opere di distribuzione
A.7 fognature
A.8 canali navigabili
A.9 ghiacciaie/neviere
A.10 condotti di funzione sconosciuta
B. OPERE INSEDIATIVE CIVILI
B.1 insediamenti stabili abitativi
B.2 ricoveri temporanei/rifugi
B.3 opifici
B.4 magazzini
B.5 silos sotterranei
B.6 stalle
B.7 colombari
B.8 altri insediamenti
C. OPERE DI CULTO
C.1 luoghi di culto
C.2 opere sepolcrali
D. BELLICHE
D.1 opere difensive varie
D.2 gallerie e camminamenti
D.3 gallerie di mina/contromina
D.4 postazioni di sparo
D.5 depositi
D.6 rifugi
D.7 rifugi per civili
E. OPERE ESTRATTIVE
E.1 cave di inerti
E.2 miniere metallifere
E.3 miniere di altre sostanze
E.4 sondaggi minerari
E.5 coltivazioni sotterranee
F. GALLERIE DI TRANSITO
F.1 gallerie stradali
F.2 cunicoli di transito
F.3 gallerie ferroviarie, tramviarie, di funicolari
F.4 pozzi non idraulici e discenderie
G. ALTRE OPERE

LA SCHEDA CATASTALE

La scheda (*Fig.* 3) prevede un numero considerevole di campi di raccolta dati, i principali sono relativi a:

- denominazione e localizzazione della cavità con specifica delle coordinate di riferimento;
- cartografia di riferimento CTR, IGM, NCEU (per le cavità censite in ambito urbano);
- dati sulla accessibilità e vincoli;
- geologia/litologia/idrologia;
- tipologia primaria ed eventualmente secondaria per riuso della cavità nel corso dei secoli individuata seguendo l'albero delle tipologie (*Tab.* 1);
- epoca di realizzazione secondo la codifica adottata (*Fig.* 2);
- sviluppo spaziale/speleometria;
- condizioni interne della struttura e note sugli eventuali pericoli: stato di conservazione, pericoli di accesso, staticità, pericolo di allagamento, presenza di gas tossici o rarefazione di ossigeno, presenza di fattori inquinanti e relativa specifica;
- dati di chi detiene la documentazione;
- rilievo topografico della struttura e riferimenti bibliografici, se esistenti.

Al dicembre 2017 risultano a catasto 5498 schede. Trattandosi di un censimento sperimentale sorsero inizialmente alcune differenze sulle modalità di raccolta dei dati: in diverse regioni venivano censiti i singoli ipogei ancorché facenti parte di strutture correlate, mentre in altre veniva assegnato un solo numero di catasto a strutture complesse collegate fra loro, quali ad esempio gli insediamenti rupestri.

Ne consegue che alle oltre cinquemila unità censite nel catasto nazionale delle cavità artificiali corrispondono in realtà decine di migliaia di strutture ipogee note al mondo speleologico, dislocate sia in ambito urbano che in ambiti extra urbani.

Oltre al Catasto esistono censimenti tematici di diffuso interesse quali la Carta degli Antichi Acquedotti italiani (*Fig.* 4) (Parise, 2007; Parise *et al.* 2009; Galeazzi, 2016), il Censimento degli emissari artificiali dei bacini endoreici (Galeazzi *et al.*, 2012) e la Carta del Trogloditismo nell'Area Mediterranea (Bixio *et al.* 2012; Parise, 2012).

COME CONSULTARE IL CATASTO DELLE CAVITÀ ARTIFICIALI

Il dati del Catasto Nazionale e dei Catasti Regionali delle CA sono pubblici. L'utilizzo dei dati catastali deve basarsi su principi di trasparenza e di correttezza deontologica, ed avvenire nei limiti e nel rispetto della salvaguardia del lavoro intellettuale di chi li ha prodotti. La consultazione dei dati può avvenire presso la sede degli stessi, o presso i rispettivi curatori.

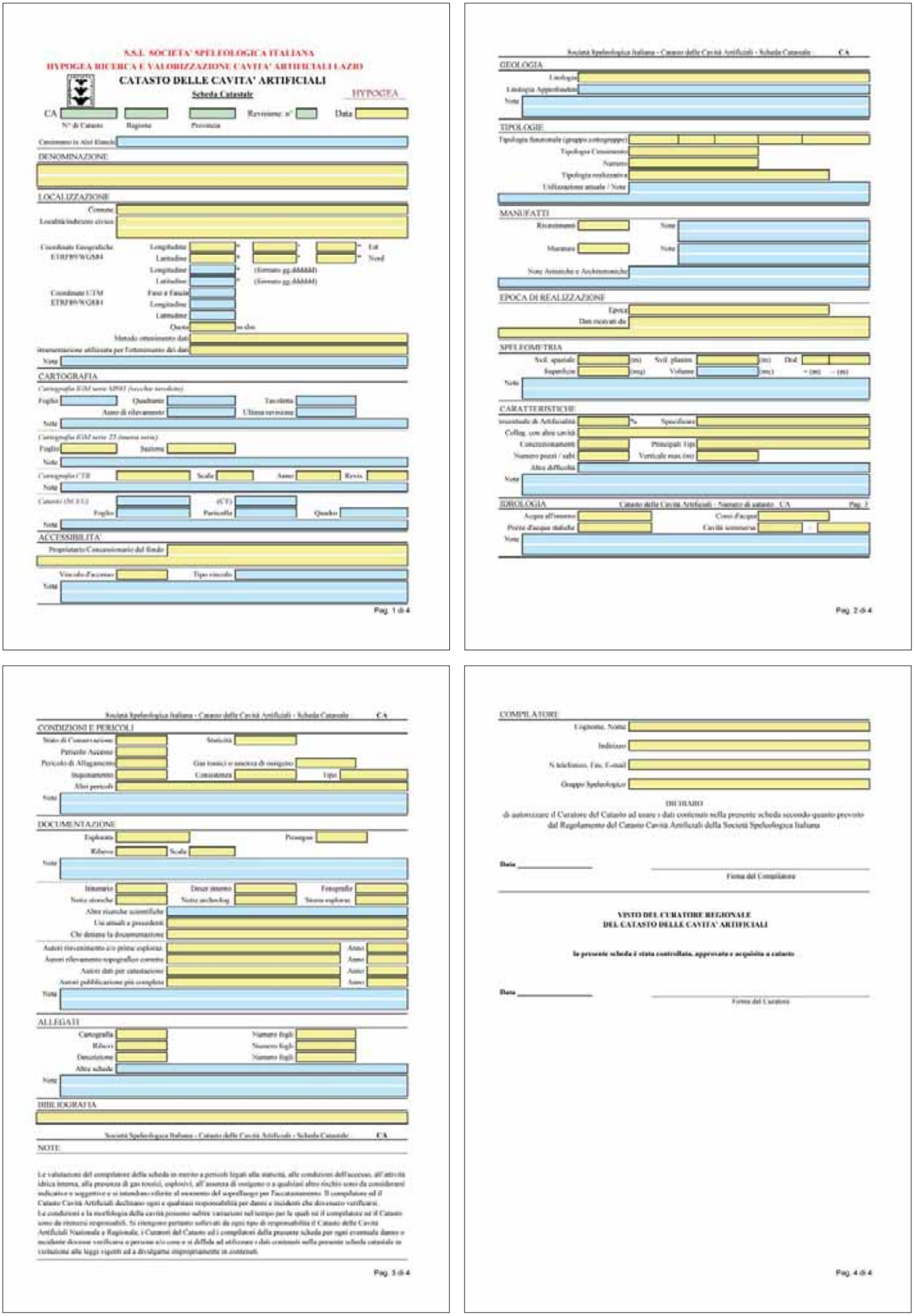


Figura 3 – Scheda catastale per il censimento delle Cavità Artificiali. Oltre alla citazione della Società Speleologica Italiana, titolare del database nazionale sintetico, su ciascuna scheda è riportato il nome della Federazione Speleologica Regionale che detiene i dati completi. Nell'esempio la scheda in uso nella regione Lazio


Carta degli antichi acquedotti italiani

SSI

Società Speleologica Italiana Commissione Nazionale Cavità Artificiali

Scheda Informativa Carta Acquedotti 2017

Dati Generali dell'acquedotto

Denominazione dell'opera

Ubicazione

Regione

Provincia

Comune/i interessato/i

Rif.to cart. I.G.M.

Coordinate GPS UTM33WGS84 dell'accesso principale

Epoca di realizzazione

Fino al VI sec. d.C.

Dal VII al XIV sec.d.C.

Dal XV al XVIII sec. d.C.

Data di realizzazione

Certa

Presunta

Fonte

Esplorazione e catasto

Esplorato

Non esplorato

Rilievo disponibile

Rilievo non disponibile

Rif.ti Catasto Cavità Artif.

Planimetria

Lunghezza complessiva espressa in metri

Indicazione del percorso - carta 1:25.000

Allegata planimetria

SI

NO

Pendenza media del condotto

Percentuale di percorso sotterraneo

Uso dell'opera

Percorribilità/difficoltà

Rischi presenti

Bibliografia

Pubblicato

SI

NO


Carta degli antichi acquedotti italiani

SSI

Società Speleologica Italiana Commissione Nazionale Cavità Artificiali

Scheda Informativa Carta Acquedotti 2017

Dati Tecnici dell'acquedotto

Geologia

Terreni affioranti nella zona di captazione

Terreni affioranti lungo il percorso

Idrogeologia

Acque captate da:

sorgente

corso d'acqua

falda acquifera

acque meteoriche

scioglimento nivale

Altro

Presenza di acqua

Perenne

Temporanea

NO

Presenza speleotemi

NO

SI

Opere

Numero ingressi

Numero pozzi

Numero cisterne

Numero discenderie

Dimensioni

Dimensioni

Scala interna

Vasca di decantazione

Condotta forzata/sifone rovescio

Cadefluvi aquae

Dissipatore

Ponti

Briglie/dighe (esterne)

SI

NO

Biologia

Specie endemiche

Fauna troglofila

Indicatori biologici

Epoche di utilizzo

Adattamenti per la riattivazione

Si allega scheda con indicazioni specifiche per la riattivazione

Accessibilità

libera

soggetta a vincolo di accesso

Tipologia vincolo

Coord. GPS UTM33WGS84 ingr. praticabili

Figura 4 – Prime due sezioni (di 4) della scheda di censimento degli antichi acquedotti

La richiesta di accesso ai dati deve essere formulata per iscritto, indicando i dati del richiedente e i motivi della richiesta. I curatori nazionali, o i curatori regionali per quanto di loro competenza, possono riservarsi di negare l'accesso ai dati o di subordinare la concessione al parere di chi li ha prodotti al fine di salvaguardarne la proprietà intellettuale del lavoro svolto. La gestione dei dati è soggetta alle leggi vigenti, in particolare in materia di diritti d'autore e di trattamento dei dati personali. Un primo elenco di dati sintetici suddiviso per regione è stato pubblicato nel 2004 (Di Labio, 2004).

INTERVENTI DI MONITORAGGIO CONSEGUITI GRAZIE AI DATI SPELEOLOGICI PRESENTI NEL CATASTO NAZIONALE CAVITÀ ARTIFICIALI - SSI

Si riportano nel seguito alcuni esempi di attività di studio e ricerca svolte in collaborazione con Enti esterni ed effettuati a partire dai dati presenti nel Catasto Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana.

1) Il Progetto Ipodata - INGV - SSI

Individuazione di cavità ipogee idonee ad ospitare sismometri a "larga banda". L'accordo con l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, siglato nel 2005, prevedeva la ricerca di possibili siti attingendo ai dati del Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali SSI. Concluso nel 2006 (Germani, 2005; Casale *et al*., 2014), ha portato alla segnalazione di molti siti sotterranei, alcuni dei quali sono poi risultati idonei. L'installazione in ipogeo di alcune stazioni sismiche a larga banda è da considerare un risultato di eccellenza in quanto consente migliori registrazioni dei terremoti, con interessanti ricadute sia nel campo della ricerca sia in quello del monitoraggio sismico volto alla prevenzione dal rischio.

2) Studi paleoclimatici nella Valle dell'Aniene

Il Progetto, finanziato da *National Geographic*, ha per obiettivo la comparazione delle deposizioni concrezionali (speleotemi) nelle zone di sorgente (grotte naturali) e di distribuzione (cavità artificiali, acquedotti) ed attinge ai dati contenuti nei Catasti delle Cavità Naturali ed Artificiali.

3) Studi delle variazioni climatiche attraverso le analisi geochimiche

In seguito allo "studio-campione" dell'emissario Albano (Madonia *et al*, 2017) il progetto si è ampliato estendendosi al campionamento delle acque sotterranee delle zone a rischio sismico dell'Italia Centrale. Anche in questo caso è stato determinante poter attingere ai dati presenti nei catasti regionali delle cavità artificiali del centro Italia.

INTERVENTI DI TUTELA CONSEGUITI GRAZIE AI DATI SPELEOLOGI PRESENTI NEL CATASTO NAZIONALE CAVITÀ ARTIFICIALI - SSI

A) Genova e i morti della grande peste

In occasione del cinquecentenario della scoperta dell'America (1992) a Genova era in progetto la realizzazione di una grande serra. A seguito del ritrovamento, da parte degli speleologi del Centro Studi Sotterranei, dell'imponente giacimento osteologico all'interno delle gallerie del bastione cinquecentesco dell'Acquasola (risalente alla peste del '600 e obliterato nel 1825 dalla realizzazione dell'omonima spianata e del giardino) il Comune di Genova ritirò il progetto e la Soprintendenza appose un "vincolo puntuale" salvaguardando le preesistenze.

B) Proteggere la fauna troglofila

Nell'ambito territoriale del Parco Regionale dei Castelli Romani, grazie alle segnalazioni speleologiche attinte anche dai dati presenti a catasto, vige l'interdizione stagionale di accesso ad alcuni ipogei per il rispetto del letargo della chirotterofauna. Il divieto di accesso si rivela utile anche ai fini della periodica verifica di eventuali azioni dannose perpetrate dall'uomo.

C) Progettare un Geoparco a 360 gradi

L'impatto antropico sulle strutture ipogee, naturali o artificiali, deve essere necessariamente monitorato. Partendo da tale premessa il Parco Regionale dei Castelli Romani, attingendo ai dati speleologici, sta provvedendo all'inserimento delle strutture ipogee più significative nel perimetro del costituendo Geoparco del Vulcano Laziale, per garantirne la tutela creando nel contempo progetti che ne accrescano il valore: realizzazione di percorsi tematici, didattica speleo-geologica, seminari.

CONCLUSIONI

Ad oggi (2018) mentre i dati prodotti dagli speleologi italiani concorrono in modo crescente allo sviluppo di progetti scientifici e di salvaguardia, il Catasto Nazionale non ha ancora ottenuto un riconoscimento da parte degli Enti preposti alla protezione del territorio. I catasti regionali delle cavità artificiali hanno avuto destini diversi secondo le diverse sensibilità delle locali amministrazioni. La situazione attuale si presenta dunque estremamente variegata, con Regioni che hanno attivato specifici accordi con le realtà speleologiche territoriali ed altre nelle quali si ignora completamente il lavoro svolto.

Rendere oggi *open source* sul web, senza alcuna forma di tutela, l'intero censimento catastale nazionale significherebbe, per la Speleologia Italiana, cedere senza alcuna tutela il lavoro di decine di anni e di centinaia di studiosi.

Al momento sono pertanto disponibili i soli dati "sintetici" (www.catastoartificiali.speleo.it).

Le prospettive future, in attesa dei riconoscimenti che ci auguriamo non tardino ad arrivare, indicano l'utilità di costituire in seno alla Commissione Cavità Artificiali specifici gruppi di lavoro tematici.

Il lavoro prodotto per ciascuna categoria tipologica di cavità artificiali costituirà la base per la realizzazione di "*Piani di sviluppo e tutela del sottosuolo*" finalizzati alla conoscenza e alla mitigazione del rischio nei centri abitati, ma anche alla definizione di nuovi ambiti di riqualificazione, valorizzazione in chiave culturale e geoturistica.

BIBLIOGRAFIA

Bixio R., De Pascale A., Mainetti M. (2012), *Census of Rocky sites in the Mediterranean Area,* Proceedings CHRIMA-CINP Project «The Rupestrian Settlements in the Circum-Mediterranean Area, Università degli Studi di Firenze, pp. 89-94.

Bixio R., Galeazzi C. (2007), (a cura di) *Le cavità artificiali 1: categorie e tipologie*, in "Risorse Didattiche per la Speleologia e il Carsismo", Società Speleologica Italiana e International Union of Speleology.

Cappa G. (2000), *Il Catasto delle cavità artificiali*, Opera Ipogea n. 1/2000.

Casale P., De Martin M., Germani C. (2014), *Il Progetto Ipodata: stazioni sismiche in siti ipogei,* Atti VIII Convegno Nazionale di Speleologia in cavità Artificiali, Ragusa 7/9 settembre 2012. In Speleologia Iblea Vol. XV, pp 205-2017, 2014.

Chimenti M., Consolini F. (1958), *Relazione tecnica sull'esplorazione dell'emissario del lago di Albano*, Not. Circ. Spel. Rom. Anno VIII, n. 1, p. 20.

Di Labio E. (2004), (a cura di) *Il Catasto Nazionale delle cavità artificiali*, Opera Ipogea 2-3/2004, Società Speleologica Italiana.

Dolci M. (1958), *Esplorazioni dell'emissario del lago di Albano in comune di Castel Gandolfo*, Not. Circ. Spel. Rom. Anno VIII, n. 1, pp. 17-19.

Galeazzi C. (2010), *Catasto Nazionale delle cavità artificiali: la Società Speleologica Italiana segna un nuovo importante passo verso la condivisione della conoscenza del sottosuolo*, Opera Ipogea 1/2010.

Galeazzi C. (2011), *Speleologia in cavità artificiali,* Le cavità artificiali dalla riscoperta alla valorizzazione turistica Vol I (Urbino, 2-4 dicembre 2011).

Galeazzi C., Germani C., Parise M. (2012), *Gli antichi emissari artificiali dei bacini endoreici,* Opera Ipogea 1-2012, pp. 3-10.

Galeazzi C. (2013), *The typological tree of artificial cavities: a contribution by the SSI commission,* Proceedings of the international workshop on Speleology in artificial cavities "Classification of the typologies of artificial cavities in the world" 18-20 May, 2012, Turin (Italy) pp. 9-18, Opera Ipogea 1/2013, Società Speleologica Italiana.

Galeazzi C., Meneghini M. (2007), *Il Catasto Nazionale delle cavità artificiali fra passato, presente e futuro,* Atti I Convegno Regionale di speleologia in cavità artificiali "Architetture nel Buio", 24-25 Marzo 2007, Castellana Grotte (BA) in Grotte e Dintorni Rivista del Museo speleologico Franco Anelli e delle Grotte di Castellana, anno VI, N. 12.

Galeazzi C., Germani C., Parise M. (2016), *La Carta degli Antichi Acquedotti. Un progetto della Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana*, Atti Convegno Nazionale Tecnica di Idraulica Antica SIGEA, Roma dicembre 2016. Supplemento a Geologia Dell'Ambiente n. 3-2017, pp. 93-95.

Germani C. (2005), *Il progetto IPODATA, Nota preliminare*, Opera Ipogea, n. 1-2/2005, Società Speleologica Italiana, pp 75-77.

Guglia P. (2004), *Il Catasto Nazionale delle cavità artificiali,* Opera Ipogea 2-3/2004, Società Speleologica Italiana.

Madonia P., Cangemi M., Galeazzi C., Germani C., Parise M., Favara R. (2017), *Preliminary Geochemical Characterization of groundwater drained by the Roma emissary of Lake Albano (Italy),* Environ Earth Sci (2017) 76:286, Springer Ed.

Meneghini M. (2006), *Il Catasto Nazionale delle cavità artificiali. Aggiornamenti: Abruzzo, Lazio, Piemonte, Toscana, Trentino Alto Adige,* Opera Ipogea 1-2/2006, Società Speleologica Italiana.

Meneghini M. (2011), *Il Catasto Nazionale delle cavità artificiali della Società Speleologica Italiana,* Le cavità artificiali dalla riscoperta alla valorizzazione turistica. Vol I (Urbino, 2-4 dicembre 2011).

Meneghini M. (2013), *The Italian cadastre of artificial cavities,* Proceedings of the international workshop on Speleology in artificial cavities "Classification of the typologies of artificial cavities in the world" 18-20 May, 2012, Turin (Italy) pp. 89-92, Opera Ipogea 1/2013, Società Speleologica Italiana.

Parise M. (2007), (a cura di) *La Carta degli Antichi Acquedotti Italiani,* Opera Ipogea n. 1-2007, Società Speleologica Italiana.

Parise M. (2012), *Underground passages in defensive structures of eastern turkey: the cases of Bitlis, Ahlat and Ani,* Proceedings International Seminars CRHIMA-CINP - May 2011 Massafra - *Rupestrian settlements in the Mediterranean region*, Università degli Studi di Firenze (Dip. Architettura), Firenze, pp. 133-138.

Parise M. (2013), *Artificial caves as possible danger: sinkholes and other effects at the surface,* Proceedings of the international workshop on speleology in artificial cavities "Classification of the typologies of artificial cavities in the world" 18-20 May, 2012, Turin (Italy) pp. 93-100, Opera Ipogea 1/2013, Società Speleologica Italiana.

Parise M., Sammarco M. (2015), *The historical use of water resources in karst.* Environmental Earth Sciences, 74, 143-152.

Parise M., Bixio R., Burri E., Caloi V., Del Prete S., Galeazzi C., Germani C., Guglia P., Meneghini M., Sammarco M. (2009), *The map of ancient underground aqueducts: a nationwide project by the Italian Speleolological Society,* Proceedings 15th International Congress of Speleology, Kerrville-Texas (U.S.A.), vol. 3, International Union of Speleology/National Speleological Society, U.S.A., pp. 2027-2031.

Parise M., Galeazzi C., Bixio R., Dixon M. (2013), *Classification of artificial cavities: a first contribution by the UIS Commission,* in: Filippi M. & Bosak P. (Editors), Proceedings 16th International Congress of Speleology, Brno, 21-28 July 2013, vol. 2, pp. 230-235.

L'inventario delle cavità di origine antropica e la Banca Dati Territoriale online del territorio della Città Metropolitana di Napoli

The register of artificial cavities and the online Territorial Database of the Naples' Metropolitan City territory

Parole chiave (*key words*): cavità artificiali (*artificial cavities*), database (*database*), sinkhole (*sinkhole*), Napoli (*Naples*), Italia (*Italy*)

Paolo Maria Guarino[1]
E-mail: paolomaria.guarino@isprambiente.it
Roberta Carta[1]
E-mail: roberta.carta@isprambiente.it
Daniela Maria Antonia Niceforo[1]
E-mail: danielamariaantonia.niceforo@isprambiente.it
Mauro Roma[1]
E-mail: mauro.roma@isprambiente.it

Rocco Mari[2], Marco Soravia[2], Paola Napolitano[2], Giuseppe Palma[2], Fortunato Sgariglia[2]
E-mail: romari@cittametropolitana.na.it

Antonio Santo[3]
E-mail: antonio.santo@unina.it

[1] ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia
[2] Città Metropolitana di Napoli. Area Pianificazione Territoriale Urbanistica, Sviluppo, Valorizzazione e Tutela Ambientale - Direzione Pianificazione Territoriale Urbanistica
[3] Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università Federico II – Napoli

1. INTRODUZIONE

L'esistenza di una diffusa rete caveale di origine antropica nel sottosuolo del territorio della Città Metropolitana di Napoli costituisce una potenziale risorsa, ma, al tempo stesso, un vincolo allo sviluppo del territorio e un fattore predisponente il verificarsi di dissesti in superficie.

Poter disporre di un inventario aggiornato delle cavità rappresenta un elemento essenziale ai fini della gestione del territorio e della mitigazione del rischio idrogeologico.

Nel biennio 2014-2016 è stata realizzata una convenzione tra l'ISPRA e la Città Metropolitana di Napoli, finalizzata alla strutturazione di una banca dati territoriale, con l'obiettivo di riunire e sistematizzare, in un organico quadro conoscitivo, informazioni georiferite relative alle cavità, all'assetto geologico del sottosuolo ed ai fattori predisponenti gli sprofondamenti di origine antropica (*anthropogenic sinkholes*), che costituiscono la tipologia più rilevante di dissesto in superficie provocata dal crollo di una cavità (Guarino & Nisio, 2012; Basso *et al.*, 2013; Guarino *et al.*, 2018).

L'attività di ricerca della convenzione si è avvalsa del supporto scientifico della Università Federico II di Napoli, e della collaborazione del Comune di Napoli e dell'Autorità di Bacino Regionale della Campania Centrale, successivamente divenuta parte del Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale. Nel presente lavoro viene illustrato l'insieme delle informazioni relative alle cavità sotterranee di origine antropica riportato nella Banca Dati territoriale "*Anthropogenic sinkholes* del territorio della Città Metropolitana di Napoli", consultabile sul sito dell'ISPRA e sul sito del SIT della Città Metropolitana di Napoli.

L'architettura della Banca Dati Territoriale, che comprende una semplice interfaccia *webgis* per la consultazione e il *download* dei dati, prevede la realizzazione di successive implementazioni, costituendo per le amministrazioni e gli *stakeholders* uno strumento conoscitivo in continuo aggiornamento.

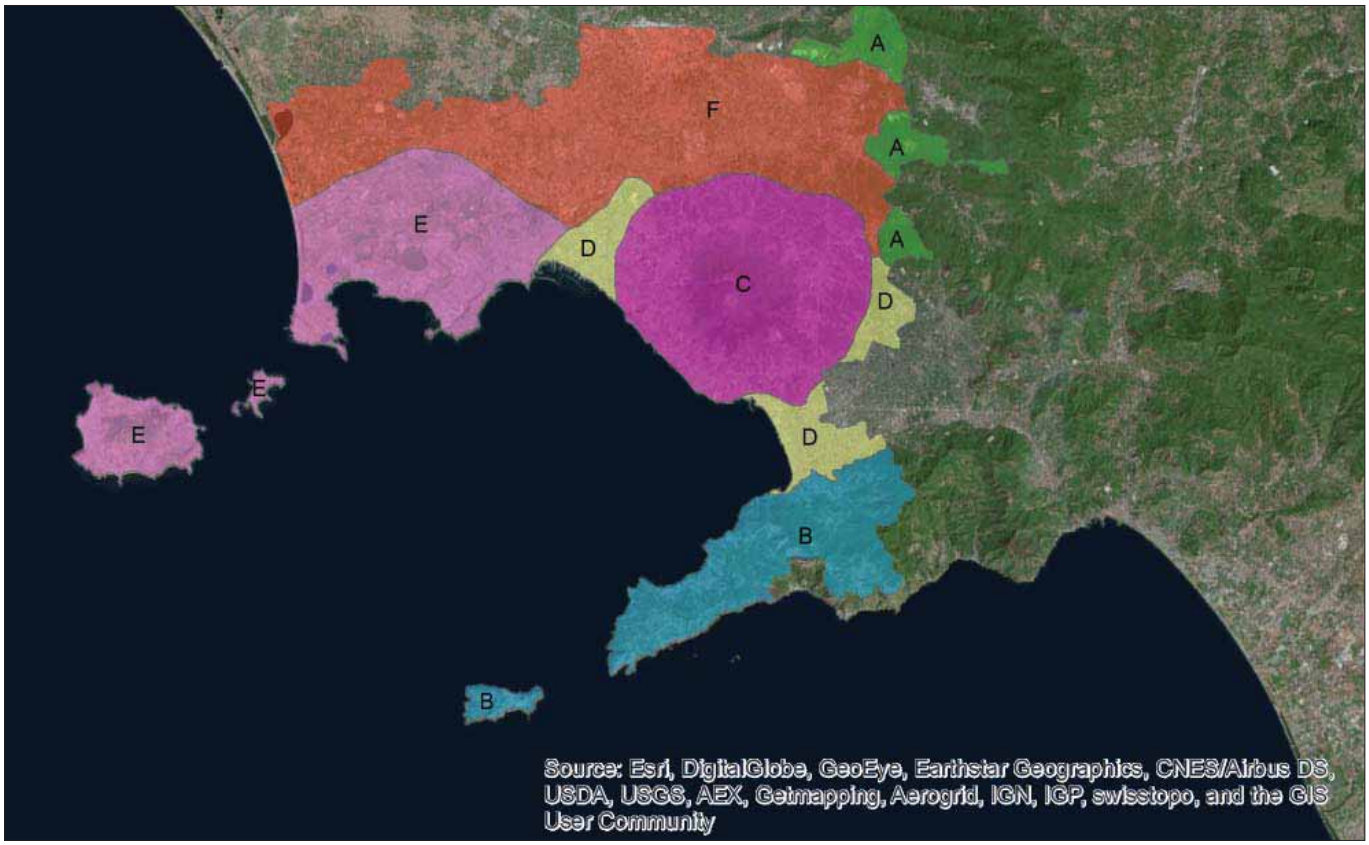


Figura 1 – Il territorio della Città Metropolitana di Napoli: ambiti geologici individuati in funzione dello sviluppo e delle caratteristiche della rete caveale sotterranea di origine antropica

2. IL TERRITORIO DELLA CITTÀ METROPOLITANA DI NAPOLI

Il DB *Anthropogenic sinkholes* del territorio della Città Metropolitana di Napoli interessa un'area di oltre 1.100 kmq, estesa dalla piana dei Regi Lagni a nord alla Penisola Sorrentina a sud, e dal litorale tirrenico ad ovest ai contrafforti appenninici ad est.

Si tratta di un contesto territoriale molto articolato dal punto di vista geologico, all'interno del quale è possibile individuare una serie di ambiti differenti per effetto della loro storia geologica ed evoluzione geomorfologica (*Fig.* 1), che sottendono, a loro volta, reti caveali con caratteristiche diverse (*Fig.* 2).

Il **settore A** (Rilievi carbonatici) è poco esteso, e comprende rilievi montuosi poco elevati (la quota massima supera di poco gli 800 m s.l.m.) con crinali sottili e versanti molto acclivi, costituiti da successioni carbonatiche mesozoiche, sovente ricoperte da coperture detritiche e vulcano-clastiche.

La presenza di cavità antropiche non è confermata nei censimenti ufficiali, ma con molta probabilità esistono situazioni locali di cavità non documentate e censite.

Nel **settore B** (Penisola Sorrentina e isola di Capri), caratterizzato da versanti a elevata energia di rilievo in terreni carbonatici e successioni arenaceo-argilloso-marnose meso-cenozoiche, l'esistenza di depositi della formazione tufacea dell'Ignimbrite Campana è all'origine della presenza di numerose cavità scavate nel tufo grigio, realizzate principalmente per l'estrazione di materiale da costruzione o come cisterne, generalmente di dimensioni modeste.

Nel **settore C** (Complesso vulcanico del Somma Vesuvio) le cavità antropiche censite sono poco numerose, ma questo è un dato sicuramente molto sottostimato, considerata la densità degli insediamenti sin dall'antichità e l'esistenza di opere e servizi in sotterraneo. Ad esempio, anche nella città antica di Pompei, le ricerche hanno portato alla scoperta di numerose cisterne realizzate in età romana, che provocano frequenti dissesti in superficie.

Il **settore D** comprende la piana alluvionale dei principali fiumi (F. Sarno e F. Sebeto) dell'area di studio. Il sottosuolo è costituito da potenti successioni di depositi sciolti, sovente con intercalazioni di torbe; tale assetto e la presenza della falda a pochi metri dal piano campagna non consentono lo scavo di cavità.

Nel **settore E** (Campi Flegrei, Napoli, Isole di Ischia e Procida) il sottosuolo è costituito da terreni a consistenza tufacea, idonei allo scavo di cavità sin dall'antichità.

Oltre che per l'estrazione di materiale da costruzione, le cavità sono state realizzate per uso funerario (già a partire dall'età ellenistica), di cisterne e acquedotti sotterranei, gallerie di collegamento, fino ad arrivare all'ampliamento e utilizzo delle cavità come ricovero antiaereo durante la seconda guerra mondiale e, purtroppo, come discariche illegali di rifiuti con la ricostruzione della città (Basso et al., 2013). In funzione dell'utilizzo, possono essere molto diverse le dimensioni delle cavità, con ambienti di cava alti alcune decine di metri, gallerie lunghe fino circa 1 km (galleria di Cocceio, Pozzuoli), cunicoli dell'acquedotto in cui è a malapena possibile il passaggio di una persona, che collegano a loro volta ampie cisterne.

Nel **settore F (Piana Campana)** sino agli anni '60 del secolo scorso, le case sono state costruite in muratura, utilizzando il tufo grazie alle sue buone caratteristiche geotecniche (limitato peso specifico e buona resistenza a compressione) e di isolante termico ed acustico. La presenza della formazione tufacea dell'Ignimbrite Campana ad una ridotta profondità dal piano campagna ha favorito lo sviluppo dell'attività estrattiva di materiale da costruzione, in genere mediante cave di modeste dimensioni, generalmente riutilizzate come cantina o deposito.

3. IL DATASET DELLE CAVITÀ DI ORIGINE ANTROPICA

Nel database delle cavità di origine antropica sono state raccolte, in primo luogo, le informazioni sulle cavità fornite dalla Città Metropolitana di Napoli, Area Pianificazione Territoriale Urbanistica, Sviluppo, Valorizzazione e Tutela Ambientale - Direzione Pianificazione Territoriale Urbanistica e dal Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del comune di Napoli. Il nucleo iniziale di dati è

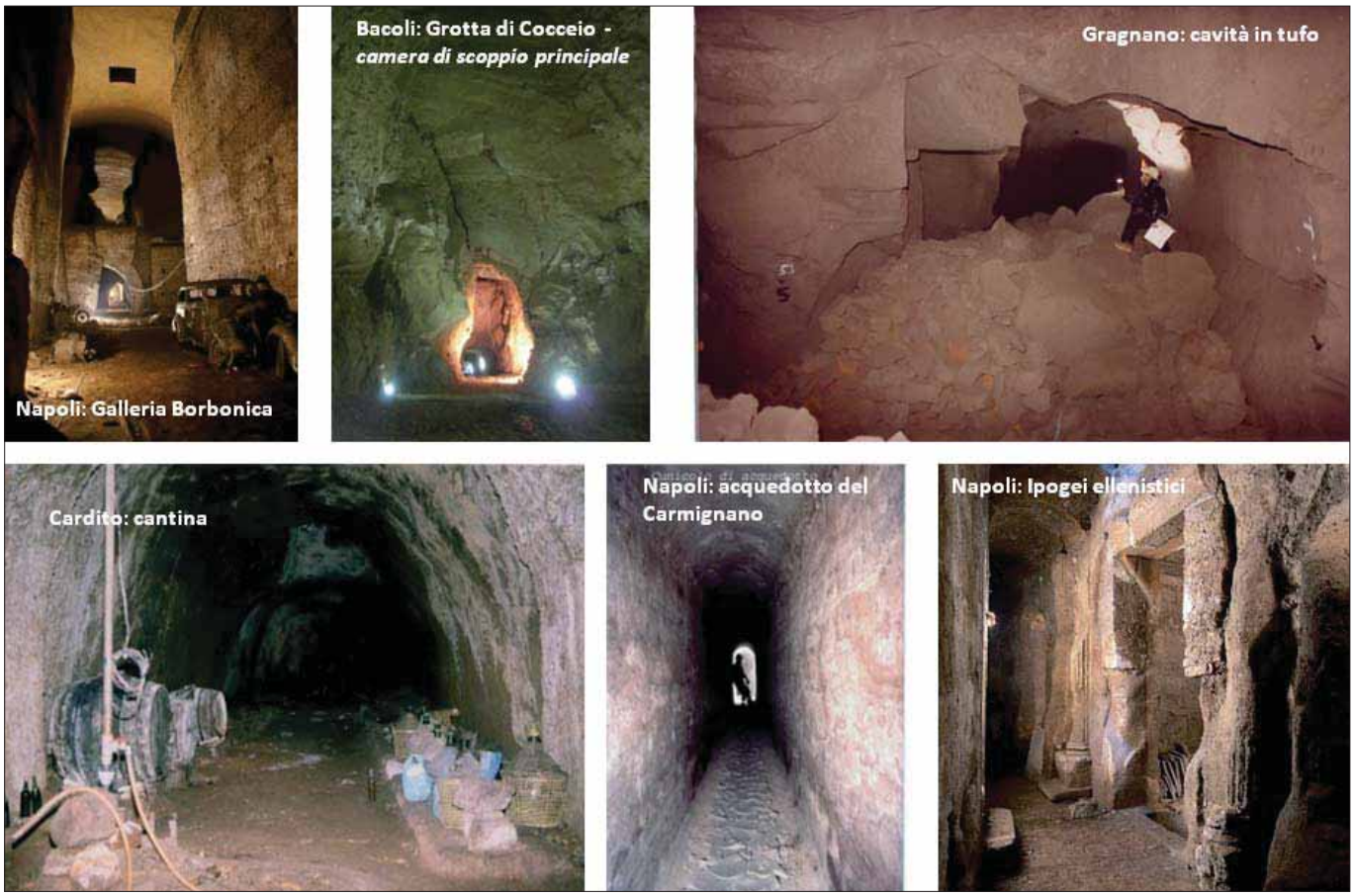


Figura 2 – Alcuni esempi di cavità aventi sviluppo e dimensioni molto diverse, perché realizzate per finalità diverse

Tabella 1 – Cavità di origine antropica: fonti delle informazioni inserite

1. Censimento delle cavità sotterranee dei comuni della Provincia di Napoli, dicembre 2002 (Provincia di Napoli, 2002)
2. Banca dati delle cavità sotterranee del Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del comune di Napoli
3. Catasto delle Cavità artificiali della Federazione Speleologica Campana
4. Studi e Relazioni Tecniche di professionisti e società, per la redazione di Piani Regolatori a scala comunale e/o di progetti di sistemazione e consolidamento
5. Pubblicazioni e note scientifiche acquisite, sopralluoghi del GdL ISPRA

Tabella 2 – Numero delle cavità censite e rilevate nei comuni della provincia di Napoli (da: Provincia di Napoli, 2002)

Cod. Istat	Comune	Cavità censite			Cavità rilevate	Piante	Sezioni	Foto
		Antecedente anno 2000	Anno 2001	Totali				
002	Afragola	336	0	336	328	501	709	0
004	Anacapri	0	16	16	0	0	0	0
005	Arzano	155	5	160	5	5	9	9
006	Bacoli	0	15	15	1	1	0	1
007	Barano	0	24	24	0	0	0	0
011	Caivano	214	5	219	14	20	17	12
013	Camposano	0	1	1	1	1	0	0
014	Capri	0	8	8	0	0	0	0
016	Cardito	126	23	149	64	71	103	50
017	Casalnuovo	5	0	5	5	5	4	0
018	Casamarciano	0	32	32	0	0	0	0
019	Casamicciola Terme	0	7	7	0	0	0	0
020	Casandrino	22	6	28	6	6	10	5
021	Casavatore	1	0	1	0	0	0	0
022	Casola di Napoli	0	1	1	1	1	3	2
023	Casoria	65	19	84	19	19	7	19
027	Cicciano	0	20	20	6	6	6	0
029	Comiziano	0	8	8	5	5	2	6
030	Crispano	66	1	67	1	1	1	0
031	Forio d'Ischia	0	16	16	0	0	0	0
032	Frattamaggiore	199	1	200	139	140	0	0
033	Frattaminore	186	0	186	177	177	1	0
035	Gragnano	0	29	29	4	4	18	26
036	Grumo Nevano	54	21	75	21	21	16	0
037	Ischia	0	5	5	0	0	0	0
038	Lacco Ameno	0	9	9	0	0	0	0
039	Lettere	0	2	2	0	0	0	0
045	Melito	0	1	1	0	0	0	0
047	Monte di Procida	0	2	2	0	0	0	0
057	Pomigliano d'Arco	0	21	21	1	1	2	0
060	Pozzuoli	0	14	14	11	21	13	9
061	Procida	0	52	52	3	6	5	13
062	Qualiano	0	3	3	0	0	0	0
065	Roccarainola	0	11	11	1	1	0	0
073	Sant'Antimo	61	0	61	53	54	35	0
078	Serrara Fontana	0	68	68	0	0	0	0
084	Torre del greco	0	3	3	0	0	0	0
085	Tufino	0	14	14	7	7	4	10
087	Villaricca	0	12	12	8	8	13	0
		1490	475			1082	978	162
TOTALE				**1965**	**881**			

stato successivamente integrato con il contributo proveniente dal Catasto delle Cavità Artificiali della Federazione Speleologica Campana (FSC), e attraverso la raccolta di studi e segnalazioni riportati in pubblicazioni scientifiche o in lavori professionali (tab. 1).

Non essendo il frutto di un piano unico e organico di indagini, ed essendo le informazioni un insieme di dati raccolti da tecnici diversi con diverse modalità di rilievo e restituzione, esiste una evidente disomogeneità del dato riportato che, solo in parte dei casi, comprende la disponibilità di rilievi planimetrici, sezioni e immagini fotografiche.

Relativamente alle informazioni fornite dalla Città Metropolitana di Napoli, esse fanno riferimento al censimento delle cavità sotterranee dei comuni della Provincia di Napoli realizzato negli anni tra il 1998 e il 2001 attraverso più convenzioni tra l'amministrazione provinciale e il Centro Interdipartimentale Ricerca "Ambiente" dell'Università Federico II di Napoli (Provincia di Napoli, 2002). Il dato è aggiornato al 2002 ed esclude il territorio del comune di Napoli. L'ubicazione delle cavità, graficamente evidenziata mediante un quadrato, è riferita alle coordinate dell'accesso della cavità. Delle 1965 cavità censite, 881 (circa il 45%) dispongono di un rilievo grafico, per un totale di 1082 piante, 978 sezioni e 162 immagini fotografiche disponibili online (tab. 2 e fig.3).

Per quanto riguarda il censimento delle cavità sotterranee realizzato dal Comune di Napoli, il dato è aggiornato al 2000 e comprende 733 cavità.

Tale dataset proviene dalle attività svolte dal Comitato Tecnico di supporto al Sindaco di Napoli, Commissario Straordinario per l'Emergenza Sottosuolo per effetto della O.M. 2695/98 e s.m.i., in collaborazione con il C.U.G.Ri. (Consorzio interuniversitario per la previsione e la prevenzione dei Grandi Rischi, Salerno).

Le suddette attività hanno portato alla riorganizzazione dei dati già esistenti, riferiti ai lavori della Commissione di Studio del 1967, del catasto comunale, dell'aggiornamento effettuato ai sensi della legge regionale 9/83, e sono stati pubblicati nel mese di aprile 2000 (Sindaco di Napoli Commissario Straordinario per l'Emergenza Sottosuolo, 2000; tab. 3). Non sono disponibili, al momento, i dati relativi alle cavità censite e rilevate successivamente al 2000, che portano il numero complessivo a oltre 900 cavità (Lombardi et al., 2010).

L'ubicazione delle cavità è riportata in forma poligonale, e quando disponibile è riportata la documentazione grafica (*Fig.* 4).

Le informazioni fornite dalla FSC sono riferite al Catasto delle Cavità Artificiali, da essa gestito, nel quale sono raccolte informazioni cartografiche, speleometriche e descrittive delle cavità di origine antropica presenti nel territorio regionale, distinte in categorie sulla base della classificazione tipologica della Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana (Galeazzi, 2013; Parise et al., 2013).

La collaborazione del Catasto Cavità artificiali della FSC con il Dipartimento per il Servizio Geologico d'Itali (ISPRA) è stata definita

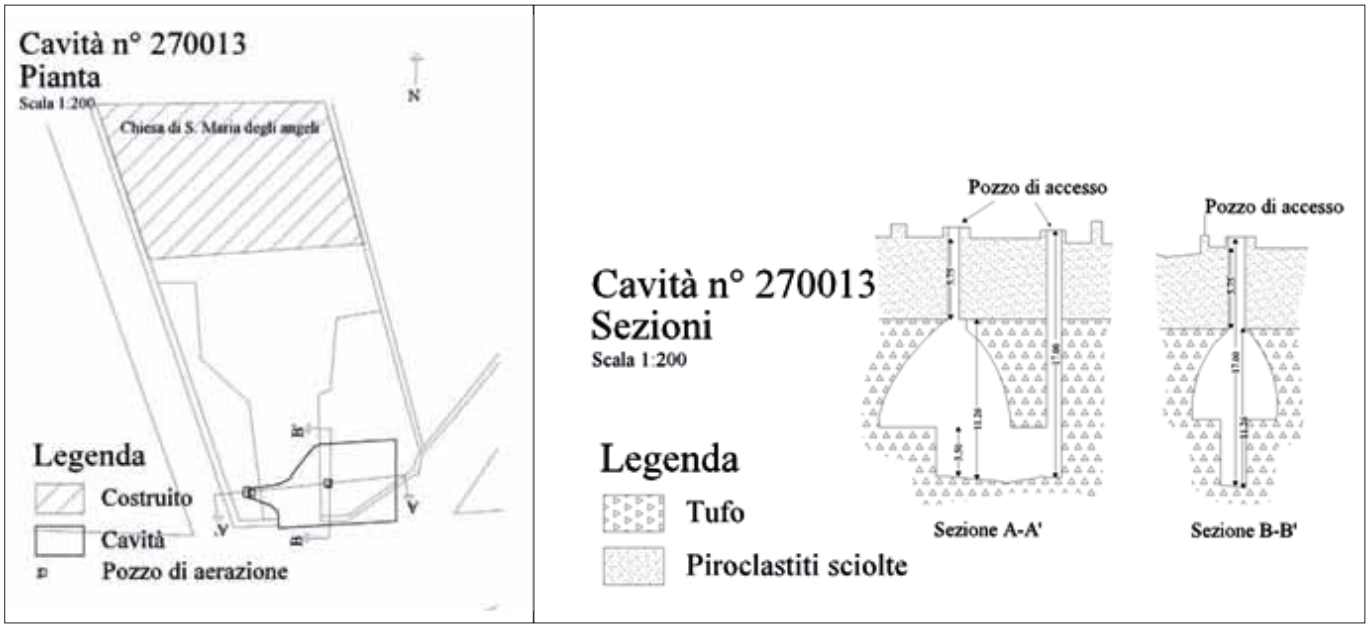


Figura 3 – Comune di Cicciano, cavità 270013: esempio di documentazione grafica derivante dal Censimento delle cavità sotterranee dei comuni della Provincia di Napoli (Provincia di Napoli, 2002)

nel 2017, e prevede un inserimento graduale delle cavità inventariate.

Infine, attraverso il continuo lavoro di acquisizione di relazioni tecniche fornite da geologi liberi professionisti e studi tecnici, e di analisi di pubblicazioni scientifiche, sono state raccolte segnalazioni relative a oltre 110 cavità, che sono state inserite nel database come "nuove cavità". A ciascuna segnalazione è associata la descrizione, e/o la planimetria e immagine fotografica, riportate nel documento di origine (*Fig.* 5).

4. INFORMAZIONI GEOLOGICHE RIFERITE ALLE CAVITÀ SOTTERRANEE ESTRAIBILI DALLA BANCA DATI TERRITORIALE

Dalla Banca Dati Territoriale *Anthropogenic sinkholes* della Città Metropolitana di Napoli è possibile estrarre informazioni riguardanti l'assetto geologico dell'area in cui ricade la cavità di interesse, interrogando di volta in volta o contemporaneamente gli strati informativi: Cartografia geologica, Dati stratigrafici, Acque sotterranee e *Anthropogenic sinkholes* (*Fig.* 6).

Sono infatti riportate le ubicazioni di circa 1600 indagini geognostiche cui risultano associate le relative colonne stratigrafiche (*Fig.* 6b). Si tratta di perforazioni a carotaggio continuo realizzate per Piani Regolatori comunali, realizzazione di infrastrutture stradali e/o impianti industriali, interventi di edificazione o ristrutturazione, ricerche idrogeologiche ed altro (Tab. 4). Contestualmente, si può visualizzare ed esportare la cartografia geologica aggiornata del Progetto CARG.

In particolare, essendo il territorio della Città Metropolitana di Napoli compreso all'interno di diversi fogli della Carta Geologica d'Italia, le informazioni vettoriali relative ai cinque fogli geologici sono state appositamente elaborate al fine di fornire un unico *layer* del dato geologico di superficie (*Fig.* 6a).

In aggiunta alle informazioni di carattere geologico-strutturale, sono visualizzabili anche informazioni relative alla circolazione idrica sotterranea (*Fig.* 6c), riferita alle curve isopiezometriche della falda superficiale derivate dalla cartografia del Piano di Tutela delle

Tabella 3 – Cavità di origine antropica nel territorio del Comune di Napoli: informazioni rielaborate dal Comitato Tecnico e dal C.U.G.RI.

	Notizie della L.R. 9/83	Acquisite dal C.U.G.Ri.	Analizzate dal C.U.G.Ri.
Cavità rilevate, su carta (con Codice Catasto)	461	435	411
Cavità rilevate su file	131	125	125
Cavità censite ma non rilevate	141	170	0
Totale	**733**	**730**	**536**

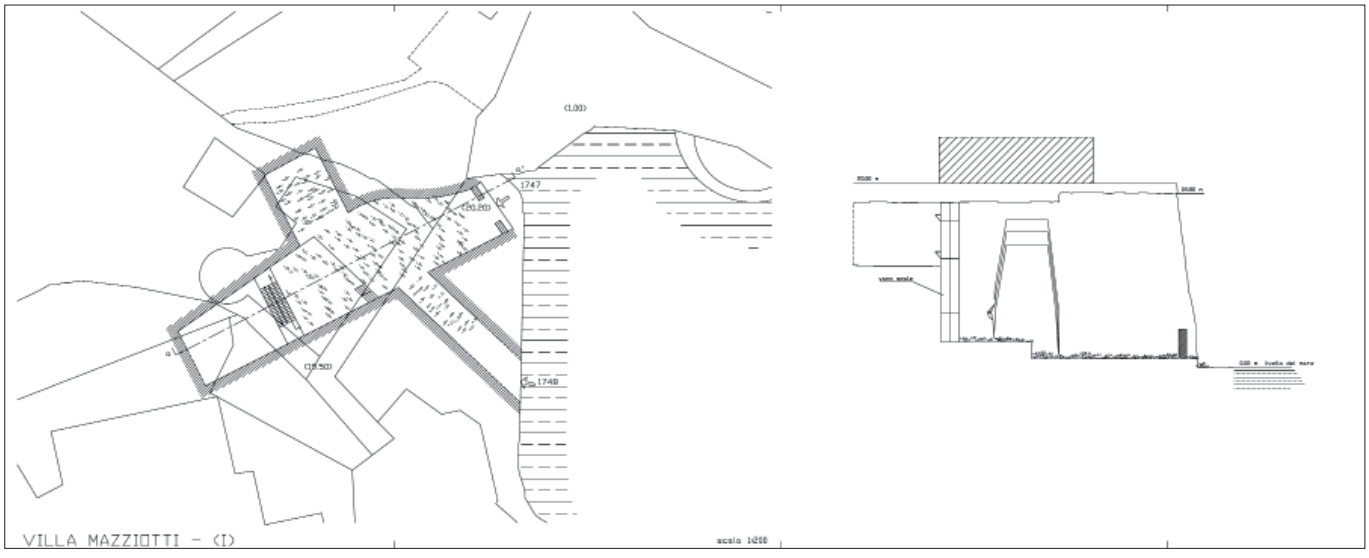


Figura 4 – Comune di Napoli, cavità 498: esempio di documentazione grafica derivante dalla "Indagine sullo stato del sottosuolo. Quadro organico degli interventi. Rapporto aprile 2000"

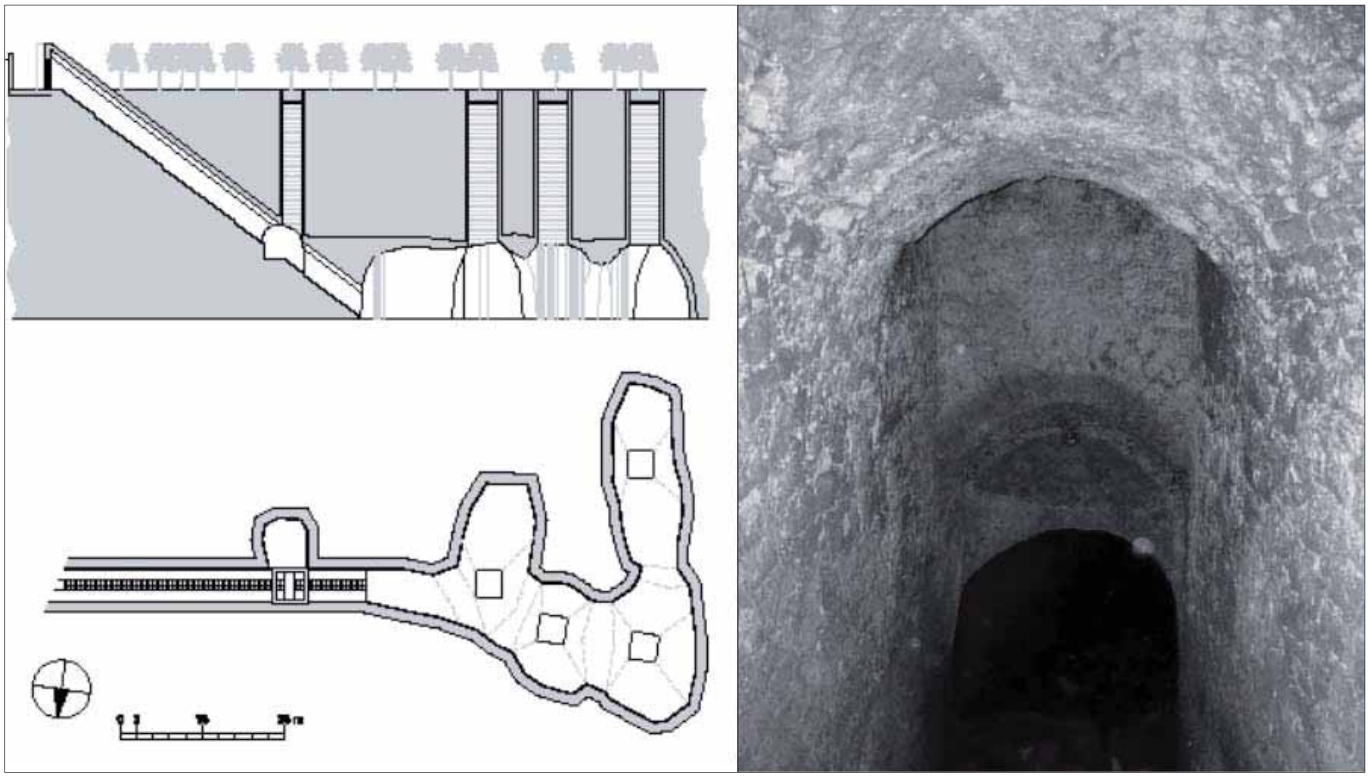


Figura 5 – Rilievo planimetrico, sezione e dettaglio fotografico di una cavità del comune di Comiziano (da: Ebanista, 2002)

Acque, redatto dalla Autorità di Bacino del Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale, e informazioni relative ai fenomeni di sprofondamento improvviso censiti nell'ambito di uno specifico progetto di ricerca sugli *anthropogenic sinkholes* condotto da ISPRA (*Fig.* 6d).

In tal modo è possibile pervenire a un quadro conoscitivo maggiormente esaustivo, relativo alla cavità oggetto di interesse.

In figura 7, ad esempio, sono riportate le informazioni (planimetria della cavità, geologia di superficie, log stratigrafico, quota della falda sotterranea) estraibili, relativamente ad una cavità del comune di Cicciano NA).

CONCLUSIONI

L'inventario delle cavità di origine antropica del territorio della Città Metropolitana di Napoli nasce all'interno di un progetto di studio della suscettibilità del territorio della Città Metropolitana di Napoli ai fenomeni di sprofondamento improvviso di origine antropica, realizzato dal Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia dell'ISPRA.

La strutturazione del database è il risultato di una convenzione con l'Ufficio Sistema Informativo Territoriale della Città Metropo-

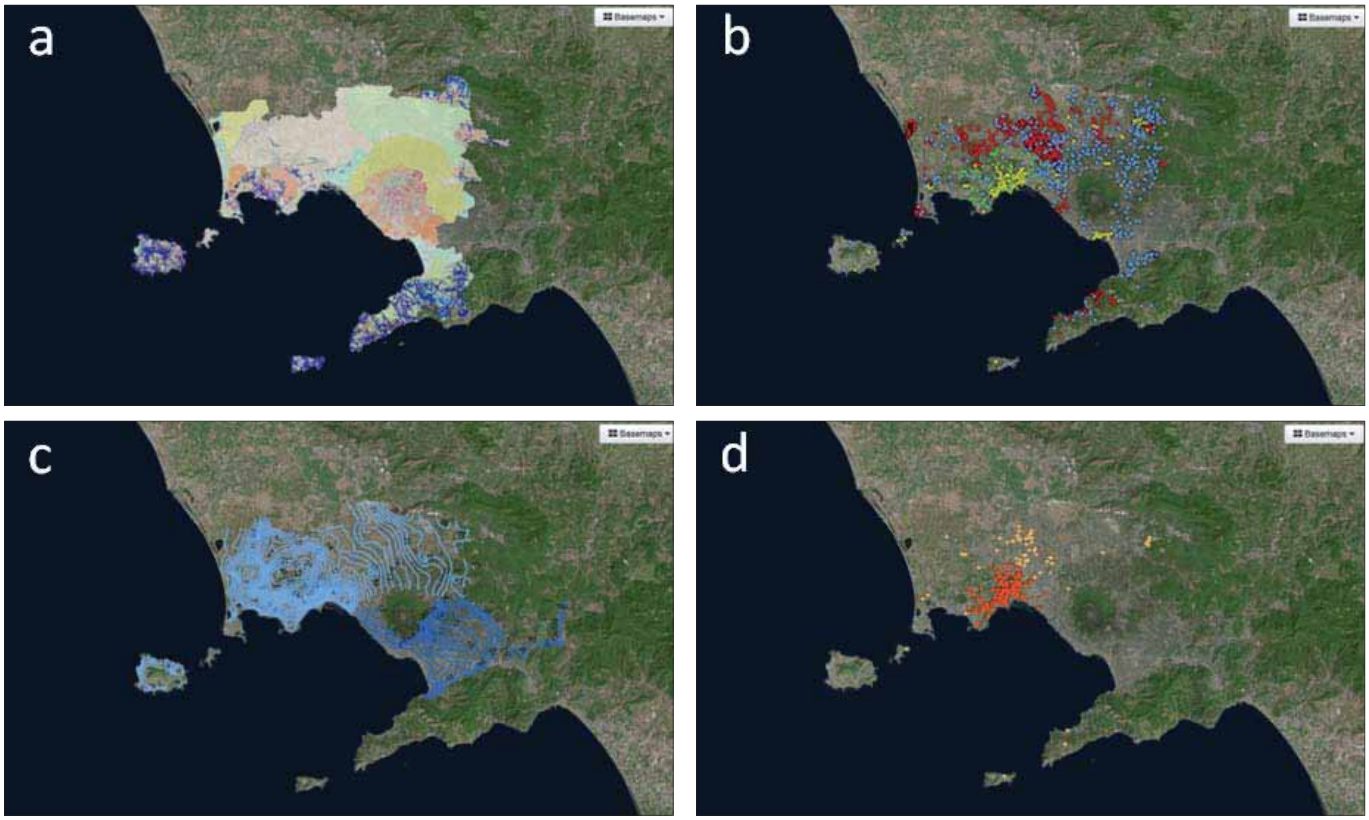


Figura 6 – Visione d'insieme degli strati informativi consultabili nel DB territoriale Anthropogenic sinkholes *della Città Metropolitana di Napoli: Cartografia geologica, Dati stratigrafici, Acque sotterranee e Anthropogenic sinkholes*

litana di Napoli, che si è avvalsa del supporto scientifico della Università Federico II di Napoli e della collaborazione della Autorità di Bacino, del Comune di Napoli e della Federazione Speleologica Campana.

Diversi sono i soggetti che si rapportano con le problematiche connesse al sottosuolo: Pubbliche Amministrazioni, Privati, Enti di gestione delle reti tecnologiche, ognuno dei

Tabella 4 – Dati stratigrafici: fonti delle informazioni inserite

1. Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo ("L464_84 ISPRA" in Banca Dati) realizzato dall'ISPRA
2. Ufficio Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del comune di Napoli;
3. Documentazione in formato cartaceo o digitale in possesso del S.I.T. della Città Metropolitana di Napoli, relativa all'adozione di adeguamenti o progetti di variante del Piano Regolatore dei comuni, zonazione comunale in chiave sismica, adozione di P.U.C. o adeguamento al P.T.P.
4. Documentazione in formato cartaceo o digitale acquisito nel corso di studi condotti negli anni scorsi dai ricercatori del gruppo di Lavoro ISPRA del Progetto Anthropogenic Sinkholes.

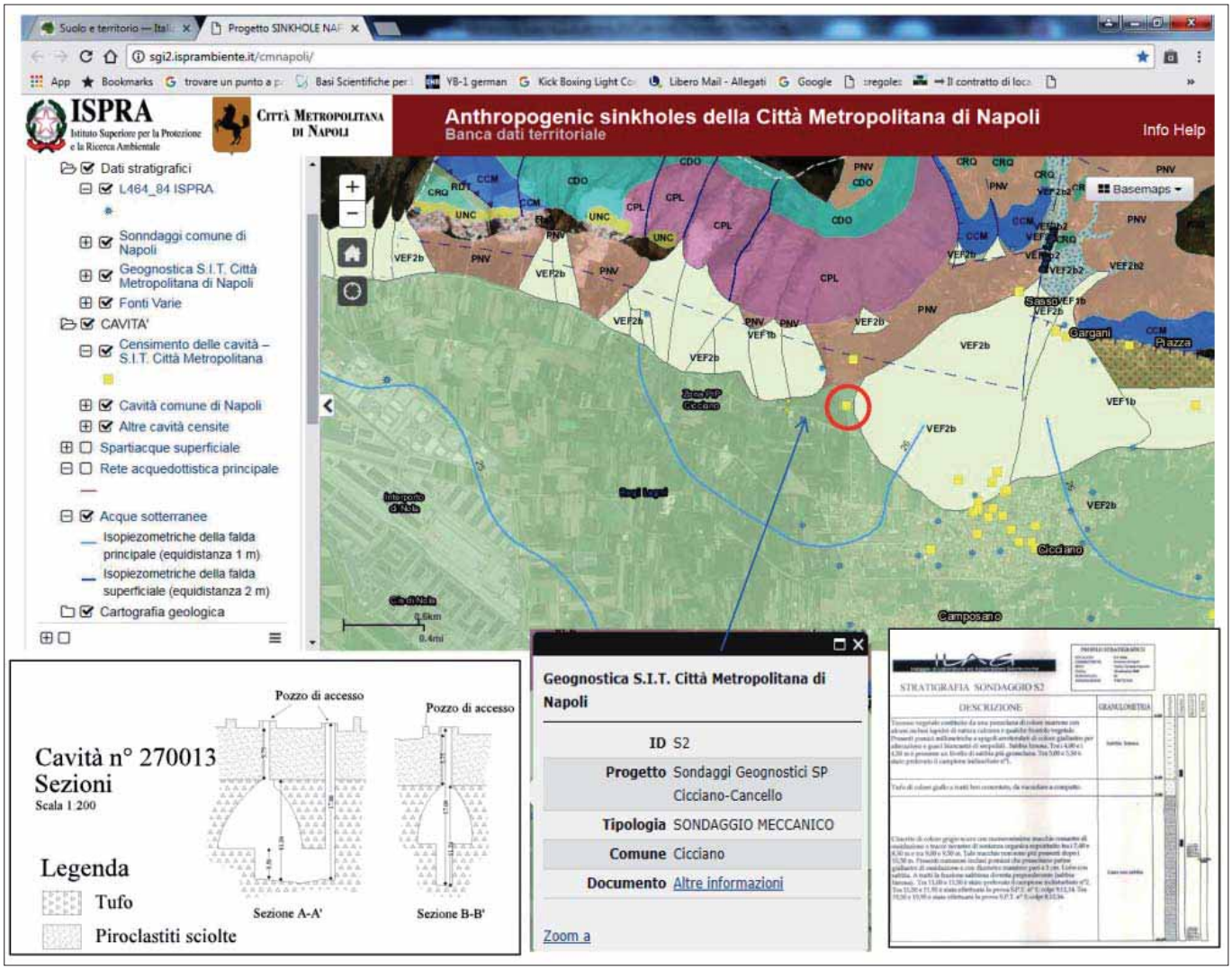


Figura 7 – Esempio di dati di carattere planimetrico e geologico relativi ad una cavità del comune di Cicciano NA), estraibili dalla Banca Dati Territoriale Anthropogenic sinkholes *della Città Metropolitana di Napoli*

quali è portato a affrontare in maniera settoriale le problematiche connesse alla loro specifica missione.

In tale contesto, l'inventario delle cavità di origine antropica può costituire una cornice integrata delle conoscenze dell'insieme sottosuolo-cavità: un comune denominatore conoscitivo che può essere ulteriormente sviluppato ed aggiornato, e posto alla base delle azioni decisionali dei vari Enti, della pianificazione degli interventi e della gestione delle risorse del territorio.

BIBLIOGRAFIA

Basso N., Ciotoli G., Finoia M.G., Guarino P.M., Nisio S. (2013) *Suscettibilità a fenomeni di sinkholes antropogenici nel territorio di Napoli*, Mem. Descr. Carta Geol. d'It. XCIII: 73-104.

Comune di Napoli (1967) *Il sottosuolo di Napoli.* Relazione della commissione di studi.

Ebanista C. (2012) - *Le cave di tufo, le cantine e le cisterne ipogee.* In: Cumignano e Gallo. Alle origini del comune di Comiziano. Tavolario, Cimitile (NA), pp. 155-181. ISBN 978-88-904323-7-8

Galeazzi C. (2013) *The typological tree of artificial cavities: a contribution by the SSI Commission.* in: Parise M. (ed.), *Proceedings of the International Workshop on Speleology in Artificial Cavities "Classification of the typologies of artificial cavities in the world".* Torino (italy), May 18-20, 2012, Opera Ipogea, no. 1, 9-18.

Guarino P.M., Santo A., Forte G., De Falco M., Niceforo D.M.A. (2018), *Analysis of a database for anthropogenic sinkhole triggering and zonation in highly urbanized area of the hinterland of Naples (South Italy),* Nat Hazards 91:S173–S192 https://doi.org/10.1007/s11069-017-3054-5.

Guarino P.M., Nisio S. (2012), *Anthropogenic sinkholes in the territory of the city of Naples (Southern Italy)*, J Phys Chem Earth 49:92-102. doi: 10.1016/j.proeng.2016.09.472

Lombardi G., Feola A., Miraglino P. (2010) *Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico nella città di Napoli*, Geologi, 28 (1/2010)

Parise M., Galeazzi C., Bixio R., Dixon M. (2013) *Classification of artificial cavities: a first contribution by the UIS Commission.* In: Filippi M. & Bosak P. (Editors), Proceedings 16th International Congress of Speleology, Brno, 21-28 July 2013, vol. 2, p. 230-235.

Provincia di Napoli (2002) *Censimento delle cavità sotterranee dei comuni della Provincia di Napoli*, Direzione PTCP-SIT Piani di Settore, Napoli.

Sindaco di Napoli Commissario Straordinario per l'Emergenza Sottosuolo OM 2509/97 e s.m.i. (2000) - *Indagine sullo stato del sottosuolo. Quadro organico degli interventi*, Rapporto aprile 2000.

Primo contributo alla realizzazione della Carta delle Cavità Sotterranee di Roma

First contribution to the realization of the map of underground cavities of Rome

Fabrizio Bisconti[1], Giancarlo Ciotoli[2], Gianluca Ferri[3], Roberto Fiore[4], Maurizio Lanzini[6], Stefania Nisio[7], Mauro Roma[7], Riccardo Paolucci[8], Ivano Stranieri[6], Claudio Succhiarelli[9], Maurizio Allevi[5]

[1] Pontificia Commissione di Archeologia Sacra
[2] Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR - IGAG
[3] Roma Capitale, Ufficio Extradipartimentale Politiche della Sicurezza e Protezione Civile
[4] Roma Metropolitane
[5] Roma Capitale, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana
[6] Associazione Culturale "Roma Sotterranea"
[7] ISPRA, Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia
[8] Associazione Centro Ricerche Speleo-Archeologiche "Sotterranei di Roma"
[9] Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica

Parole chiave (*key words*): Cavità artificiali (*underground cavities*), Roma (*Rome*), cartografia tematica (*thematic cartography*), sprofondamenti antropogenici (*anthropogenic sinkholes*)

RIASSUNTO

Sono molti gli studi di tipo archeologico e geologico-geotecnico riguardanti le cavità sotterranee nel territorio di Roma.

Tali cavità costituiscono un'intricata rete di gallerie sotto la città, costituendo sistemi, a volte a più piani, che si approfondiscono a differenti profondità.

Questi vuoti sono tutti di origine antropica, scavati a vario titolo, per vari scopi (edilizio, idraulico, religioso etc.), ma per lo più per l'approvvigionamento di materiali da costruzione.

Le cave romane furono realizzate prevalentemente nei terreni vulcanici. Esse sono le cavità maggiormente diffuse e si concentrano soprattutto nella porzione orientale della città. La coltivazione mineraria avveniva attraverso la realizzazione di gallerie che prevedeva un imbocco alla base del versante. L'utilizzo delle cave di tufo come aree di culto e cimiteriali è successivo e risale al I–III secolo d.C. Le aree censite e adibite a catacombe ed ipogei privati rappresentano la seconda tipologia di cavità sotterranea per estensione. Le cave di conglomerati e sabbia, realizzate nella porzione sud-occidentale della città, hanno più scarsa estensione e non furono mai utilizzate come necropoli ma, successivamente, come depositi, fungaie, etc.

Purtroppo, tale rete di gallerie sotterranee è conosciuta solamente in forma frammentaria e molte abitazioni civili sono state realizzate su vuoti spesso non bonificati. La presenza delle cavità nel sottosuolo, in particolari condizioni e congiuntamente a possibili criticità naturali o antropiche, ad esempio perdite della rete idraulica dei sottoservizi, può provocare il crollo degli strati più superficiali del terreno con la formazione di voragini in superficie (*sinkholes* antropogenici) determinando condizioni di rischio per il prezioso tessuto urbano romano.

Sono mancati, dunque, sino ad oggi, una cartografia d'insieme e un database completo, che riportino l'effettiva estensione delle cavità. Tuttavia, tali informazioni, risultano ora fondamentali al fine di studiare la pericolosità del territorio.

Al fine di migliorare e completare lo studio e censimento dei vuoti sotterranei è stato costituito un Gruppo di Lavoro (GdL), coordinato dall'ISPRA (a cui partecipano vari enti, tra i quali: Roma Capitale, CNR-IGAG, Protezione Civile Nazionale, Roma Metropolitane, le principali Associazioni Speleologiche di Roma e La Pontificia Commissione di Archeologia Sacra) che si sta occupando della raccolta dati sia di tipo puntuale sia delle mappature delle reti caveali nel loro sviluppo areale.

Si presentano pertanto i primi risultati conseguiti dal GdL e la prima Carta delle cavità sotterranee di Roma. Tale prodotto, sebbene preliminare, è tutt'ora in fase di perfezionamento e costituisce comunque un prodotto unico, affidabile ed aggiornabile che potrà essere di riferimento per le pubbliche amministrazioni al fine di una valutazione della vulnerabilità del territorio della Capitale.

ABSTRACT

There are many archaeological and geological-geotechnical studies concerning underground cavities in the territory of Rome. These cavities constitute an intricate network of tunnels under the city, developing multi-layer systems, located at different depths. These voids are all of anthropogenic origin, dug in various ways, for various purposes (building, plumbing, religious etc.), but mostly for excavation of building materials. The Roman quarries were mainly built in volcanic soils. These constitute the most widespread cavities and are mainly concentrated in the eastern portion of the city. Mineral cultivation took place through the construction of tunnels that provided an entrance to the base of the slope. The use of tuff quarries as areas of worship and cemeteries is successive and dates back to the I-III century A.C. The areas surveyed and used as private catacombs and hypogea represent the second type of underground cavity by extension. The conglomerate and sand quarries, built in the south-western part of the city, have lesser extension and were never used as necropolis but, later, as deposits, mushroom farms, etc. Unfortunately, this network of underground tunnels is known only in fragmentary form and many public and private buildings have been built above such unknown and uncontaminated voids. The presence of underground cavities in particular conditions, together with the possible losses of the public water and sewage network, can cause the collapse of the most shallow layers of the ground with the formation of anthropogenic sinkholes at the surface determining risk for the precious Roman urban fabric. To date, an overall cartography and a complete database that show the actual extension of the cavities has never been produced. However, this information is now fundamental to study the hazard and the vulnerability of the Roman territory. In order to improve and complete the study and inventory of the underground cavities, a Working Group (WG) has been set up by ISPRA (in which various bodies participate, among which: Roma Capitale, CNR-IGAG, National Civil Protection, Roma Metropolitane and the main Speleological Associations of Rome and the Pontifical Commission of Sacred Archeology) and involved in data collec-

Nota:

Hanno Partecipato al Gruppo di Lavoro: ISPRA: Nisio S., Roma M., Serafini R., Falcetti S., Grossi S. (Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia); CNR – IGAG: Ciotoli G.; Roma Capitale: Succhiarelli C. (Dip. Programmazione e Attuazione Urbanistica); Ferri G. (Protezione Civile Roma Capitale) Bonfà I., La Vigna F., Martelli S., (Dip. Tutela Ambientale) Allevi M., Huber T., Canalini A., Galiano M. (Dip. S.I.M.U.); Ass. Centro Ricerche Speleo-Archeologiche Sotterranei di Roma: Placidi M., Paolucci R.; Ass. Culturale Roma Sotterranea: Morabito A., Lanzini M. Stranieri I.; Roma Metropolitane: Fiore R.; Pontificia Commissione di Archeologia Sacra: Bisconti F., Fiorenza G.; Dipartimento Nazionale di Protezione Civile: Corazza A.; Roma Città Metropolitana: Argentieri A. Piro M.

tion. In this way, at the already available point data, the mapping of the areal development of the cavities has been added. The first results obtained by the WG and the first map of the underground cavities of Rome are therefore here presented. This map is still in progress, and is being processed and refined.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro vuole illustrare i risultati conseguiti da un gruppo di lavoro interistituzionale finalizzato alla elaborazione aggiornata di una cartografia riguardante le cavità sotterranee del territorio di Roma Capitale.

La necessità dell'elaborazione di una cartografia aggiornata delle cavità artificiali di Roma, si è sviluppata all'interno degli Enti istituzionali che, in funzione delle competenze riguardanti la gestione del territorio, hanno voluto colmare il vuoto conoscitivo di una tematica costituita da studi, mappe e dati eterogenei a volte non aggiornati e non organizzati, in relazione alle attività di pianificazione e programmazione urbanistica, di previsione e prevenzione di protezione civile, di predisposizione di interventi di bonifica e messa in sicurezza.

IL GRUPPO DI LAVORO PER LE CAVITÀ SOTTERRANEE

Negli ultimi tre decenni, con lo sviluppo urbanistico della città di Roma, sono stati sviluppati, dalle varie Amministrazioni pubbliche e associazioni private, diversi studi sulle cavità sotterranee, riguardanti sia la mappatura e la loro planimetria, sia la loro descrizione e analisi, in relazione alla progressiva espansione edificatoria della città. In tal modo si è venuto a creare un insieme frammentato e non organizzato di queste informazioni.

Con il coordinamento del Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia dell'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca dell'Ambiente, fu costituito nel 2009 un primo specifico gruppo di lavoro per il territorio di Roma Capitale riguardante il "Progetto Sprofondamenti nei centri urbani" (Nisio, 2010a, b; 2011) che rappresenta una sottocategoria di eventi antropogenici del più ampio "Progetto Sinkhole" (Nisio, 2008).

Il Progetto ha consentito per la prima volta l'avvio di un censimento dei fenomeni di sprofondamento legati alla presenza delle cavità sotterranee e la realizzazione di un Database Nazionale dei Sinkholes consultabile sul sito web di ISPRA (http://sgi2.isprambiente.it/sinkhole), oltre che attraverso il Portale Geologico (Ciotoli et al., 2013, 2015 a, b, 2016).

In occasione dell'ultimo Workshop internazionale, tenutosi a Roma nel 2014, riguardante i fenomeni di *sinkholes*, emerse la necessità di associare a questa fenomenologia anche l'avvio di una nuova fase di aggiornamento delle cavità sotterranee di origine antropica del territorio di Roma.

Si è proceduto quindi ad un aggiornamento degli enti costituenti il GdL, includendone altri per competenza istituzionale, che attualmente risulta composto da: ISPRA, Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia (aventi funzione di coordinamento); Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR-IGAG; Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica; Roma Capitale, Ufficio Extra-dipartimentale Politiche della Sicurezza e Protezione Civile; Roma Capitale, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana; Roma Capitale, Dipartimento Tutela Ambientale; Roma Capitale, Sovrintendenza Capitolina; Ministero dei beni e attività culturali, Soprintendenza Archeologica di Roma; Città del Vaticano, Pontificia Commissione di Archeologia Sacra; Associazione Culturale "Roma Sotterranea"; Associazione Centro Ricerche Speleo-Archeologiche "Sotterranei di Roma".

Il GdL ha lavorato all'integrazione e aggiornamento della banca dati delle cavità sotterranee ed allo studio della loro densità in relazione alla geologia ed idrogeologia di Roma (Ventriglia, 1971, 2002; Funiciello *et al*., 2008 a, b).

Dall'elaborazione dei dati raccolti è emerso un quadro molto variegato delle cavità sotterranee (Galeazzi, 2013; Parise *et al*., 2013; Ciotoli *et al*., 2015 a) presenti nel sottosuolo romano, sia per tipologia d'uso, sia per dimensioni e strutture nonché per l'elevata densità di presenza in determinate aree del



Figura 1 – Sopralluogo del GdL presso le Cave di Monteverde, Circonvallazione Gianicolense, in cui sono presenti crolli di volta



Figura 2 – Scoperta di cave per l'estrazione dei tufi presso l'Aventino

territorio romano, incrementata progressivamente dall'epoca etrusco-romana al periodo contemporaneo.

TIPOLOGIA DI USO DELLE CAVITÀ

Le cavità identificate sono ascrivibili a quattro attività d'uso (Galeazzi, 2013; Parise et al., 2013; Ciotoli *et al*. 2015 a):

- minerario, per l'estrazione di materiali da costruzione**;**
- idraulico, per la gestione delle risorse idriche sotterranee e superficiali**;**
- religioso, per l'espressione del culto, delle cerimonie e per le funzioni funerarie**;**
- militare, per la protezione durante i conflitti bellici e la difesa civile.

Le cavità adibite a coltivazione mineraria per l'estrazione dei materiali da costruzione rappresentano la tipologia maggiormente diffusa, soprattutto nella porzione orientale della città (*Fig*. 1, 2). I materiali estratti per uso edilizio sono costituiti da lave, piroclastiti di consistenza litoide, pozzolane, ghiaie, sabbie e argille.

La gestione sotterranea delle acque è collegata con cavità aventi funzioni di: i) acquedotti e opere idrauliche connesse con l'approvvigionamento idrico con cisterne e pozzi; ii) cunicoli per la regimazione delle acque, meteoriche e incanalate del reticolo idrografico naturale; e iii) drenaggio delle acque reflue (*Fig*. 3).

Le cavità ad uso religioso sono costituite prevalentemente dalle funzioni funerarie delle catacombe (cristiane e in misura minore ebraiche), sepolcreti e colombari e, per le funzioni cerimoniali di culto, dai santuari. L'utilizzo delle cave di tufo come aree di culto e cimiteriali è successivo e risale al II–VI sec.

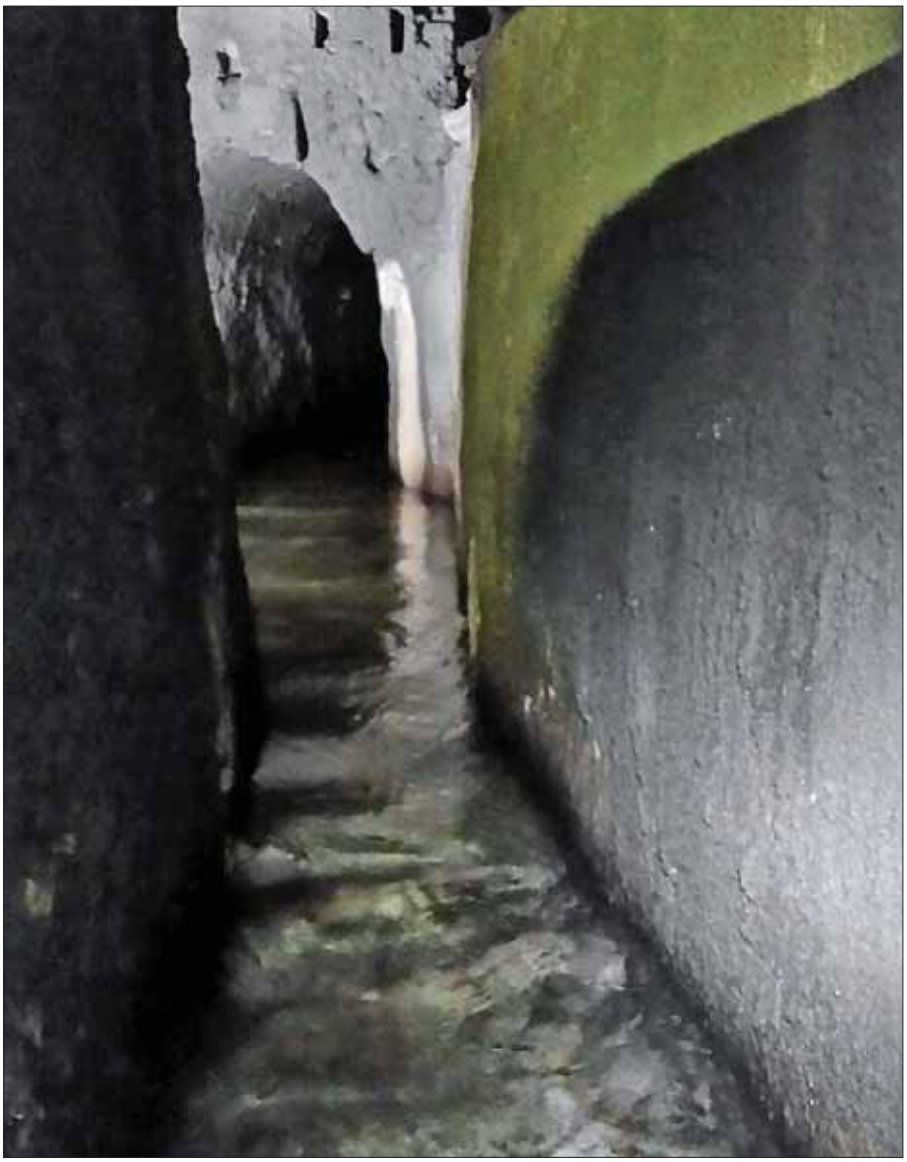


Figura 3 – Esempio di un cunicolo idraulico sotto la città

d.C. Nel loro insieme rappresentano la seconda tipologia di cavità per estensione (*Fig.* 1).

Le attività militari hanno interessato la realizzazione di rifugi di protezione, *bunker* e ambienti per la difesa civile e la costruzione delle strutture forti fortificate a servizio delle attività belliche.

Qui di seguito viene riportata una tabella riassuntiva (*Tab.* 1), riguardante le principali caratteristiche delle cavità sotterranee presenti nell'area romana distinte per tipologia d'uso, sviluppo sotterraneo e periodo storico di realizzazione.

I dati raccolti per la realizzazione della carta delle cavità sotterranee sono sia di tipo puntuale sia areale, con estremo dettaglio in relazione alle aree ipogee. I dati areali, ovvero le planimetrie delle aree di cavità e le aree con cavità certe e presunte, sono stati raccolti analizzando varie fonti bibliografiche, relazioni tecniche di professionisti, relazioni presenti negli archivi comunali e municipali, nonché ottenute da indagini operate direttamente in sito dalle associazioni speleologiche.

I dati sono piuttosto eterogenei e i confronti incrociando le varie fonti sono stati piuttosto difficili. In ogni caso si è realizzata una prima mappatura degli ipogei di Roma, che verrà aggiornata e migliorata periodicamente.

L' insieme dei dati ha consentito anche di predisporre una prima elaborazione della mappa di densità di cavità (punti per km^2) distinta in classi di probabilità di presenza di cavità (*Fig.* 5). La mappa è stata realizzata in ambiente GIS applicando ai punti l'algoritmo di kernel che calcola la densità degli elementi (puntuali e/o lineari) all'interno di un'area di rispetto (*vicinaggio)* centrata su ognuno dei elementi considerati (Silverman, 1986). La prima versione della *Carta delle cavità sotterranee di Roma* (*Fig.* 6), suddivisa in quattro quadranti, è consultabile sul sito dell' Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale all'indirizzo: http://www.isprambiente.gov.it/it/cartografia/carta-delle-cavita-sotterranee-di-roma.

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle cavità sotterranee presenti nell'area romana distinte per tipologia di uso, sviluppo sotterraneo e periodo storico di realizzazione

Tipologia delle cavità sotterranee presenti nell'area romana e principali caratteristiche			
Tipologia		**Sviluppo sotterraneo**	**Periodo storico**
Cave per materiali da costruzione	Materiali vulcanici (lave, piroclastiti litoidi e pozzolane)	Ramificato o a rete	Romano con eventuale riuso medioevale
		Isolato (in qualche caso)	
		In ordini sovrapposti (in qualche caso)	
	Materiali sedimentari (ghiaie, sabbie e argille)	Ramificato o a rete	Romano e prevalentemente contemporaneo
Catacombe		Ramificato e in qualche caso in ordini sovrapposti	Romano
Acquedotti e opere idrauliche connesse per l'approvvigionamento idrico		Lineare e puntiforme	Etrusco e romano
Cunicoli idraulici per la regimazione delle acque meteoriche e incanalate del reticolo idrografico naturale			
Cunicoli di collegamento per comunicazione e transito pedonale			
Infrastrutture fognarie		Lineare e ramificato	Romano
Ambienti ad uso funerario (camere sepolcrali, gallerie cimiteriali, colombari, sepolcreti)		Isolato o puntuale	Romano
Ambienti ad uso religioso (santuari)			
Ambienti ad uso idraulico (cisterne e pozzi)			
Ambienti ad uso militare e difesa civile (Bunker e rifugi di protezione)		Isolato, lineare o puntuale	Contemporaneo
Ambienti ad uso di difesa di forti militari		Isolato, lineare o puntuale	Moderno e contemporaneo

LA CARTOGRAFIA

La letteratura riguardante le cavità sotterranee a Roma e la documentazione cartografica su tutto il centro urbano sono state in passato per lo più realizzate prendendo in considerazione dati puntuali (cavità riscontrate in sondaggio; Ventriglia, 1971, 2002; Comune di Roma, 1981, 1988; Sciotti 1982; Crescenzi *et al.*, 1995). Gli studi di dettaglio, invece, hanno riguardato solo alcune aree campione (De Angelis D'Ossat 1943; Ventriglia, 1971, 2002; Mazza *et al.* 2008).

Il lavoro svolto ha consentito di redigere una mappa di Roma sino all'anello stradale del Grande Raccordo Anulare, raccogliendo le effettive planimetrie di cavità conosciute per ottenere una carta della distribuzione degli ipogei più definita e per confrontare i dati di letteratura con le attuali elaborazioni ottenute con i più moderni sistemi.

Di seguito i dati sono stati elaborati in ambiente GIS su cartografia in scala 1: 5000. In questa prima fase di lavoro, le cavità censite sono state rappresentate in relazione alla:

- ubicazione territoriale, in forme puntuali e areali (le delimitazioni areali distinguono i perimetri di aree con cavità accertate, i perimetri di cavità presunte; le forme puntuali rappresentano la distinzione delle sei tipologie attualmente definite nella cartografia);
- tipologia (catacombe, ipogei isolati, imbocchi di cava, cunicoli, *bunker*, rifugi e forti militari) (*Fig.* 1- 3).

Sono inoltre stati distinti e rappresentati anche i sondaggi stratigrafici che hanno evidenziato la presenza nel sottosuolo di cavità. (*Fig.* 4).

CAVITÀ SOTTERRANEE E GESTIONE DEL TERRITORIO

Il lavoro svolto rappresenta il primo contributo unitario e aggiornato riguardante le cavità sotterranee di Roma che potrà consentire l'avvio di un processo definito e istituzionale prevedendo per le aree a rischio la valutazione della loro pericolosità e della loro interazione con le attività antropiche del territorio, gli insediamenti edilizi e le infrastrutture a rete.

Questo processo istituzionale si attua attraverso la costituzione di un Tavolo Tecnico Inter-istituzionale richiesto da Roma Capitale sulla base dell'art. 43 del Piano di Assetto Idrogeologico. Il Tavolo Tecnico sarà coordinato

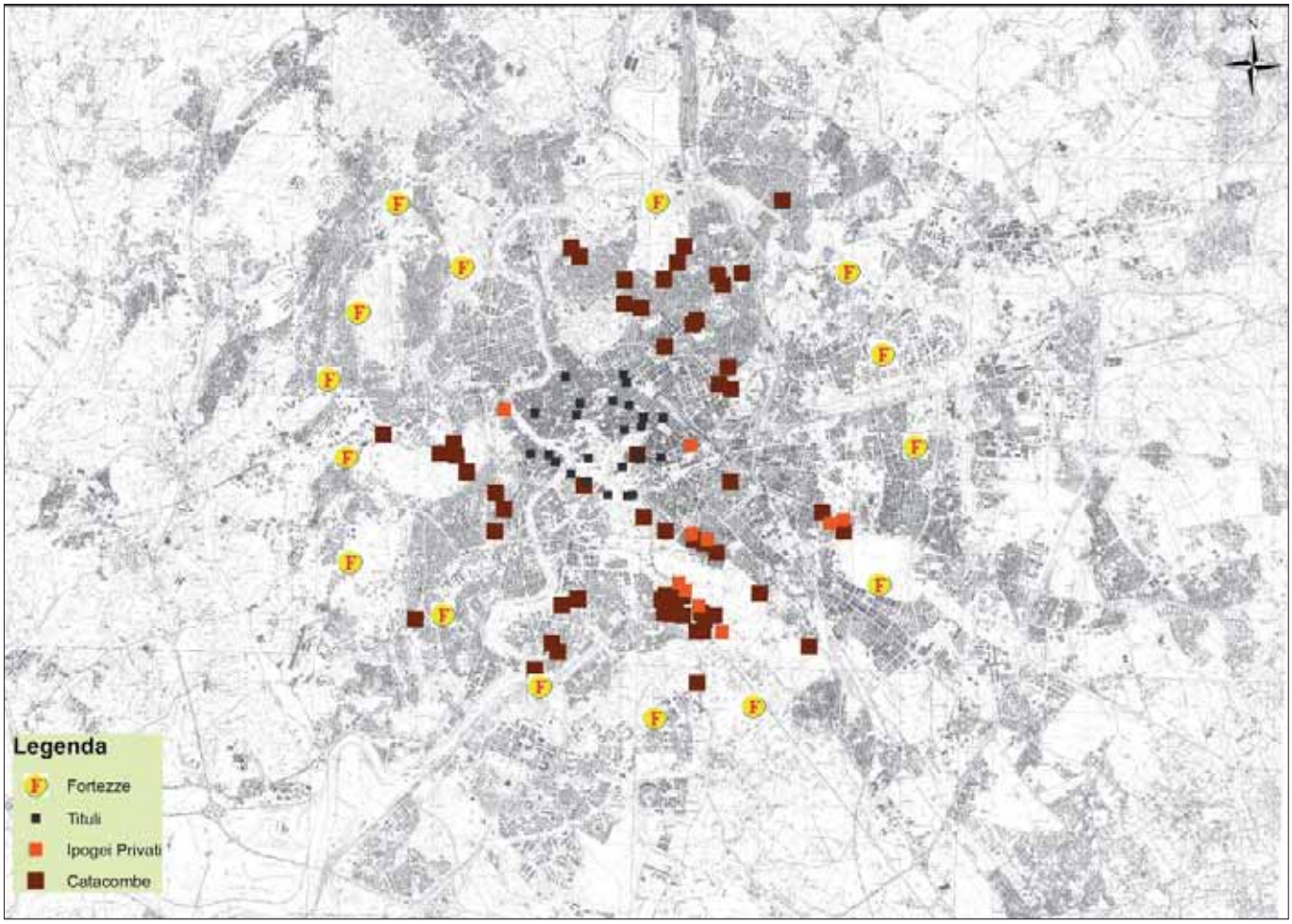


Figura 4 – Tipologia di cavità puntuali: ipogei privati, catacombe di cui non si conosce la planimetria, forti militari con presenza di sotterranei; chiese con presenza di cripte o sotterranei sviluppati

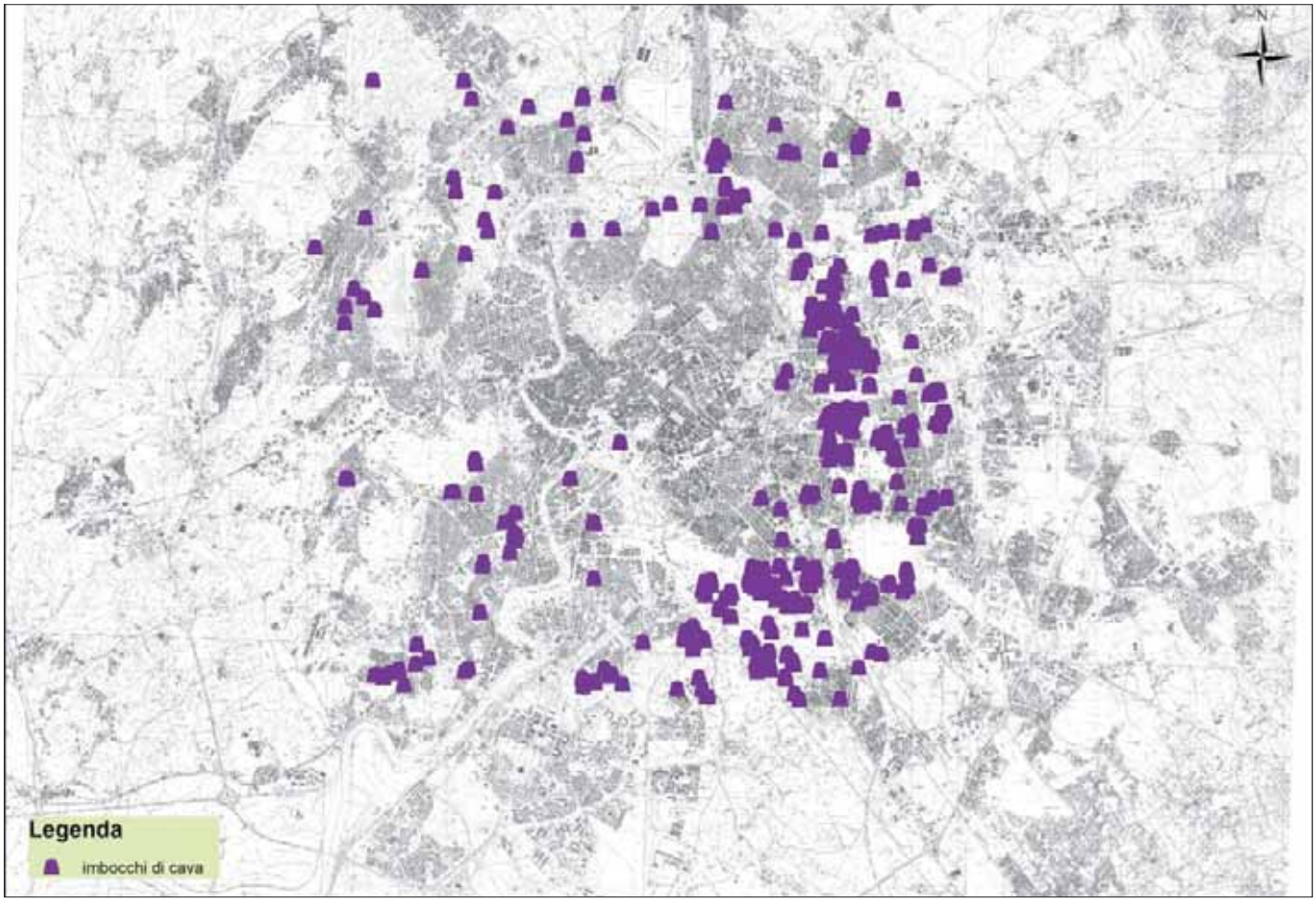


Figura 5 – Ubicazione degli antichi imbocchi alla cave sotterranee, dati raccolti da cartografie storiche e da immagini aeree

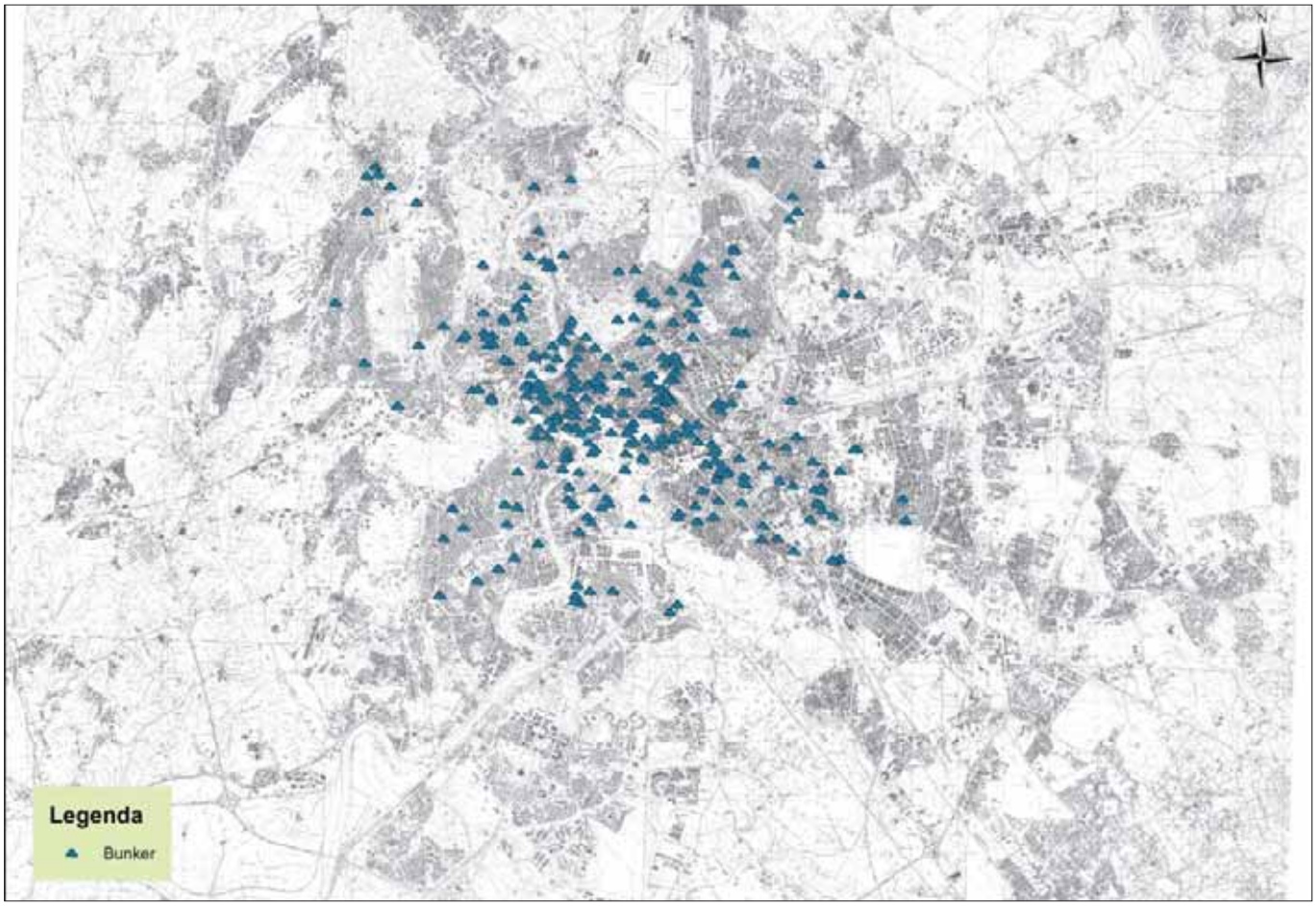
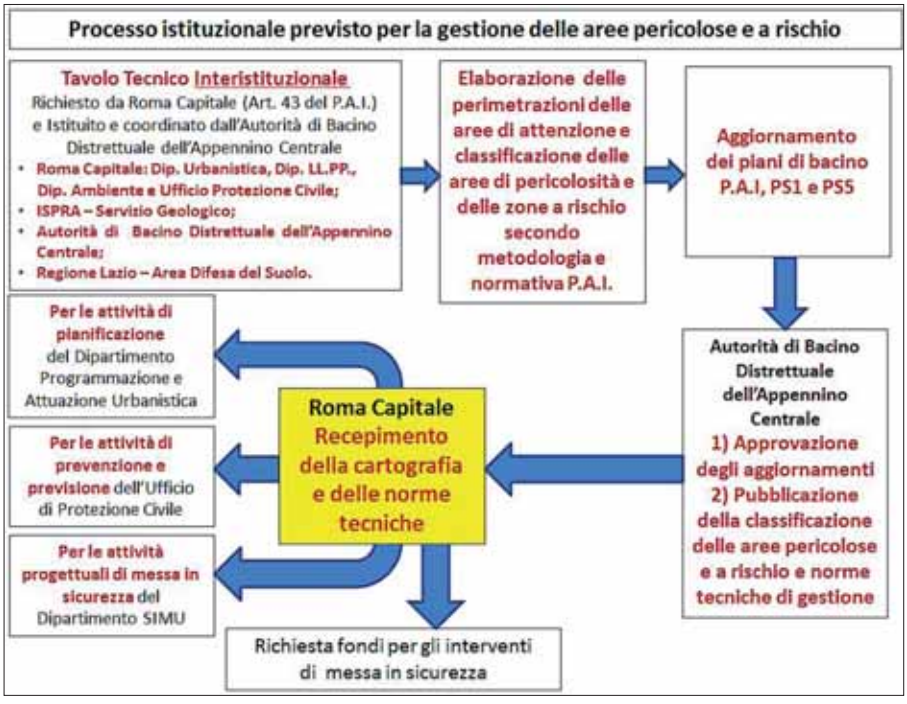


Figura 6 – Sotterranei militari, bunker*, realizzati durante i conflitti mondiali*

dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale, e sarà composto dagli Enti che, per competenza istituzionale, hanno il compito della gestione del territorio: Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale, Roma Capitale, ISPRA e Regione Lazio. Le attività sono costituite da quattro fasi (*Tab.* 2):

1. Elaborazione delle perimetrazioni delle aree di attenzione e classificazione delle aree di pericolosità e delle zone a rischio secondo la metodologia e la normativa del Piano di Assetto Idrogeologico;
2. Aggiornamento dei Piani di Bacino che riguardano l'area romana (P.A.I.), P.S.1 e P.S.5 (Disposizioni contenute nei Piani Stralcio funzionali PS1 "Aree soggette a rischio di esondazione nel tratto da Orte a Castel Giubileo" e PS5 per il "tratto metropolitano del Tevere da Castel Giubileo alla foce", redatti dall'Autorità di Bacino Tevere e relativi al territorio di Roma Capitale.;Determinazione Dirigenziale n. rep. QF/722/2012 dell'8/nov/12, prot.n. QF/22701/2012 dell'8/nov/12);
3. Approvazione degli aggiornamenti e pubblicazione della classificazione delle aree pericolose e a rischio e delle relative norme di gestione;
4. Recepimento da parte di Roma Capitale della cartografia e delle norme di tecniche di attuazione.

Tabella 2 – Schema del processo istituzionale proposto per la gestione delle aree pericolose e a rischio interessate da cavità sotterranee per il territorio di Roma Capitale



Il recepimento della cartografia e delle norme tecniche di attuazione costituiranno la fase importante per le attività di Roma Capitale, riguardanti:

- la pianificazione e l'attuazione urbanistica del Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica;
- la prevenzione e la previsione degli eventi pericolosi e dei rischi dell'Ufficio Extradipartimentale di Protezione Civile;
- la progettazione per gli interventi di messa in sicurezza del Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana;
- il recupero, lo studio e la gestione della Sovrintendenza Archeologica Capitolina.

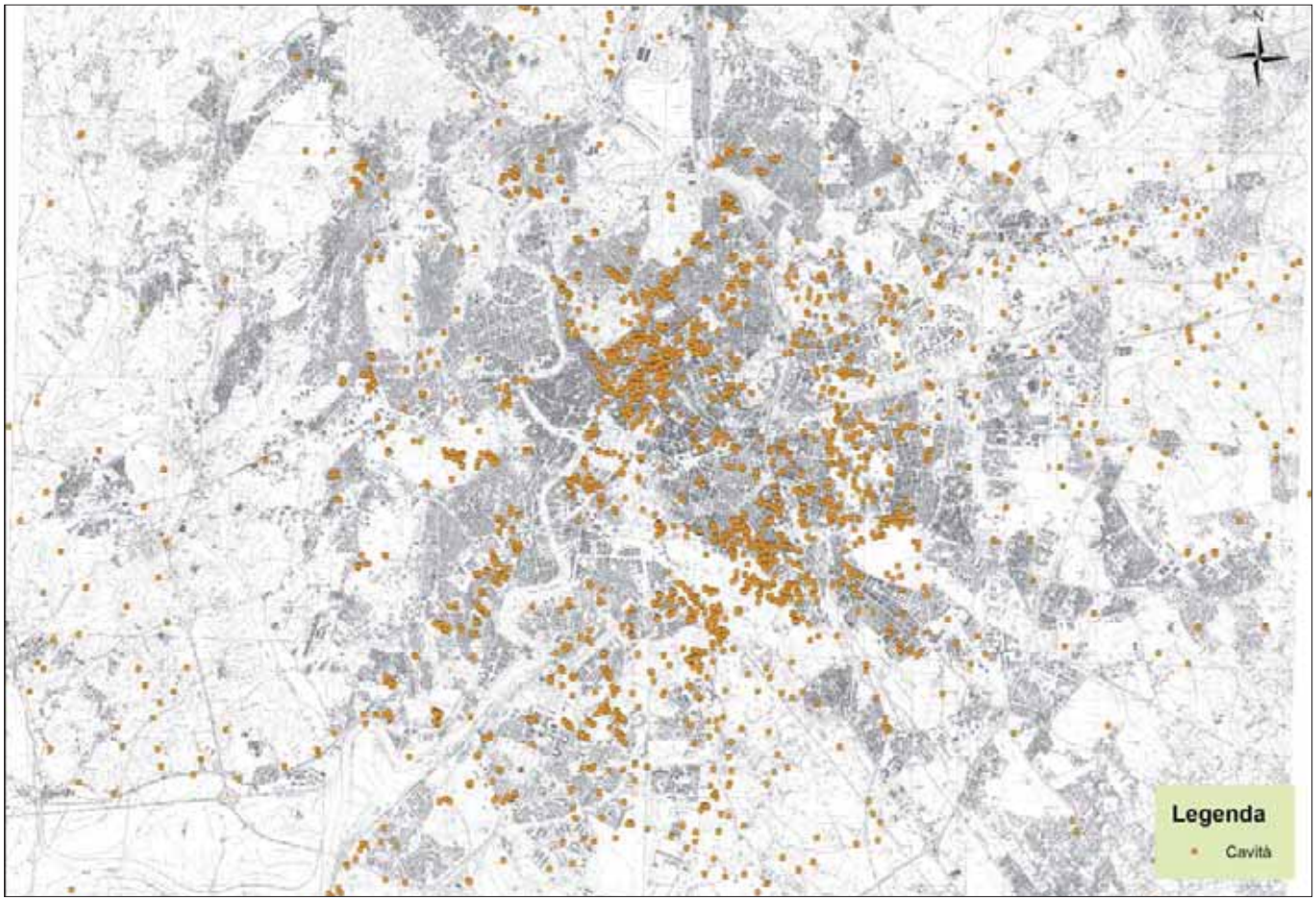


Figura 7 – Cavità puntuali individuate in sondaggi geognostici

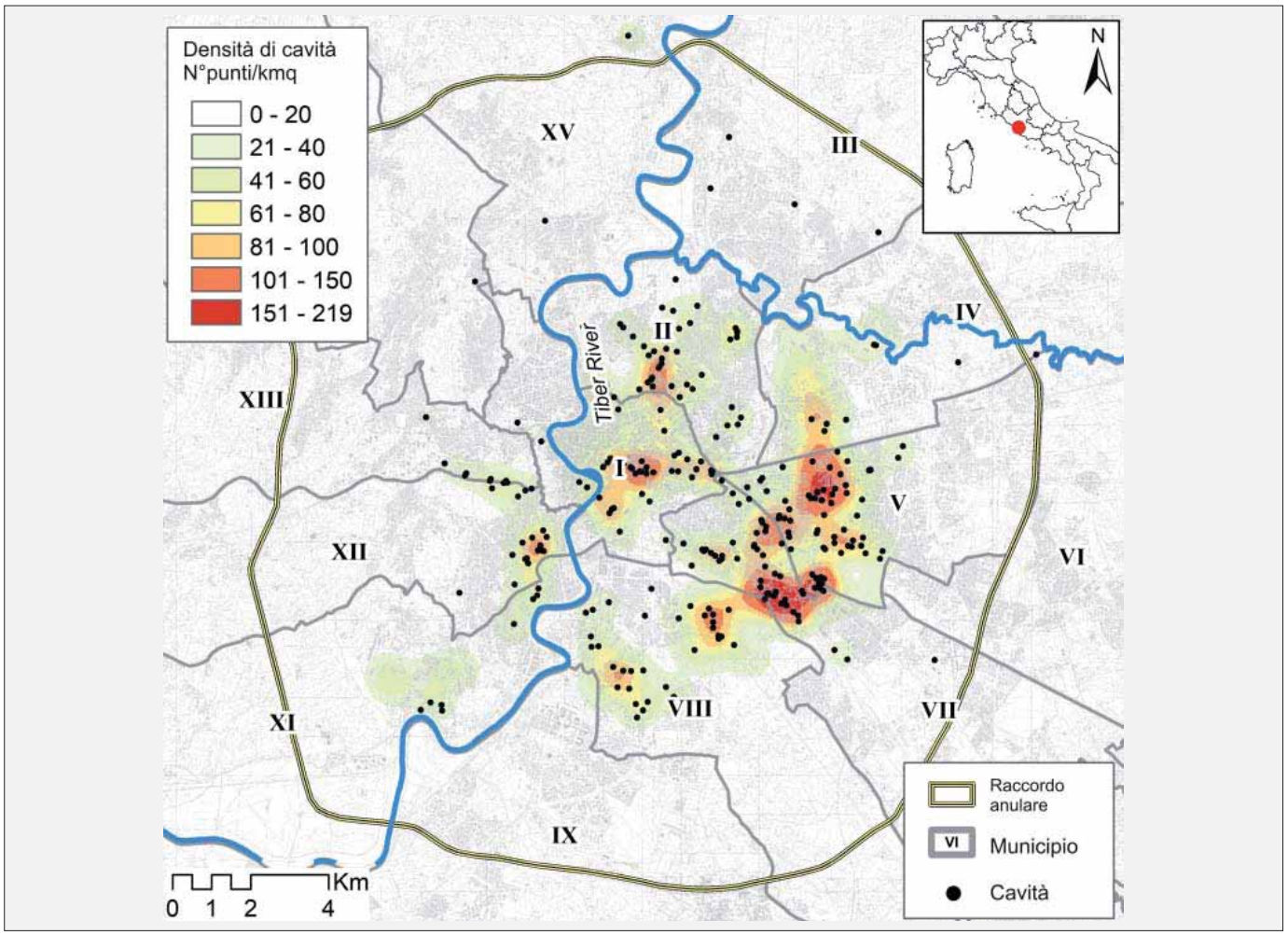


Figura 8 – Mappa di densità di cavità sino all'area del GRA

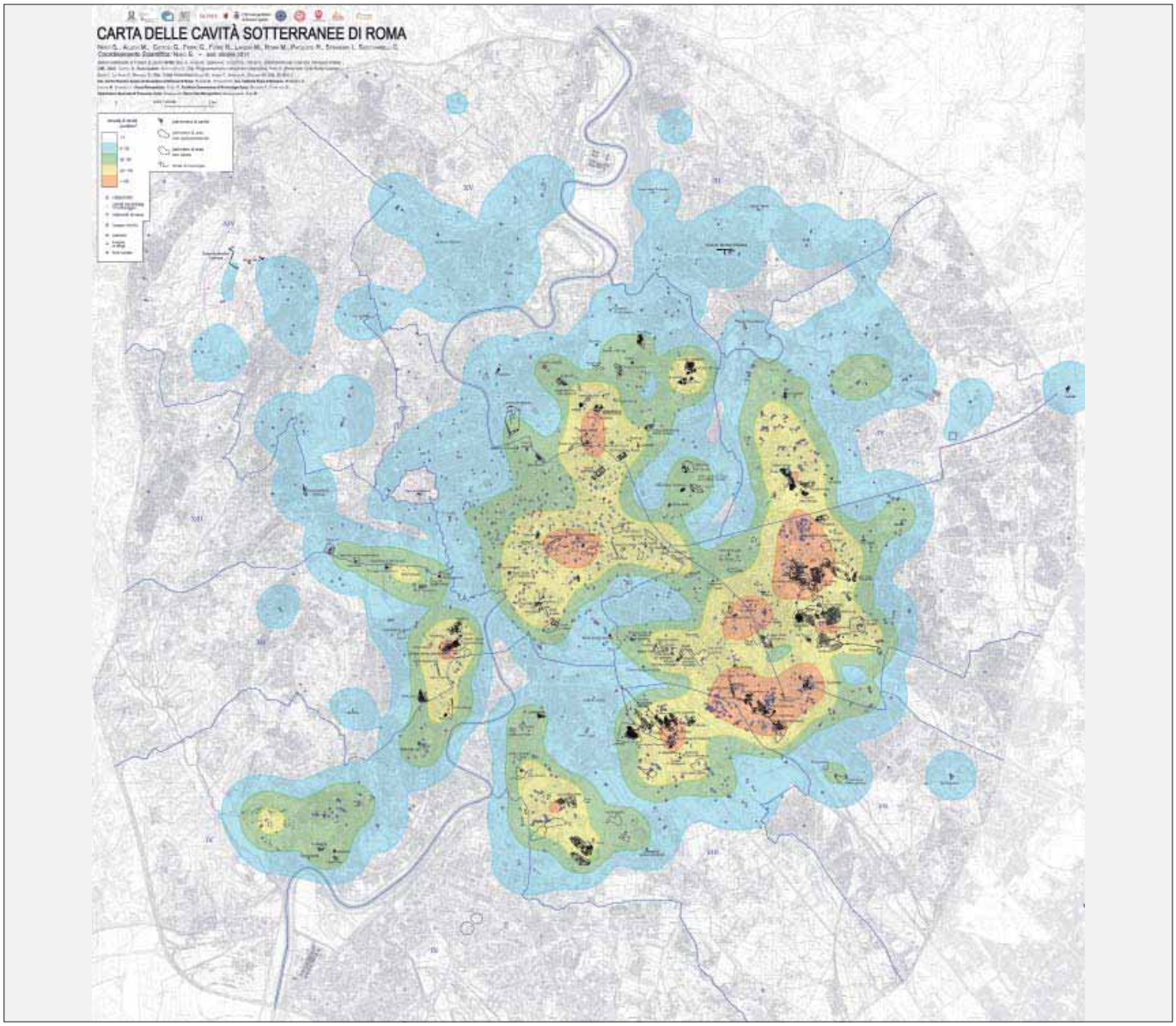


Figura 9 – Carta delle cavità sotterranee di Roma

BIBLIOGRAFIA

Ciotoli G. Corazza A., Finoia M.g., Nisio S., Succhiarelli C. (2013), *Gli sprofondamenti antropogenici nell'area urbana di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It. 93, 143-182.

Ciotoli G., Ferri G., Nisio S., Succhiarelli C. (2015a), *The underground cavities in the territory of Rome: typologies, distribution and sinkhole susceptibility. Hypogea 2015 - Proceedings of International Congress of Speleology in Artificial Cavities* - Rome, March, 11/17, 3-11.

Ciotoli G., Nisio S., Serafini R. (2015b), *Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma: analisi previsionale*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It. 99, 167-188.

Ciotoli G., Nisio S., Amanti M. (2016), *La Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici*. Professione Geologo, Ordine Geologi del Lazio

Comune di Roma, Ripartizione V Lavori Pubblici, Geosonda Italconsult (1981), *Studi e indagini geognostiche per il rilevamento delle gallerie esistenti in una zona del territorio della Circoscrizione VI,* 3 relazioni e 21 elaborati grafici, Roma.

Comune di Roma, Ripartizione X Antichità e Belle Arti, Ufficio Carta dell'Agro (1988), *Carta storica archeologica monumentale e paesistica del suburbio e dell'Agro Romano*, scala 1:10.000, 38 fogli, Roma.

Crescenzi, R., Piro M., Vallesi L. (1995), *Le cavità sotterranee a Roma*- In: La geologia di Roma: il centro storico. Mem. Descr. Carta Geol. d'It, L, 249-278.

De Angelis D'Ossat G. (1943), *La geologia delle catacombe romane*. Città del Vaticano, 1943.

Funiciello R., Praturlon A., Giordano G. (a cura di) (2008a), *La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 80.

Funiciello R., Giordano G., Mattei M. (2008b), *Carta Geologica del Comune di Roma.* Mem. Descr. Carta Geol d'It., 80.

Mazza R., Capelli G., Lanzini M. (2008), *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma*. In: La geologia di Roma dal Centro Storico alla periferia. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXXX (2), 149-170.

Nisio S. (2008), *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It. Vol. LXXXV; 475 pp.

Nisio S. (2010a), *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani.* Atti 2° Workshop internazionale: I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato. Roma 3-4 dicembre 2009. ISPRA, 845-864.

Nisio S. (2010b), *Fenomeni di sprofondamento nell'ambiente urbano.* VI Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano, ISPRA, 81-94.

Nisio S. (2011), *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani.* VII Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano, ISPRA.

Rogerson P.A. (2010), *Statistical Methods for Geography*: A Student's Guide SAGE Publications, 368 pp., ISBN 0761962875.

Santoro V. M. & Federici V. (1999), *Studi e indagini di un sistema di cavità sul Colle Aventino (Roma).* In: Atti del Convegno "*Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione*", Provincia di Roma e Società Italiana di Geologia Ambientale, pp. 39-72, Roma.

Santoro V.M. & Federici V. (2002), *Studio del sistema di cavità nella zona di via Giosafat, sul colle Aventino a Roma: valutazione del rischio potenziale e scelta degli interventi di consolidamento per il ripristino della viabilità*. In: Atti del XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, A.G.I., L'Aquila, pp. 595-602.

Silverman, B.W. (1986), *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. New York, Chapman & Hall.

Sciotti M. (1982), *Engineering geological problems due to old underground quarries*. In the Urban Area of Rome – Proc. IV Int. Congress I.A.E.G., New Delhi.

Ventriglia U. (1971), *La geologia della città di Roma*. Bardi Ed.

Ventriglia U. (2002), *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Editore Cerbone, Napoli.

Cavità sotterranee nell'area portuense a Roma

Underground cavities in the Portuense area in Rome

Cianfriglia Laura
Funzionario Archeologo Direttore S.S.A.B.A.P.-Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma
E-mail: laura.cianfriglia@gmail.com

Matteucci Renato
Cartografo, S.S.A.B.A.P.-Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma; S.I.G.E.A. Lazio
E-mail: renato.matteucci50@gmail.com.

Rosa Carlo
Geologo, S.I.G.E.A. Lazio; Istituto Italiano di Paleontologia Umana
E-mail: carlorosa62@gmail.com

Sebastiani Renato
Funzionario Archeologo Direttore S.S.A.B.A.P.-Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma
E-mail: renato.sebastiani@beniculturali.it

Parole chiave (*key words*): Geoarcheologia (*Geoarchaeology*), area portuense (*Portuense area*), cave in sotterraneo (*underground quarries*)

RIASSUNTO

Le peculiari caratteristiche geologiche e storico-topografiche, rappresentate dalla diffusa presenza del Tufo Lionato nella zona (il cosiddetto tufo di Monteverde) e dalle vie di transito costituite dal Tevere e dalle importanti arterie della via Portuense e Campana, hanno facilitato e favorito il diffondersi dell'attività estrattiva sin dall'antichità, sia a cielo aperto che in sotterraneo, lungo tali vie e nelle loro adiacenze.

Nel corso delle indagini di archeologia preventiva eseguite in varie aree della zona in esame, negli ultimi 20 anni, dalla Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma, ora SSABAP, sotto la direzione scientifica della dott.ssa Cianfriglia, sono stati individuati segni evidenti di questa attività, dello studio dei quali si è occupato il Servizio Geologico-Cartografico e di Geoarcheologia della stessa Soprintendenza.

L'analisi multitemporale cartografica ed aerofotografica (1938, 1944) integrata da indagini geognostiche e speleologiche, ha consentito di riconoscere e collocare cronologicamente i segni della passata attività estrattiva sia in superficie, con gli evidenti fronti di cava abbandonati, che in sotterraneo, con crolli da sprofondamento connessi con la evoluzione dei processi di cedimento delle volte delle gallerie sotterranee. Attività, la cui lettura ed identificabilità risultavano difficili per effetto della intensa urbanizzazione del quartiere.

INTRODUZIONE GEOMORFOLOGICA E IDROGRAFICA

Da un punto di vista morfologico l'area dei Colli di Santa Passera (*Figg.* 1-2) costituisce il lembo più meridionale della zona collinare di Monteverde, che si prolunga e si affaccia

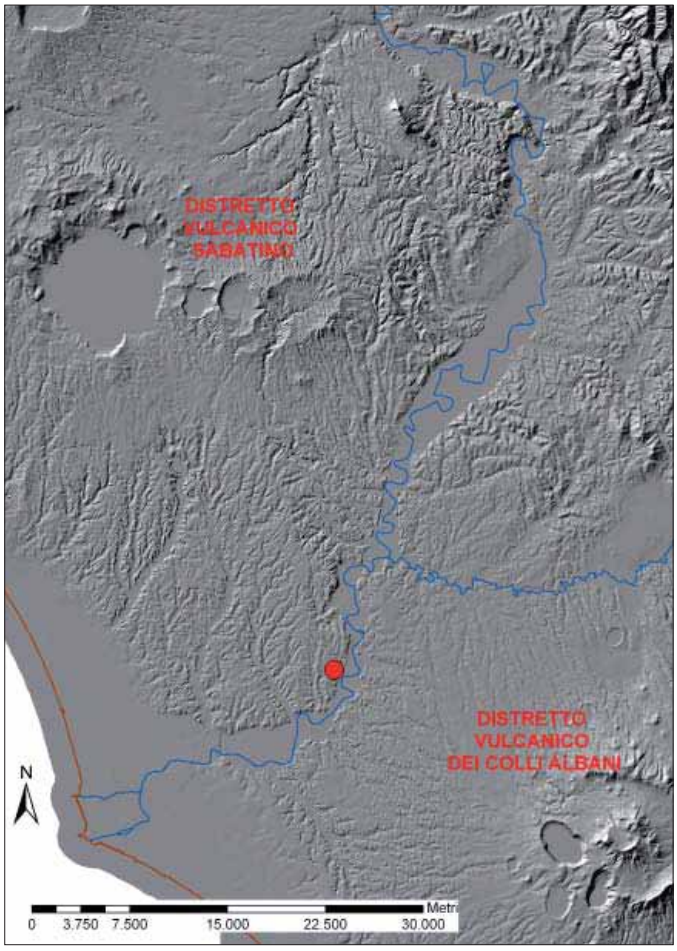


Figura 1 – Modello digitale del terreno.
Il pallino rosso indica l'area di Vigna Pia, compresa tra i Distretti Vulcanici dei Sabatini e dei Colli Albani.
In blu il Fiume Tevere e il Fiume Aniene



Figura 2 – Stralcio della "Carta Topografica del Suburbano di Roma" (Falzacappa) del 1839 in scala di 1:15.000. Sono indicati in rosso con le lettere maiuscole dell'alfabeto: A – area di scavo di Via Ricci Curbastro; B – area di scavo ex-Drugstore; C – area di scavo Necropoli di Vigna Pia; D – estensione del sistema di cavità sotto il Complesso Ospedaliero Forlanini; E – area di scavo via Greppi; F- area di scavo Largo Ruspoli

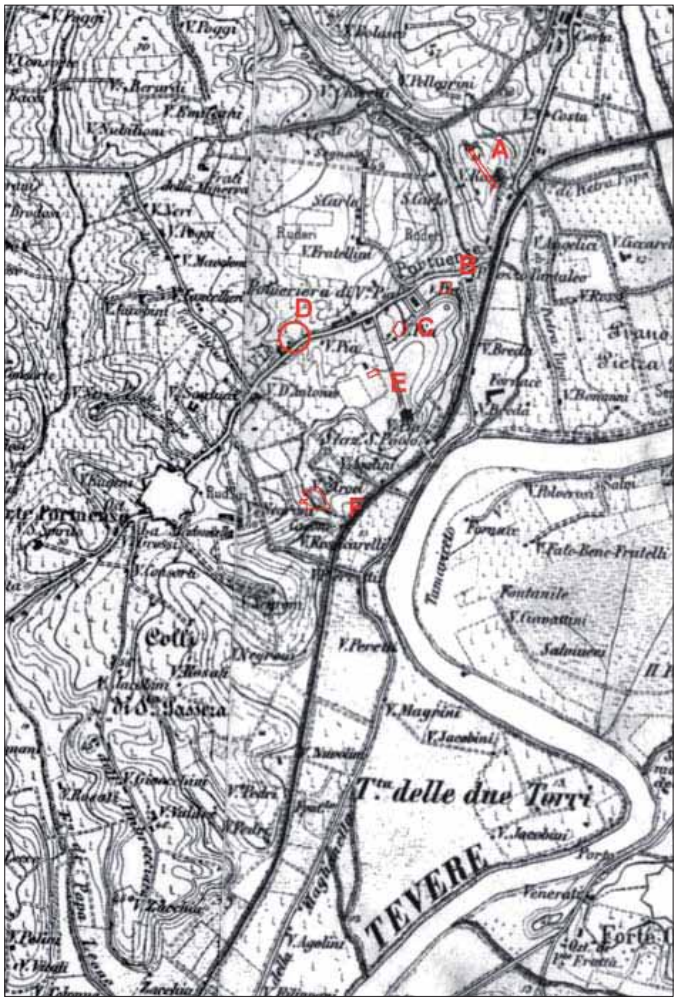


Figura 3 – Stralcio della unione delle Tavolette al 25.000 dell'I.G.M. Foglio 149 ISE-Maglianella e Foglio 150 IVSO Roma nella prima edizione del 1874. Si noti il primitivo tracciato della ferrovia per Civitavecchia. Le lettere e le aree in rosso indicano: A – area di scavo di Via Ricci Curbastro; B – area di via Portuense, ex Drugstore; C – area di scavo Necropoli di Vigna Pia; D – estensione del sistema di cavità sotto il Complesso Ospedaliero Forlanini; E – area di scavo via Greppi; F- area di scavo Largo Ruspoli

sulla valle del Tevere, con un versante fortemente acclive, fino ad essere lambita dal corso di questo fiume (*Fig.* 2). L'area collinare si eleva al di sopra della piana alluvionale tiberina (posta a 12-13 metri s.l.m.[1]) raggiungendo quote massime che vanno dai 46 metri s.l.m. nella zona meridionale ai 65 metri s.l.m. dalla zona di Forte Portuense verso nord (*Fig.* 3).

L'area presa in esame è caratterizzata dalla presenza di due lunghi e stretti fossi: il Fosso di Papa Leone, ad ovest e a sud, ed il Fosso di Pozzo Pantaleo a nord-nordest, che, prima della loro scomparsa a causa dell'urbanizzazione e relativo intubamento, convogliavano le loro acque in direzione circa nord-sud, dalla zona di Villa Doria-Pamphili e Via Aurelia Antica, per confluire nel Tevere, il primo di fronte all'attuale quartiere dell'EUR, il secondo poco a nord della chiesa di Santa Passera (*Fig.* 4). Un piccolo fosso, il Fosso la Passera, più una linea di impluvio che un corso d'acqua perenne, attraversa e divide in due la porzione meridionale dei Colli di Santa Passera: ad est il Colle Pian due Torri e ad ovest la dorsale di Via dell'Imbrecciato (*Fig.* 4). Osservando la porzione della Carta Topografica di Roma e suburbio (IGM, edizione del1924) riguardante l'area dei Colli di Santa Passera prima della sua urbanizzazione, saltano all'occhio le numerose cave presenti, alcune delle quali di dimensioni notevoli (*Fig.* 5). Si trattava essenzialmente di cave di tufo lionato (VSN1 nella carta geologica di *Fig.* 9), nella varietà cosiddetta "di Monteverde", sia a cielo aperto che in sotterraneo, ed in misura minore di piccole cave di ghiaia nelle estreme propaggini sud-orientali dell'area (*Fig.* 6). Questi segni dell'attività di cava sul territorio sono visibili e ben identificabili anche su documenti aerofotografici. Risultano infatti ben leggibili le tracce di questa attività in tutta la zona nord dei Colli di Santa Passera, sia su una foto aerea obliqua A.M. del 1938 (*Fig.* 6) che sulla foto aerea verticale della R.A.F. del gennaio 1944 (*Fig.* 7). In modo specifico per le aree descritte tali tracce sono visibili in via Ricci Curbastro (A nelle figure 2, 3, 4, 5) e nell'area archeologica di Vigna Pia (C nelle figure 2, 3, 4, 5), dove il fronte di cava è evidenziato da una rottura di pendio verso l'area più pianeggiante in direzione della via Portuense. Ancora più evidente ed estesa la situazione in Largo Ruspoli (F nelle figure 2, 3, 4, 5): dal confronto della foto aerea e dalla cartografia appare evidente la strutturazione e la regolarizzazione di un fronte naturale per l'estrazione del vasto affioramento di Tufo Lionato, che arrivava a lambire la sponda destra del Tevere. Il risultato finale è un ampio anfiteatro, i cui estremi sono costituiti dallo sperone sottostante Villa Pia e dalla collinetta ad est di Casale Negroni; quest'ultima forse lasciata appositamente forse per scopi militari di avvistamento e controllo del Tevere, o per qualche presenza storico-archeologica. La stessa area di via Portuense, ex Drugstore (B nelle figure 2, 3, 4, 5) risulta regolarizzata e i resti ritrovati nella posa dei cavi in fibre ottiche ne sono una riprova.

Osservando l'area come è attualmente, densamente urbanizzata sia nella sua porzione collinare che in quella della piana alluvionale tiberina (*Fig.* 8), risulta difficile l'individuazione e la lettura di

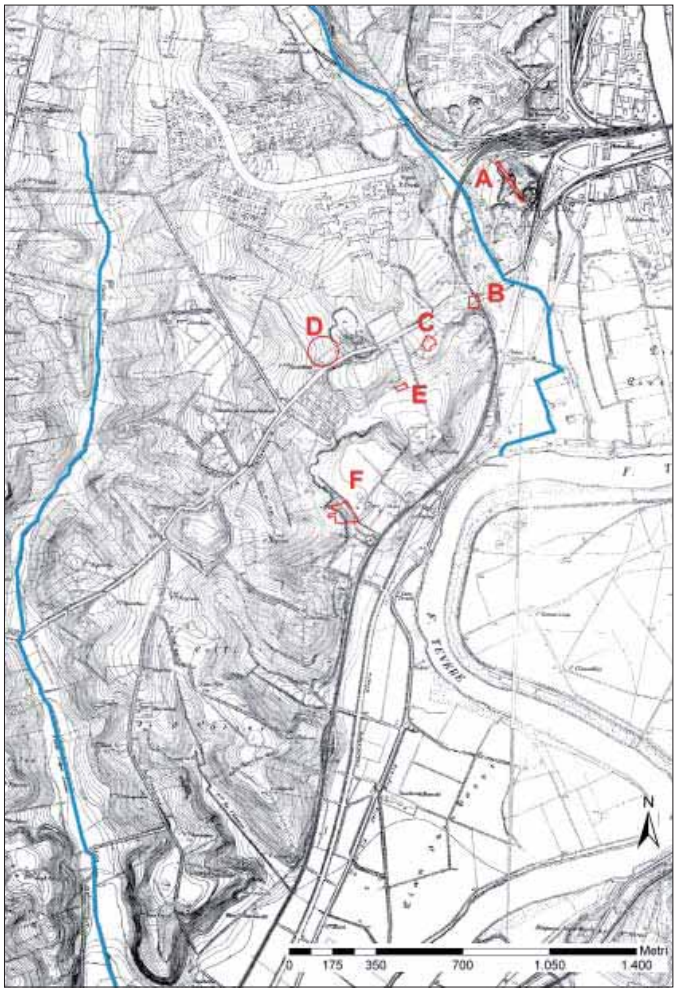


Figura 4 – Stralcio del Piano Topografico di Roma e Suburbio in scala 1:5000 e curve di livello al metro, edizione del 1924. Si noti il nuovo percorso della linea ferroviaria per Civitavecchia nel settore del Pozzo Pantaleo. Le lettere e le aree in rosso indicano: A – area di scavo di Via Ricci Curbastro; B – area di via Portuense, ex Drugstore; C – area di scavo Necropoli di Vigna Pia; D – estensione del sistema di cavità sotto il Complesso Ospedaliero Forlanini; E – area di scavo via Greppi; F- area di scavo Largo Ruspoli

1 Tali quote si riferiscono a quelle che aveva la piana alluvionale pre-urbanizzazione fino quasi alla II guerra mondiale

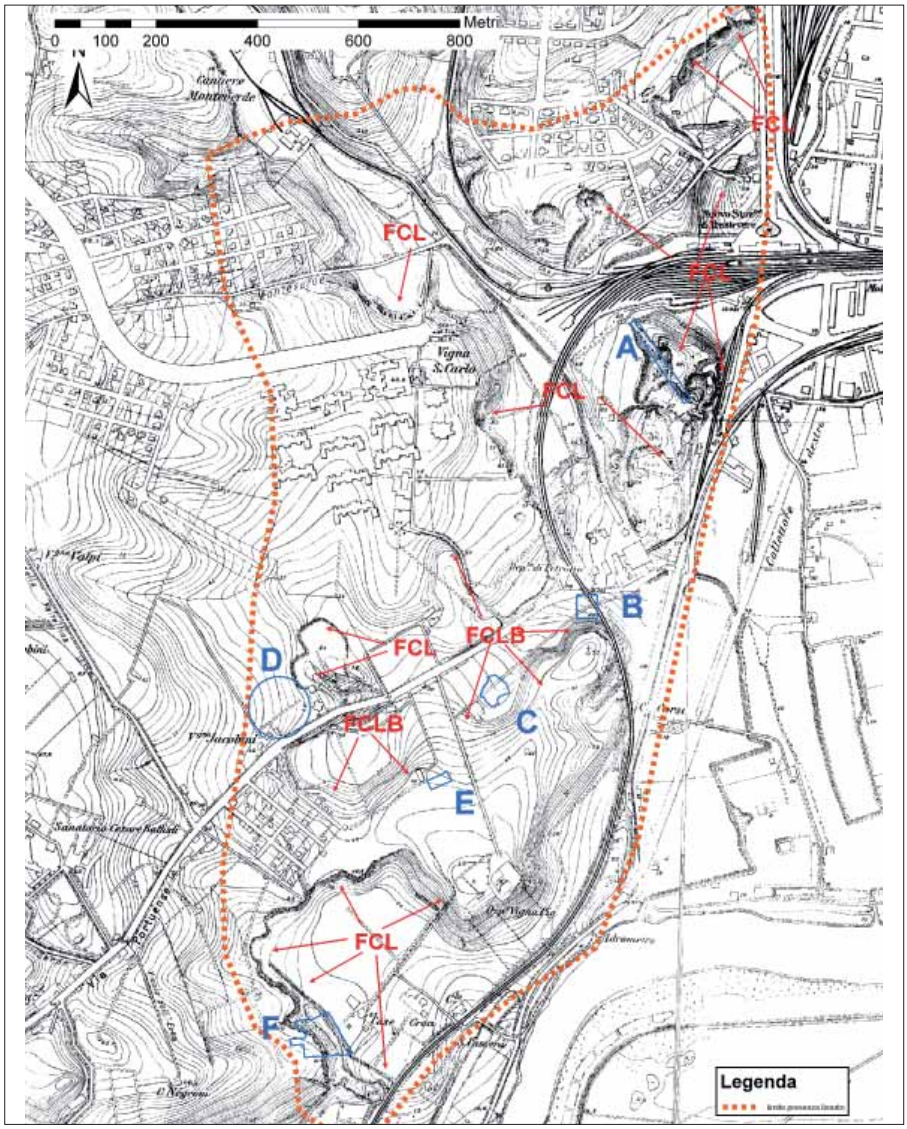


Figura 5 – Ingrandimento dello stralcio del Piano Topografico di Roma e Suburbio, edizione del 1924, relativamente all'area interessata dagli affioramenti del Tufo Lionato. La linea arancione tratteggiata indica il limite di presenza del Tufo Lionato. Le frecce rosse indicano rispettivamente: FCL – Fronte di cava di Tufo Lionato; FCLB – fronte di cava di Tufo Lionato sottoposto a bonifica (soprattutto presenti a sud della via Portuense). In blu sono indicate le stesse aree di scavo delle figure precedenti

tutta questa miriade di caratteri morfologici, ad eccezione di quello più eclatante di Largo Ruspoli.

GEOLOGIA

Nell'area in esame sono distinguibili chiaramente tre settori, anche cronologicamente distinti, dal più recente al più antico (*Fig.* 9):

- la pianura alluvionale del Tevere e le valli alluvionali dei suoi affluenti di destra idrografica, indicati con i toni del celeste;
- l'area a nord-est dei Colli di Santa Passera, caratterizzata dalla presenza in affioramento del Tufo lionato, indicata con il colore violetto, ricoperto da depositi fluviali sabbioso limosi, in colore avana;
- l'area occidentale, caratterizzata da depositi sedimentari sabbioso limosi e ghiaiosi, indicati con i toni del verde, ricoperti da depositi piroclastici provenienti dal Distretto Vulcanico Sabatino e in misura minore dal Distretto Vulcanico Albano, indicati con il marroncino chiaro ed il verde scuro.

La sezione geologica di *Fig.* 10 evidenzia i rapporti stratigrafici reciproci di tutti questi depositi.

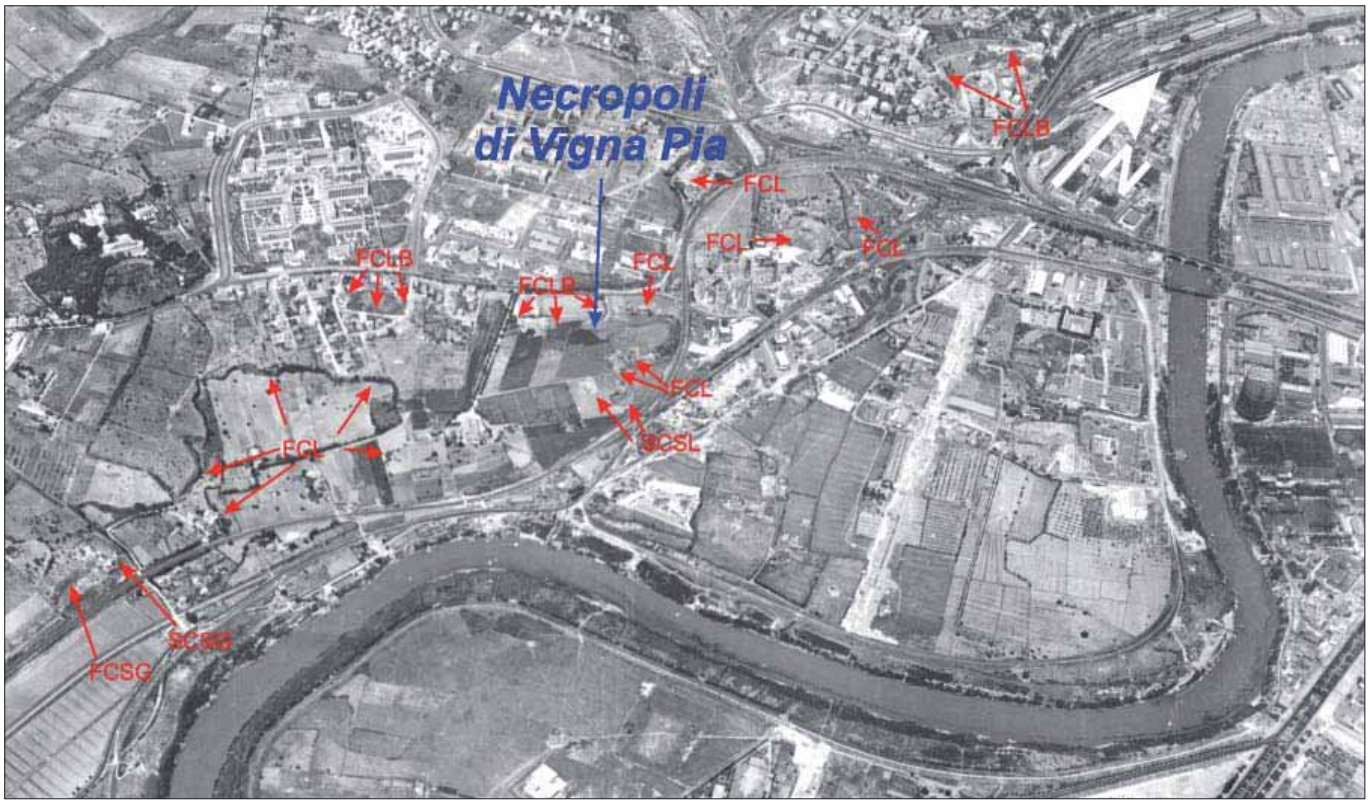


Figura 6 – Foto aerea a volo di uccello dell'A.M. del 1938, zona di Vigna Pia e della Magliana. Con le frecce rosse sono indicati rispettivamente: FCL – fronte di cava di Tufo Lionato; SCSL – sgrottamenti da cava in sotterraneo di Tufo Lionato; FCLB - fronte di cava di Tufo Lionato sottoposto a bonifica; FCSG – fronte di cava in sotterraneo di ghiaia; SCSG – sgrottamenti da cava in sotterraneo di ghiaia. La freccia blu indica la posizione della Necropoli di Vigna Pia. Si ringrazia l'Aerofototeca Nazionale per la concessione dell'utilizzo della fotografia a scopi di studio

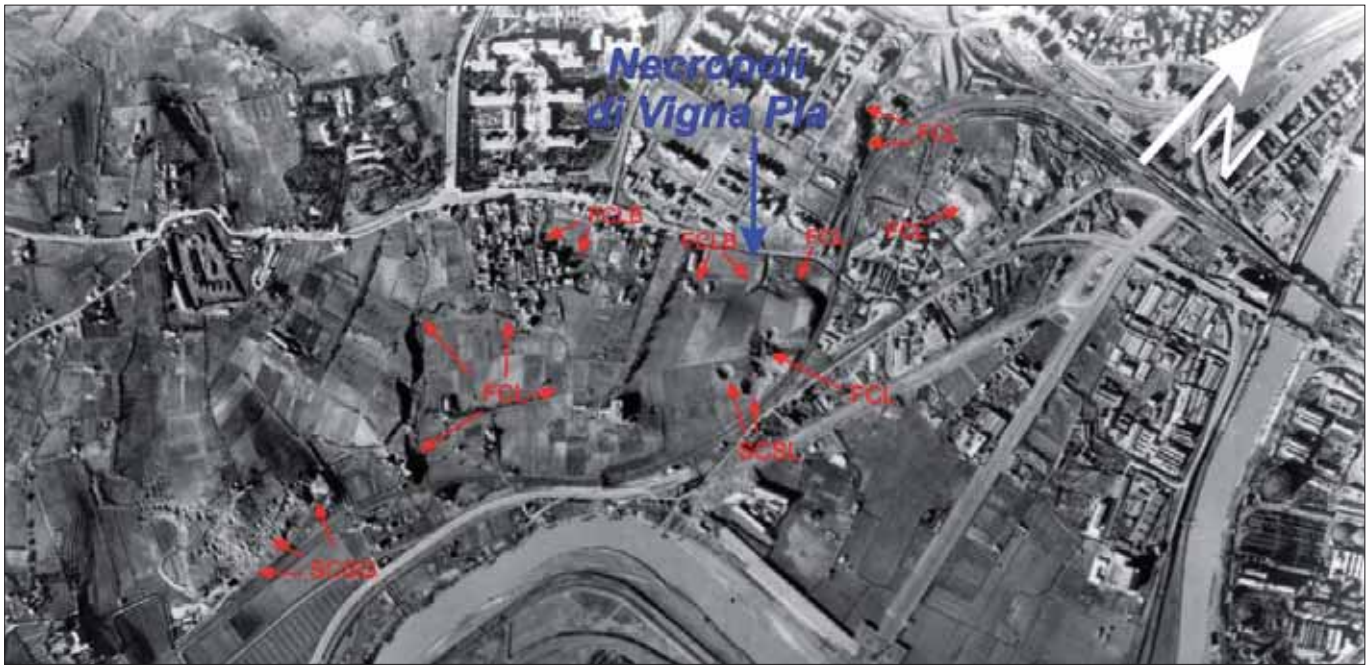


Figura 7 – Foto aerea azimutale volo R.A.F. del gennaio 1944, zona di Vigna Pia e della Magliana. Con le frecce rosse sono indicati rispettivamente: FCL – fronte di cava di Tufo Lionato; FCLB - fronte di cava di Tufo Lionato sottoposto a bonifica; SCSL – sgrottamenti da cava in sotterraneo di Tufo Lionato; SCSG – sgrottamenti da cava in sotterraneo di ghiaia. La freccia blu indica la posizione della Necropoli di Vigna Pia. Si ringrazia l'Aerofototeca Nazionale per la concessione dell'utilizzo della fotografia a scopi di studio



La evoluzione geologica dell'area, come vedremo, ha risentito fortemente della presenza, a nordovest e a sudest rispettivamente, dei due distretti vulcanici dei Monti Sabatini e dei Colli Albani (vedi Figg. 1 e 11).

La emersione dell'area, durante il Pleistocene inferiore, ed il suo allontanamento dal dominio marino che aveva determinato i depositi limoso argillosi e sabbiosi delle sequenze Plioceniche (MVA-Formazione di Monte Vaticano, argille grigie e sabbie, in giallo nella sezione geologica di *Fig.* 10) e del Pleistocene inferiore (MTM -Formazione di Monte Mario, sabbie con intercalazioni di arenarie e di panchina bioclastica, a destra in verde chiaro nella sezione di *Fig.* 10), produce una paleogeografia di tipo spiaggia sommersa. In questo contesto, durante il Pleistocene inferiore-medio avviene la deposizione della Formazione di Ponte Galeria (PGL in *Fig.* 9), caratterizzata da una varietà di ambienti, cui corrispondono facies deposizionali, variabili nel tempo e nello spazio, che vanno dalle ghiaie di ambiente fluviale (PGL1 in fig.10), alle ghiaie fluvio-deltizie (PGL3a in *Fig.* 10), alle ghiaie di spiaggia (PGLa in *Fig.* 10), alle argille grigie e limi di laguna (PGL3b in *Fig.* 10), alle sabbie e sabbie limose di ambiente eolico e piana costiera (PGL3c in *Fig.* 10).

Intorno ai 600.000 anni fa ha inizio l'attività vulcanica in entrambi i Distretti prossimi alla area in esame (*Fig.* 11), che producono

Figura 8 – Fotogrammetria SARA-NISTRI del 1991. Notare la intensa urbanizzazione che ha ormai modificato completamente l'aspetto della zona in esame. Le lettere e le aree in rosso indicano: A – area di scavo di Via Ricci Curbastro; B – area di via Portuense, ex Drugstore; C – area di scavo Necropoli di Vigna Pia; D – estensione del sistema di cavità sotto il Complesso Ospedaliero Forlanini; E – area di scavo via Greppi; F- area di scavo Largo Ruspoli

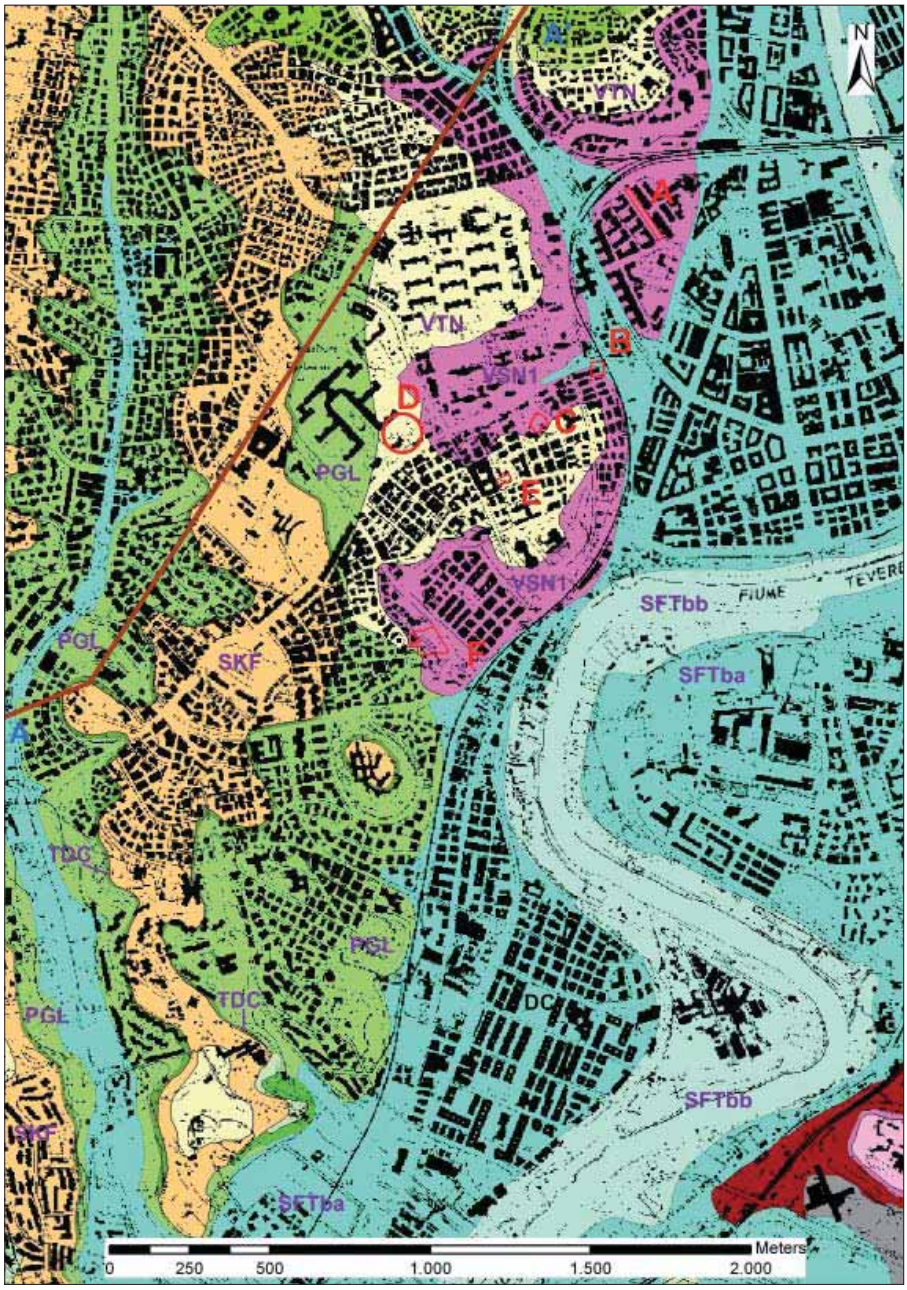


Figura 9 – Carta geologica dell'area dei Colli di Vigna Pia (da Funiciello, Giordano 2008a). Per la simbologia vedi testo

delle eruzioni a carattere esplosivo parossistico con la messa in posto di depositi da colata piroclastica e/o di ricaduta. Il primo deposito vulcanico nell'area in esame è l'Unità di Tor de' Cenci (TDC in figg. 9 e 10), deposito grigio-giallastro cineritico da colata piroclastica proveniente dai Colli Albani e datato a circa 561.000 anni fa (KARNER et al., 2001). Dopo questo deposito, prende localmente il sopravvento il Distretto Vulcanico Sabatino con la messa in posto dei Tufi stratificati varicolori di Sacrofano (SKF in figg. 9 e 10), una alternanza di depositi lapillosi e cineritici intercalati a livelli rimaneggiati e a orizzonti pedogenizzati.

Un forte abbassamento del livello del mare (ben oltre 50 metri), connesso ad una fase glaciale e culminato intorno ai 360.000 anni fa, produce una forte incisione del reticolo idrografico e una modifica notevole della morfologia locale. E' in questo contesto che avviene una grande eruzione esplosiva parossistica dal Distretto dei Colli Albani, che provoca la messa in posto di estesi depositi da colata piroclastica, la Formazione di Villa Senni. Questa Formazione comprende due principali unità deposizionali con caratteristiche differenti, delle quali la sottostante, il Tufo Lionato (VSN1 in figg. 9 e 10) arriva ad interessare la nostra area, colmando la valle del Paleotevere, precedentemente formatasi, con spessori superiori ai 20 metri (età radiometrica compresa tra i 338.000 anni ed i 357.000 anni, (RADICATI DI BROZOLO et al., 1981; KARNER et al., 2001). Una successiva fase deposizionale, connessa con una risalita del livello del mare, produce depositi alluvionali che vanno dalle ghiaie in basso a sabbie e limi in alto (Formazione di Vitinia – VTN in figg. 9 e 10) poggianti al di sopra del precedente deposito vulcanico, il Tufo Lionato. A questo

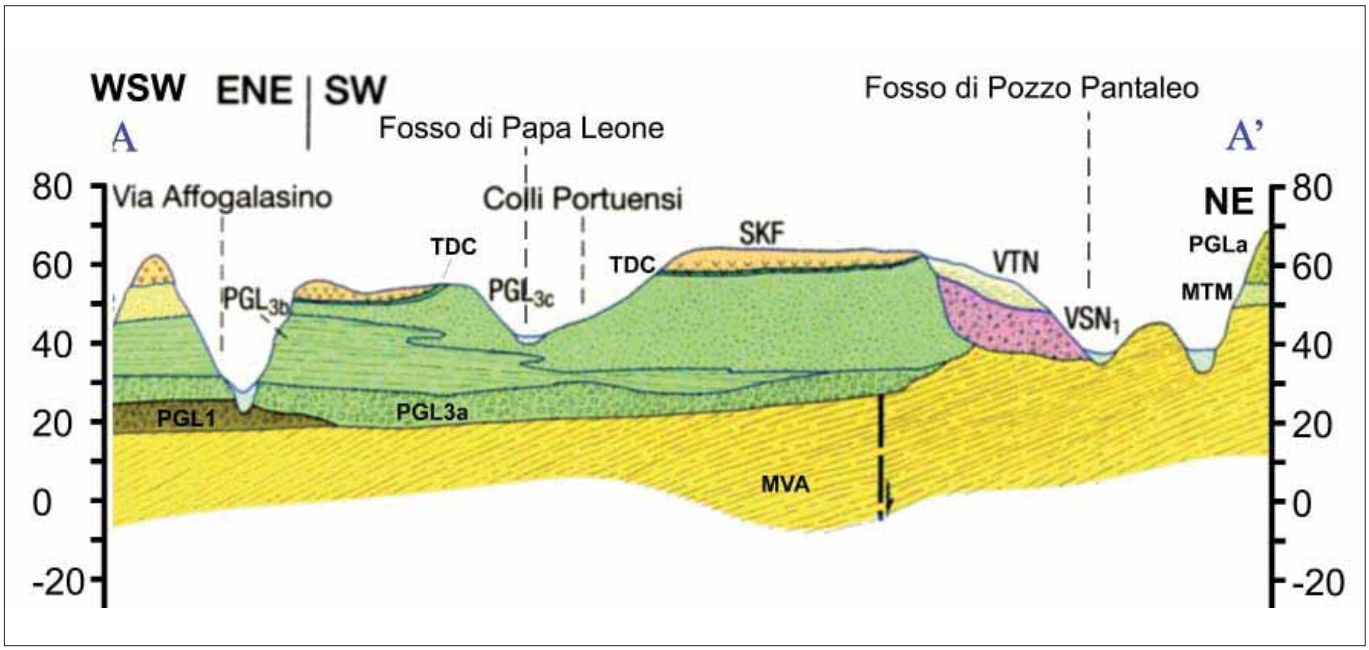


Figura 10 – Sezione geologica A-A' dell'area dei Colli di Vigna Pia (da A.P.A.T.2008), per la traccia vedi Figura 9.

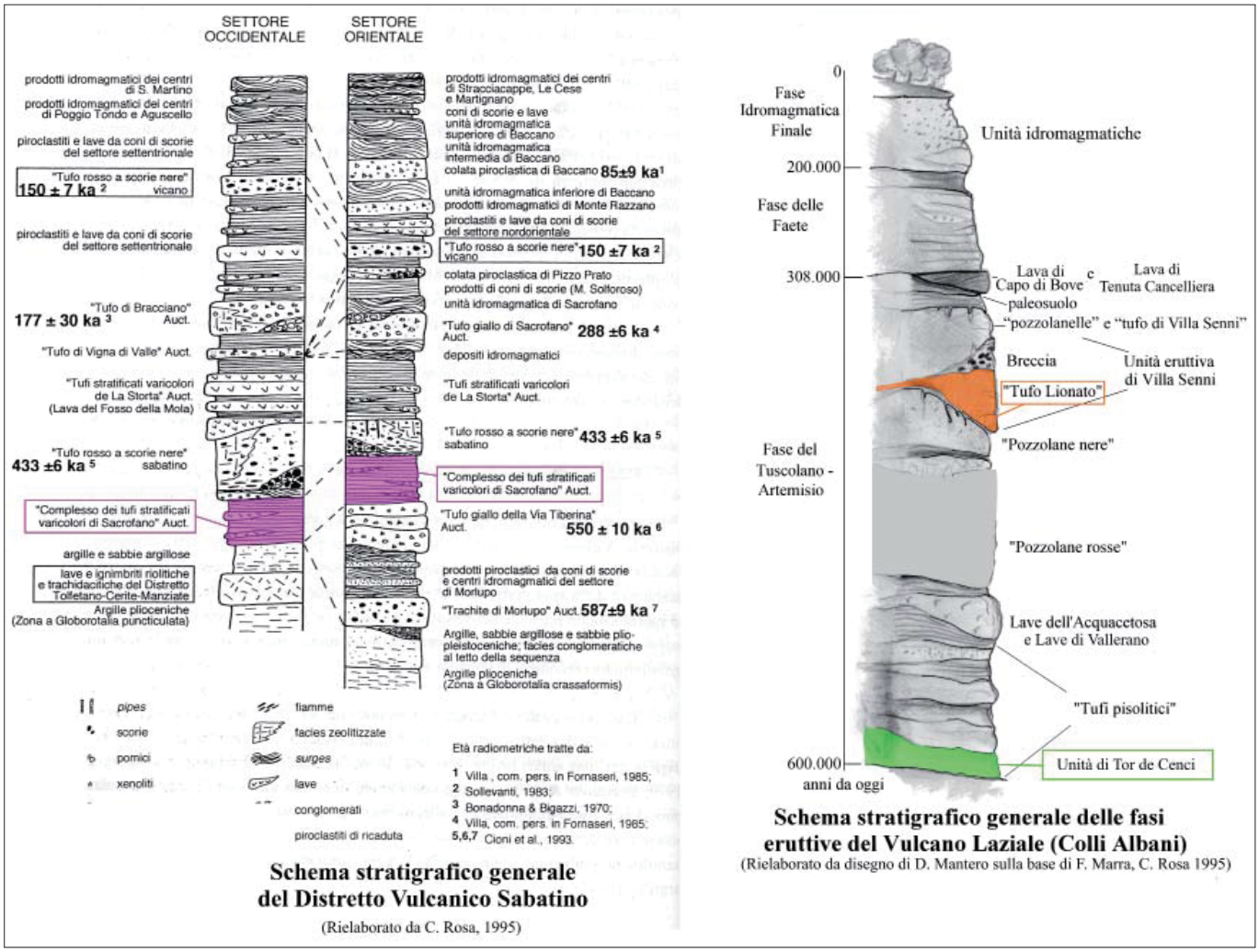


Figura 11 – Schemi stratigrafici generali dei Distretti Vulcanici Sabatino e Albano. Rielaborazione C. Rosa

punto subentra, in un arco temporale di circa 220.000 anni, una fase di sollevamento di almeno trenta metri di tutta la Campagna Romana, che porta il tetto dei depositi alluvionali, precedentemente depostisi, a circa 45 metri s.l.m.

Un ennesimo abbassamento del livello del mare, connesso con l'ultima fase glaciale würmiana, di circa 120 metri, e culminato intorno ai 19.000 anni fa, produce una ennesima trasformazione del paesaggio della campagna romana con una forte reincisione del reticolo idrografico ormai simile a quello attuale (la valle tiberina viene incisa sino a circa – 40 metri s.l.m.). Il successivo innalzamento del livello del mare produce un colmamento delle valli precedentemente incise con depositi alluvionali limoso-argillosi

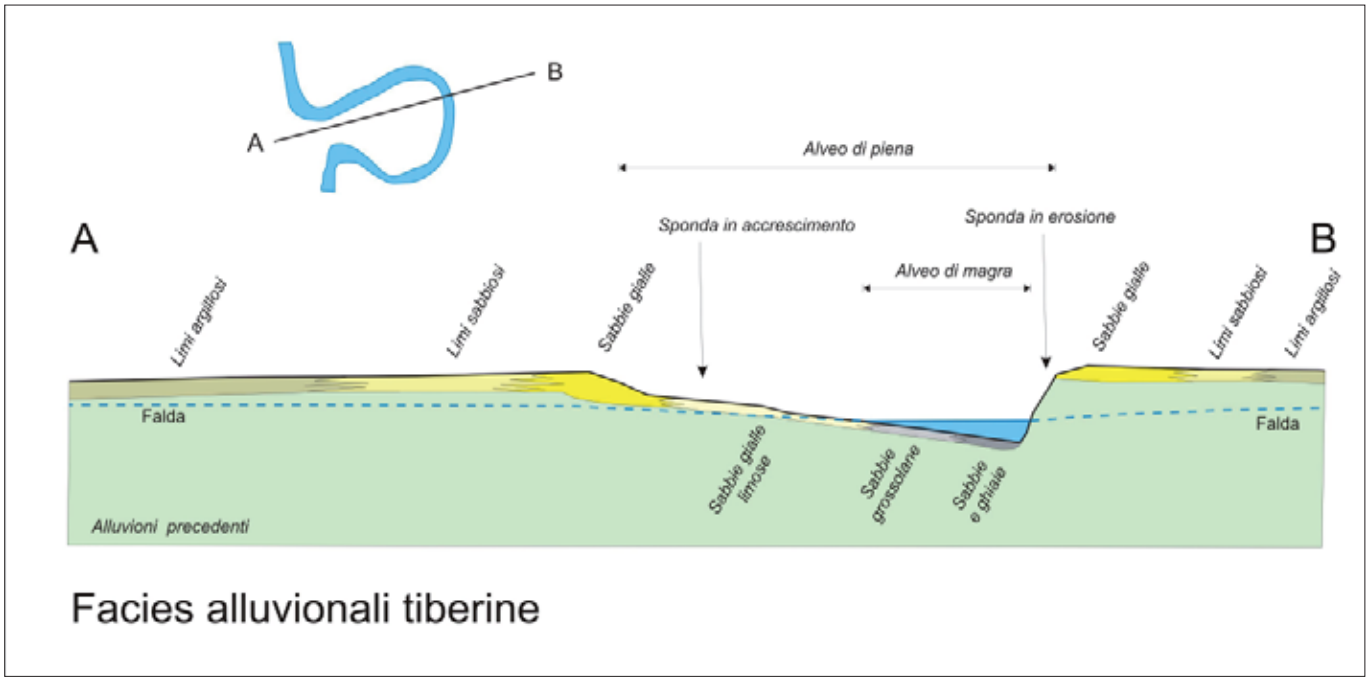


Figura 12 – Modello di facies deposizionali dei diversi tipi di depositi alluvionali del Fiume Tevere. Elaborazione grafica C. Rosa

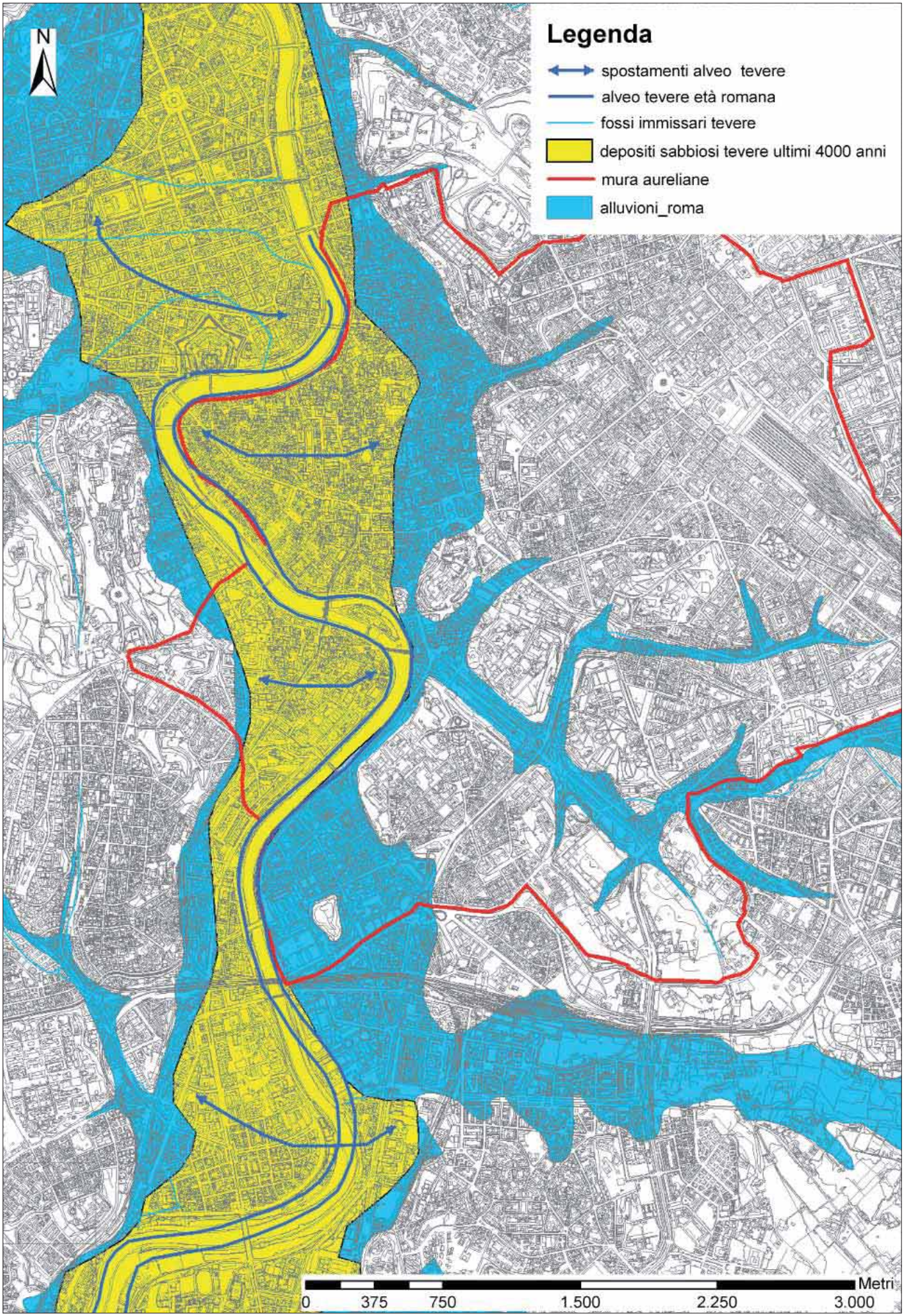


Figura 13 – Spostamenti dell'alveo del Fiume Tevere nella porzione urbana della valle tiberina negli ultimi 4000 anni. Elaborazione grafica R. Matteucci – C. Rosa

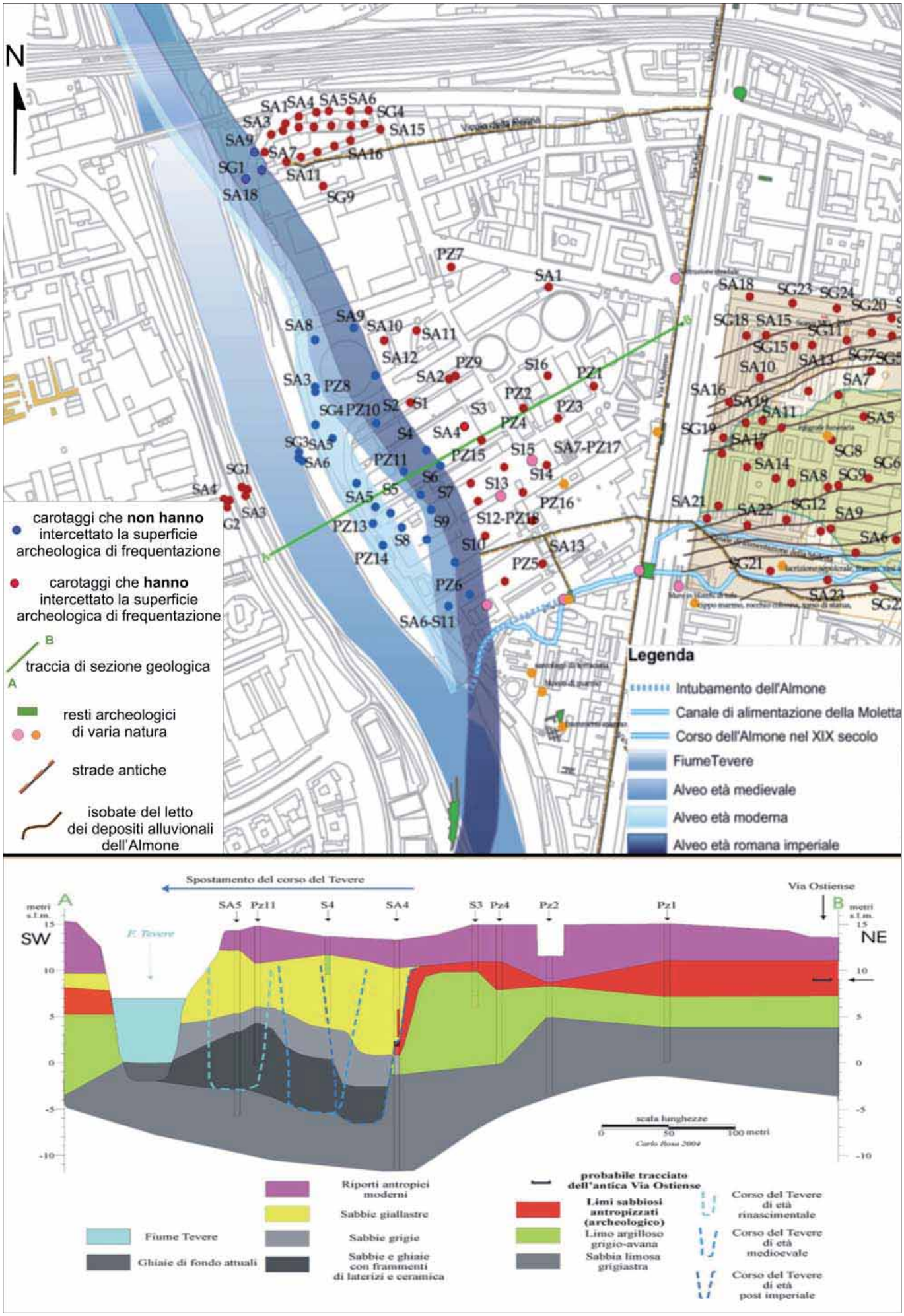


Figura 14 – Pianta (in alto) e sezione ricostruttiva (in basso) dello spostamento dell'alveo del Fiume Tevere nell'area Ostiense negli ultimi 2000 anni

e sabbiosi, localmente ghiaiosi o torbosi, che costituiscono i depositi recenti ed attuali del Fiume Tevere e dei suoi affluenti (SFTba e SFTbb in *Fig.* 9).

Negli ultimi venti anni, la disponibilità di una numerosa quantità di dati di perforazioni meccaniche a carotaggio continuo, per bonifica di aree industriali dismesse e per finalità di indagini archeologiche preventive, ha consentito al Servizio Geologico-Cartografico e di Geoarcheologia, della Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma (ora SSABAP), la ricostruzione della evoluzione tardo olocenica della piana alluvionale tiberina e dello stesso corso del Fiume Tevere. In *Fig.* 12 è presentata la ricostruzione, effettuata in base ai numerosi dati acquisiti, della distribuzione delle diverse facies sedimentarie alluvionali del Fiume Tevere. In base a questo modello di facies è stato possibile ricostruire, verificando la presenza di depositi grossolani, sedimentabili solo in prossimità dell'alveo, lo spostamento subito dal corso del Tevere negli ultimi 5000 anni nell'area urbana di Roma (*Fig.* 13).

Un esempio di dettaglio di questo studio tuttora in corso, è la ricostruzione degli spostamenti del Tevere all'altezza del Gasometro nel quartiere Ostiense (MATTEUCCI et al., 2002, 2009). Per questo settore della piana alluvionale tiberina è stato possibile verificare direttamente, tramite i numerosissimi dati di carotaggio, non solo l'entità dello spostamento dell'alveo del Tevere ma anche i tempi di evoluzione di questo spostamento, che vanno dall'età imperiale sino a quella moderna, grazie alla analisi archeologiche dei frammenti ceramici e di laterizi presenti nei vari depositi di alveo rinvenuti in posizioni e profondità differenti (*Fig.* 14).

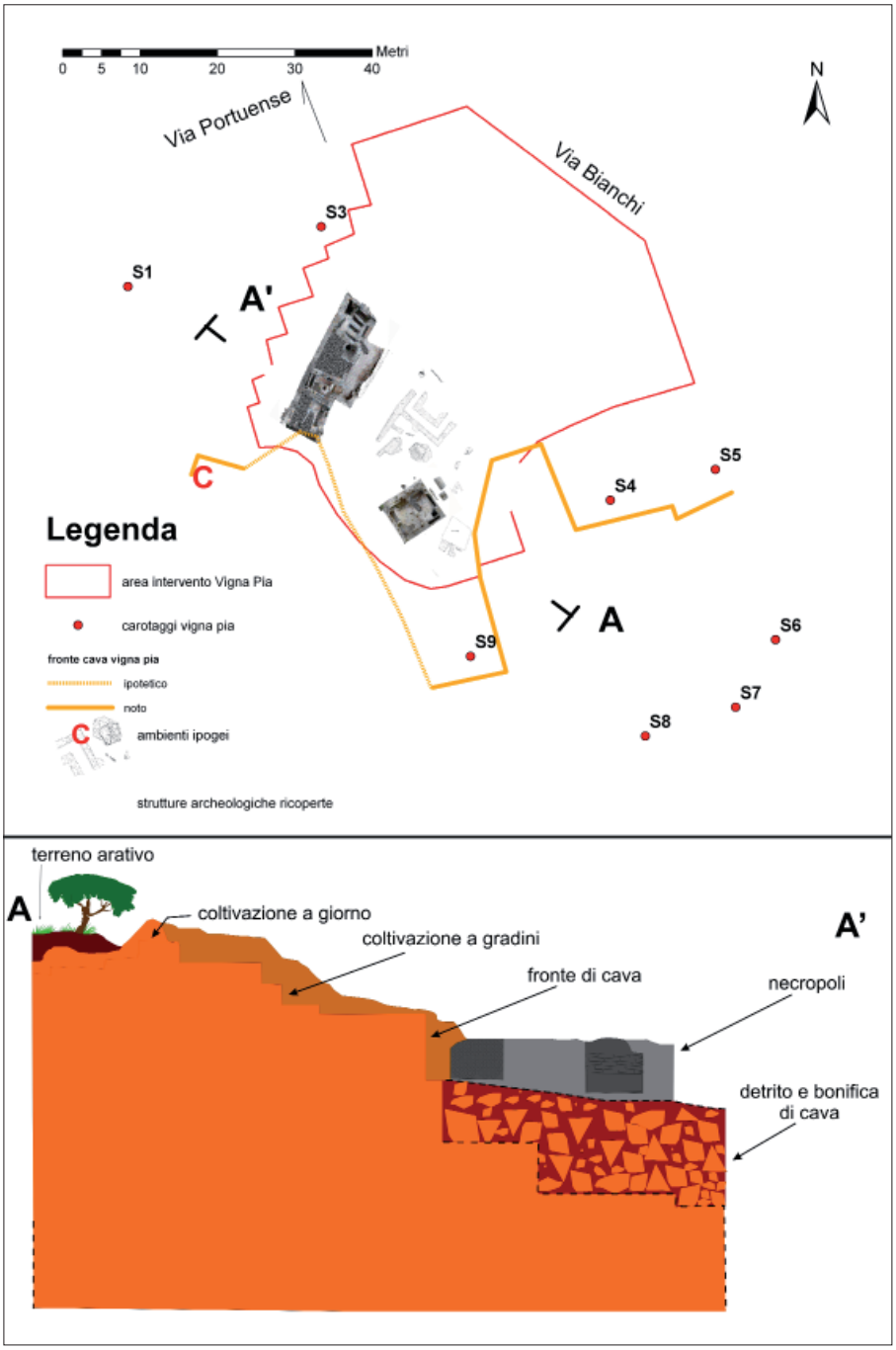


Figura 15 – Pianta dell'area di intervento archeologico a Vigna Pia (in alto) e sezione schematica della cava romana di tufo lionato (in basso)

RIUSO E RIQUALIFICAZIONE DI UNA CAVA

In località Vigna Pia sulla via Portuense, sono state rinvenute alcune strutture sepolcrali pertinenti all'antica necropoli che si estendeva lungo l'antica via *Portuensis*: a partire infatti dall'età imperiale, i romani seppellirono i loro morti lungo la strada fuori città, riutilizzando in parte le cave presenti in questa area fin dall'età repubblicana (CIANFRIGLIA et al., 2002; GROSSI & MELLACE, 2006). Tale necropoli costituisce un esempio ed una testimonianza di "riuso" e di riqualificazione di un'area di cava per l'estrazione del Tufo Lionato. Nel settore meridionale dell'area archeologica in questione è stato infatti individuato un fronte della cava di età romana (Figg.15-16), sulle pareti della quale si vedevano evidenti segni delle varie fasi di lavorazione lasciati dal cavapietre per l'estrazione del materiale e tracce delle impronte dei blocchi estratti (Figg.17-18). Per una migliore identificazione e definizione dello sviluppo dell'area estrattiva, è stata programmata ed eseguita una compagna di 9 sondaggi geognostici (Fig.15)[2], che hanno permesso di ricostruire l'andamento del piano di cava o quantomeno i livelli di affioramento del tufo. Questa campagna ha evidenziando una grande variabilità della quota di affioramento del Tufo Lionato, intercettato, in un'area così limitata, ad una profondità dal p.d.c.[3] variabile tra 5 e 12 metri, mostrando una morfologia irregolare con notevole differenza di spessori e di qualità nella natura del riempimento, costituito da pezzami di tufo e materiale ciottoloso e ghiaioso di varia natura (scapoli lavici e frammenti di laterizio) frammisti ad una matrice limoso-argillosa. La differenziazione e l'eterogeneità in senso planimetrico e verticale del reinterro hanno confermano la presenza di un'attività estrattiva con la coltivazione a "cielo aperto" o "a giorno", in cui l'estrazione avveniva procedendo per gradini, sino ad arrivare al livello più basso ai piedi del pendio naturale. L'operazione proseguiva tracciando in verticale uno o più fronti di escavazione, procedendo per altezze pari a quelle delle *assise* (generalmente compresa per le cave romane tra 60-65 cm.), corrispondente alle dimensioni dei blocchi: 2 piedi romani. Ricavate le assise, restava una falesia verticale, il fronte di cava, nella quale la traccia di queste assise si legge molto chiaramente (Figg. 16-17-18). La discesa si

2 Documentazione Archivio S.S.B.A.R. n. 3641/3050.

3 Piano di campagna.



Figura 16 – Fotomosaico del fronte di cava romana di tufo lionato presso la Necropoli di Vigna Pia



Figura 17 – Particolare del fronte di cava romana di tufo lionato presso la Necropoli di Vigna Pia. Nella parte destra sono indicati con tratto nero i segni di cava lasciati dagli antichi scalpellini



Figura 18 – Particolare del fronte di cava romana di tufo lionato presso la Necropoli di Vigna Pia. Sono visibili i segni di cava

fermava o per l'esaurimento del materiale o per l'incontro di una falda freatica o per la difficoltà di far risalire i materiali, lasciando le caratteristiche scarpate degradanti spesso riempite di terra e di scaglioni di tufo di risulta, che ne permettevano il riutilizzo per la coltivazione agricola o, come nel nostro caso, per insediamenti necropolari (per un'accurata ed esauriente descrizione delle tecniche di estrazione si rimanda a LUGLI, 1957; VENTRIGLIA, 1971, 2002; ADAM,1989; ROCKWEL, 1989; GIULIANI, 1990; FEDERICI SANTORO, 1997).

È ipotizzabile che l'abbandono di questa porzione della cava sia precedente all'impianto della necropoli, dal momento che su una parete del fronte si appoggiano delle strutture sepolcrali, attualmente ricoperte come la cava stessa (*Fig.* 15); tali strutture sono state datate a partire dalla fine del I sec. d.C., confermando quanto è stato detto sopra. In un'iscrizione rinvenuta in questa zona, presso il bivio delle vie Portuense e Magliana, un padre raccomanda tuttavia ai cavatori di tenersi a distanza dal sepolcro della figlia e di prestare attenzione, facendo supporre che una certa attività estrattiva dovesse continuare nella zona[4].

4 Lo stesso Lanciani dice: "*Io non saprei decidere se le cave abbiano preceduto i sepolcri, o i sepolcri le cave, ovvero se gli uni e le altre debbano credersi contemporanei. Forse quest'ultima supposizione è la vera. In una iscrizione trovata nel 1886 fra le cave di Monte Verde, un Aurelio Niceta, temendo che gli esercenti di quelle non avessero a recar danno al sepolcro della figliuola Elianete, scrive sull'epitaffio: Fossor vide ne fodias. Deus magnu(s) oc(u)lu(m h)abet. Vide et tu filios (habes)*" (R. Lanciani-NSc. (1888), p. 136 ss; NSc., 1886, p.454; Bull. Com., 1886, XII, p. 413). In tarda età romana infine nelle aree di cava vengono realizzate anche Catacombe, come quella Ebraica di Monteverde, segnalata presso la circonvallazione Gianicolense e quella Cristiana di Ponziano, presente sotto la via Poerio sempre a Monteverde.



Figura 19 – Cunicolo parzialmente interrato rinvenuto nel fronte di cava della Necropoli di Vigna Pia nel punto indicato con C in fig. 15

ti, due dei quali sicuramente comunicanti tra loro, uno solo è stato parzialmente esplorato (Fig.19)[6]. Non è stato possibile valutare le dimensioni dei vani e l'eventuale prosecuzione in altre cavità contigue, a causa della mediocre stabilità delle cavità stesse e dalla presenza di potenti interri, dovuti a crolli e riempimenti artificiali, che li ostruivano. Sulle pareti rimangono consistenti porzioni di intonaco. Questa limitata esplorazione ha confermato il grande interesse archeologico delle cavità rinvenute, legate all'antica presenza di necropoli e di cave.

interrato, è stata identificata un'area con piloni testimoni di cava e blocchi lavorati. In Largo Ruspoli (*Fig.* 21), dove la presenza di cave era stata riscontrata anche dai sondaggi geognostici, le indagini preventive per la costruzione di un parcheggio hanno individuato un ampio sistema caveale, attivo dall'epoca romana fino ad quella moderna, (*Fig.* 22)[7], con un percorso/piano di camminamento funzionale al trasporto del materiale estratto, che si dirigeva verso il Tevere, tagliando ed isolando una collinetta. Il trasporto del materiale per via fluviale è ancora attivo agli inizi del 1900,



Figura 20 - Cantiere parcheggio in Via Ricci Curbastro, con evidenti i testimoni di cava e blocchi lavorati di tufo lionato. La vista è verso sud-est

Nella parte occidentale dell'area sono stati identificati inoltre tre ambienti ipogei[5] (CIANFRIGLIA *et al.*, 2002, pag. 353), aperti sul fianco di una scarpata, probabile prosecuzione del fronte di cava, ulteriormente tagliato in epoca moderna (*Fig.* 15, C). Di tali ambien-

GEOLOGIA ED INSEDIAMENTO. I SEGNI DELL'UOMO

L'interesse verso questi nuovi dati è legato all'importanza storico-ambientale propria dell'attività estrattiva. Questa è un elemento di cerniera tra l'ambiente naturale e lo spazio antropizzato. Infatti, le antiche cave da un lato sono un bene culturale, con le loro manifestazioni materiali e con le espressioni di tecnologie non più in uso, e dall'altro, con l'utilizzazione delle risorse naturali, hanno costituito e lasciato fin dall'antichità, tracce profonde sul paesaggio, determinando altresì la vocazione e lo sviluppo degli insediamenti.

In via Ricci Curbastro (*Fig.* 20), in seguito ai lavori per la costruzione di un parcheggio per le aree del Vicolo degli Inglesi e di via di Affogalasino, situate poco più a sud della necropoli di Vigna Pia (DE MARCHI, 1907). Grotte e cunicoli si vedono nella parte meridionale del fronte della parete, ora riutilizzati anche ad abitazione.

I testimoni di cava ritrovati per la posa dei cavi a fibre ottiche in via Portuense 319[8], davanti all'ex Drugstore, presentano chiari segni per l'estrazione dei blocchi, da cui si possono ricavarne le dimensioni di m.1 x 0.90 e 1.80 x 0.90 (*Figg.* 23-24). È probabile che questi testimoni siano riferibili come dice il Lanciani alla "*vasta latomia di tufa, degli ultimi tempi della repubblica e dei primi*

5 Inoltre nel comprensorio di Vigna Pia, e precisamente tra via di Vigna Pia e la ferrovia (a circa 200 metri dalla via Portuense), sono state individuate cavità sotterranee, che mostrano come le coltivazioni venivano eseguite con il sistema dei pilastri abbandonati corti. La pianta cui si fa riferimento non permette la loro precisa ubicazione, mentre la sezione mostra chiaramente che queste hanno interessato l'estrazione del Tufo Lionato (VENTRIGLIA, 1971, pag. 122; VENTRIGLIA, 2002, pag. 234). La contemporanea presenza di cave a cielo aperto e in sotterraneo è abbastanza diffusa nell'area romana: CRESCENZI *et al.*, 1995, MATTEUCCI & SEBASTIANI, 2000; CALCATERRA *et al.*, 2001; VENTRIGLIA, 2002.

6 L'indagine speleologica è stata effettuata il 27 marzo 2001, in base alla convenzione esistente fra la S.S.B.A.R. e il G.S.-C.A.I. di Roma

7 Documentazione Archivio S.S.B.A.R. n. 3641/2609.

8 Documentazione Archivio S.S.B.A.R. n. 3641/4.2028.

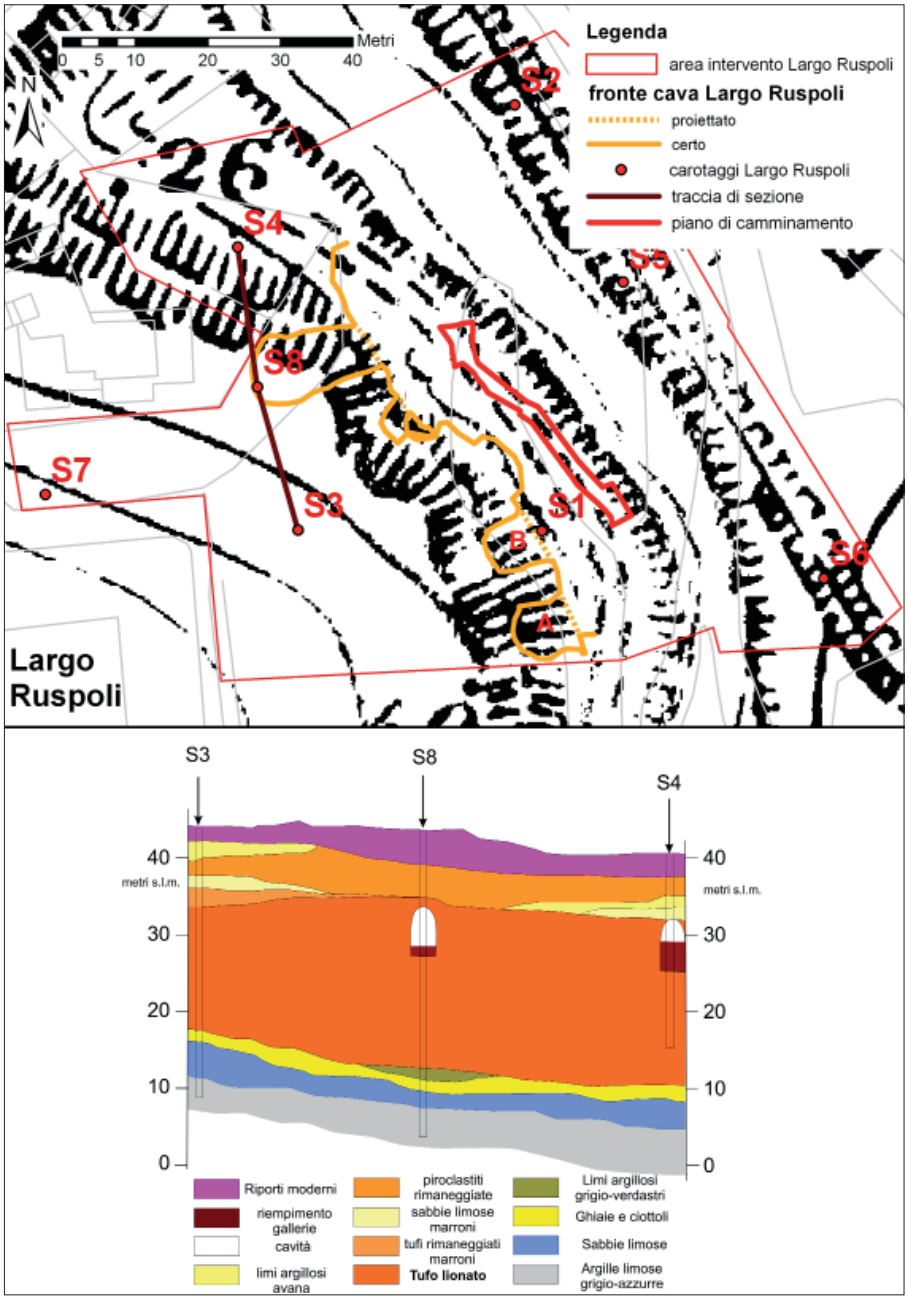


Figura 21 - Pianta dell'area di intervento archeologico a Largo Ruspoli (in alto) e sezione geologica passante per i carotaggi S3, S8, S4 (in basso)



Figura 22 - Fronte di cava di tufo lionato in zona Largo Ruspoli. Sono visibili le grotte A e B scavate nel tufo (vedi Figura 21 per la localizzazione)

dell'impero, che si viene discoprendo nel terreno appartenente ai fratelli Moroni, sito fra il bivio della Portuense e della Campana, e la polveriera di Monte Verde, in contrada "Pozzo Pantaleo". (*Fig.* 25)[9]. L'ipotesi proposta è localizzabile dall'esame della carta del 1884 (*Fig.* 3), in cui la Polveriera di Monte Verde è denominata Polveriera di Vigna Pia e l'area è situata sulla destra della via Portuense tra la necropoli di Vigna Pia e Pozzo Pantaleo.

Altre aree nella zona sono state interessate da questa attività estrattiva: tra le tante segnaliamo, sia per la vicinanza con la necropoli di Vigna Pia che per la sua imponenza, il sistema caveale sotto l'Ospedale Forlanini (VENTRIGLIA, 1971, 2002), in parte utilizzato nella prima metà del '900 come cucina del primitivo ospedale (1934). Tale impianto fa parte di un sistema molto più ampio che si sviluppa da via dei Grottoni (Magliana) in tutta la zona di Monteverde, ed è caratterizzato dalla presenza di un'area di circa 100 m quadrati, che trovandosi sotto il livello di falda, crea un "lago", la cui quota varia dai -3 ai -6 m dal piano di cava (Figg. 26)[10].

SFRUTTAMENTO E METODI TRADIZIONALI DI ESTRAZIONE

L'utilizzo delle rocce, nelle diverse forme presenti in natura, da parte delle comunità umane per i più svariati usi è una pratica antichissima. Nel territorio di Roma l'origine della maggior parte delle cavità si può ascrivere al periodo etrusco-romano, durante il quale furono realizzate opere idrauliche quali acquedotti e fognature scavati nel sottosuolo, imprese legate alla progressiva urbanizzazione del territorio e allo sfruttamento agricolo del suolo. Il grande sviluppo di Roma come città pose presto il problema dell'approvvigionamento dei materiali da costruzione. I materiali vulcanici (tufi, pozzolane, lave), per la loro facilità di lavorazione e/o qualità meccaniche, vennero utilizzati ad ampio spettro nell'attività edilizia fin dai periodi più antichi. Pertanto, i terreni vulcanici, ampiamente presenti nel territorio romano, furono intensamente sfruttati mediante cave in sotterraneo e a cielo aperto. Le esigenze religiose e cultuali, in genere, portarono a realizzare cimiteri ed ipogei di varia tipologia, molti dei quali riutilizzavano cave abbandonate. Il riuso di cave per fini diversi da quello originario ha illustri testimonianze nell'area romana, basti ricordare il Mausoleo di Cecilia Metella lungo l'Appia Antica la cui

9 Nel rapporto del prof. R.Lanciani, NSc.1888, pp.136-137, si evidenziano le tecniche di estrazione e la presenza di cunicoli di drenaggio.

10 Le notizie e le foto sono di M. Placidi dell'Associazione Sotterranei di Roma, che si ringrazia per la cortese collaborazione.



Figura 23 - Testimone di cava di Tufo lionato rinvenuto in un cantiere per la posa di cavi in fibra ottica di fronte all'ex-Drugstore in Via Portuense 319.



Figura 24 - Panoramica dei due testimoni di cava di Tufo lionato rinvenuti in un cantiere per la posa di cavi in fibra ottica di fronte all'ex-Drugstore in Via Portuense 319

costruzione ha colmato e obliterato una precedente cava a cielo aperto sul fronte della colata lavica di Capo di Bove, che a sua volta aveva, almeno parzialmente, tagliato gallerie di una ancor più antica cava di pozzolana (MATTEUCCI & SEBASTIANI, 2000).

Nel corso del Medioevo e dell'Età Moderna, fino ai primi decenni del '900, furono spesso riutilizzate cavità e cave di pozzolana, tufo, sabbia e ghiaia già esistenti, sia per le attività estrattive, sia per usi insediativi legati all'agricoltura e alla pastorizia o alla difesa. Nel corso della Seconda Guerra Mondiale, molte cavità esistenti all'interno della città vennero utilizzate come ricoveri e rifugi di emergenza, comandi e depositi militari. Attualmente l'uso "secondario", pur se marginale, delle cavità nate per l'estrazione del materiale, è ancora presente sotto forma di fungaie, depositi, autorimesse, stazzi (cfr. GIULIANI,1990).

I metodi di sfruttamento, in termine tecnico "coltivazione", tradizionali erano essenzialmente di due tipi, molto spesso applicati contemporaneamente nello stesso luogo: "a cielo aperto" e in sotterraneo, detto anche "per camere e pilastri". (Figg. 25, 27 e 28)

L'estrazione "a cielo aperto" era generalmente finalizzata a ricavare il cosiddetto pietrame a "pezzatura artificiale" (un aggiornato censimento delle cave si può reperire in: VENTRIGLIA, 1971, 2002; CRESCENZI et al., 1995; MAZZA et al., 2008; NISIO et al., 2017), attraverso la lavorazione di blocchi di cava (in massima parte tufo, lava, travertino). L'attività estrattiva procedeva per gradini fino alla base del livello da sfruttare, proseguendo con fronti di escavazione nelle pareti verticali. Specie quando la pietra, per la sua compattezza, era difficile da lavorare con lo scalpello, ma non esclusivamente in quei casi, i blocchi erano staccati attraverso l'inserimento, in strati e fessure naturali della roccia, di file di zeppe



Figura 25 - Disegno tratto da una nota del Lanciani su Notizie di Scavi del 1888 riguardante il rinvenimento di una cava di tufo lionato, a cielo aperto ed in sotterraneo, databile tra la fine repubblica e gli inizi l'impero romano, nella zona di Vigna Pia



Figura 26 – Laghetto sotterraneo presente all'interno delle vecchie cave in sotterraneo di tufo lionato esistenti sotto l'Ospedale Forlanini (D nelle Figg. 2,3,4,5,8,9)

di legno o metallo che venivano battute con colpi di mazzuolo (martello) facendo poi leva (*Fig.* 29). Spesso i cunei di legno venivano bagnati ripetutamente per farli gonfiare contribuendo così all'allargamento delle fessure e alla frantumazione della roccia. Il blocco veniva poi parzialmente regolarizzato con la sbozzatura, mentre direttamente nel cantiere veniva fatta la rifinitura. Questa, secondo Giuliani, produceva le schegge utilizzate nel caso di messa in opera di murature. È interessante a questo proposito notare come l'autore attribuisca l'enorme accumulo di scorie che si ritrova generalmente nelle antiche cave, alla scelta tendente ad evitare "..di trasportare questo materiale, preferendo utilizzare le schegge di risulta della seconda lavorazione fatta direttamente sul cantiere.." (GIULIANI, 1990, p. 147).

L'estrazione in cave sotterranee "per camere e pilastri" consisteva in un sistema di gallerie comunicanti tra loro (*Figg.* 22, 26), sovente disposte su diversi livelli sovrapposti, con le volte sostenute da pilastri, secondo norme ben precise, tese a garantire la stabilità sia delle gallerie stesse per consentirne lo sfruttamento, sia per i terreni sovrastanti per garantirne l'utilizzabilità successiva in sicurezza. Spesso la coltivazione di queste cave fu eseguita ignorando le norme richieste, soprattutto nelle fasi finali precedenti l'abbandono, quando si assottigliavano i pilastri e si approfondivano le gallerie per sfruttare al massimo la cava, causando fenomeni di dissesto e crolli. L'attività estrattiva, sia in antichità che in età moderna, fino alla prima metà degli anni '20 del secolo scorso, avveniva sia a cielo aperto che in sotterraneo. I fronti di cava a cielo aperto visibili nelle carte e nelle foto aeree, nella maggior parte dei casi erano accompagnati anche da gallerie in sotterraneo che si inoltravano nelle colline interessate. Gli sgrottamenti in superficie visibili nelle foto di *Fig.* 6 e 7 (SCSL per cave nel lionato e SCSG per cave sotterranee in ghiaie) sono la naturale evoluzione dei dissesti di queste gallerie sotterranee in seguito all'abbandono.

Il materiale più frequentemente estratto nell'area romana attraverso le cave in galleria è la pozzolana, una piroclastite presente in gran parte dell'area di Roma dove esistono moltissime cave. Le qualità della pozzolana, che prende il nome dalle antiche cave di Pozzuoli, sono conosciute nel mondo romano già in periodi molto antichi. Inizialmente usata come inerte al posto della sabbia, presto ne vengono apprezzate le

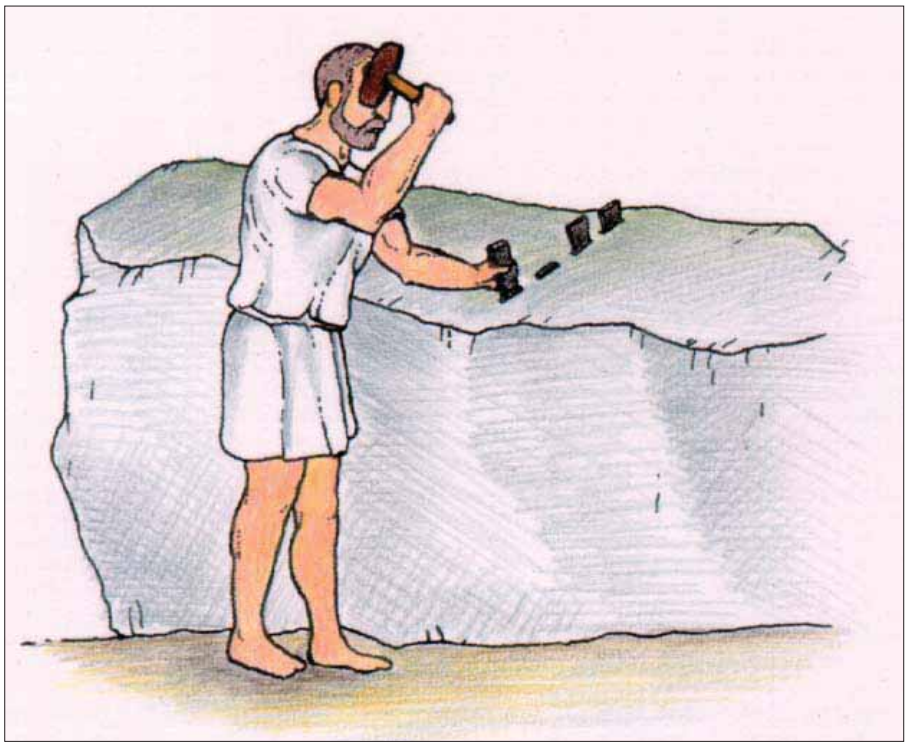


Figura 27 – Tecnica estrattiva di materiale lapideo tramite zeppe di legno o di metallo e uso del martello

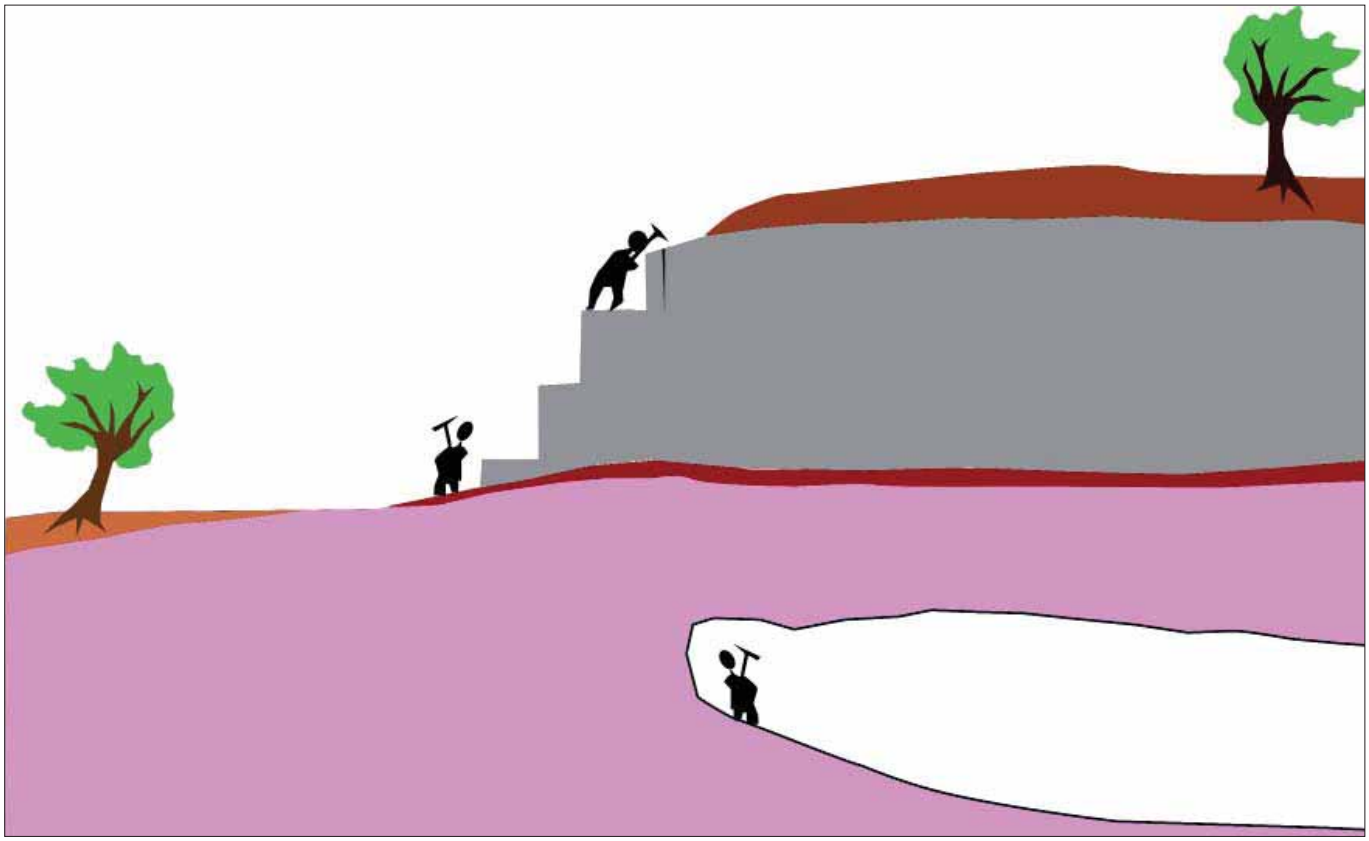


Figura 28 – Esempio di attività estrattive antiche, a cielo aperto (cava di blocchi di lava, in alto) e in sotterraneo (cava sotterranea di pozzolana, in basso)

qualità cementizie unita alla calce e la capacità di conferire alla malta proprietà idrauliche consentendo la realizzazione di strutture in acqua. A tal proposito Vitruvio scrive: "*…C'è una specie di sabbia…se mescolata con calce e caementa indurisce altrettanto bene sott'acqua come nelle costruzioni ordinarie…" (VITRUVIO, De Architectura II.VI 1).*

BIBLIOGRAFIA E ABBREVIAZIONI BIBLIOGRAFICHE

Adam J. P. (1989), *L'arte di costruire presso I Romani. Materiali e tecniche*, Milano, pp.23-60, Longanesi&C. Editore.

A.P.A.T. (2008), *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000*, Foglio 374, A.P.A.T.- Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Roma.

Aeronautica Militare (1938), *Foto altoobliqua della zona ostiense-marconi*. Aerofototeca Nazionale.

Calcaterra S., Cesi C., Eulilli V., Matteucci R., Sebastiani R. (2001), *Geoarcheologia. Le indagini*, in Filippi F. ed., Archeologia e Giubileo. I lavori del Ministero per i Beni e le Attività Culturali nel Lazio con i finanziamenti del Giubileo 2000, Roma, pp. 116-122.

Cianfriglia L., Grossi M.C., Mellace V.S. (2002), *Località Vigna Pia. Area necropolare (Municipio XV),* BCom 103, pp. 349-353.

Crescenzi R., Piro M., Vallesi R. (1995), *Le cavità sotterranee a Roma,* in Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia: La Geologia di Roma - Il Centro Storico, vol 50, Roma.

De Marchi L. (1907), *Elenco delle principali cave di pozzolana dei circondari di Roma e Velletri,* Ass. Ital.Mater.Costr., *R*oma.

Falzacappa G.F. (1839), *Carta topografica del suburbano di Roma desunta dalle mappe del nuovo censimento per ordine dell'E.mo e R.mo Principe Sig. Cardinale Gio. Francesco Falzacappa presidente del Censo nell'anno MDCCCXXXIX, Filippo Trojani inc., Roma.*

Federici W., Santoro M. (1997), *Antiche cave sotterranee sul colle Aventino (Roma): indagini, studi e rilievi eseguiti nella zona di via San Giosafat e valutazione delle caratteristiche di potenzialità di dissesto*, in Geologia Tecnica e Ambientale (3), pp. 63-78, Roma.

Funiciello R., Giordano G. (2008a), *La nuova carta geologica di Roma: litostratigrafia e organizzazione stratigrafica*, in Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia: La Geologia di Roma dal Centro Storico alla periferia. Roma.

Funiciello R., Giordano G. (2008b), *Note ilustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 374*; *A.P.A.T.*, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Roma.

Giuliani C.F. (1990), *L'edilizia nell'antichità*, La Nuova Italia Scientifica, Roma.

Grossi M.C., Mellace V.S. (2006), *Vigna Pia (Municipio XV). Area necropolare*, in M.A.Tomei (a cura di) Roma. Memorie del sottosuolo. Ritrovamenti archeologici 1980-2006, Roma, pp.505-510

Istituto Geografico Militare (1907-1924), *Piano topografico di Roma e suburbio*, Firenze.

Karner D.B., Marra F., Renne P.R. (2001), *The history of Monti Sabatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 107, pp. 185-219.

Lugli G. (1957), *La tecnica edilizia romana con particolare riguardo a Roma e Lazio,* Roma.

Marcelli M., Matteucci R., Sebastiani R. (2009), *Il sistema informativo territoriale per la gestione del patrimonio storico-archeologico del quartiere Ostiense-Marconi: uno strumento di ricerca e programmazione urbana,* in: Jolivet *et al.*, *Suburbium II: il suburbio di Roma dalla fine dell'età monarchica alla nascita del sistema delle ville, V-II secolo a.C.*, Collection de l'École française de Rome, 419, pp. 105-122, École française de Rome, Roma.

Matteucci R., Rosa C., Sebastiani R. (2002), *Via Ostiense, n. civico 72. Indagine geoarcheologica nell'area dell'Italgas (Municipio XI)*, BCom, 103, pp. 364-367, L'Erma di Bretscheider, Roma,

Matteucci R., Sebastiani R. (2000), *Geologia e insediamento. Il segno dell'uomo*, in Paris R. ed., Via Appia. Il Mausoleo di Cecilia Metella e il Castrum Caetani, Milano pp. 94-101

Mazza R., Capelli G., Lanzini M. (2008), *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma.* In Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia: La Geologia di Roma – Dal Centro Storico alla periferia. Roma.

Nisio S., Allevi M., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Lanzini M., Roma R., Paolucci R., Stranieri I., Succhiarelli C. (2017), *Carta delle cavità sotterranee di Roma,* ISPRA Roma.

Radicati di Brozolo F., Huneke J.C., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J. (1981), *39Ar/40Ar and Rb/Sr Age determinations on quaternary volcanic rocks*, Earth Planet. Sci. Letters, 53, pp. 445-456.

R.A.F. (1944), *Foto azimutale del settore Ostiense-Marconi del 16 gennaio 1944*. Aerofototeca Nazionale

Rockwell P. (1989), *Lavorare la pietra, Roma,* pp.169-178.

Sara Nistri (1991), *Carta Tecnica del Comune di Roma in scala 1:10.000, Fogli 23N-24N.*

Ventriglia U. (1971), *La geologia della città di Roma*, Roma.

Ventriglia U. (2002), G*eologia del territorio del Comune di Roma*, Roma.

Vitruvio Pollione M. *De Architectura*. Edizione a cura di P. Gros. Traduzione e commento di A. Corso e E. Romano, 2 voll., Torino, Einaudi 1997.

Le cavità sotterranee scomparse di Roma: la catacomba di San Felice scomparsa sulla Via Portuense

Giancarlo Ciotoli
CNR – IGAG Roma

Stefania Nisio
ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico D'Italia

The disappeared underground cavities of Rome: the lost catacomb of Saint Felix along Portuense road

Parole chiave (*key words*): Catacomba di San Felice (*Saint Felix catacomb*), Via Portuense (*Via Portuense*), Roma (*Rome*), Cavità sotterranee (*Underground cavities*), Catacombe scomparse(*lost catacombs*)

RIASSUNTO

Il cimitero di San Felice era una vasta necropoli sotterranea della antica Roma, III-V sec. AD. La catacomba cristiana era ubicata sulla Via Portuense, nel settore meridionale dell'area urbana romana. In particolare, tale cimitero si trovava, secondo le fonti storiche, al terzo miglio dell'antica Via Portuense.

Nel periodo medievale esso era una destinazione ben nota per il diffuso pellegrinaggio che si praticava alle spoglie del popolare Santo, tuttavia, in seguito, l'ingresso e l'ubicazione della catacomba si persero. L'accesso al cimitero era dalla Basilica di San Felice, anch'essa scomparsa.

Nel corso dei secoli, molti Autori, hanno invano cercato l'ingresso a tale catacomba e gli eventuali ruderi della chiesa.

Al fine di individuare con maggiore precisione una possibile ubicazione di tale vasta area cimiteriale, nonché del santuario, è stato compiuto uno studio del quartiere Portuense che mette a confronto i dati geologici con quelli storici, correlando le cavità riscontrate in sondaggio, con i sinkholes antropogenici, con l'analisi delle foto aeree e con i dati da satellite (PSIInSar).

I sinkholes antropogenici a Roma, infatti, sono strettamente connessi alla presenza della diffusa rete di cavità sotterranee (realizzata soprattutto nei terreni vulcanici), eredità dei più di 25 secoli di storia. Tale rete di gallerie sotterranee è spesso soggetta al crollo delle volte originando voragini in superficie, soprattutto lungo la rete stradale.

Questo fenomeno è diventato più frequente negli ultimi venti anni e rappresenta un rischio crescente per la città (Ciotoli *et al.* 2013, 2015 a). Recentemente sono stati condotti studi di suscettibilità, prendendo in considerazione alcuni fattori predisponenti (cioè geologici, morfologici, idrologici) che hanno permesso di realizzare una prima cartografia tematica (Ciotoli *et al.* 2015 b, 2016; Nisio, 2017). Al fine di definire, poi, un modello previsionale per gli sprofondamenti, gli eventi di sinkholes raccolti e le cavità sotterranee censite sono stati confrontati con i dati di subsidenza del suolo PSInSAR. Le osservazioni ottenute sono state, poi, dettagliate nel quartiere Portuense, al fine, questa volta, di individuare un'area che potesse nascondere in sotterraneo un cimitero tanto vasto (sembra fosse pari per estensione al cimitero di San Callisto).

Realizzando una serie di mappe di densità di cavità di sinkhole e di abbassamenti lenti del terreno è stato possibile identificare alcune aree maggiormente suscettibili al dissesto e con alta probabilità di presenza di cavità sotterranee. Sono stati confrontati, dunque, i dati geologici con i dati storici ed è stato possibile ipotizzare, con maggior precisione, una possibile ubicazione della catacomba scomparsa.

ABSTRACT

The cemetery of Saint Felix was a large underground necropolis of ancient Rome, III-V centuries AD. According to the historical sources, this Christian catacomb was located in correspondence of the third mile of the ancient Portuense road, in the south-western sector of the urban area of Rome.

In the medieval period, it was a well-known destination for the widespread pilgrimage that was practiced in the remains of the popular Saint, but later, the entrance and the location of the catacomb were lost. Access to the cemetery was from a church, the Church of Saint Felix, also disappeared.

Over the centuries, many authors have searched in vain for the exact location of this catacomb and the possible ruins of the church.

In order to identify a possible location of this vast cemetery area, a study was carried out in the Portuense district of Rome, comparing the geological data with the historical ones, and the cavities found in the survey with the anthropogenic sinkholes, and with analysis from aerial photos and satellite data (PSIInSar).

The anthropogenic sinkholes in Rome, in fact, are closely connected to the presence of the widespread network of underground cavities (mainly occurring in volcanic soils), a legacy of more than 25 centuries of history. This network of underground tunnels is often subject to the collapse of the vaults, originating sinkholes on the surface, especially along the road network.

These events increased in the last twenty years and represent a growing hazard to the city. Susceptibility studies have recently been carried out, taking into consideration some predisposing factors (i.e., geology, morphology, hydrology; Ciotoli *et al.*, 2013, 2015) which allowed to realize a first thematic cartography. In order to define a forecast model for sinkholes, the collected sinkholes events and the subterranean underground cavities were compared with the PSInSAR soil subsidence data. The observations obtained were then detailed in the Portuense district, in order, this time, to identify an area that could hide a wide underground cemetery (it seems to be equal by extension to the cemetery of San Callisto).

By creating a series of cavity density maps some areas more susceptible to failure and with a high probability of the presence of underground cavities were identified. The cross-comparison between geological and historical information allowed the identification of the possible location of the disappeared catacomb.

INTRODUZIONE

Lungo la via Portuense a Roma, nell'antichità era molto noto e meta di pellegrinaggio un cimitero cristiano cui si accedeva dalla Basilica di S. Felice, che custodiva le reliquie di uno dei vari santi e martiri con questo nome (Partenio, 1802; Ceselli, 1848; Nibby, 1849; Pellegrini, 1865; Henzen, 1868).

La maggior parte dei testi storici riporta che la chiesa, con l'annesso cimitero, erano ubicati al terzo miglio della Via Portuense (Bosio, 1632; Martinelli 1653; Brocchi, 1820; Marchi, 1844; Armellini, 1887; Scaglia,1911; Kirsch, 1924; 1933; Marucchi, 1933; Silvagni, 1935; De Angelis D'Ossat, 1943; Verrando, 1988). Tale catacomba era molto estesa, forse uno dei cimiteri più grandi di Roma, paragonabile a quello di San Callisto per estensione, ma la sua ubicazione andò perduta nell'arco dei secoli e mai più ritrovata. Molti archeologi e studiosi cercarono tracce ed indizi che potessero portare alla esatta posizione di tale complesso, ma non riuscirono nelle ricerche (Bosio,1632; Boldetti, 1720).

L'importanza di tale sito di pellegrinaggio era notevole, al punto che anche la Via Portuense, in epoca medioevale, fu denominata Via di San Felice e la stessa Porta Portese (la porta che sorgeva all'inizio della via) prese il nome di Porta di San Felice (Paoli, 1790; Mazzolari, 1806).

Nell'arco dei secoli ci fu molta confusione rispetto la strada che portava al cimitero e il Santo Felice cui esso era dedicato; il principale dubbio riguardò un fraintendimento delle fonti storiche tra Papa Felice I, divenuto anche egli santo e sepolto sulla via Aurelia, e Felice II (Baronio, 1583; Anastasio, 1754).

Il santuario di San Felice venne ipotizzato sulla via Aurelia (Moroni, 1861; Anastasio, 1754), e confuso con il complesso di S. Pacrazio; alcuni Autori hanno ritenuto che la catacomba di San Felice fosse quella nota con il nome "dei *Due Felici*", sull'Aurelia Antica.

Tuttavia, gli studi più recenti convergono sul fatto che la via Aurelia era ben distinta dalla Via Portuense già all'epoca (Paoli, 1790) e non vi può essere stato errore: il cimitero ipogeo e la Chiesa di San Felice erano un complesso a parte e ubicati sull'antica Via Portuense (Verrando, 1988).

Sono ancora molti, tuttavia, gli interrogativi irrisolti per arrivare all'individuazione del sito esatto: qual'era il santo Felice custodito nella chiesa e nel cimitero? Lungo quale strada la catacomba era ubicata? Qual'era esattamente il terzo miglio della via Portuense? Quando il cimitero e la chiesa furono costruiti? Quando e perché se ne persero le tracce?



Figura 1 – Unica immagine di Felice II antipapa, custodita a Roma presso la Basilica di San Paolo fuori le Mura a Roma

IL SANTO CUSTODITO NELLA CATACOMBA: PAPA FELICE II

I pareri riguardo il santo martire, custodito nella catacomba sembrano convergere sulla figura di Papa (o Antipapa) Felice II (Paoli, 1790; Verrando, 1988), deceduto nel 365 (*Fig.* 1).

Nel 355 Papa Liberio fu esiliato dall'imperatore Costanzo II in Tracia, perché sostenne tenacemente il Credo niceno e perché non volle appoggiare le dottrine ariane che si diffondevano in quel periodo. Il clero romano, riunito in Concilio decise di non riconoscere nessun altro papa finché Liberio fosse stato in vita. L'imperatore, tuttavia, visti i disordini in città, volle insediare un nuovo Papa a Roma, che fosse più aperto alle dottrine ariane: scelse Felice, giovane arcidiacono (Baronio, 1583; Anastasio, 1754; Paoli, 1790; Amore, 1975; Kelly, 1989). Parte del clero romano riconobbe la validità della consacrazione di Felice, ma il laicato non volle riconoscerlo e rimase fedele al legittimo papa esiliato. Felice in poco tempo si mostrò ancora più severo di Liberio nei confronti dell'arianesimo, entrando presto in conflitto con Costanzo II, che esortato dalle matrone romane, richiamò papa Liberio dall'esilio (Paoli, 1790; La Chatre & Latty, 1850).

Il ritorno di Papa Liberio ricevette il consenso del popolo e un grande dissenso sorse contro Felice che, alla fine, fu costretto a lasciare la città.

Felice fu esiliato con voto unanime del Senato e del popolo. Egli uscì dalla città, dalla porta più vicina a Santa Maria in Trastevere, dove si era rifugiato (Paoli 1790; La Chatre & Latty, 1850), la *Porta Portuensis,* che conduceva all'antica Città di Porto (Fiumicino) e percorse la Via Portuense costeggiando il fiume Tevere.

Alcuni Autori, tra cui Paoli (1790), sostengono che, percorrendo la via Portuense, sia arrivato nei pressi del mare, città di Porto (Fiumicino), attraversando una vasta area dedicata alle saline, dove predicò il Vangelo.

Sembra, inoltre, che per sfuggire ai suoi persecutori, che temevano un suo ritorno, visse per circa 35 anni nascosto in alcuni ipogei della stessa via, pertanto la data della sua morte sarebbe errata (365 d.C.) e di molto successiva (Paoli, 1790). Felice forse lasciò credere di essere deceduto e visse in solitudine e raccoglimento presso la Portuense. Altri Autori propendono per un esilio di otto anni sulla Via di Porto (La Chatre & Latty, 1850).

Mazzolari (1806) sostenne, poi, che Felice si ritirò in una vigna sulla Portuense dove aveva una proprietà; altri ritengono che dalla via Portuense, Felice arrivò al castello di Ceri (sull'Aurelia), dove predicò e fece del bene vivendo in povertà e solitudine, nascosto negli ipogei (Paoli 1790).

Alcuni testi, tra cui Paoli (1790), riportano che egli morì di vecchiaia, ad oltre settanta anni, dopo una vita relegata in ipogei; altri Autori sostengono che fu decapitato presso il castello di Ceri, dove il suo nome è collegato ad una piccola cappella e dove parte delle sue reliquie furono custodite sin dal secolo XV (Paoli, 1790).

La figura di Felice come martire si consolidò dopo la sua morte, già alla fine del IV sec., e la sua immagine fu definitivamente riscattata da un papa che aveva il suo stesso nome, Felice IV (526-530 d.C.; Paoli, 1790), e successivamente fu consacrato santo da Gregorio I il Grande (590 – 604 d.C.).

Un fitto pellegrinaggio si compì per tutto il Medioevo alle sue spoglie, secondo alcune fonti la chiesa di San Felice fu eretta presso la vigna dove Felice ha vissuto sino alla morte in esilio (Boldetti, 1720).

Fu dopo la consacrazione del santo, nel V secolo, che la Via Portuense, fu denominata Via di San Felice (Bianchi 1747; Paoli 1790; Mazzolari, 1806) e la *Porta Portuensis* prese il nome di Porta di San Felice.

Nel 1582 durante la redazione del Martirologio Romano sorse una disputa riguardo la figura di Felice II perché Baronio (1583) ritenne essere stato fatto santo per errore, in quanto confuso con Felice I e, pertanto, da escludere dell'elenco dei martiri cristiani. Il cardinale Santoro assunse le difese di Felice II. Subito dopo, presso l'altare della chiesa di S.S. Cosma e Damiano, emerse un sarcofago di marmo con la scritta: "*Il corpo di San Felice, papa e martire, che Costanzo ha condannato*", che mise fine alla disputa. Felice II fu riabilitato e il suo nome inserito di nuovo nel Martirologio (Baronio, 1583; La Chatre & Latty, 1850).

LA STRADA CHE NASCONDE LA CATACOMBA SCOMPARSA E LA RICERCA DEL III MIGLIO

La via Portuense risale all'epoca dell'imperatore Claudio (I sec d.C.), essendo l'arteria che, lungo la sponda destra del Tevere, collegava Roma al nuovo Porto di Augusto (Fiumicino).

Nei primi tre secoli dell'impero, invece, sulla sponda del Tevere viene riportata un'altra strada: la via Campana (l'attuale Via della Magliana).

La Via Campana era una strada etrusca, realizzata nel VII sec. a. C, che aveva inizio dal Foro Boario (piazza della Bocca della verità) ed arrivava alle saline di Fiumicino (Scheid, 1976).

A partire del IV secolo scompare dalle fonti il toponimo di Via Campana e subentra solo quello di *Via Portuensis,* realizzata probabilmente sul percorso della Via Campana (Frutaz, 1962; 1972; Lanciani, 1893; Tomassetti 1899; Tomassetti *et al.* 1977).

Sembrerebbe trattarsi di un'unica via diversamente chiamata in due, ben distinte, epoche cronologiche (Frutaz, 1962; 1972; Verran-

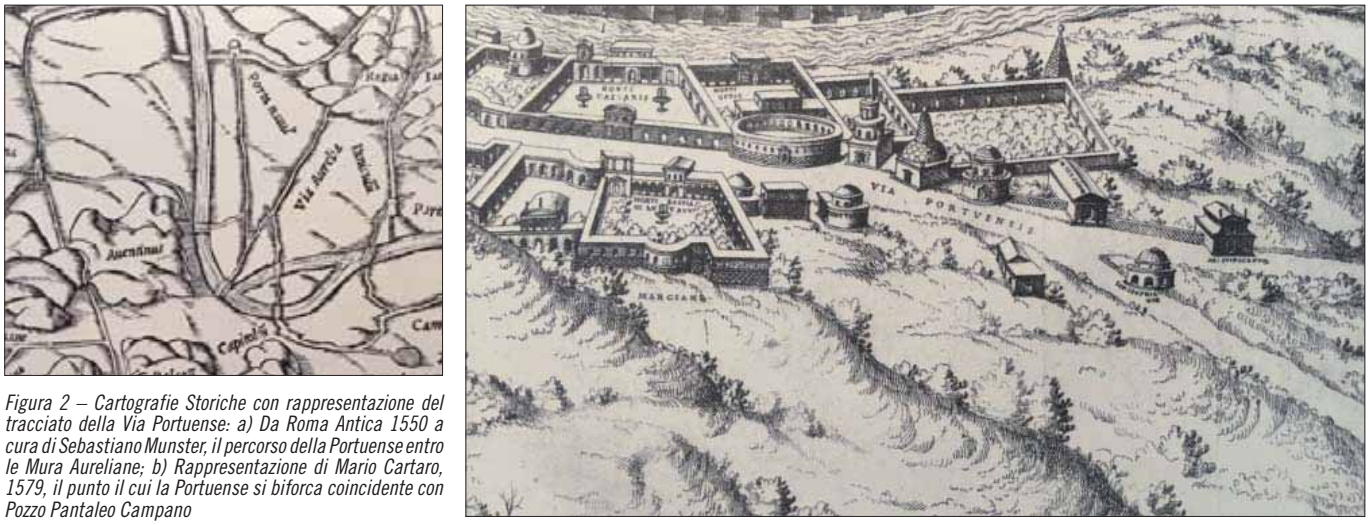


Figura 2 – Cartografie Storiche con rappresentazione del tracciato della Via Portuense: a) Da Roma Antica 1550 a cura di Sebastiano Munster, il percorso della Portuense entro le Mura Aureliane; b) Rappresentazione di Mario Cartaro, 1579, il punto il cui la Portuense si biforca coincidente con Pozzo Pantaleo Campano

do, 1988) e che costeggiava il Tevere, secondo l'attuale percorso della Via Magliana (*Fig.* 2).

Nelle piante, a partire del XVI secolo, si osserva un unico tracciato che corre quasi rettilineo, press'a poco parallelo al fiume, fino circa all'altezza di Pozzo Pantaleo Campano, poi la strada si divide in due tronchi, similmente alla situazione odierna: il tronco sinistro (l'attuale Via della Magliana) continua il suo percorso, lungo la sponda del fiume ricalcando il percorso della Via Campana, mentre il tronco destro (l'attuale Via Portuense) taglia in linea più diretta una serie di colline per ricongiungersi all'altro tronco, intorno al IX miglio (Partenio, 1802; Pellegrini, 1865; Ceselli, 1848; Henzen, 1868; Frutaz, 1962, 1972; Verrando, 1988; *Fig.* 3). Ad alcuni topografi è sembrato ovvio identificare il primo tronco con la più antica via Campana e il secondo con la più tarda via Portuense. Altri, peraltro, hanno continuato a supporre che vi fosse un unico percorso per la Via Campana-Portuense sulla traccia della attuale via della Magliana. L'area su cui andrebbe ricercata la biforcazione di queste due strade, approssimativamente intorno al II miglio (Verrando,1988), purtroppo, è oggi completamente trasformata ed identificata con un'area in cui vi sono vasti resti archeologici nonché una cisterna romana (Pozzo Pantaleo).

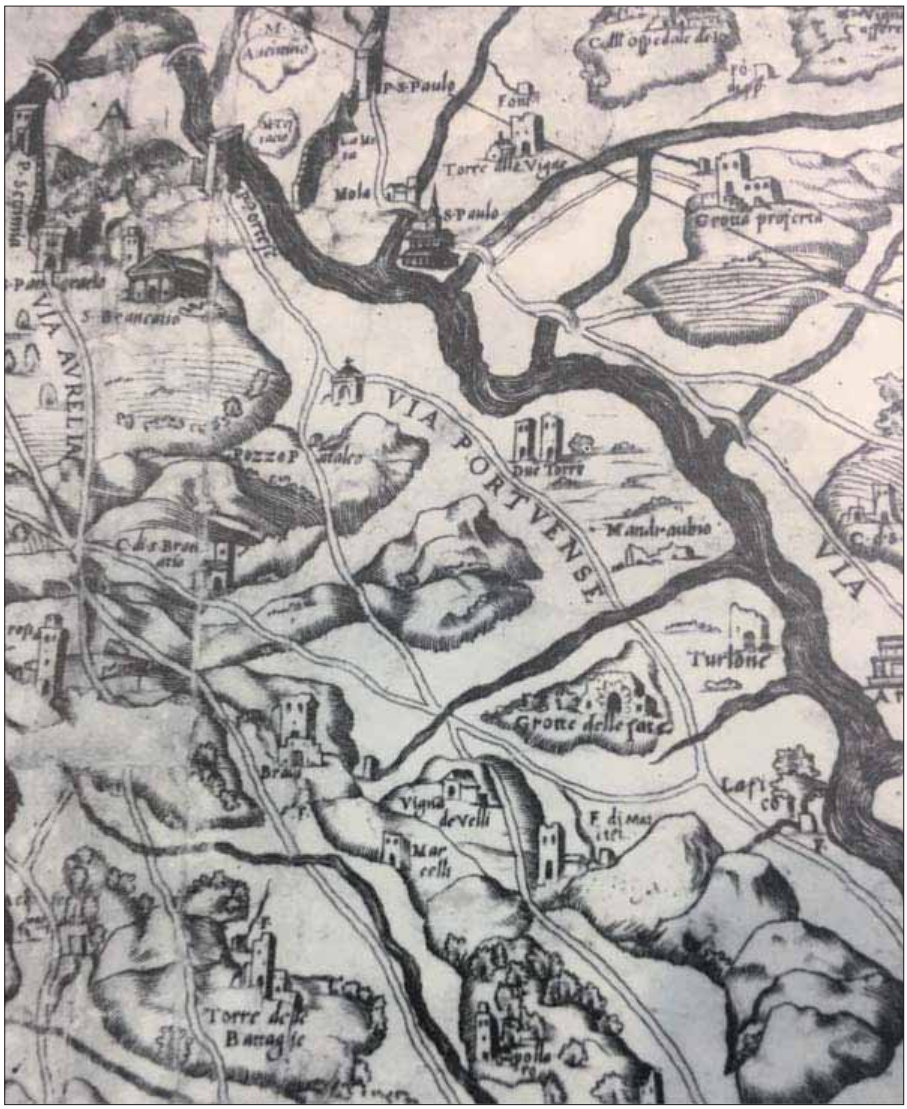


Figura 3 – Rappresentazione di Eufrosino della Volpaia, 1547, della Via Portuense; il tracciato si divide in due parti presso l'area di Pozzo Pantaleo per poi ricongiungersi

Il cimitero e il santuario di S. Felice devono essere ricercati, in questo complesso di incertezze (Verrando,1988), in una vasta area, al terzo miglio di una antica Via Portuense di cui non si riconosce l'esatto tracciato, e soprattutto il punto di partenza.

L'incertezza principale riguarda la esatta posizione del terzo miglio che potrebbe essere misurato dal Foro Romano, ovvero dalla antica posizione della *Porta Portuense*, o ancora da una delle porte poste sulle Mura Serviane (Boldetti, 1720).

Le strade romane erano dotate di pietre miliari, che indicavano la distanza in miglia dal miliario aureo, ideale "chilometro zero" posto nel Foro Romano, presso il Tempio di Saturno, da dove venivano conteggiate le miglia di tutte le strade. Il miglio utilizzato era quello romano (1482,5 m), il cimitero di San Felice distava dunque 4,448 km dalla città.

Qualora prendessimo come punto di partenza il Foro Romano, il terzo miglio sarebbe abbastanza interno alla città (Via della Magliana, angolo piazza Antonio Meucci), altrimenti misurando il terzo miglio dalle porte di accesso alla città, risulterebbe più esterna a Roma, dove in antichità era solo campagna ed oggi invece tutto urbanizzato.

In realtà il punto di partenza di tutte le strade consolari romane, il *Miliarum Aurum,* presso il tempio di Saturno nel Foro Romano, è solo ideale.

Le miglia venivano calcolate anticamente dalle Mura Serviane e dunque dalle porte ubicate su di esse. Secondo questa teoria si può



Figura 4 – Lanciani 1893 Forma Urbis Romae, quadro d'unione. Antica ubicazione della Porta Flumentana e percorso della antica Via Portuense

notare che il quartiere denominato "*Quarto Miglio*", ubicato sulla Via Appia, dista esattamente quattro miglia romane non da Porta San Sebastiano ma da Porta Capena posta sulle Mura Serviane.

Le porte sulle Mura Serviane più prossime alla Via Portuense risultano essere Porta Trigemina e Porta Flumentana (Lanciani, 1893; *Fig.* 4), ubicate sulla sinistra idrografica dell'Isola Tiberina. Alcuni Autori hanno cercato il terzo miglio partendo da Porta Trigemina e andando in direzione di Porta Flumentana, da cui diparte anche la Via Ostiense, (probabilmente riferendosi ad alcuni testi che riportano la via Portuense passante sotto due porte). Effettuando tale scelta il terzo miglio risulta nella zona della chiesa di Santa Passera sulla Via della Magliana (*Fig.* 5).

Tuttavia, risulta possibile che le miglia, successivamente, vennero misurate a partire dalle porte ubicate sulle Mura Aureliane, terminate nel 276 d.C.

La Porta Portuensis, sulle Mura Aureliane, non era nella posizione attuale ma 453 m più a sud (Frutaz, 1962; Lanciani, 1893; *Fig.* 5).

In questa sede si propende per un punto di partenza che coincida con le Mura Serviane e con le porte *Flumentana* o *Trigemina*. Più in particolare l'analisi della cartografia storica fa propendere per un inizio presso la *Porta Flumentana* (Mazzolari 1806) , presso la quale si trova il Tempio di Portuno, la divinità a cui viene dedicata la stessa via nonché la città di Porto.

Secondo i testi storici la collocazione del santuario di S. Felice era più esterna dal centro rispetto al complesso di San Ponziano (Monteverde Vecchio), così come si legge nei percorsi di pellegrinaggio (Valenti, 1750; Moroni, 1861; Armellini, 1887, 1893; Lugli, 1970; Carletti, 1972; Valentini & Zucchetti, 1953). Filtrando qualche particolare delle informazioni della *Notitia Ecclesiarum*, esso sorgeva su una altura della città dalla quale si poteva scorgere, in distanza, la zona immediatamente a nord della basilica di S. Paolo.

Inoltre, il cimitero suddetto era anche noto con il nome di *cymiteriun ad insalatos* o anche *ad insalatas*, *ad insalatos, insalsatos* (Bosio, 1632; Boldetti, 1720), ovvero *Cimitero presso gli insalsati* (Albertini, 1510); tale nome è stato ripetutamente confuso e storpiato. È possibile che il termine derivi da *insulatas* derivante dalla vicinanza del Tevere e di territori stagnati e acquitrinosi con presenza di piccole isole (Partenio, 1806). Altri sostengono che il termine derivi da *ad insalsatos*, la strada che porta alle saline, oppure dalla corruzione di *ad infulatos* che ricorda la tiara persiana (infula), antico lume funerario.

Tuttavia, è certo che la via della Magliana portava alle saline di Fiumicino, e si può ipotizzare che l'area del cimitero sia stata utilizzata per qualche tempo come deposito terminale del sale prima della distribuzione in città.

QUANDO FU COSTRUITO E QUANDO SCOMPARVE

Il cimitero dovrebbe essere datato intorno al 425 – 455 d.C. La chiesa di San Felice fu restaurata da Papa Adeodato nel 616-618 e successivamente da papa Adriano nel 772-795 ("*ecclesiam Sancti Felicis postam foris Porta Portesem noviter restauravit*"). Papa Niccolò I trovò il cimitero e la chiesa negli anni del suo pontificato, dall'858 al 867. Del cimitero se ne ha notizia, ancora, nei Mirabilia Urbis sec. XII, perché in quegli anni ancora meta di pellegrinaggio. Francesco Albertini (1510), all'epoca del pontificato di Giulio II, ne parla nei Mirabila Urbis dedicati a questo papa. Pertanto cimitero e chiesa furono presenti almeno fino al 1100, per circa 600 anni almeno, scomparvero probabilmente dopo il 1513, per cause sconosciute.

Paoli (1790) è del parere, invece, che la chiesa di San Felice che venne restaurata, fu quella di Ceri, nota a suo avviso anche con il nome di Chiesa di San Felice.

Alla fine del 1500 il cimitero era già scomparso Panvinio (1568); nel 1632 Bosio lo cercò invano e dopo di lui molti altri Autori (De Rossi, 1860; Armellini, 1893; Scaglia 1911; Marucchi 1933; Testini; 1966). La causa della scomparsa della chiesa e delle catacomba di San Felice, così come altri siti cristiani, viene attribuita da molti alle incursioni barbariche: Gianserico e i Vandali attaccarono Roma, il *sacco di Roma*, proprio entrando dalla Via Portuense nel 455 d.C., e distruggendo molti edifici religiosi. Tuttavia, la chiesa esisteva ancora nei secoli successivi, anche se i vai restauri ci fanno ipotizzare che essa versasse in cattive condizioni. Altri danneggiamenti a beni architettonici di Roma, furono operati dai Lanzichenecchi durante il *Sacco dei Lanzichenecchi* nel 1527 in cui molte batta-

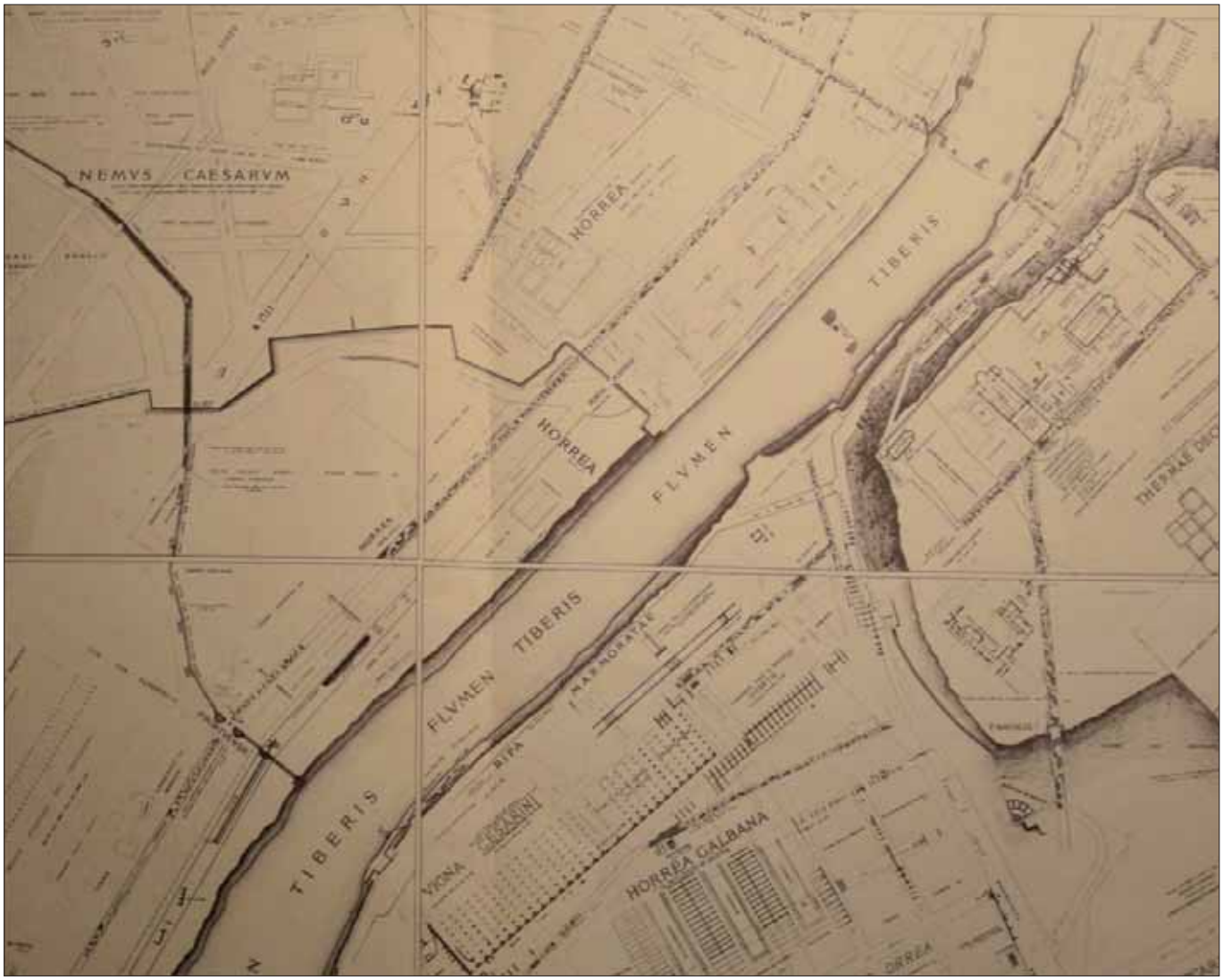


Figura 5 – Lanciani Forma Urbis Romae, 1893; Antica Ubicazione della Porta Portuensis

glie decisive si combatterono sul Gianicolo. Viceversa si può pensare a cause di natura geologica: è possibile che la chiesa e la catacomba fossero ubicate in un'area instabile e sottoposta a cedimenti o a crolli.

Nelle fonti storiche, purtroppo, non si fa alcun riferimento alle caratteristiche del santuario di San Felice, né vi sono immagini che lo rappresentino. Il termine di basilica, del resto, non ci permette di esprimere alcuna ipotesi sulla morfologia dell'edificio; esso si adatta, indifferentemente a qualunque tipo di manufatto sacro, sia grande che piccolo. Si potrebbe avanzare l'ipotesi di una basilica sub-tidale o ipogea e per questo facilmente scomparsa. Tuttavia, se la basilica fosse stata completamente ipogea sarebbe stato specificato. Un santuario ipogeo, probabilmente non avrebbe preso il nome di basilica, pertanto si ritiene che fosse più propriamente una chiesa (Verrando, 1988), forse seminterrata, del resto anche la Basilica di Generosa risulta essere in parte seminterrata. Inoltre, è possibile che la basilica di San Felice coincida con un'altra Basilica, quella di Giulio I anch'essa scomparsa sulla via Portuense e realizzata dal Papa al III miglio (Valentini & Zucchetti, 1953; Zucchetti, 1942). Sembra probabile, sebbene non sicuro, che il santuario di S. Felice si sia inserito o abbia perlomeno assorbito l'edificio preesistente di papa Giulio I (Verrando, 1988).

LA RICERCA MEDIANTE IL CONFRONTO CON I DATI GEOLOGICI

Al fine di individuare con maggiore precisione la possibile ubicazione di tale vasta area cimiteriale è stato compiuto uno studio del quartiere di Portuense di Roma, che mette a confronto i dati geologici con quelli storici.

Le catacombe romane sono state, per lo più, realizzate all'interno di depositi piroclastici granulari di facile escavazione, solo alcune vennero realizzate in orizzonti conglometratico-sabbiosi (es. Catacombe di San Ponziano, di San Valentino). Alcune vennero scavate parzialmente partendo da preesistenti cave di pozzolana (es. Catacombe di Generosa, Catacombe della Via Nomentana, di Priscilla o di S. Agnese), altre furono realizzate di proposito e possono essere considerate opere originali dei primi cristiani.

Osservando le planimetrie delle reti ipogee è evidente la diversità delle dimensioni delle gallerie e degli andamenti planimetrici di cave e catacombe. Pertanto nell'area della Via Portuense ricca di cave per escavazione di materiali da costruzione, è possibile che le Catacombe di San Felice siano state realizzate a partire da un reticolo preesistente, altresì potrebbero essere state realizzate *ex novo* in materiali non adatti alla costruzione ma più friabili.

Lungo via della Magliana, in un podere chiamato in antichità *ad Sestum Philippi*, sorgono le Catacombe di Generosa scavate nei tufi, e realizzate in un'area di cava preesistente, su di un unico livello. Il cimitero di Generosa è stato riscoperto di recente, da G.B De Rossi, anch'esso scomparso per secoli. A tali catacombe si accede da uno stradello che sale ripidamente dalla via Magliana, con alcuni tornanti, su di una collina, l'accesso al cimitero è da un piccolo scavo, il cimitero si sviluppa su un solo livello scavato nei tufi. La morfologia e lo scenario dei luoghi dell'area di Generosa rispecchia molto la descrizione del paesaggio in cui s'inserisce la catacomba di Felice. L'area di Generosa è interessata da episodi di sprofondamento della rete caveale: l'analisi delle foto aeree (voli del 1930 e del 1944) attestano molteplici forme di *sfornellamento.*

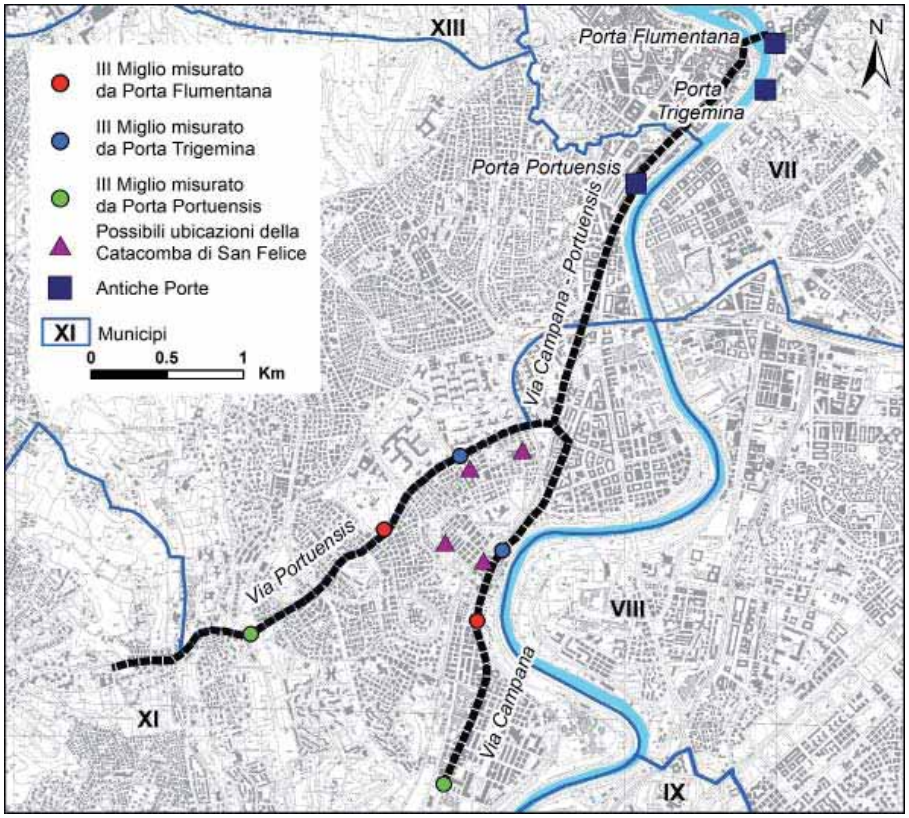


Figura 6 – Possibili ubicazioni del III Miglio dalle fonti storiche, prendendo come punti di partenza rispettivamente Porta Flumentana, Porta Trigemina e Porta Portuensis

METODOLOGIE DI RICERCA

Il primo obiettivo è stato quello di localizzare il terzo miglio dalle fonti storiche, valutando tutte le possibilità del punto di partenza e dell'antico percorso della Portuense.

Dopo aver analizzato i percorsi e i punti di arrivo si propende per l'ipotesi dell'ubicazione del terzo miglio partendo dalla Porta Flumentana, posta sulle antiche mura serviane, e si è in accordo con l'ipotesi che la Via Portuense aveva un unico percorso e coincideva con la Via Campana (Magliana).

È stato, di seguito, tracciato il percorso dell'antica via Portuense a Partire dalla *Porta Flumentana*. Misurando tale percorso il secondo miglio coincide effettivamente con l'area di Pozzo Pantaleo e il sesto miglio sulla Via Magliana, con la strada che, in salita, porta alle Catacombe di Generosa (*Fig.* 6).

Secondo tale ricostruzione, e tenendo conto di tutti gli errori connessi alla dubbia posizione dell'antico tracciato, il terzo miglio ricade nell'area di Via Giorgio Pallavicino - Via Alberto Mancini - Via Giannetto Valli. È stato effettuato anche il percorso a ritroso partendo dalle Catacombe di Generosa, al sesto miglio, e tornado indietro sino al terzo: si individua ugualmente, l'area posta alla fine di Via Prospero Colonna.

È stata misurata la medesima distanza, 4,448 km, dall'antica posizione della *Porta Portuensis*, 453 m a sud dell'attuale ubicazione. Il terzo miglio con tale ipotesi coinciderebbe con l'area compresa tra Villa Bonelli e Via Frattini.

Le stesse distanze sono state misurate sulla attuale Via Portuense e si individuano altre due aree Villa Maraini (partendo dalla Porta Flumentana) e Villa Flora (Partendo dalla Porta Portuensis).

Lo stesso procedimento si è svolto partendo da Porta Trigemina ed individuando un'altra coppia di punti (*Fig.* 6)

Sono stati, di seguito, svolti i confronti con i dati geologici-geomorfologici, per individuare l'area che soddisfa il maggior numero di requisiti.

È stato realizzato un Sistema Informativo Territoriale, in cui è stata inserita la carta geologica (Geologia CARG foglio 1.50.000) e la carta litologica (in scala 1:20.000) (*Fig.* 7).

Sono state individuate nella porzione di territorio, sino al sesto miglio delle vie Portuense e della Magliana, tutte le aree in cui affiorano le litologie utili alla realizzazione di un sistema di gallerie di tipo religioso.

Le gallerie cimiteriali avevano una larghezza inferiore a quella delle cave, circa 1,20 m ed anche un'altezza più contenuta, di conseguenza potevano essere realizzate in materiali anche più terrosi, a volte conglomeratici.

In tale porzione di territorio sono state, poi, riportate le cavità riscontrate in sondaggio (layer puntuale), nonché le planimetrie delle reti caveali già conosciute (Nisio *et al.* 2017).

L'area dei sotterranei di San Felice, abbandonata per secoli, deve aver avuto nel tempo problemi di stabilità manifestatesi con episodi di crolli di volte in sotterraneo, di cedimenti ed eventi di sprofondamento in superficie (Ciotoli *et al.*, 2013, 2015 a, b, 2016). Sono stati svolti i confronti con i fenomeni di subsidenza e di sprofondamento registrati sul terreno.

Le analisi fotogeologiche effettuate con l'ausilio dei voli relativi agli anni 1930, 1934, 1943, 1960 (immagini fornite dall'Aerofoteca Nazionale) hanno mostrato che nell'area sono frequenti episodi di collasso delle reti caveali conosciute e di presunte cavità sotterranee.

Le foto aree del volo del 1944 e 1960, in particolare, mostrano nell'area delle catacombe di Generosa massicci eventi di sprofondamento e paleo forme di collasso (*sfornellamenti*).

È stata effettuata, di seguito, una ricerca storica tramite le emeroteche dei principali quotidiani di Roma ed inseriti tutti fenomeni di sprofondamento che sono stati segnalati in tale area, e di seguito riportati nel Sistema informativo unitamente ai fenomeni individuati attraverso cartografia storica e analisi fotogeologica.

È stato, poi, compiuto attraverso l'analisi multi temporale delle foto aree il censimento degli imbocchi di antiche cave e degli antichi bunker sotterranei utilizzati nella Seconda Guerra Mondiale.

Tali dati hanno permesso di realizzare due mappe: la carta di densità di sinkholes (*Fig.* 8) e la carta di densità di cavità sotterranee (*Fig.* 9). Le mappe sono state realizzate applicando ai punti la funzione di Kernel in ambiente ArcGIS Pro. L'algoritmo calcola la densità degli elementi (in questo caso i sinkhole e le cavità) all'interno di un'area di vicinaggio centrata su ognuno dei punti considerati (Silverman, 1986). In ultimo è stata compiuta un'analisi della subsidenza del suolo mediante PSInSAR ed individuate alcune classi di subsidenza del suolo (*Fig.* 10). In particolare sono stati presi i punti di abbassamento del suolo nelle aree di affioramento delle litologie atte ad impianti caveali.I dati PSInSAR sono stati elaborati mediante kriging semplice al fine di ottenere una una carta con classi di abbassamento del suolo.

Tutte le mappe sono state realizzate in formato grid con una risoluzione 100x100m. Le griglie sono state dapprima standardizzate e poi sommate mediante il comando "raster calculator" in ambiente GIS. La griglia risultante è stata divisa per il valore massimo al fine ottenere valori variabili tra 0 e 1. La carta di sintesi così ottenuta rappresenta le zone in cui è più o meno probabile la presenza di fattori predisponenti la presenza di un reticolo di vuoti, e di conseguenza la probabilità della presenza del sito di San Felice (*Fig.* 11).

La mappa di sintesi permette di individuare alcune aree più probabili, sia sulla Portuense che sulla Via Magliana. Tra tutte si evidenzia l'area circostante a Via Giannetto Valli- Via prospero Colonna in cui si concentrano il maggior numero di fattori predisponenti e in cui convergono le ipotesi dell'ubicazione del III Miglio partendo dalla Porta Flumentana.

Inoltre l'area di Via Giannetto Valli dalla fine degli anni settanta è stata oggetto dei seguenti avvenimenti:

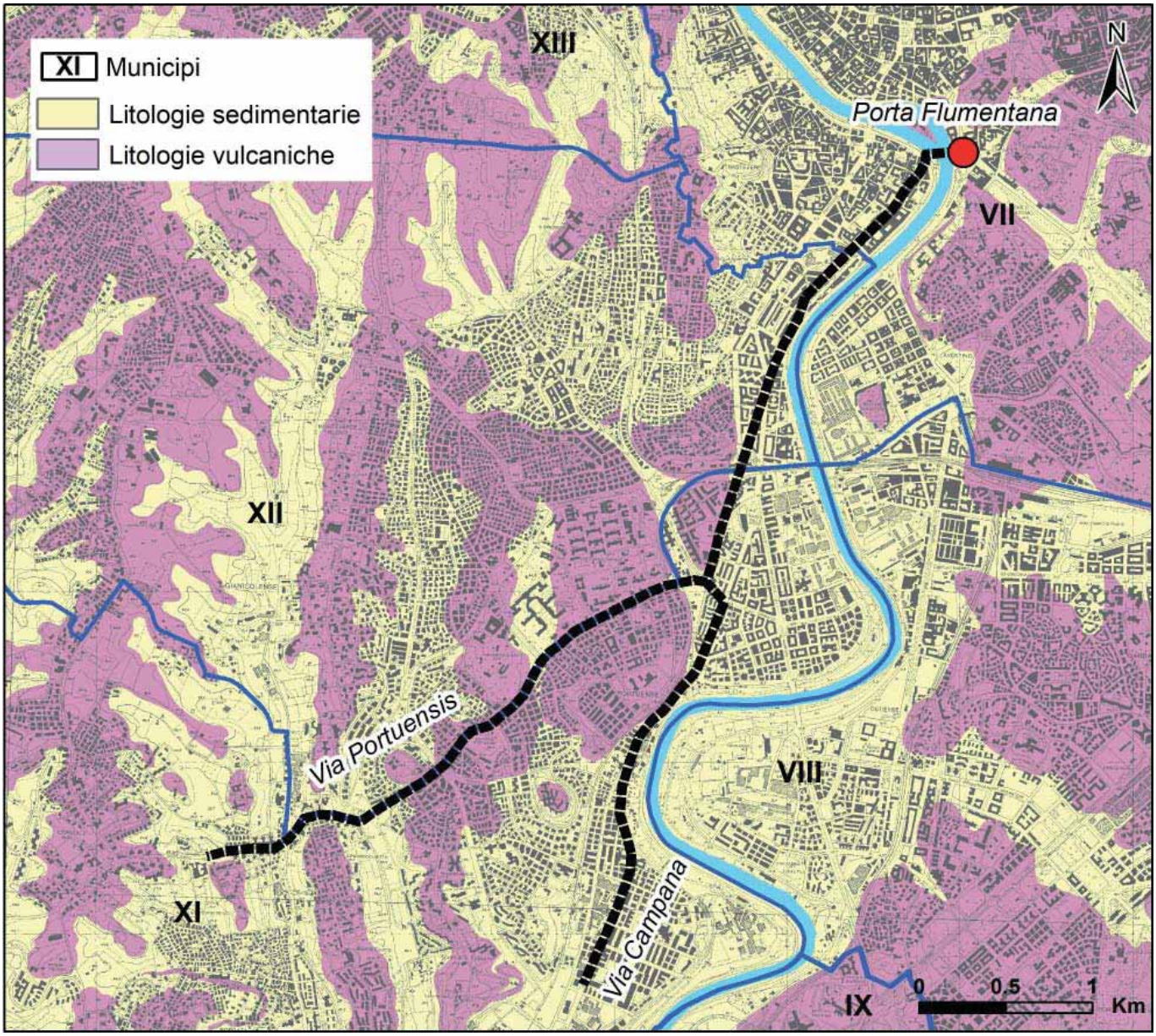


Figura 7 – Schema degli affioramenti del vulcanico e delle litologie utili ad un impianto caveale, dell'area della Portuense II –IV miglio

- Nel 1978 sprofondamenti sulla sede stradale, accertamento di vuoti sotterranei;
- Settembre 1989 sprofondamento sulla sede stradale, ricostruzione di alcune gallerie sotterranee;
- Nel 1991 altri sprofondamenti a gennaio e a settembre all'incrocio con Via Statella e via Mancini;
- 1995 forte abbassamento del suolo all'incrocio con Via P. Colonna;
- 2001 prospezione Georadar che evidenziò vaste aree con vuoti;
- Settembre 2001 Voragine 5 m di diametro e 2,5 m di profondità;
- 2003-2004 consolidamento e riapertura della strada;
- 2007 nuova voragine chiusura della strada;
- 2008 in seguito agli eventi meteorici ulteriori abbassamenti e cedimenti.

La strada di Via Giannetto Valli è tutt'ora chiusa e le strade limitrofe sono state interessate periodi-

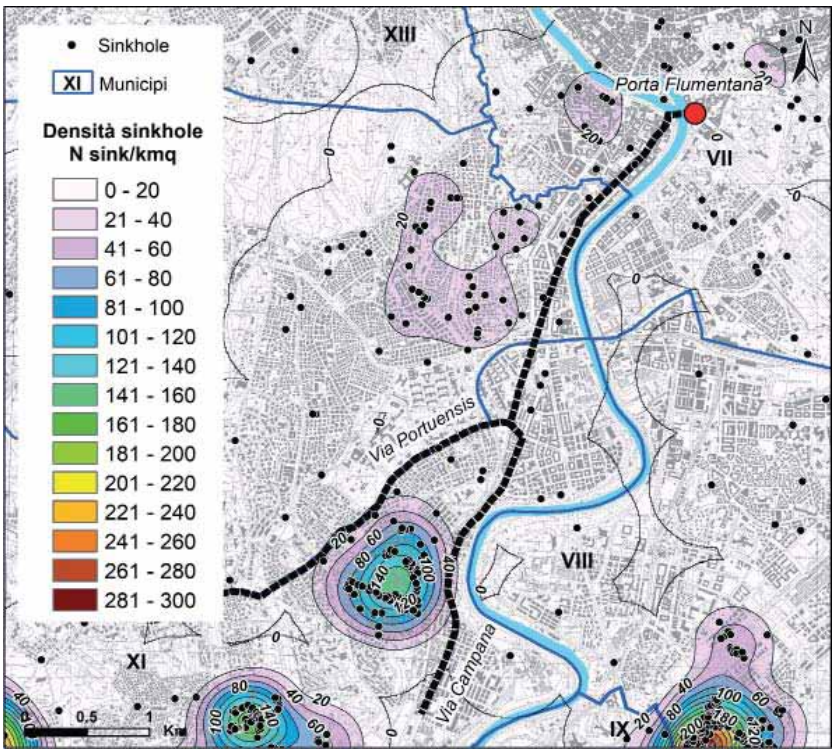


Figura 8 – Carta della densità di sinkholes (sprofondamenti del suolo) dell'area Portuense-Magliana

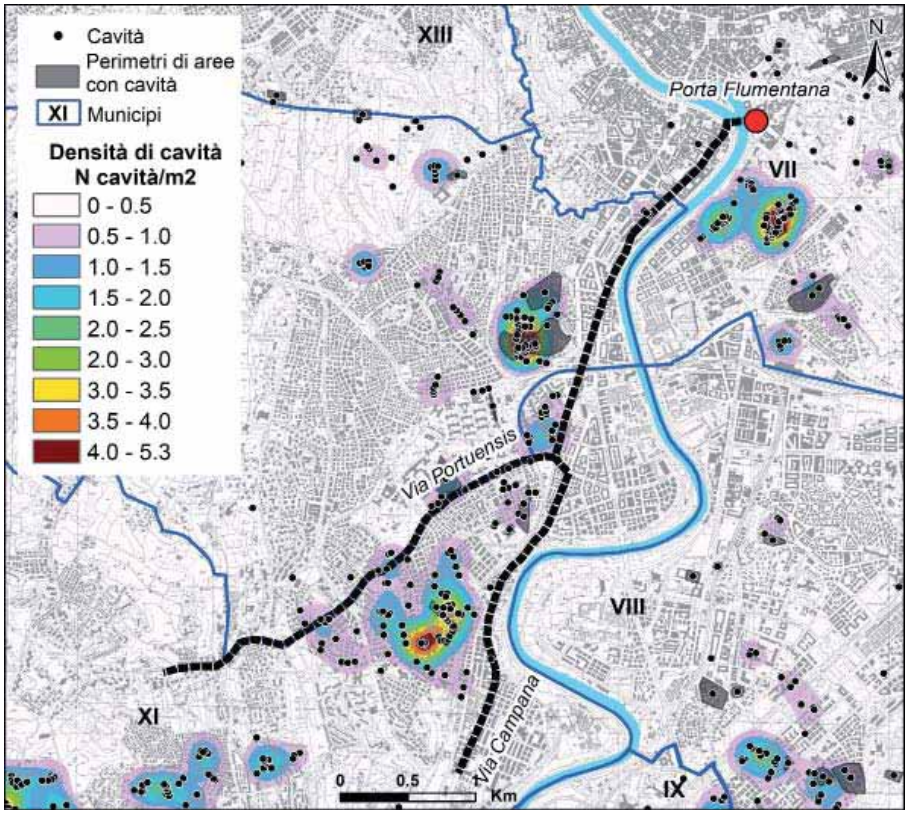


Figura 9 – Carta della densità di cavità dell'area Portuense - Magliana

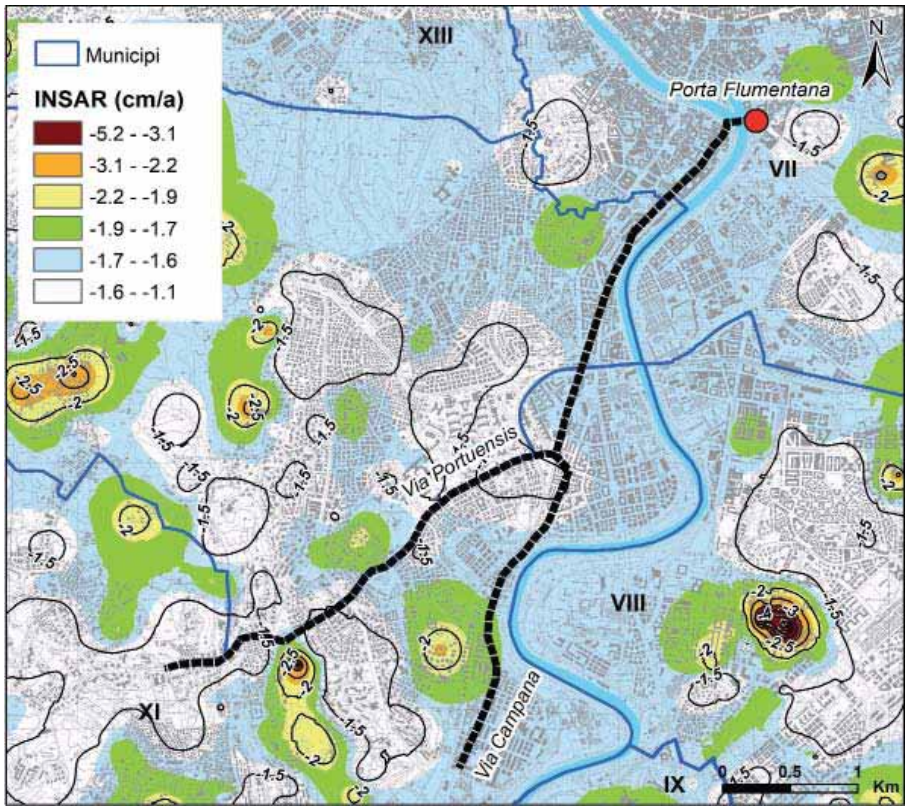


Figura 10 – Carta degli abbassamenti del suolo sulle aree in cui affiorano le litologie piroclastiche (dati InSar)

camente nel tempo da fenomeni di dissesto; anche se nel sottosuolo della zona non è presente il cimitero di San Felice è lecito pensare che vi siano nell'area cavità sotterranee e aree di cava non bonificate, molto più vaste di quelle conosciute, pertanto la zona del terzo miglio necessita per problemi di sicurezza di approfondimenti geologici e di ispezioni geofisiche.

CONCLUSIONI

Nel sottosuolo della città di Roma sono presenti alcune catacombe ed ipogei scomparsi in epoche passate e non ancora ritrovati: un cimitero anonimo sulla via Ardeatina all'incrocio con via di San Sebastiano, un Cimitero presso la Chiesa dell'Annunziatella, il Cimitero di Santa Felicola, Il cimitero di *sant'Agata ad fundum lardarum* sulla Via Aurelia. Tra tutte, la catacomba scomparsa di maggiore estensione è la Catacomba di San Felice sulla Via Portuense.

Il cimitero e la chiesa, secondo alcune fonti, furono restaurati in tre distinte epoche storiche sino al 858 da Papa Niccolò. La basilica, probabilmente coincideva con un edificio preesistente fatto realizzare da Papa Giulio I, e la catacomba fu luogo di pellegrinaggio sino al 1100 circa.

Il complesso, dedicato all'antipapa San Felice II, era ubicato al III miglio della via Portuense; le miglia venivano misurate idealmente dal *Miliarum Aurum* nel foro, ma praticamente a partire dalla Porta più vicina delle Mura Serviane. È probabile che le miglia furono misurate da Porta *Flumentana*, e non da Porta Trigemina, posta sulla riva sinistra dell'Isola Tiberina.

Ponendo l'inizio della Via Portuense dalla *Porta Flumentana,* presso il tempio di Portuno, il secondo miglio della strada coincide con l'area di Pantaleo Campano, ed il sesto con l'area del cimitero di Generosa ad *Sestum Philippi.*

L'antico percorso della Via Portuense era differente dall'attuale, l'analisi, della cartografia storica fa ritenere che esso coincidesse con la Magliana Vecchia. La ricerca compiuta sul sistema viario, infatti, ha confermato l'esistenza di un doppio percorso della Via Portuense, che si divide nei pressi del Pozzo Pantaleo, da una parte prosegue con la denominazione di Via Campana successivamente cambiata in Via della Magliana.

L'ubicazione del santuario era all'esterno della città e su un'altura dalla quale si poteva scorgere, in distanza, la zona immediatamente a nord della basilica di S. Paolo. Il luogo era raggiungibile, dalla via Campana-Portuense, in salita, mediante uno stradello che si snodava dalla riva del fiume

Il cimitero di Felice veniva denominato anche *ad insalatas* probabilmente per la presenza di acque salmastre, paludi o per la presenza di saline, o di aree di sosta del sale proveniente dai campi di Fiumicino. Tale denominazione lo fa ritenere prossimo alla via Magliana su cui avveniva il trasporto del sale

Il Terzo miglio secondo la presente ipotesi coincide con l'area, posta sul rilievo al di sopra della Via Magliana, di Via Pallavicini- Via Mancini- Via Prospero Colonna – Via Giannetto Valli.

L'area individuata in particolare è ubicata alla confluenza di un piccolo torrente e prossima ad un meandro del Tevere. È possibile che in quest'area vi fossero, stoccaggi del sale, ovvero paludi.

Inoltre la stessa è una collina da cui è visibile l'Abbazia di San Paolo.

Il confronto dei dati storici con quelli geologici ha confortato tale ipotesi.

In quest'area i terreni piroclastici sono stati sottoposti a estrazione; in particolare l'area di Giannetto Valli e soprastante un

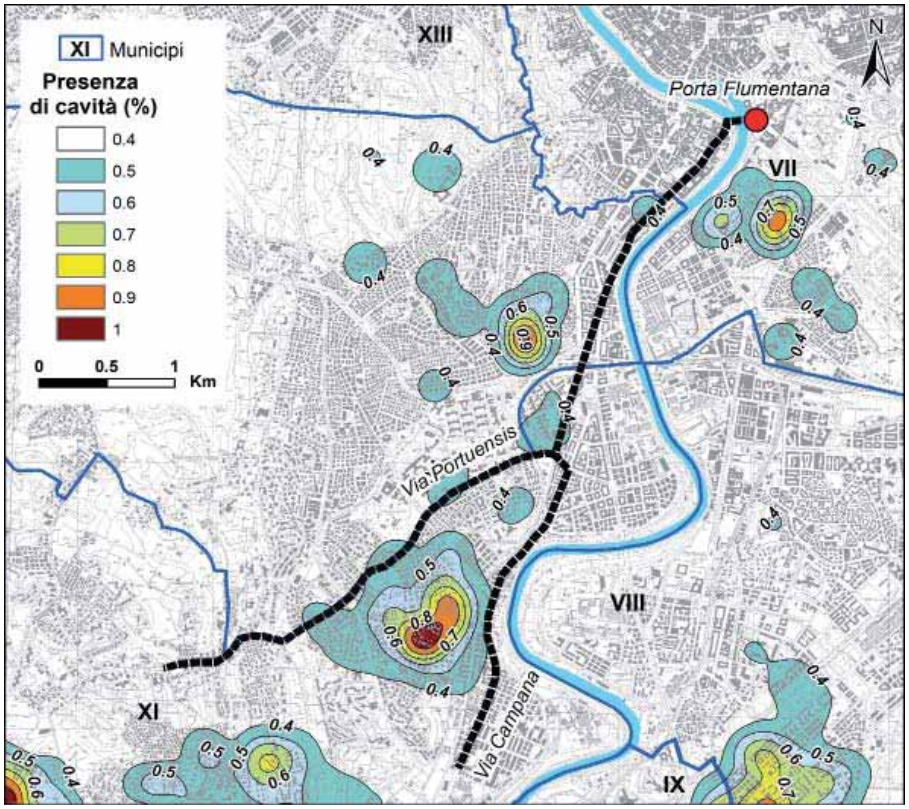


Figura 11 – Sovrapposizione delle carte ed individuazione di possibili aree caratterizzate da reti estese di cavità sotterranee

area di coltivazione delle ghiaie e al tetto è presente un orizzonte piroclastico.

Dalla carta di densità di sinkholes si individuano alcune zone alta densità di sprofondamento; dalla carta di densità di cavità di individuano aree siano con presenza di cavità sotterranee. L'analisi delle foto aeree ha mostrato la possibilità di paleo forme di sfornellamento e la sovrapposizione con i dati rilevati da satellite (PS, abbassamenti al suolo) ha permesso di definire con maggiore precisione l'area che può nascondere il cimitero scomparso.

BIBLIOGRAFIA

Albertini F. (1510), *Septem mirabilia orbis et urbis Romae et Florentinae,* presso lo stampatore Iacopo Mazzocchi di Roma.

Amore A. (1975), *I martiri di Roma.* Ed. Tau a cura di Buonfiglio, 2013, pp. 364.

Anastasio L.A. (1754), *Istoria degli antipapi*, Napoli Stamperia Munziana , 1754.

Aringhi P. (1651), *Roma Subterranea novissima*. vol I, Roma, 1651, p. 360-373.

Armellini M. (1887), *Le chiese di Roma dalle origini sino al secolo XVI*, Roma, 1887, p. 759.

Armellini M. (1893), *Gli antichi cimiteri cristiani di Roma e d'Italia*, Roma, 1893, p. 513.

Baronio C. S. (1583), *Martyrologium Romanum ad novam kalendarii rationem, et ecclesiasticae historiae veritatem restitutum. Gregorii XIII pontificis maximi iussu editum. Accesserunt notationes atque tractatio de Martyrologio Romano. Ex typographia Dominici Basae*, Romae 1586.

Bianchini G. (1747), *Delle magnificenze di Roma antica e moderna*; *Le porte e mura di Roma* da G. Vasi, Roma, 1747, LXVII/VIII.

Boldetti M. (1720), *Osservazioni sopra i cimiteri de' santi Martiri, ed antichi cristiani di Roma.*

Bosio A. (1632*), Roma sotterranea.*

Bottari G.G. (1737-1754), *Sculture e pitture sagre estratte dai cimiteri di Roma pubblicate già dagli autori della Roma sotterranea ed ora nuovamente date in luce*, 3 vol.

Brocchi G.B. (1820), *Dello Stato fisico del suolo romano*, Stamperia De Romanis.

Carletti (1972), *Le antiche chiese dei martiri romani, Le chiese di Roma*, n. 122-123, Roma, 972pp.

Ceselli L. (1848), *Memoria geologica sopra i Colli Gianicolensi*. Roma, 1848.

Ciotoli G., Corazza A., Finoia M.G., Nisio S., Succhiarelli C. (2013), Gli sprofondamenti antropogenici nell'aria urbana di Roma. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 143-182.

Ciotoli G. , Ferri G., Nisio S. , Succhiarelli C. (2015 a), *The underground cavities in the territory of Rome: typologies, distribution and sinkhole susceptibility.* Hypogea 2015 - Proceedings of International Congress of Speleology in Artificial Cavities - Rome, March 11/17 2015 311.

Ciotoli G., Nisio S., Serafini R. (2015 b), Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma: analisi previsionale. (2015) Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 99, 167-188.

Ciotoli G., Nisio S., Amanti M. (2016), *La Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici. Professione Geologo*, Ordine Geologi del Lazio.

De Angelis D'Ossat G. (1943), *La geologia delle catacombe romane*, Città del Vaticano, 1943.

De Rossi G. B. (1864-1877), *La Roma Sotterranea Cristiana descritta e illustrata*, 3 voll., Stamperia Vaticana.

De Rossi M.S. (1864-1877), *Analisi geologica ed architettonica in La Roma Sotterranea Cristiana descritta e illustrata*, 3 voll.

De Rossi M.S. (1860), *Dell'ampiezza delle romane catacombe e d'una macchina icnografica ed ortografica per rilevarne le piante e i livelli, Atti dell'Accademia Pontificia de' Nuovi Lincei*. Sessione VI del 6 Maggio 1860.

Frutaz A. P. (1962), *Le piante di Roma*, II, Roma,1962, Tip. L. Salomone e A. Staderini.

Frutaz A. P. (1972), *Le carte del Lazio*, Ist. Studi Romani, 1972.

Guidi P. (1922), *L'antico Indice dei cimiteri cristiani di Roma*, St. rom., Ili, 1922, p. 76-78.

Henzen G. (1868), *Scavi nel bosco sacro dei Fratelli Arvali*, Roma, 1868.

Kelly J. N.D. (1989), *Gran Dizionario Illustrato dei Papi*, Edizioni Piemme S.p.A., 1989.

Kirsch (1924), *Le memorie dei martiri sulle vie Aurelia e Cornelia*. Roma,1924, p. 79.

Kirsch (1933). *Le catacombe romane*, Roma, 1933.

La Chatre M., Latty G. (1850), *Storia del dispotismo: papi, imperatori, re ecc.* Torino, 1850m Ed. C. Perrin.

Lanciani R. (1893- 1901), *Forma Urbis Roma* (Milano, 1893-1901).

Lugli G. (1970), *Itinerario di Roma antica*, Milano, 1970, p. 83.

Marchi G. (1844-1847), *Monumenti delle arti cristiane primitive nella metropoli del cristianesimo* – Architettura.

Martinelli F. (1653), *Roma ex Ethnica sacra*, I, Roma.

Marucchi O. (1933), *Le catacombe romane, Roma.*

Mazzolari G.M. (1806), *Vie Sacre*, Stamperia Salvioni, 1806.

Moroni R.G. (1861), *Dizionario di erudizione storico ecclesiastica*, Vol 12, 337 pp.

Nibby A. (1849), *Analisi storico-topografico antiquaria della Carta de' dintorni di Roma*, III, Roma, 1849, p. 598/599.

Nibby A. (1927), *Della via Portuense e dell'antica città di Porto*, Roma, 1927, p. 7.

Nisio S., Allevi A., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Pascucci R., Stranieri I., Succhiarelli C. (2017), *Carta delle Cavità sotterranee di Roma*. Pubblicazione ISPRA, 2017.

Paoli P. (1790), *Di San Felice II Papa e martire. Dissertazione*. Stamperia Migliarini, 1790.

Partenio G. M. (1802), *Vie sacre*. Seconda Ed., 1, riveduta da L. Adami. Saperia Salvioni, 255 pp.

Panvinio O. (1568), *De ritu sepeliendi mortuos apud veteres christianos et eorundem coemeteriis liber*, Colinia, 1568, p. 99-101.

Pellegrini A. (1865), *Gli edifici del collegio degli* Arvali, Roma, 1865.

Scaglia S. (1911), *Manuale di archeologia cristiana*, Roma, 1911.

Scheid J. (1976), *Note su la via Campana*, in MEFRA, 88, 1976.

Silvagni A. (1935), *Inscriptiones Christianae Urbis Romae,* etc. Nov. Ser., Vol. II, 1935; p. 122- 126.

Silverman B.W. (1986), *Density estimation for statistics and data. analysis*. Published in Monographs on Statistics and Applied Probability, London: Chapman and Hall.

Testini P. (1966), *Le catacombe e gli antichi cimiteri cristiani in Roma*, Bologna, 1966.

Tomassetti G. (1899), *Della campagna romana*, in Archivio della R. Società romana di storia patria, XXII, 1899, p. 449.

Tomassetti L., Chiumenti L. E Bilancia F. (1977), *La campagna romana antica, medioevale e moderna*, VI, Roma, 1977, p. 303.

Valenti S. (1750), *Roma anticae moderna* I, Roma, 1750, p. 102.

Valentini G., Zucchetti G. (1953), *Codice topografico della città di Roma*, IV, Roma, 1953, p. 266.

Verrando G. N. (1988) - *Il santuario di S. Felice sulla via Portuense*. In: Mélanges de l'Ecole française de Rome. Antiquité, 100, 1. 1988. pp. 331-366.

Zucchetti G. (1942), *Fonti per la storia d'Italia pubblicate dall'Istituto Italiano per il Medio Evo.*

Le cave di pozzolana a Roma e nel territorio nelle fonti archivistiche settecentesche

The pozzolana quarries in Rome and in the territory in eighteenth-century archival sources

Orietta Verdi
Archivio di Stato di Roma
E-mail: oriettaverdi32@gmail.com

Gianluigi Giannella
Geologo Libero Professionista
E-mail: gg.giannella@gmail.com

Carlo Rosa
S.I.G.E.A. Lazio; Istituto Italiano di Paleontologia Umana
E-mail: carlorosa62@gmail.com

Parole chiave (*key words*): cave di pozzolana (*pozzolana quarries*), porti della pozzolana (*ports of the pozzolana*), ricerca d'archivio (*archival research*)

Nello Stato Pontificio *d'ancien régime* vennero fissate a partire dal Cinquecento una serie di regole destinate a disciplinare gli scavi che, fin dal periodo medievale, venivano frequentemente praticati nel sottosuolo della città capitale dello stato, alla ricerca sia di reperti archeologici, statue e marmi che di materiale da costruzione quale 'tavolozza', peperino, pietra, e naturalmente pozzolana.

La documentazione che attesta il rilascio di apposite licenze di scavo alle compagnie di cavatori, conservata all'Archivio di Stato di Roma, diviene più regolare a partire dalla seconda metà del Seicento e si sistematizza nel Settecento. I regolamenti da osservare nel cavare pozzolana sono affidati a bandi ed editti in materia.

I PERMESSI DI SCAVO DI POZZOLANA NEI DOCUMENTI (1700-1740)

Nei registri di Lettere Patenti (*Libri Patentium*) conservati all'Archivio di Stato di Roma per i secoli XVI-XVIII (sei registri, relativi al periodo 1580-1634, si trovano all'Archivio Storico Capitolino), sono annotate cronologicamente le licenze rilasciate ai privati nelle materie amministrate dalla Presidenza delle strade.

Negli anni Novanta l'Archivio di Stato di Roma e il CROMA-Università di Roma Tre hanno varato un progetto, coordinato rispettivamente da Orietta Verdi e Carlo M. Travaglini, per l'informatizzazione di tutte le licenze registrate nei *Libri Patentium* della Presidenza delle strade (= PdS) per il Settecento; la prima parte del lavoro, relativa al periodo 1700-1740, di imminente pubblicazione, è stata completata e dalla consultazione della base di dati sono emerse 132 licenze di scavo di pozzolana e 12 licenze relative ai porti della pozzolana, rilasciate nella prima metà del Settecento, mentre nella seconda metà i permessi di scavo si dimezzano (*Figg.* 1, 2, 3).

I PORTI DELLA POZZOLANA

In due piante del seicentesco Catasto Alessandrino (ASR, PdS, *Catasto Alessandrino*, 432/51, 429/4, v. *Figg.* 4 e 5) figurano due porti destinati allo scarico e imbarco della pozzolana proveniente dalle cave vicine, uno sul Tevere fuori porta S. Paolo sulla via Ostiense, nella tenuta di Grotta Perfetta del duca Mattei, raggiunto da una strada detta "vicolo della cava" proveniente dalla cava attiva nella tenuta (1634), l'altro sull'Aniene (Teverone) nella tenuta di Pietra Lata del duca Lante, tra Ponte Mammolo e il Quarto di S. Agnese, raggiunto in questo caso da un fosso o scolatoio che dalla cava di pozzolana, raffigurata vicino alla via Tiburtina, si diramava verso il porto (1660).

Il porto fuori porta S. Paolo. Nel periodo 1700-1740 il porto della pozzolana sul Tevere all'altezza delle tenute di Grotta Perfetta e Tre Fontane (*Fig.* 4) è oggetto di almeno tre interventi di adeguamento e riparazione: nel 1703 Giuseppe Pandiani, titolare di una società di cavatori che per trent'anni gestisce le cave di pozzolana nella tenuta dei Mattei di Grotta Perfetta e in quella degli Altieri alle Tre Fontane, nonché affittuario delle zone prative della vicina tenuta di Dragona, ottiene il permesso di riparare il muro di contenimento del porto «*sulla strada che va a Tor di Valle per servitio dello scarico della pozzolana*» proveniente dalla tenuta delle Tre Fontane. Nel 1716 Pandiani riceve l'autorizzazione per un adeguamento dell'area portuale che avrebbe velocizzato le operazioni di imbarco del materiale. Vent'anni dopo, nel 1737, il duca Mattei viene autorizzato a ricostruire al posto del «*porto vecchio di legname per scarico della sua pozzolana*» un «*nuovo porto di muro con piantare al fine della ripa, prima di arrivare a ponte Fratte, un pilone di masso di muro*». Nel 1754 Erminio Orciani ottiene il permesso per costruire un altro porto per la pozzolana nella zona fuori porta S. Paolo, «*vicino il prato detto della Crocetta, davanti la strada pubblica* [via Ostiense] *e dietro la ripa del Tevere, sopra la quale per fare il detto porto possa scassare nel pigno del terreno due legni, avanzati quanto occorrerà a formarvi il ponte e formarvi il canalone di legname per introdurre la pozzolana delle barche*» (ASR, PdS, *Liber Patentium*, reg. 64, c. 244v).

Il porto sull'Aniene. Nel 1732 si hanno notizie del porto della pozzolana sull'Aniene all'altezza della tenuta di Pietra Lata, già raffigurato in una pianta del 1660 (*Fig.* 5), in un'autorizzazione rilasciata a un capomastro

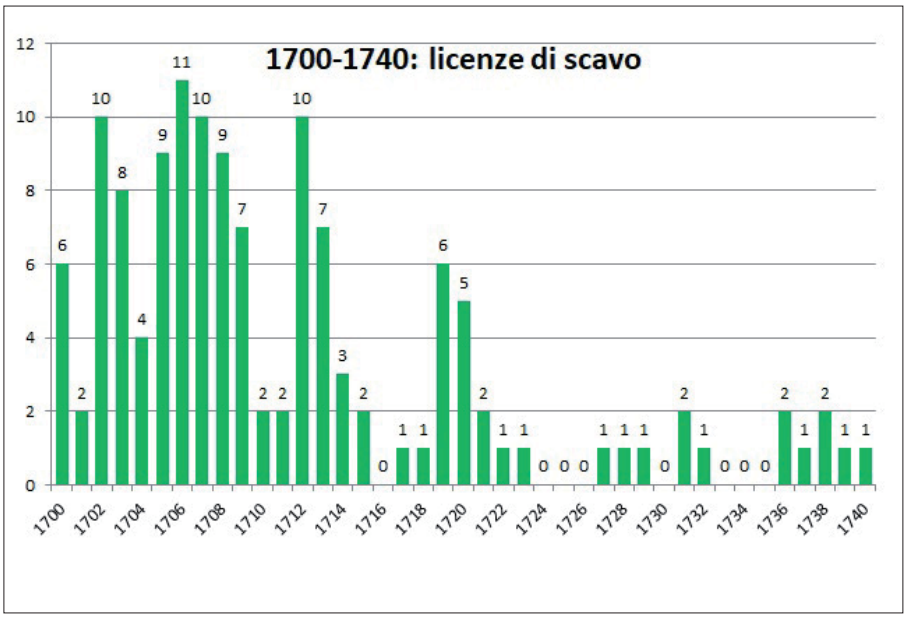


Figura 1 – Licenze di scavo anni 1700-1740 (Fonti: Archivio di Stato di Roma, CROMA-Università di Roma Tre)

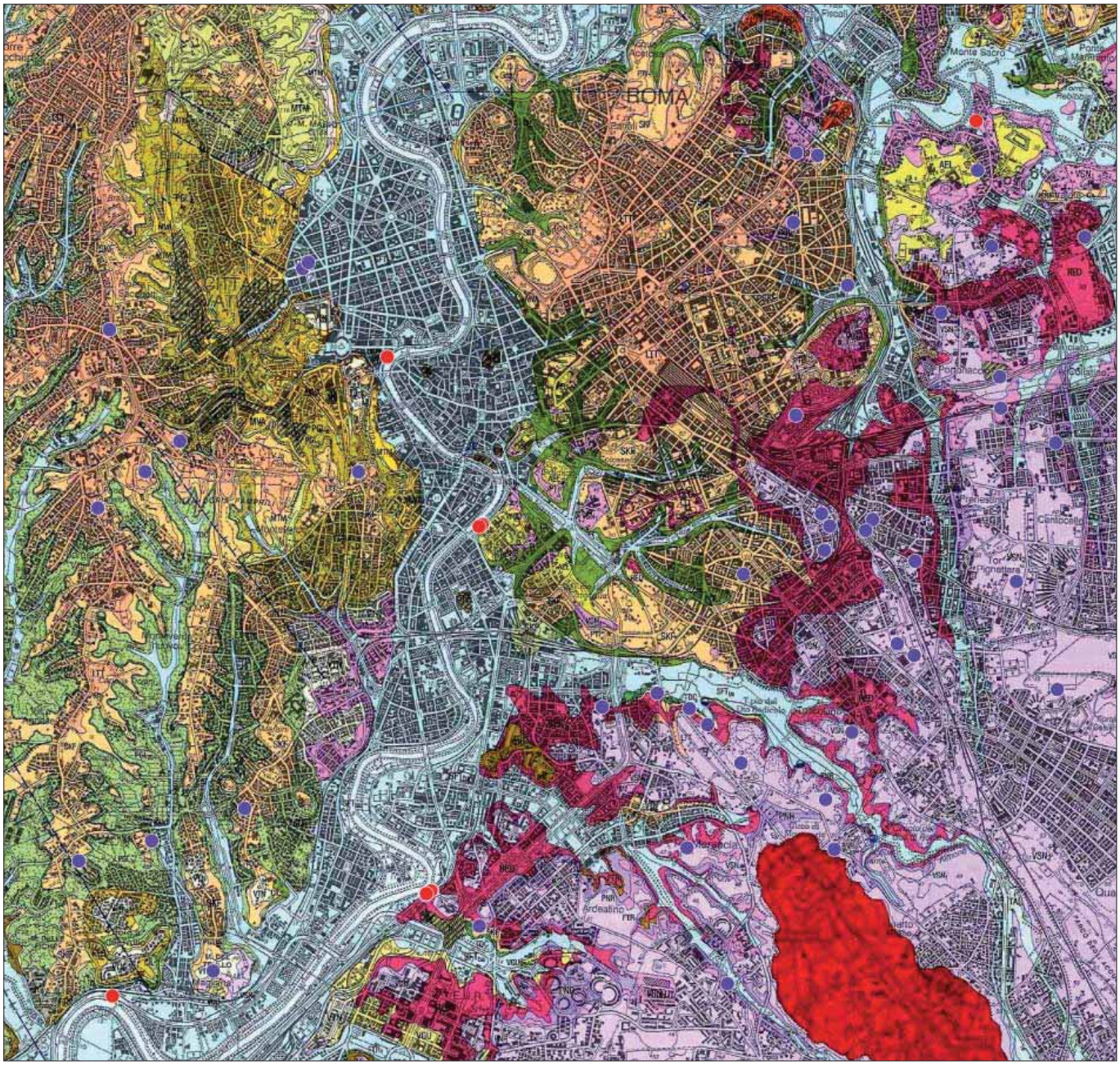


Figura 2 – Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello, Giordano 2008, particolare) con riportate le cave di pozzolana (pallini viola) ed i porti della pozzolana (pallini rossi) esistenti a Roma nella prima metà del Settecento. Si noti la coincidenza tra affioramenti di pozzolane e cave nei settori ad Est del Tevere

per riparare «*la diramazione del fiume Teverone* [Aniene] *nel sito tra le tenute di Guinzano* [Aguzzano] *e Pratalata, fuori porta Maggiore, per renderlo navigabile con le barche della pozzolana con fare un penello di grossi massi di pietra*» (ASR, PdS, *Liber Patentium*, reg. 61, c. 111rv).

Il porto di S. Spirito. Nei registri di licenze è attestata la presenza di un porto della pozzolana sul Tevere all'altezza di Borgo S. Spirito, accanto al magazzino della legna (attuale Lungotevere in Sassia), indicato anche nello schizzo a inchiostro che compare in calce a una licenza del 1689 (ASR, PdS, *Liber patentium*, reg. 52, c. 79rv); la presenza di cave di pozzolana fuori le porte Angelica, Cavalleggeri, Fabrica, Pertusa e S. Pancrazio (località Torre Rossa, Croce di Monte Mario, Casaletto di Pio V, Pidocchio, via Trionfale e via delle Fornaci), testimoniata nei registri delle licenze, giustifica l'attività di un porto all'altezza dell'ospedale di S. Spirito ove veniva convogliata e imbarcata la pozzolana proveniente dalle cave a nord della città.

Un porto fuori porta Portese. Carlo Dezi è l'intestatario di diverse licenze rilasciate tra gli anni Trenta e Cinquanta del Settecento per gestire un'area sulla riva del Tevere fuori porta Portese destinata allo scarico della pozzolana dalle imbarcazioni e allo stoccaggio del materiale: nel 1731 Dezi riceve il permesso di «*mettere una burbora nella ripa del fiume Tevere fuori porta Portese per scaricare la pozzolana dalle barche, con mettere fuori due legni per formarvi sopra un ponte di legname e piantarvi la conocchia per tirare ad alto la pozzolana*», permesso che gli viene rinnovato nel 1741: «*possa continuare a ritenere la burbora con conocchia e ponte nella ripa del fiume Tevere fuori porta Portese per scaricare la pozzolana dalle barche*» e ancora nel 1754 (ASR, PdS, *Liber Patentium*, reg. 64, c. 268r). Alla fine del Settecento il sito fuori porta Portese destinato allo scarico e stoccaggio della pozzolana era ancora attivo: nel 1797 difatti Agapito Salvi ottiene di «*formare uno spiazzo sulla ripa del Tevere nel sito detto il monte della Pica fuori di porta Portese per ivi impastare la pozzolana*» (ASR, PdS, *Liber Patentium*, reg. 71, c. 62r).

IL CONTROLLO DELLA QUALITÀ DELLA POZZOLANA (SECONDA METÀ SECOLO XVIII)

Mentre il rilascio dei permessi di apertura e conduzione delle cave di pozzolana, come degli scavi di pietra, travertino, peperino e materiale archeologico, competeva da sem-

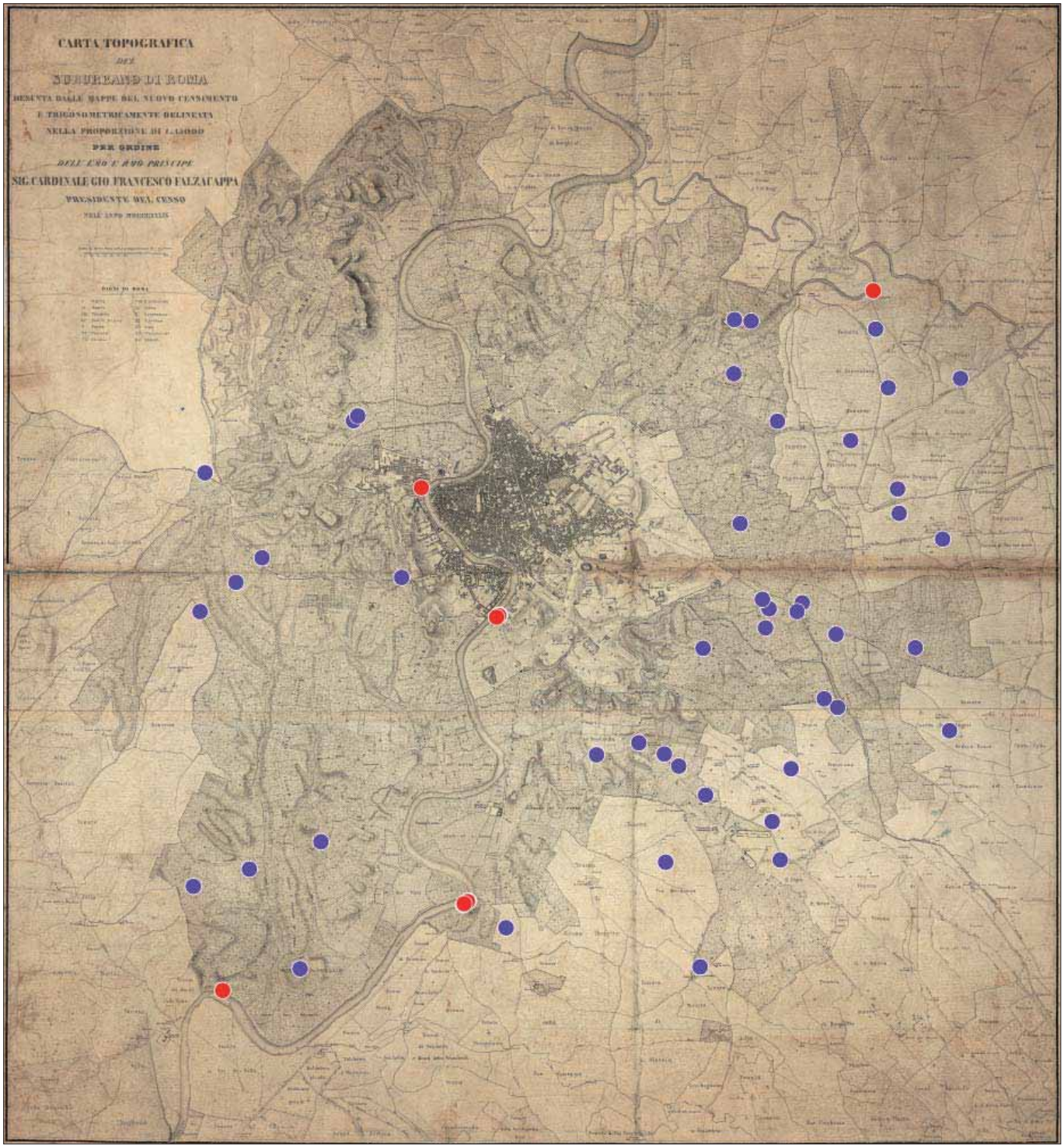


Figura 3 – «Carta Topografica del suburbano di Roma desunta dalle mappe del nuovo Censimento e trigonometricamente delineata nella proporzione di 1:15000 per ordine dell'Eminentissimo e Reverendissimo Principe Sig. Cardinale Giovanni Francesco Falzacappa Presidente del Censo, nell'anno 1839*», incisore F. Trojani. Sono riportate le cave di pozzolana (pallini viola) ed i porti della pozzolana (pallini rossi) esistenti a Roma nella prima metà del Settecento, presenti nelle licenze registrate nei* Libri Patentium *della Presidenza delle strade*

pre al Camerlengo, suprema autorità della Camera apostolica e della magistratura di strade, la sorveglianza e il controllo operativo sulle cave e sulla qualità della pozzolana furono affidati fin dai primi del Seicento a un alto funzionario, il Commissario delle cave e antichità di Roma, affiancato dagli architetti sottomastri di strade e assessori delle cave.

I sopralluoghi e le visite da parte degli incaricati si sistematizzarono dopo il 1750, quando furono chiuse molte cave di pozzolana scadente e impura e divenne vincolante ottenere una sorta di certificato della qualità della pozzolana estratta per poterla commercializzare. Grazie alle relazioni delle visite alle cave possiamo conoscere la tipologia della pozzolana estratta, che era generalmente di colore rosso, rosso-violetto, violetto, nero; in parecchi casi si trovano nel testo informazioni sullo stato della cava, se si trattava della riapertura di una cava già attiva o di una nuova apertura.

Ecco i passaggi più interessanti: nel 1768 l'architetto delle cave dichiara, dopo aver riconosciuto il sito della cava presso Tor Sapienza «*la di cui bocca, ossia ingresso antico, rimane al lato di detta strada*», che si può riaprire abbandonando però «*tutti i cavi antichi prossimi alla strada*» in cui si era cavata la pozzolana in precedenza, e che «*la pozzolana è di colore rosso di ottima e perfetta qualità e che possa cavarsi e vendersi ad uso di qualunque fabrica purchè si cavi dal masso vergine e schietto e si usi tutta la diligenza acciò non si mischi con il cappellaccio che puole distaccarsi dalle parti superiori dei capigrotta nè con il pedicozzo, ossia porcino del fondo, e purchè si conservi la mucchia ove verrà caricata netta e purgata da qualsiasi materia che possa infettarla*». (ASR, PdS, *Liber Patentium*, reg. 67, c. 17r). Un simile dettato si ritrova in molte licenze per la riapertura di cave dismesse o per intraprendere nuovi scavi.

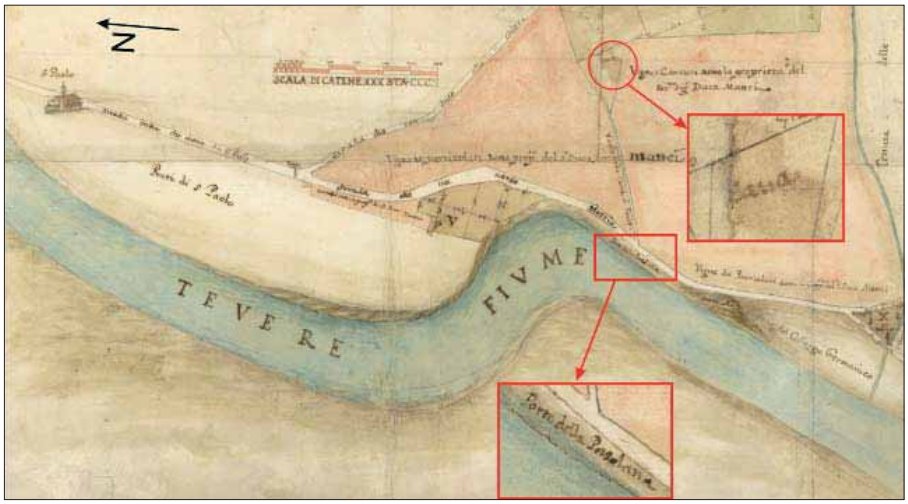


Figura 4 – 1634, E. Vannucci, Pianta della tenuta di Grotta Perfetta fuori porta S. Paolo, particolare del porto della pozzolana, ASR, Pds, Catasto Alessandrino, *432/51*



Figura 5 – 1660, E. Vannucci, Pianta della tenuta di Pietra Lata del duca Lante, particolare del porto della pozzolana sul Teverone [Aniene], ASR, Pds, Catasto Alessandrino, *429/4*

TECNICHE DI SCAVO E TASSAZIONE DELLE CAVE FRA XVII E XVIII SEC.

Le tecniche di scavo documentate fin dai primi decenni del Seicento erano le seguenti: cava a bocca, scoperta, coperta, a grotta, a grotta ossia a bocca, a burbora, a burbora con conocchia; la burbora era un verricello o argano (*Fig.* 6).

Successivamente si registrano anche tipologie diverse di estrazione: a cava scoperta da tirarsi fuori con carriole o con barozze, a bocca da lavorarsi con 2 o 3 picconi, a grotta da tirarsi fuori con carriole; è sempre previsto l'obbligo per il cavatore di costruire in tempi rapidi una strada per permettere ai funzionari delle strade di calare da basso a ispezionare la cava. Una clausola sempre presente nei permessi obbligava i cavatori a denunciare il materiale archeologico ritrovato nello scavo al fine di salvaguardare la parte spettante alla Camera Apostolica, specificando di «*non muovere* [le cose antiche] *se prima non saranno da noi riconosciute e visitate*»: nella seconda metà del Settecento infatti i pontefici misero a punto una normativa più stringente per la tutela dei resti archeologici della Roma classica, anche per garantirsene la parte più pregevole. Ne costituisce testimonianza inequivocabile un registrino di assegne e disdette della cave di pozzolana per gli anni 1763-1772, nel quale, oltre alle dichiarazioni di apertura e disdette di cave di pozzolana, sono annotati i reperti archeologici rinvenuti nella cava di Roma Vecchia e in quella del principe Altieri ad Albano (Quarto Secciaro): frammenti di capitelli, colonne, statue e busti, fra i quali una testa colossale in marmo di Antonino Pio.

Negli anni Venti del Seicento la Presidenza delle strade aveva stabilito per la prima volta che ogni cava di pozzolana attiva doveva essere dichiarata dal conduttore e pagare una tassa di 5 scudi mensili per il periodo di attività. Nel 1670 vennero esentati dal pagamento della tassa dei 5 scudi mensili i gestori delle cave di pozzolana fuori porta S. Giovanni. La riscossione della tassa era appaltata e i proventi andavano a coprire i costi di manutenzione delle strade percorse dai carri carichi di pozzolana.

LA CAVA NELLA VIGNA DI VILLA NEGRONI A TERMINI

Nel 1780 venne rilasciato al cavatore Michelangelo Garattoni un permesso per riaprire un'antica cava di pozzolana a Termini, nella vigna della villa Negroni, già Peretti-Montalto, (ASR, PdS, *Liber Patentium*, reg. 68, c. 88r); Carlo Puri De Marchis, architetto delle cave incaricato del sopralluogo, scrive nella sua relazione: «*cava antica di pozzolana, si estrae colla burbora in molta profondità; si attesta che la pozzolana, di color nero, è di*

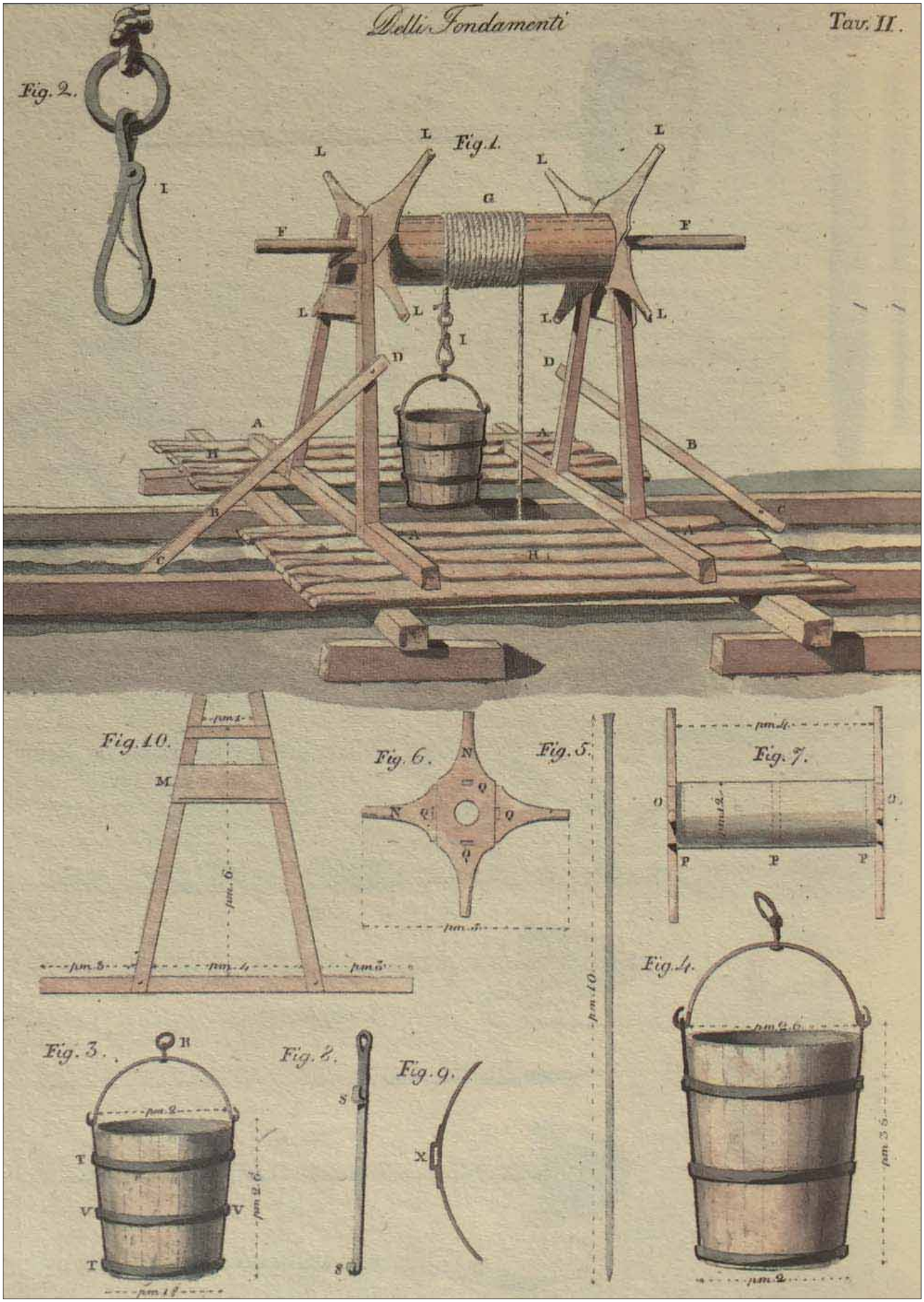


Figura 6 – «Burbera» con i suoi accessori (G. Valadier, L'architettura pratica, Roma 1832, Vol I tav.II). Il vocabolario della Crusca definisce la burbera o burbora «strumento in uso per tirar pesi»*, mentre, alla metà del XIX secolo, Giacinto Carena afferma trattarsi di un* «argano orizzontale girevole ai due capi su due perni, uno di questi (o entrambi) prolungato e ripiegato in manovella. Con questo strumento collocato sul ponte tiransi su i materiali di cui abbisogna il muratore quando lavora in alto» *(G. Carena, Prontuario dei vocaboli attinenti a parecchie arti e ad alcuni mestieri, Torino 1853)*



Figura 7 – 1779, T. Jones, "An excavation of an antique building discovered in a cava in the Villa Negroni at Rome", Londra, Tate Gallery. Lo scavo di resti archeologici a Villa Negroni, a Termini, visibile nel dipinto con la chiesa di S. Antonio Abate sullo sfondo, era in atto quando fu riaperta la cava di pozzolana nello stesso sito.

in particolare due diramazioni, una verso Ponente (F) e l'altra verso Libeccio (G): la prima «d*opo aver formato 4 bracci, 2 a destra e 2 a sinistra, prosegue a distanza di palmi 38 e ¾ dalla vigna Pallavicini, la seconda diretta a Libeccio si dirige in linea retta verso Ponente (H)*». Dopo altre due diramazioni, la cava si dirigeva per 18 palmi sotto la vigna Pallavicini «*alla quale se non si prosegue oltre non dovrebbe recar danno*». Il giudice avrebbe poi deciso se permettere loro di continuare lo scavo o dirottarlo in modo da rimanere sotto la vigna Noccioli (ASR, *Coll. Disegni e Mappe* I, c. 92, f. 717).

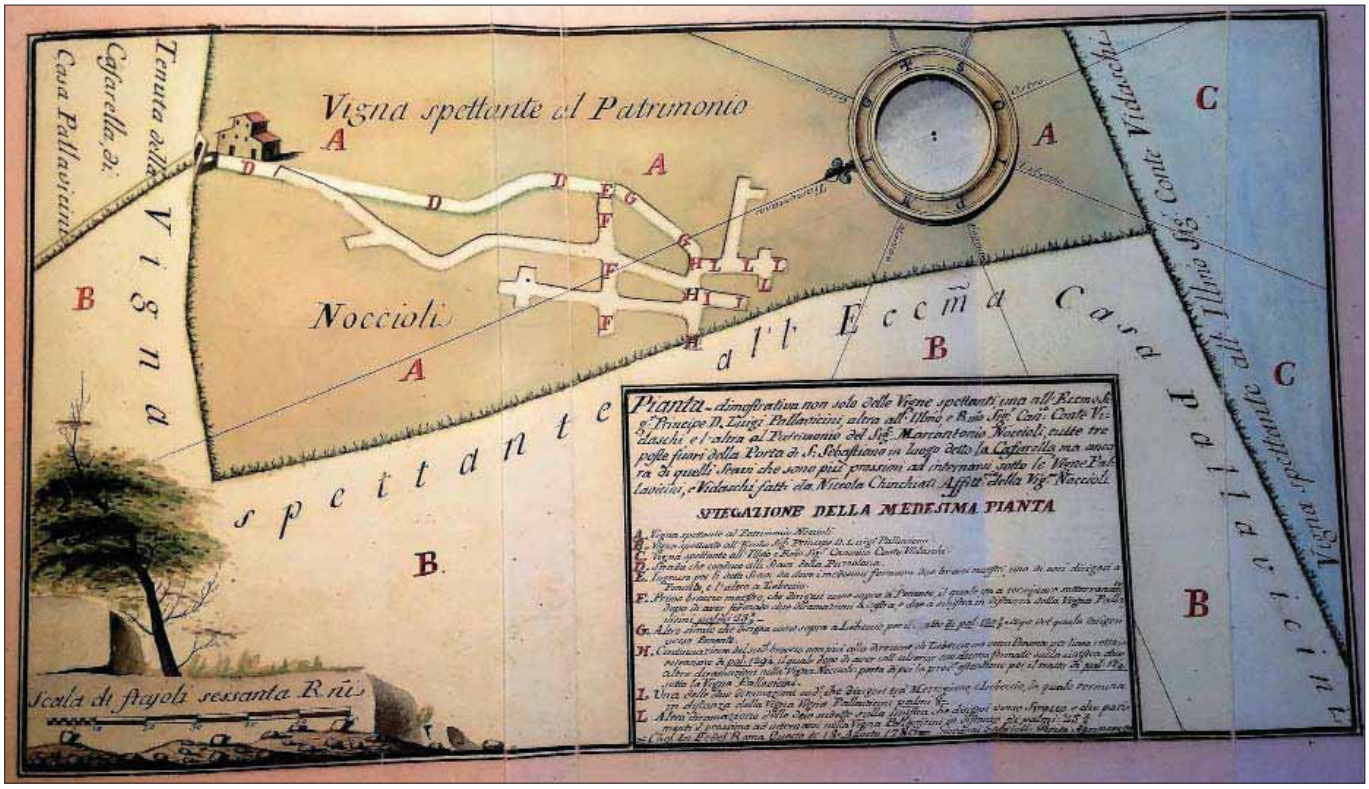


Figura 8 – 1786, Giovanni Gabrielli, Pianta della Vigna spettante al Patrimonio Noccioli fuori Porta San Sebastiano, e ubicazione degli scavi in sotterraneo per cavare la pozzolana al di sotto della stessa Vigna. ASR, Coll. Disegni e Mappe, *I, c. 92, f. 717.*

buona qualità e può cavarsi e vendersi per uso di qualsiasi fabrica, purchè si cavi dal masso schietto e si conservi la mucchia dove verrà caricata netta e spurgata da qualunque materia terrosa». Negli stessi anni era in corso nella villa Negroni anche uno scavo di materiale archeologico nel quale si rinvennero edifici dell'epoca classica ornati da affreschi, raffigurati in un dipinto dell'inglese Thomas Jones (*Fig.* 7).

UNA CAUSA PER IL PERICOLO DI FRANA IN UNA CAVA ALLA CAFFARELLA

L'escavazione di pozzolana dava origine a contenziosi tra i proprietari dei terreni vicini alle cave: è grazie ad una controversia tra i proprietari di vigne adiacenti alla cava di pozzolana alla Caffarella, gestita da Nicola Cruciani, amministratore della vigna Noccioli, che nel 1786 fu redatta una pianta della planimetria della cava (*Fig.* 8), conservata insieme con la relazione dell'agrimensore Gabrielli. Il principe Luigi Pallavicini e il canonico Vidaschi temendo che l'estensione degli scavi sotto le loro vigne facesse franare il terreno denunciarono il fatto al tribunale dell'*Auditor Camere* che dispose un sopralluogo. L'agrimensore, entrato nella cava scortato dai cavatori muniti di torce e lumi e con l'aiuto della bussola vide «*molte e lunghe escavazioni*» e

BIBLIOGRAFIA

Archivio di Stato Di Roma (secoli XVI-XVIII), Presidenza delle strade, *Libri Patentium*; *Catasto Alessandrino*, Roma.

Archivio Storico Capitolino (1580-1634), *Camera Capitolina*, *Libri Patentium*, Roma.

Carena G. (1853), *Prontuario dei vocaboli attinenti a parecchie arti e ad alcuni mestieri*, Torino

Funiciello R., Giordano G. (2008), *Carta Geologica del Comune di Roma*.

Jones T. (1779), *An excavation of an antique building discovered in a cava in the Villa Negroni at Rome*, Tate Gallery, Londra.

Trojani F. (1839), *Carta Topografica del suburbano di Roma*, Roma.

Valadier, G. (1832), *L'architettura pratica*, Roma.

Cave sotterranee nel Colle Aventino. Cartografia storica, documenti di archivio e nuove indagini geoarcheologiche

Hypogean quarries in the Aventine hill. Historical cartography, archival documents and new geoarcheological research

Letizia Rustico
Archeologa, Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma
E-mail: letizia.rustico@beniculturali.it

Roberto Narducci
Archeologo, Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma
E-mail: roberto.narducci@beniculturali.it

Parole chiave (*key words*): cave di tufo (*tufa quarries*), Aventino (*Aventine hill*), cartografia storica (*historical cartography*), documenti di archivio (*archival documents*), indagini geoarcheologiche (*geoarchaeological research*), GIS

ABSTRACT

L'analisi comparata tra cartografia storica, documentazione archivistica e dati raccolti sul campo attraverso recenti indagini geoarcheologiche, consente di ricostruire il paesaggio ipogeo del colle Aventino che è stato oggetto nel corso dei secoli di un'intensa attività di estrazione di materiale da costruzione come tufo e pozzolana.

Finalità della ricerca è l'elaborazione di un GIS - appositamente eseguito e incrementabile - che favorisca la lettura del sistema di cavità ipogee artificiali dell'Aventino considerate in antico non un intralcio allo sviluppo urbanistico di superficie ma, al contrario, una risorsa economica da proteggere.

***

L'argomento delle cave sotterranee presenti sulle due alture dell' Aventino, già oggetto di anticipazioni in precedenti occasioni editoriali (RUSTICO L. in corso di stampa; NARDUCCI L., RUSTICO L. (2017), 81-97 part. 87-89), viene qui approfondito con un contributo dedicato che mette a confronto i dati storici scaturiti da studi cartografici e archivistici e i risultati di recenti indagini geoarcheologiche svolte nell'ambito del ruolo istituzionale della Soprintendenza competente per territorio.

L'esistenza nel sottosuolo della struttura morfologica dell'Aventino di strati geologici di natura vulcanica ha determinato, fin dall'antichità, lo sviluppo di un'intensa attività di cava per l'estrazione di materiale da costruzione come tufo e pozzolana. In particolare, come si evince dai sondaggi geognostici effettuati, l'unità stratigrafica significativamente estratta sul colle è il tufo lionato, un deposito piroclastico litoide del distretto vulcanico dei Colli Albani utilizzato per le sue caratteristiche meccaniche di compattezza, relativa leggerezza e di versatilità al taglio. Associati al tufo lionato, sono attestati anche consistenti livelli di vari tipi di pozzolane, in uso ancora in epoca moderna come inerti e miscelanti del conglomerato cementizio.

L'attività di coltivazione risulta organizzata prevalentemente in galleria come si può dedurre dall'analisi comparata tra il materiale documentario esaminato e le esplorazioni o le video ispezioni condotte sul posto, anche se si deve necessariamente pensare a settori a cielo aperto per la fuoriuscita degli elementi cavati e soprattutto all'esecuzione di profonde falesie per l'impostazione iniziale dei fronti di cava. La tecnica di scavo in galleria degli strati geologici prevedeva l'apertura di cunicoli e di spaziosi ambienti, intervallati da pilastri risparmiati che avevano lo scopo di sorreggere le volte dei grandi vani (ADAM J.P. (1994), 24-25, *Fig.* 21; FUNICIELLO R., HEIKEN G., DE RITA D., PAROTTO M. (2006), 73-80).

In questo senso le cave sotterranee dell'ambiente romano-laziale si somigliano un po' tutte: intraprese con la finalità di estrarre materiale per uso edile, nel corso dei secoli possono assumere diverse destinazioni: da spazi per lo svolgimento di rituali ad aree cimiteriali come nel caso delle catacombe ebraiche di Monteverde (ROSSI D., DI MENTO M. (2013)); da depositi a fungaie fino a divenire in alcuni casi rifugi antiaerei per la popolazione civile durante il periodo della seconda guerra mondiale. Solo quest'ultima tipologia di riuso è riscontrabile sull'Aventino dove è documentata un'ininterrotta continuità di esercizio delle cave per l'estrazione di materiali da costruzione, dall'epoca antica fino al periodo immediatamente precedente il secondo conflitto mondiale.

Nel 1940, mentre si realizza la metropolitana E42 nell'attraversamento di viale Aventino, allora viale Africa, all'altezza di piazza Albania, denominata a quell'epoca piazza Rauduscolana (BUZZETTI C., PISANI SARTORIO G. (2015), 285-341) si incontrano gli ambienti delle cave sotterranee che vengono inglobati nel tunnel ipogeo della metropolitana (PERRONE V. (1940), 321-333). Proprio in questo tratto i tecnici identificano una cava di pozzolana ancora funzionante (*Fig.* 1). L'ingegnere Vito Perrone, supervisore del progetto, riporta la seguente testimonianza: "lungo viale Africa si costruisce la galleria ferroviaria parte all'aperto parte a foro cieco. In quest'ultima si incontrano quasi dappertutto antiche cave di pozzolana molto grandi perché vi si entrava con carri a più cavalli e con le volte sostenute dai piloni che solevano



Figura 1 – I lavori per la realizzazione della Metropolitana sotto viale Aventino incontrano le cavità sotterranee (da PERRONE V. 1940)

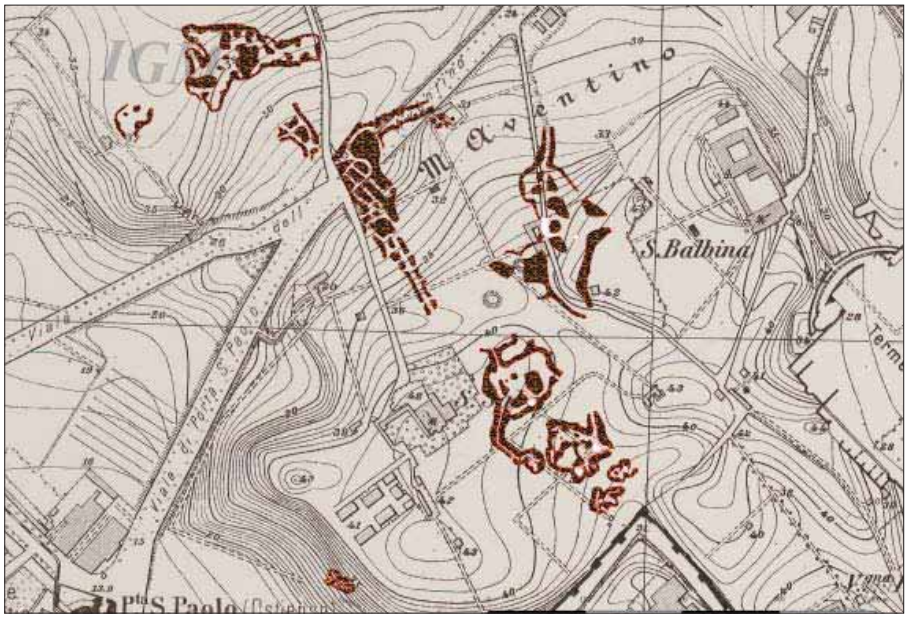


Figura 2 – Elaborazione GIS delle cavità sotterrane su base IGM del 1908 (R. Narducci)

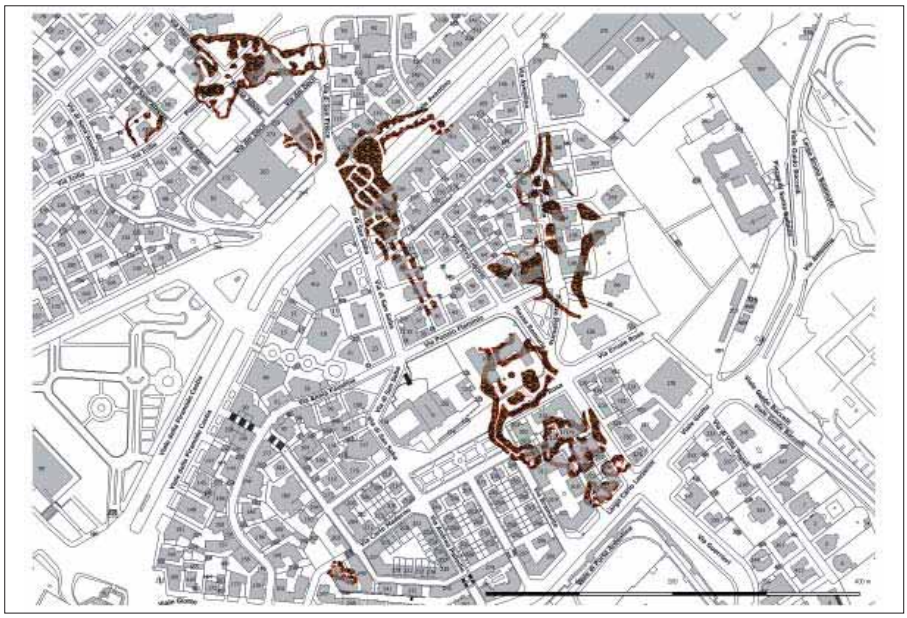


Figura 3 – Elaborazione GIS delle cavità sotterrane su base catastale del 2004 (R. Narducci)



Figura 4 – Elaborazione GIS della Cava de Tufi *riportata nella Nuova Pianta di Roma di Giovanni Battista Nolli del 1748 e su base catastale del 2004 (R. Narducci)*

lasciare gli escavatori e che non sempre erano adeguati alle fortissime luci create negli scavi; d'altronde il tempo e i rimaneggiamenti apportati a quei terreni a scopo di costruzione o altro hanno indubbiamente mutato, peggiorandole, le preesistenti condizioni di stabilità delle cave. Si è quindi proceduto con speciali cautele facendo precedere l'avanzata della galleria da cunicoli di saggio allo scopo di esplorare le cave sostenendo preventivamente le volte con grossi muri dopo di che si potevano abbattere i piloni lasciati dagli scavatori e proseguire l'avanzata".

Lo straordinario materiale iconografico di archivio sul sistema ipogeo dell'Aventino è confluito in un'elaborazione GIS appositamente eseguita, costantemente aggiornata e incrementata con le nuove acquisizioni derivate dalle indagini geoarcheologiche in alcune zone del colle. Interessante la localizzazione georiferita delle cave sulla carta topografica IGM del 1908 epoca in cui il territorio non era ancora fittamente urbanizzato (*Fig.* 2). Su tale rappresentazione è particolarmente apprezzabile la dorsale orografica del colle interessata dalle cave sotterranee e la depressione morfologica oggi percorsa da viale Aventino dove si può riconoscere un fronte di cava, il punto iniziale, probabilmente ai piedi di una falesia naturale poi artificialmente regolarizzata, da cui in antico venne intrapresa la coltivazione del banco naturale di tufo (MATTEUCCI R., ROSA C. (2002)). Colpisce l'elaborazione GIS sulla moderna base catastale (*Fig.* 3) che manifesta in tutta la sua chiarezza quanto sia fragile l'equilibrio tra lo sviluppo urbano soprastante e il reticolo sotterraneo delle gallerie e quanto sia pressante ormai un'azione prima di conoscenza e poi di prevenzione in questo territorio.

Le più antiche testimonianze documentali sull'esistenza di cave sotterranee ancora funzionanti all'Aventino sembrano circoscritte all'area di San Saba sull'Aventino Minore. Si tratta di un rapporto di cantiere da cui risulta che la Basilica di Santa Maria degli Angeli fu edificata a partire dal 1562 con blocchi di tufo estratti dalle cave di San Saba (LANCIANI R., 1990, II, 149).

Nel XVIII secolo Giovanni Battista Nolli nella "Nuova Pianta di Roma", considerata la prima mappa catastale analitica della città con proprietà, beni immobili e antichità, censisce una *Cava de Tufi* nella Vigna d'Aste (*Fig.* 4), località identificabile, grazie all'elaborazione GIS, nell'area compresa tra le attuali via di San Saba, viale Aventino e via Aventina (TRAVAGLINI C.M., LELO K. (2013), I-II).

Risale al 1820 la Carta fisica del suolo di Roma di Giovanni Battista Brocchi il quale si avvale della base topografica di Nolli e redige - in assoluto - la prima carta geologica



Figura 5 – Disegno acquerellato del Fondo Lanciani, inv. 19410)

di Roma precedente alla crescita a macchia d'olio della città (CAPUTO C., FUNICIELLO R., in TRAVAGLINI C.M., LELO K. (2013), vol. I, 43-49). Brocchi riflette nella sua carta un paesaggio urbano che di lì a breve, con la nascita dello stato unitario e l'elezione di Roma a sua capitale, sarebbe stato cancellato per sempre senza lasciare tracce. Sulla sommità dell'Aventino Maggiore davanti alla chiesa di Sant'Alessio Brocchi segnala la presenza di tufo litoide tra boschi sacri - i *luci* della tradizione letteraria antica - mentre sull'Aventino Minore, Brocchi rileva tufi vulcanici di consistenza granulare.

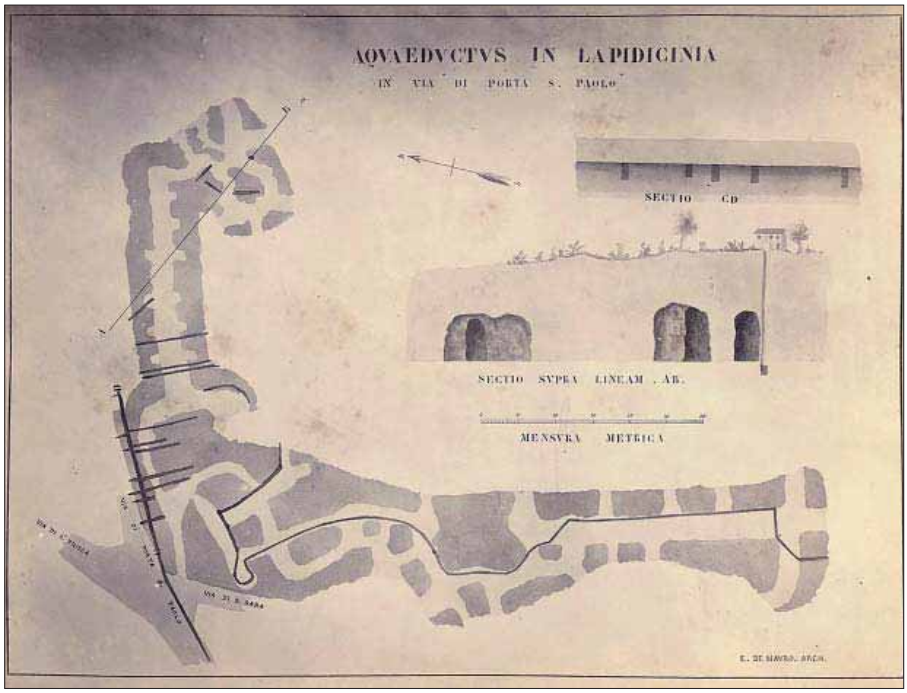


Figura 6 – Foto di John Henry Parker del disegno acquerellato del Fondo Lanciani (Photographic Archive of British School at Rome, jhp 834)

Si deve a Rodolfo Lanciani un fondamentale apporto alla conoscenza della topografia delle cave dell'Aventino. Lo studioso ha utilizzato due disegni su questo tema: il primo (*Fig.* 5) consiste in acquarello che riproduce per esteso la planimetria dello stesso gruppo di cave riportato da Nolli (Fondo Lanciani della Biblioteca di Archeologia e Storia dell'Arte di Palazzo Venezia a Roma, inv. 19410) . Colpisce la resa realistica della caratterizzazione, evocativa del tufo, mentre dalla precisione del tracciato completo di quote assolute, dai particolari come le linee di sezione e dal percorso in azzurro del tratto ipogeo di un acquedotto interpretato come l'*Aqua Appia*, si deduce che il rilievo grafico, purtroppo strappato nella parte inferiore, è stato elaborato sul posto. Rodolfo Lanciani inserisce questo disegno nella sua monumentale opera *Forma Urbis Romae*, considerata il primo applicativo GIS della storia, a cui si affianca uno studio diacronico. Nella tavola XLI il complesso di cave risalta agli occhi più di qualsiasi altra evidenza archeologica e costituisce anzi la peculiare caratteristica del paesaggio ipogeo del colle Aventino. Il colore usato da Lanciani per illustrare le cave è il rosso scuro che identifica l'iconografia della città antica di epoca repubblicana. Tuttavia Lanciani non perde mai occasione di rimarcare l'ininterrotta continuità di uso delle cave stesse fino in epoca moderna.

Nel biennio compreso tra il 1867 e il 1869 lo studioso inglese John Henry Parker fotografa in maniera completa questo disegno consentendo così di leggere l'autore dell'elaborato grafico, l'architetto ingegnere Ernesto de Mauro (*Fig.* 6). Nella riproduzione fotografica integrale di Parker (Photographic Archive of British School at Rome, jhp 834.) si osservano anche altri particolari delle cave come ad esempio le quote *libramentum maris* del piano di una galleria posto a m. 12.53 e i rapporti stratigrafici tra cave e *specus* degli acquedotti (*Fig.* 7). In alcuni punti i pilastri risparmiati delle gallerie tagliano il percorso ipogeo dell'acquedotto interrompendone il funzionamento; dove i cunicoli per la captazione e deflusso delle acque non interferiscono con le gallerie, occupando in maniera coerente lo spazio ipogeo a disposizione, si può pensare di riconoscere, presumibilmente, una parte originaria della cava. Anche Parker, al pari di Lanciani, deve aver condotto dei sopralluoghi all'interno delle cave come

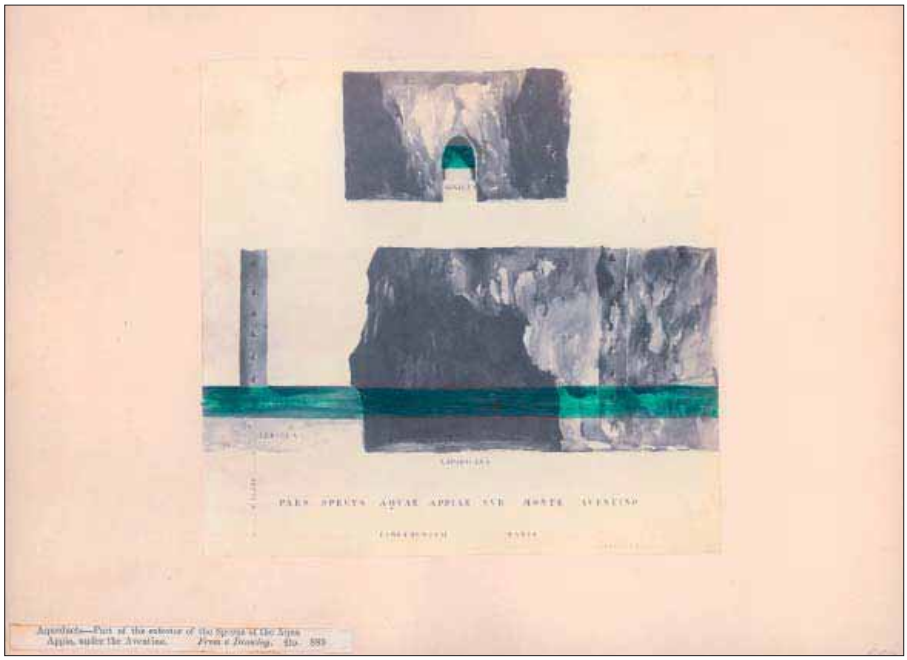


Figura 7 – Foto di John Henry Parker delle cave di San Saba e dello specus *dell'Acquedotto Appio (Photographic Archive of British School at Rome, jhp 889)*

dimostra un'immagine scattata con l'ausilio di una lampada a luce di magnesio in una delle sue prime applicazioni (Photographic Archive of British School at Rome, jhp 11161).

Il secondo disegno (*Fig.* 8) pertinente a Rodolfo Lanciani è un piccolo schizzo a penna datato al 1879 che raffigura la sezione stratigrafica della cava a est della chiesa di San Saba con la dicitura "Fossa Serviana ripiena di scarichi" Lanciani riporta il disegno nella tavola XLI della *Forma Urbis Romae* ponendolo in riferimento con il percorso in questa parte del colle delle Mura Serviane (BUONOCORE M. 2001, 30, f. 39). Tuttavia dalla sovrapposizione georiferita tra una planimetria tecnica del Comune di Roma risalente al 1943 con il sistema di cave allora conosciuto e la carta di Lanciani si può stabilire che la cd. Fossa Serviana coincide in realtà con una diramazione delle gallerie e non ha alcun rapporto funzionale con le fortificazioni d'età repubblicana che probabilmente correvano più a sud, lungo il ciglio meridionale del colle. Gli "scarichi" sono forse riferibili alla colmatura di parti delle gallerie con terra, detriti e materiali di scarto avvenuta nel corso del tempo e anche in epoca tardoantica.

Un interessante carteggio conservato all'Archivio Storico Capitolino lascia intuire come la rete di cavità sotterranee fosse ancora attiva nella seconda metà dell'Ottocento e come lo sfruttamento del sottosuolo per l'estrazione di tufo e pozzolana costituisse allora un'attività così redditizia da mettere a repentaglio la sicurezza della viabilità pubblica di superficie pur di esercitarla (Archivio Storico Capitolino, Ripartizione Lavori Pubblici, Miniere e cave, Direzione, Titolo 11, anno 1875-1880, busta 44, fasc. 2).

Mappe dettagliate in allegato a pratiche di denunce e a ordinanze sindacali documentano i continui crolli verificati all'interno delle gallerie ipogee ma sono, allo stesso modo, fonte di conoscenza del percorso seguito dalle cave sul colle. In questo caso le diramazioni sono localizzabili sull'Aventino Minore tra l'area del palazzo della FAO e via Aventina. Proprio lungo questo tracciato, che ricalca un asse viario antico noto come via di Porta *Naevia* su cui si affacciano importanti complessi residenziali di età romana, si è aperta di recente un'ampia voragine che ha lasciato in vista un fronte di cava con tracce di lavorazione "a gradini", l'imbocco di un cunicolo e una vasca di forma rettangolare ricavata nel banco naturale di tufo e fornita di pedarole. Come ormai accade con una certa frequenza negli spazi urbani, i dissesti e le voragini sono indizio del cedimento di cavità antropiche sottostanti (AMANTI M., CESI C., VITALE V. (2008), in FUNICIELLO R, PRATURLON A., GIORDANO G. (2008), 83-117). Queste mappe di archivio tuttavia non sono esaustive e restituiscono solo le quote delle strade all'esterno delle gallerie ma non del livello interno delle cavità che non sappiamo quali profondità raggiungessero.

Altro importante materiale documentario appannaggio della municipalità di Roma aiuta a collocare su questo versante dell'Aventino le gallerie poste in prosecuzione con il nucleo principale riportato da Nolli e Lanciani (*Fig.* 9). I documenti anche iconografici, datati tra la fine dell'Ottocento e gli inizi del Novecento, sono relativi alle compravendite e agli espropri da parte del Comune di Roma nell'area a sud della chiesa di San Saba dove nel 1905 l'Istituto Case Popolari intraprende i lavori per la realizzazione del quartiere operaio (Archivio Storico Capitolino, Piano Regolatore, fuori posizione, Aventino – San Saba, busta 27, fasc. 5, 1909-1912; Titolo 34, Sottosuolo, busta 107, fasc. 14; Ripartizione V, Ispettorato Edilizio, 6836/1913 con allegata mappa a colori delle cavità).

Significativi i passaggi di proprietà di questa zona dove risultano in giacenza scorie di tufo e pozzolana provenienti dalle cave sottostanti e che fanno parte, alla stessa stregua

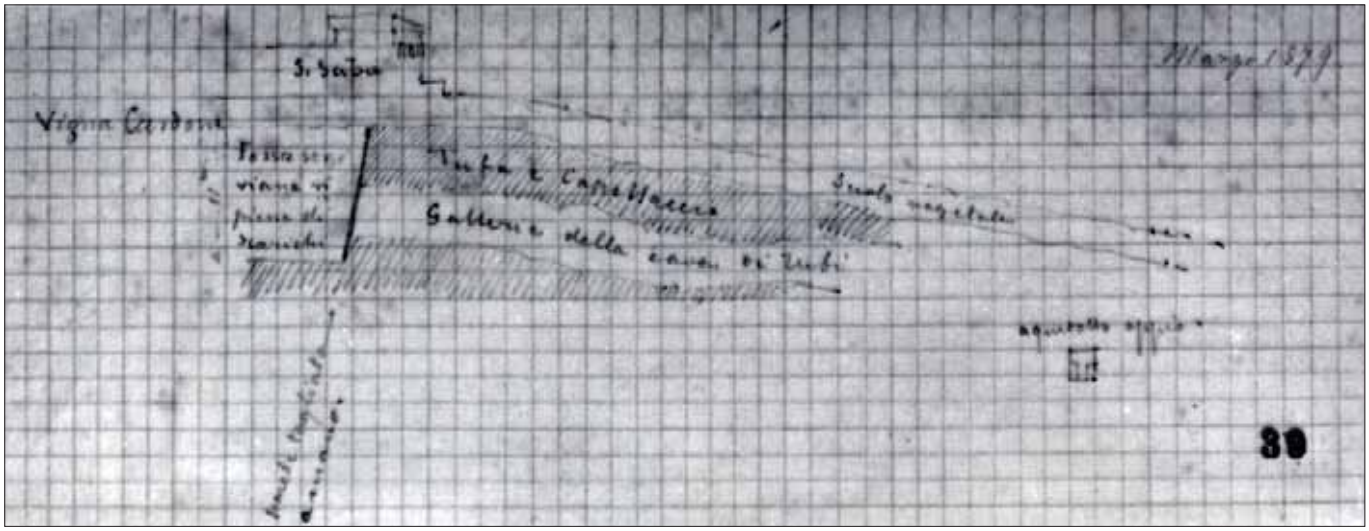


Figura 8 – Sezione della Fossa ripiena di scarichi *nell'area di San Saba (da BUONOCORE M., 2001)*

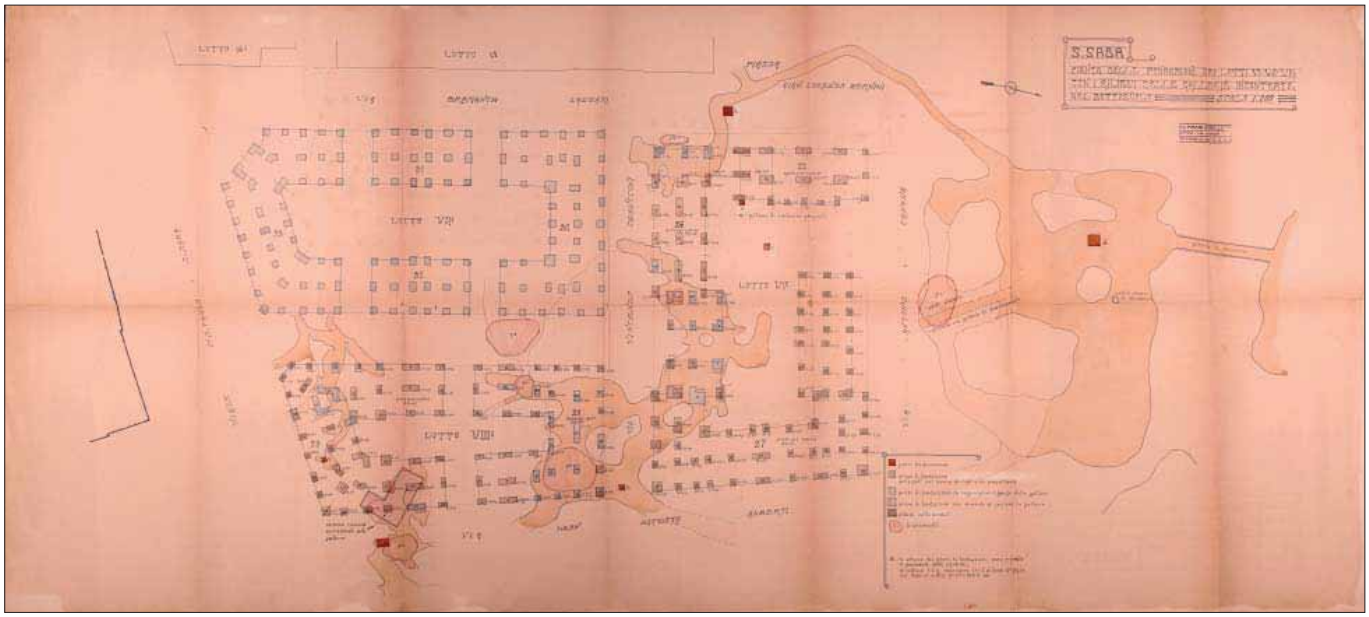


Figura 9 – Planimetria delle cavità nell'area del quartiere operaio di San Saba (Archivio Storico Capitolino, anno 1875-1880, busta 44, fasc. 2)

dei prodotti dell'orto o degli alberi da frutta di una stima di valutazione in denaro ben precisa.

Nel 1913 l'Istituto Case Popolari invia al Comune di Roma la mappatura delle cave specificando di aver provveduto al rinforzo delle volte delle gallerie con la costruzione di piloni che arrivavano fino al fondo delle gallerie stesse e di aver comunque consolidato le fondazioni degli edifici moderni. A nulla valgono le rassicurazioni del Comune agli abitanti delle case popolari che lamentano invece crepe e cedimenti all'interno delle abitazioni e segnalano l'apertura di voragini nelle sedi stradali. Addirittura nel 1922 per motivi statici si abbandona definitivamente la realizzazione di una linea tranviaria di superficie a viale Giotto, staccando i binari e ricoprendo i sondaggi (Archivio Storico Capitolino, Ripartizione V, Ispettorato Edilizio, 2679/1922)

Nell'ottobre del 1987 si apre in via di San Giosafat all'Aventino un'ampia voragine che inghiotte addirittura un auto con persone a bordo mentre transitava lungo la strada. Le cavità ipogee, lasciate in stato di abbandono, se non sottoposte a manutenzione e controllo costituiscono infatti un grosso rischio per la città. Il cedimento di via di San Giosafat, una volta passata l'emergenza, ha consentito al personale tecnico specializzato di esplorare l'interessante complesso ipogeo di cave per l'estrazione di materiale vulcanico posto ad una profondità -14 m sotto l'attuale piano stradale e di analizzare il tipo di materiale estratto nelle cave che è risultato essere tufo lionato. Le planimetria e le sezioni di dettaglio eseguite in quella occasione (SANTORO W., FEDERICI V. (2002), 595-602) si aggiungono alla rete di cavità ipogee note attraverso la documentazione cartografica di archivio



Figura 10 – Le cave di via San Giosafat ispezionate nel 1987 (Archivio Fotografico FotoSAR)



Figura 11 – Le cave di via San Giosafat ispezionate nel 2004 (M. Placidi)

mentre le suggestive immagini scattate nel corso del tempo, se paragonate tra loro, lasciano intravedere nuovi crolli che minano la staticità del complesso ipogeo con il rischio di trascinare in un disastroso effetto domino le strutture soprastanti, siano esse moderne o anche antiche (*Figg*. 10-11). Altri dissesti hanno interessato sempre nel 1987 la vicina via Marcella convincendo i proprietari di un villino moderno lungo questa strada ad ammettere l'esistenza di alcuni ambienti antichi affrescati appartenenti ad una *domus* romana e usati fino a quel momento come cantine e come rifugi antiaerei durante la seconda guerra mondiale. La Soprintendenza ha subi-



Figura 12 – Piazza Albania pozzo ricavato nel banco naturale di tufo (M. Letizia)



Figura 13 – Piazza Albania particolare del pozzo ricavato nel banco naturale di tufo (M. Letizia)



Figura 14 – Piazza Albania sinkhole nei pavimenti della domus *di età romana (M. Letizia)*

to posto un vincolo sul complesso residenziale antico sottoposto oggi ad un continuo monitoraggio sotto il profilo ambientale per la conservazione degli affreschi e soprattutto sotto l'aspetto statico (CICCARELLO G. (2017), in CAPODIFERRO A., MIGNONE L .M., QUARANTA P. (2017),159-169).

Le recenti indagini archeologiche preventive alla realizzazione di un parcheggio interrato in via Sant'Alessio 28, non lontano da via San Giosafat lungo le pendici occidentali del colle che digradano verso via Marmorata, oltre a riportare in luce un importante complesso residenziale di epoca romana con resti di mosaici e affreschi parietali (RUSTICO L., NARDUCCI R., in corso di stampa), ha consentito di conoscere un nuovo nucleo di cave sotterranee grazie all'esecuzione di carotaggi che hanno raggiunto la profondità di m 20. I sondaggi geognostici si sono svolti in due riprese lungo tutto il perimetro della proprietà: nel 2016 quando è stata eseguita anche una videoispezione con microcamera digitale ad alta definizione e nell'estate del 2017. In entrambe le occasioni si è rilevata la presenza di cavità ricavate nel tufo lionato ad una profondità variabile compresa tra m 11 e m 13. rispetto all'attuale piano di calpestio. Le immagini hanno individuato un ambiente unico molto ampio delimitato da un pilastro risparmiato e varie diramazioni. Si sono riscontrati crolli di materiali dalla calotta anche sotto forma di grosse scaglie e riempimenti di terra provenienti da lesioni superiori. Il pilastro presenta vari distacchi con accumulo di materiale alla base. Le dimensioni in altezza delle cavità sono calcolabili intorno a m 3,10 - 3,80. A interessanti conclusioni si è giunti dopo la realizzazione di un pozzo piezometrico che raggiungendo la profondità di m 55, ha attraversato completamente le cavità ipogee nel tufo lionato. Queste si riscontrano tra m 11.80 fino a - m 16.00 m. e risultano pertanto alte nel punto della perforazione oltre m 4. Nella sequenza stratigrafica il tufo lionato termina a m 17 e a - m 21.85 m affiora l'acqua di falda.

Il cambiamento di destinazione d'uso - da ufficio a residenziale - del complesso immobiliare di proprietà BNL a piazza Albania, ha determinato l'intervento della Soprintendenza per l'esecuzione di indagini archeologiche preventive. L'area è localizzata alle pendici meridionali dell'Aventino lungo la depressione morfologica oggi percorsa da viale Aventino che separa le alture dell'Aventino maggiore e del minore. Probabilmente connessa e afferente all'attività estrattiva, già ampiamente documentata in quest'area, sembra essere una struttura grossomodo circolare (largh. m. 2.00 - 2.55) ricavata nel banco naturale, in una lingua tufacea dalla superficie fortemente dissestata forse a causa di sbancamenti

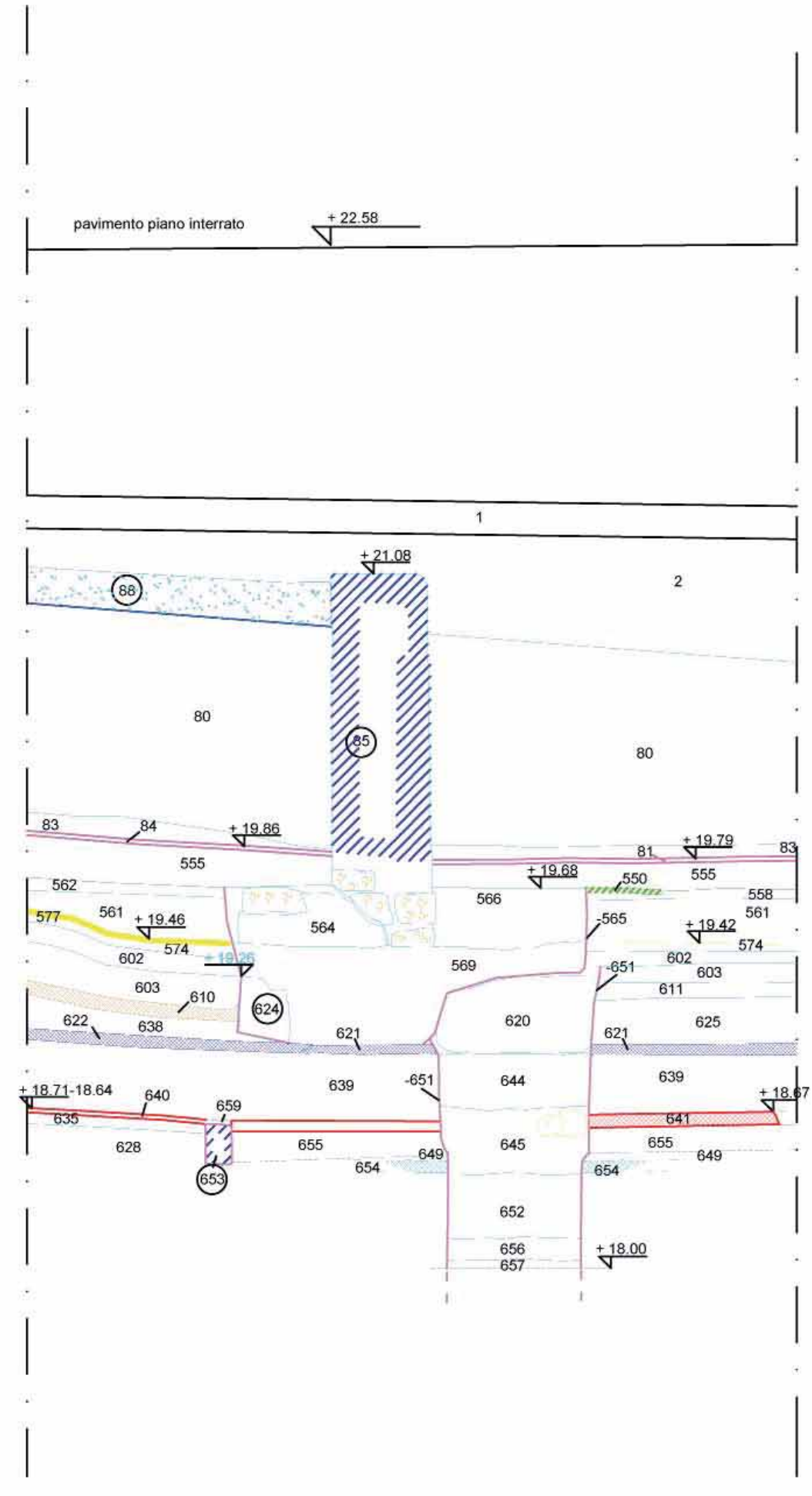


Figura 15 – Piazza Albania sezione del sinkhole nei pavimenti della domus *di età romana (Land s.r.l.)*

moderni ma posta sostanzialmente in piano ad una quota di m 21.16 slm (*Figg*. 12-13). Le pareti interne, in cui si aprono profonde lesioni e fessurazioni, sono levigate e presentano ancora vistose tracce di lisciatura e lavorazione a piccone. Lo scavo della struttura circolare ha restituito esclusivamente materiale antico di epoca romana contrariamente a quanto constatato nel resto dell'area archeologica circostante dove non affiorano emergenze tufacee e i livelli di colmatura sono poderosi, ricchi di materiale moderno misto all'antico tanto da far pensare ad un riempimento intenzionale delle cavità in questo punto, avvenuto in epoca moderna. Per motivi di sicurezza non è stato possibile condurre al termine l'indagine all'interno della struttura circolare che viene a trovarsi ai piedi dell'alto muro di contenimento tra la proprietà BNL e la soprastante via dei Decii. Essa era stata comunque intercettata da un carotaggio geognostico precedente all'indagine archeologica che pone il banco di tufo in questo punto ad una quota di m 15.05 slm. Alla luce di quanto qui esposto e in assenza della completezza dei dati archeologici, la struttura, che doveva essere profonda oltre 6 metri, può essere interpretata come un pozzo di aerazione o un lucernario o una semplice apertura attraverso la quale potevano entrare e uscire mezzi e materiali per i lavori di estrazione e forse era dotata di cunicoli di ingresso alla base.

Nell'ambito dell'argomento cave sotterranee in questo versante del colle, vale la pena aggiungere che lo stesso contesto archeologico di piazza Albania ha restituito un complesso residenziale di grande pregio con una successione di sei strati sovrapposti di pavimentazioni a mosaico di età romana inquadrabili in un arco temporale di poco meno di due secoli (QUARANTA P., NARDUCCI R. (2018), 221-232; NARDUCCI R., RUSTICO L. GREGORI G.L. (2018), 233-242).

Su tutti i livelli pavimentali, ora distaccati e in attesa di essere esposti all'interno di una scatola archeologica per la musealizzazione, si legge una vistosa deformazione in superficie dovuta probabilmente a motivi statici e a cedimenti strutturali degli strati sottostanti. In particolare sul pavimento più antico di epoca tardo repubblicana è evidente una fossa circolare a sezione cilindrica interpretabile come un *anthropogenic sinkhole,* uno sprofondamento originato dall'attività umana e generato in antico, così come viene classificato dall'ISPRA, vale a dire un collasso di volte verificabile in presenza di cave, catacombe o scavi di varia origine (*Figg*. 14-15). Infine, si sottolinea come ad un esame autoptico gli elementi tufacei di rivestimento delle murature romane presenti a piazza Albania come i *cubilia* dell'opera incerta e dell'opera reticolata sono prodotti in tufo lionato delle vicine cave che potrebbero essere state usate in maniera sistematica proprio tra la fine del II e gli inizi del I sec. a.C., momento di massima diffusione delle due tecniche edilizie.

La ricerca fin qui esposta è lungi dall'essere esaustiva in termini di conoscenza e di ricostruzione del paesaggio antico all'Aventino. La prosecuzione delle indagini sul campo può dare altri importanti risultati. Allo stato attuale rimangono ancora insoluti alcuni problemi come il rapporto topografico tra cave estrattive e fortificazioni serviane realizzate nel IV sec. a.C. in tufo di Grotta Oscura ma soprattutto ancora da approfondire è il fenomeno, raro e non comune per l'antichità, di un'intensa attività estrattiva esercitata nel territorio intramuraneo, in un'area prossima a importanti luoghi di culto e a vasti impianti residenziali di pregio. Anche a *Gabii,* antico centro sulla via Prenestina, le cave a cielo aperto di *lapis gabinus* sono comprese all'interno della cinta muraria anche se nel caso di *Gabii* l'espansione del sistema estrattivo sembra avvenuta in un momento successivo rispetto all'impianto originario e abbia coinciso con una forte contrazione dello spazio urbano (MUSCO S., SALVATORI A. (1998), 31-34 in MARINO L. 1998).

Nel caso del colle Aventino a partire dagli inizi dell'età imperiale è stato possibile riscontrare come le due fasce di rispetto - interna ed esterna - delle Mura Serviane, avessero perso la loro funzione strettamente difensiva diventando un terrazzamento che offriva appoggio al dilagante sviluppo di strutture a carattere residenziale o commerciale, in un' inedita suddivisione degli spazi urbani. Il "disordine" urbanistico sembra sia rimasto tale per lungo tempo fino alla costruzione delle Mura Aureliane, nel tardo III sec. d. C. quando si fanno sempre più pressanti le esigenze di difesa dei confini di Roma dalle incursioni barbariche (QUARANTA P. (2017), in CAPODIFERRO A., MIGNONE L.M., QUARANTA P. 2017, 33-45).

BIBLIOGRAFIA

Adam J.P. (1994), *L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e tecniche*, Longanesi, 2008, Milano.

Amanti M., Cesi C., Vitale V. (2008), *Le frane nel territorio di Roma*, 83-117 in FUNICIELLO R, PRATURLON A., GIORDANO G. (2008), 83-117.

Buonocore M. (2001), *Appunti di Topografia romana nei codici Lanciani della Biblioteca Apostolica Vaticana,* Quasar, Città del Vaticano, 30, f. 39.

Buzzetti C., Pisani Sartorio G. (2015), *Le scoperte archeologiche del tracciato della Metropolitana B di Roma (1939-1953) dall'Archivio Gatti*, Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma, Supplemento 23, 285-341.

CAPODIFERRO A., MIGNONE L.M., QUARANTA P. (2017), *Studi e scavi sull'Aventino 2003-2015*, Quasar, Roma.

Caputo C., Funiciello R. (2013), *Giovanni Battista Brocchi: la geologia di Roma e la Carta del Nolli.* in Travaglini C.M., Lelo K. (2013), vol. I, 43-49.

Ciccarello G. (2017), *La domus di via Marcella. Un repertorio iconografico degli affreschi*, in Capodiferro A., Mignone L.M., Quaranta P. (2017), 159-169.

Funiciello R., Heiken G., De Rita D., Parotto M. (2006), *I sette colli. Guida geologica a una Roma mai vista* , Raffaello Cortina, Roma.

Funiciello R., Praturlon A., Giordano G. (2008), *La Geologia di Roma dal centro storico alla periferia,* parte seconda, Istituto Poligrafico dello Stato, Firenze.

Lanciani R. (1990), *Storia degli scavi di Roma e notizie intorno le collezioni romane di antichità*, Quasar, Roma, II, 149.

Marino L. (1998), *Materiali da costruzione e tecniche edili antiche. Indagini e rilievi nell'ottica della conservazione,* Restauro Archeologico, Firenze

Matteucci R., Rosa C. (2002), *Geologia dell'Aventino e indagini geoarcheologiche*, Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma CIII, 214-222.

Musco S., Salvatori A. (1998), *Lapis gabinus: cave ed impiego di un materiale vulcanico nell'edilizia romana di età classica*, in MARINO L. (1998), 31-34.

Narducci L., Rustico L. (2017), *L'Aventinus minor. Un paesaggio urbano tra archeologia e storia*, 81-97 part. 87-89.

Narducci R., Rustico L. Gregori G.L. (2018), *Il complesso archeologico di Piazza Albania all'Aventino II. Pavimentazioni a motivi geometrici e in cementizio. Lacerto musivo con iscrizione*, Atti del XXIII Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico, Quasar, Roma, 233-242.

Perrone V. (1940), *La Ferrovia Metropolitana dell'Esposizione Universale di Roma*, Le Strade, n. 8.

Quaranta P. (2017), *Le Mura repubblicane dell'Aventino. Il contributo dell'archeologia di tutela*, in CAPODIFERRO A., MIGNONE L.M., QUARANTA P. (2017), 33-45.

Quaranta P., Narducci R. (2018), *Il complesso archeologico di Piazza Albania all'Aventino I. La domus di età imperiale*, Atti del XXIII Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico, Quasar, Roma, 221-232;

Rossi D., Di Mento M. (2013), *La catacomba ebraica di Monteverde. Vecchi dati e nuove scoperte*, Presidenza del Consiglio Provinciale, Roma.

Rustico L. (in corso di stampa), *Archival sources and archaeological research. Documents for rediscovering antiquity. The Aventine hill in Rome*, XXII Meeting European Association of Archaeologists (Vilnius 31 agosto - 4 settembre 2016).

Rustico L., Narducci R. (in corso di stampa), *Rivestimenti pavimentali di età tardo repubblicana - augustea dal colle Aventino. Nuove e vecchie scoperte*, Atti del XXIV Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico, Quasar, Roma.

Santoro W., Federici V. (2002), *Studio del sistema di cavità nella zona di via San Giosafat, sul colle Aventino a Roma: valutazione del rischio potenziale e scelta degli interventi di consolidamento per il ripristino della viabilità Geotecnica, L'Aquila,* Atti del XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, Opere geotecniche in ambiente urbano, L'Aquila, 595-602.

Travaglini C.M., Lelo K. (2013), *Roma nel Settecento. Immagini e realtà di una capitale attraverso la pianta di G.B. Nolli*, vol I e II, CROMA, Roma.

Note preliminari sulle indagini speleologiche e geologiche dell'acquedotto "Fontana" di Velletri (Roma)

Preliminary notes on speleological and geological investigations of the "Fontana" aqueduct in Velletri (Rome)

Pio Bersani[1,2]
Carlo Germani[2,3]
Autore di riferimento/reference author
E-mail: carlo.germani@gmail.com

Carla Galeazzi[2,3]
Ruggero Bottiglia[2]
Sandro Galeazzi[2,4]

[1] Geologo, libero professionista
[2] Egeria Centro Ricerche Sotterranee
[3] Commissione Nazionale Cavità Artificiali - Società Speleologica Italiana
[4] Geometra, libero professionista

Parole chiave (*key words*): Acquedotto (*Aqueduct*), antiche opere idrauliche (*ancient hydraulic systems*), cavità artificiali (*artificial cavities*), Colli Albani (*Alban Hills*), Nemi (*Nemi*), Velletri (*Velletri*)

RIASSUNTO

L'Acquedotto Fontana fu realizzato tra il 1607 e il 1612 dall'architetto Giovanni Fontana per alimentare la città di Velletri (Roma). Si tratta di un'opera imponente che si sviluppa quasi interamente in sotterraneo per circa 14 chilometri, interessando i comuni di Velletri e Nemi, sui Colli Albani. La struttura, non più in uso dagli anni '70, presenta ancora tratti in buono stato di conservazione che potrebbero essere destinati ad una valorizzazione di tipo turistico-culturale. Il percorso dell'acquedotto risulta particolarmente interessante perché attraversa i prodotti di alcune differenti fasi eruttive del Vulcano Laziale ben distinte tra loro. Tali fasi sono chiaramente visibili nei tratti non rivestiti da intonaco ed in particolare nel segmento noto come "Porte di Ferro" che, attraversando il bordo della caldera del Vulcano Laziale, presenta peculiarità geologiche e strutturali di grande interesse.

ABSTRACT

The Fontana Aqueduct was built between 1607 and 1612 by architect Giovanni Fontana to supply Velletri town (Rome). It is an imposing work that winds almost entirely underground for about 14 kilometers, affecting Velletri and Nemi towns, on the Alban Hills. The structure, no longer used since the '70s, shows still stretches in good state of conservation that could be destined to a tourist-cultural enhancement. The path of the aqueduct is particularly interesting because it crosses the products of different eruptive phases of the Latium Volcano. These phases are clearly visible in the sections not covered by plaster and in particular in the segment known as "Porte di Ferro" which, crossing the edge of the caldera of the Latium Volcano, presents geological and structural peculiarities of great interest.

INTRODUZIONE

La ricerca di acqua potabile ha rappresentato per la città di Velletri un problema che si è protratto per secoli. L'Acquedotto Fontana, noto localmente anche come acquedotto di Nemi o della Fajola, dai nomi delle zone in cui si originavano i maggiori apporti, fu realizzato tra il 1607 ed 1611 dall'architetto Giovanni Fontana (Melide, 1540 – Roma, 1614), figura ben nota del Rinascimento italiano.

Si tratta di un'opera imponente che si sviluppa quasi interamente in sotterraneo, interessando i comuni di Velletri e Nemi, sui Colli Albani. Gran parte del percorso ricade nell'area di tutela del Parco Regionale dei Castelli Romani.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il distretto dei Colli Albani appartiene alla cosiddetta Provincia Co-magmatica Romana. Il vulcano dei Colli Albani, situato a circa 15 km a sud est di Roma, presenta una morfologia circolare che domina la Campagna Romana tra Roma ed il litorale. L'attività del vulcano varia tra circa 600.000 e 20.000 anni fa (De Rita *et al.*, 1988a, 1988b, 1995b; Fornaseri *et al.*, 1963; Ventriglia, 1990; Servizio Geologico d'Italia, 2009), ed è oggi riconosciuto un vulcano quiescente.

Il complesso vulcanico dei Colli Albani è caratterizzato dalla presenza di un edificio centrale ad attività mista (effusiva ed esplosiva) costituito prevalentemente da depositi piroclastici e colate piroclastiche con subordinate effusioni di lave leucititiche e tefritiche provenienti sia dall'apparato centrale sia da fratture e centri eruttivi locali. L'inizio dell'attività vulcanica si è sviluppata attraverso tre fasi principali, che dalla più antica alla più recente sono:

- FASE 1: FASE DELL'EDIFICIO VULCANICO TUSCOLANO ARTEMISIO

L'età di questa fase eruttiva iniziale è compresa tra i 600.000 e i 350.000 anni fa. Durante questo periodo attraverso stadi parossistici successivi un primo edificio centrale, noto con il nome di edificio Tuscolano Artemisio, ha eruttato circa 280 km^3 di magma, con prodotti sparsi su un'area di circa 1.500 km^2. L'attività dell'edificio Tuscolano Artemisio può essere suddivisa in 4 cicli principali, ciascuno dei quali è caratterizzato dalla messa in posto di una colata piroclastica e di spesse coltri di piroclastiti a cui si intercalano rare colate di lava. Un'attività parossistica esplosiva sia dell'apparato centrale sia da fessure circum-calderiche ha determinato la fine del vulcanismo e il definitivo crollo dell'edificio Tuscolano Artemisio intorno a 360.000 anni fa, che ha dato luogo all'omonima caldera Tuscolana Artemisia, di forma circolare con circa 10 km di diametro.

- FASE 2: FASE DELL'EDIFICIO CENTRALE DEI CAMPI DI ANNIBALE (RECINTO INTERNO O DELLE FAETE)

L'età di questa fase eruttiva è compresa tra i 350.000 e i 270.000 anni fa. All'interno dell'area della caldera Tuscolana Artemisia l'attività eruttiva riprese circa 300.000 anni fa edificando un nuovo apparato centrale, il Vulcano dei Campi di Annibale o delle Faete. L'attività di questo piccolo edificio vulcanico è stata di natura molto più effusiva rispetto a quella del Tuscolano Artemisio. Essa, infatti, è costituita da ingenti quantità di lave leucititiche eruttate intorno a 260.000 – 280.000 anni fa dal cratere centrale, tra cui la colata di Capo di Bove che giunge fino a Roma sulla Via Appia Antica all'altezza della tomba di Cecilia Metella.

- FASE 3: ATTIVITÀ IDROMAGMATICHE O ATTIVITÀ FINALE

L'età di questa fase eruttiva è comunemente compresa tra i 270.000 e i 20.000 anni fa e comprende l'attività di natura idromagmatica proveniente da una serie di crateri eccentrici localizzati nel settore occidentale dei Colli Albani, in corrispondenza di un alto strutturale. Durante quest'ultimo periodo si sono formati i crateri (dal più antico al più recente)

di Pantano Secco, Prata Porci, Valle Marciana, Nemi, Valle Ariccia, Giuturna e infine Albano. Valle Ariccia è il cratere più antico nel settore sud-occidentale e si è sviluppato lungo una frattura con direzione circa nord-sud, quindi con un allineamento simile sono avvenute le due esplosioni simultanee che hanno dato origine al cratere coalescente di Nemi. Infine le ultime esplosioni idromagmatiche sono occorse ad Albano almeno con quattro episodi differenti che hanno dato origine ad altrettanti crateri coalescenti lungo una frattura con andamento nordovest–sudest. L'attività del cratere di Giuturna si intercala temporalmente alle due ultime esplosioni di Albano.

Il percorso dell'Acquedotto Fontana risulta particolarmente interessante dal punto di vista geologico perché attraversa i prodotti di due fasi eruttive del Vulcano Laziale (o Vulcano dei Colli Albani) ben distinte tra loro (*Fig.* 1):

- nella parte verso Nemi vi sono, infatti, i prodotti più recenti della fase eruttiva finale freato-magmatica, dovuti al cratere eccentrico di Nemi, di età inferiore a 200.000 anni;
- nella parte verso Velletri vi sono invece i prodotti più antichi appartenenti alla fase dell'Edificio centrale Tuscolano-Artemisio, compresi tra i 600.000 e i 350.000 anni fa.

Tali fasi risultano chiaramente visibili nei tratti non rivestiti da intonaco e in particolare nel segmento noto come "Porte di Ferro" che, attraversando il bordo della caldera del Vulcano Laziale, presenta peculiarità geologiche e strutturali di grande interesse e oggetto delle analisi geologiche preliminari sulla struttura (*Fig.* 2).

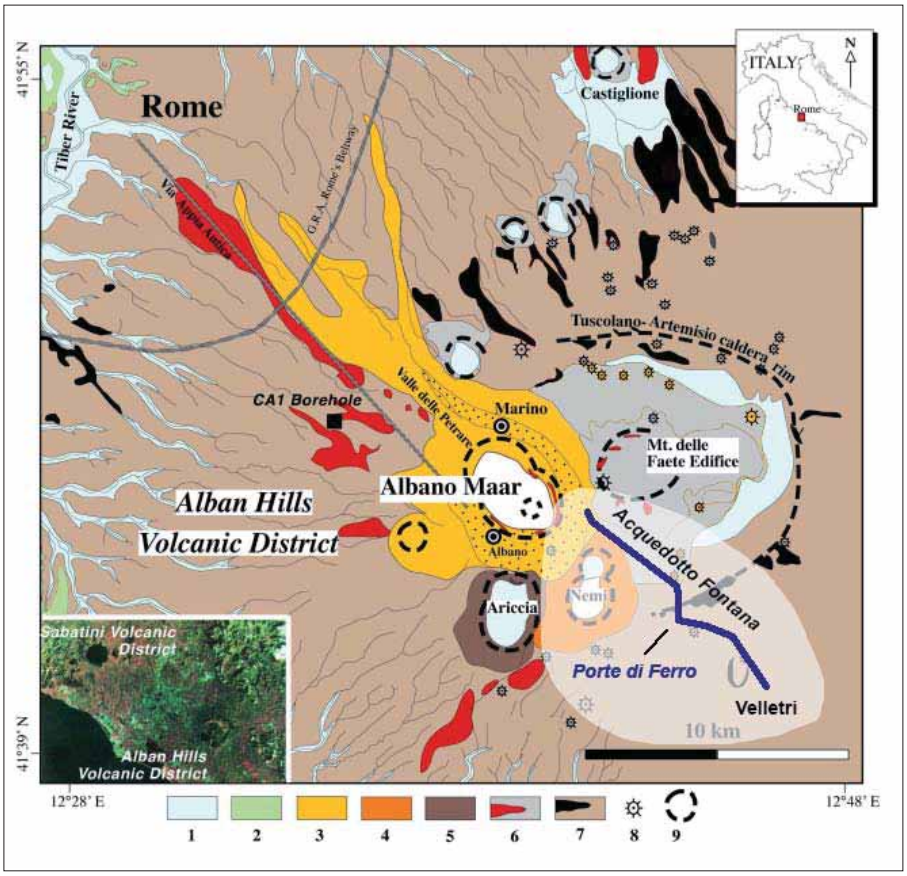


Figura 1 – Schema geologico del distretto Vulcanico dei Colli Albani (da Freda et al.*, 2006 modificata). Legenda: 1-Depositi alluvionali olocenici; 2-Depositi alluvionali pliocenici e quaternari; 3-Colate piroclastiche e depositi idromagmatici del maar di Albano (36-69 Ka). Il puntinato nero indica i depositi del Peperino albano in affioramento; 4-Depositi idromagmatici del maar di Nemi (150 Ka); 5-Depositi idromagmatici del maar di Ariccia (200 Ka); 6-Depositi idromagmatici e piroclastici della fase del Recinto interno o del Monte delle Faete con le lave (color rosso) associate (250 – 308 Ka); 7-Colate piroclastiche e depositi di ricaduta, associati a flussi lavici (di color nero) della fase Tuscolana-artemisia (350-600 Ka); 8-Coni di scorie; 9-Caldera e bordo del cratere della fase Tuscolana-artemisia*

LE RICERCHE STORICHE

Le indagini speleologiche e bibliografiche condotte dagli autori hanno accertato che vi sono stati almeno due tentativi di portare a Velletri le acque provenienti dal cuore dei Colli Albani: un primo, senza successo, nella seconda metà del Quattrocento (Borgia, 1723) ed un secondo due secoli dopo, con risultati positivi. Probabilmente sia l'opera quattrocentesca che quella seicentesca sono state parzialmente impiantate su preesistenti e ben più antiche strutture idrauliche (Germani *et al.*, 2017).

Purtroppo, la documentazione storica sull'acquedotto di Velletri, anche se progettato da uno dei più noti architetti dell'epoca, risulta piuttosto carente. La maggior parte delle notizie disponibili provengono dalla biografia dello stesso Fontana, dalle cronache dell'epoca di realizzazione (peraltro avare di notizie sulla struttura idraulica) e da alcuni studi realizzati in epoca relativamente recente da studiosi locali (p.es. Remiddi, 1972).

Le sorgenti più lontane da Velletri, inoltre, si trovano in una zona compresa tra i laghi di Albano e Nemi particolarmente ricca di acque, oggi detta di Fontan Tempesta, che nel corso dei secoli è stata oggetto di ripetuti rimaneggiamenti delle gallerie di captazione e di lunghe contese fra le cittadine di Nemi e Genzano.

Vale la pena sottolineare che fino alla metà del 1800 la zona era caratterizzata dalla presenza di un bosco fittissimo (foresta della Fajola) che spesso offriva rifugio a briganti

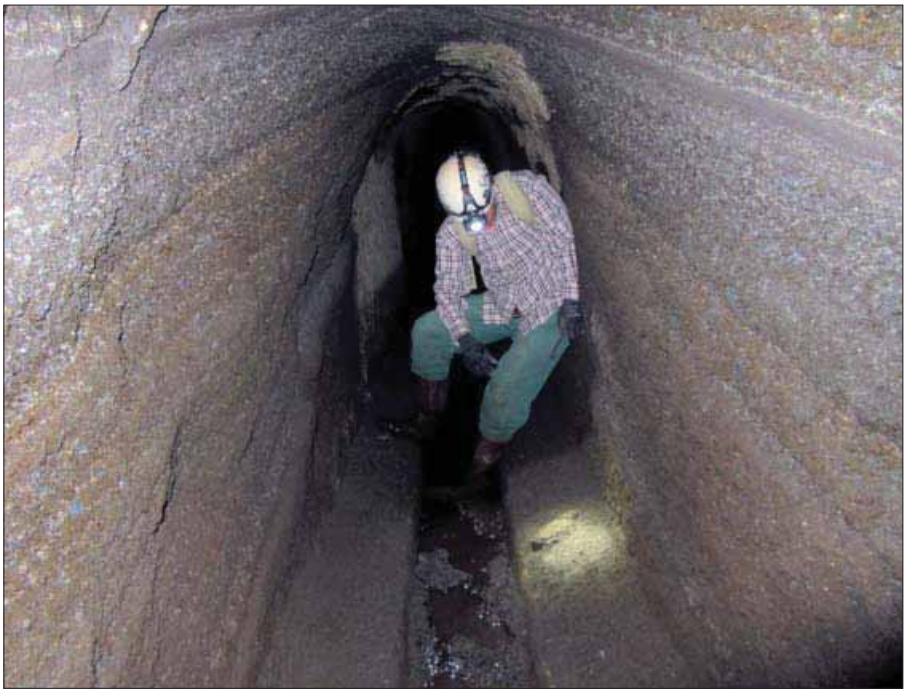


Figura 2 – Depositi piroclastici nei pressi della località Porte di Ferro originatisi a seguito del collasso dell'apparato centrale Tuscolano-Artemisio con la formazione dell'omonima caldera (foto Pio Bersani)

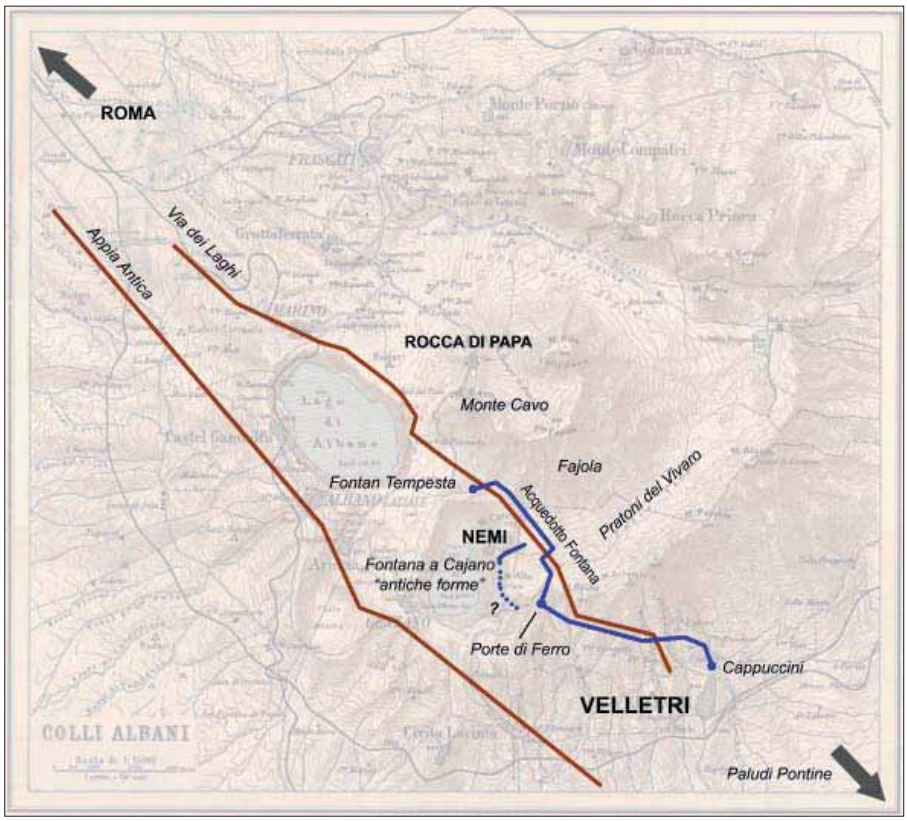


Figura 3 – Localizzazione dell'acquedotto Fontana e delle "antiche forme" (probabile tentativo quattrocentesco – vedi testo) nei Colli Albani (grafica Carlo Germani, archivio Egeria Centro Ricerche Sotterranee).

ed era ritenuta, a torto o a ragione, assolutamente impenetrabile. I Briganti della Fajola, noti per aver perpetrato innumerevoli azioni malavitose, sono ancora oggi protagonisti di leggende locali.

Questo spiega perché, nel corso degli anni, le strutture esistenti sono state più volte dimenticate, riscoperte e nuovamente obliate.

Un tratto di particolare interesse storico e geologico, detto "Porte di Ferro", si trova circa a metà del percorso tra le sorgenti e Velletri. Qui l'architetto Fontana si era imbattuto in una colata di lava tefritica (*Fig.* 5) molto compatta, che rallentò enormemente l'esecuzione dell'opera. Lo scavo in questa zona "*risultò opera difficilissima, ove fu di mestieri forare un monte di selci vive a forza di fuoco; e parea, che di lui si potesse dire, che schernisse le forze della Natura*" (Baglione, 1733).

I tempi di esecuzione furono dunque assai diversi da quelli previsti in fase di progettazione, con pesanti ricadute economiche e violente dispute fra i committenti e il Fontana.

L'acquedotto viene completato il 17 settembre del 1611, ma la struttura risultava non eseguita a regola d'arte, con alcuni tratti già in rovina. Le riparazioni, lunghe, difficili e dispendiose terminano solo nel 1613. Il Fontana morirà nel 1614.

Anche nei secoli successivi l'acquedotto non avrà vita facile. Nel 1744, Velletri è teatro della guerra di successione austriaca. A farne le spese, oltre agli abitanti della cittadina, è l'acquedotto che viene interrotto dalle truppe tedesche (Bauco, 1841; D'Ayala, 1843). Nell'agosto 1806 un terremoto con epicentro Velletri colpisce i Colli Albani e sono rasi al suolo conventi, chiese e abitazioni. Anche l'acquedotto subisce danneggiamenti.

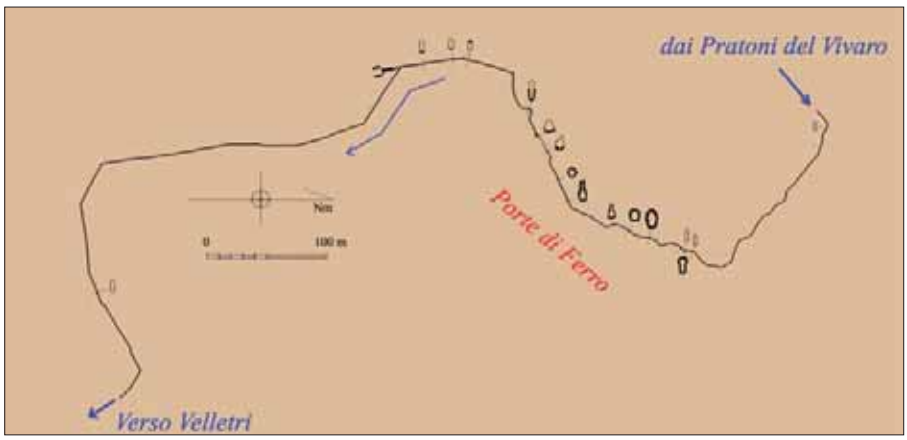


Figura 4 – Tracciato dell'acquedotto Fontana nel tratto detto "Porte di Ferro", tra i Pratoni del Vivaro e la discesa verso Velletri (rilievo CRS Egeria)

Nel 1840 le cronache riportano nota di vari problemi alla struttura: le captazioni delle percolazioni realizzate dal Fontana finiscono a dispersione nel terreno senza incanalarsi più nella conduttura principale. Le sorgenti risultano divenute "*intermittenti*", sono intervenuti guasti alle condutture in piombo e si rileva qualche prelevamento di troppo a favore di case blasonate (Provenzani, 1841).

La II Guerra Mondiale provocherà altre distruzioni e, analogamente al terremoto del 1806, la perdita degli archivi.

L'Acquedotto Fontana è stato parzialmente in funzione fino al 1970.

IL TRACCIATO

Il tracciato dell'acquedotto Fontana oggi è noto nelle sue linee generali, ma ancora non è stato rilevato e percorso per intero a causa delle interruzioni e della difficoltà ad accedere in alcune aree in proprietà privata (*Fig.* 3).

Le fonti si trovano nel cuore dell'antico bosco della Fajola, in prossimità della SP217 (Via dei Laghi) e alle spalle del fontanile detto di Fontan Tempesta (circa 620 m s.l.m.).

Qui, una fitta rete di cunicoli di captazione più volte riadattati nel corso dei secoli per rifornire d'acqua i comuni limitrofi convergono alla base di un pozzo, chiuso da un tombino, e confluiscono in un unico condotto, ancora parzialmente alimentato da stillicidio. La galleria si sviluppa poi in direzione SE verso Velletri e lungo i Pratoni del Vivaro in leggera pendenza fino alla località Colle degli Impiccati. Qui un pozzo di 23 metri consente la discesa nell'acquedotto, che in questa zona si presenta pulito e ben conservato.

Il tratto successivo, tra il Colle e l'inizio della discesa verso Velletri, è particolarmente suggestivo: sono le "Porte di Ferro" (quota 600 m s.l.m. ca.), la colata di lava che tanti problemi provocò al Fontana (*Figg.* 4 e 5).

Superate le Porte di Ferro, l'acquedotto scende in notevole pendenza verso Velletri, correndo quasi parallelo alla Via dei Laghi e superando alcuni fossi su piccole arcate (ponti-canale). I punti di accesso sono molti ma lungo il tracciato sono numerosi anche i crolli e le interruzioni. Particolarmente suggestivi sono una scala in muratura che consente di percorrere un tratto di canale particolarmente acclive (*Fig.* 6) e il passaggio fuori terra del fosso di S. Anatolia.

Di grande interesse sono i numerosi tratti rivestiti da intonaco nei quali, già a partire dal 1608 (quindi a struttura non ancora terminata) fontanieri, custodi e studiosi hanno lasciato iscrizioni incise e a carboncino (*Fig.* 7). In altri settori del condotto scritte più recenti inneggiano e si oppongono al regime fascista, testimoniando le tracce di ripetute



Figura 5 – Colata lavica tefritica incontrata da Giovanni Fontana nei pressi della località Porte di Ferro, generata dal sistema di fessure peri-calderico della fase centrale Tuscolana-artemisia (foto Marco Vitelli)



Figura 6 – La scala che consente di rendere percorribile uno dei tratti dell'acquedotto Fontana in fortissima pendenza (foto Carlo Germani archivio Egeria Centro Ricerche Sotterranee)

frequentazioni e protratte manutenzioni nel corso dei secoli.

Il condotto termina vicino alla località "Cappuccini", alle porte di Velletri (circa 370 m s.l.m.). Da qui una serie di tubature metalliche, realizzate sia dal Fontana che da altri nei secoli successivi, portava l'acqua alle fontane ed alle varie utenze cittadine.

CONCLUSIONI

In tutta l'area dei Colli Albani il rischio di incontrare colate laviche tefritiche e leucititiche molto compatte e resistenti nel corso dello scavo di opere idrauliche ha rappresentato un serio problema sia in tempi antichi che relativamente recenti. Nel vicino emissario del lago di Nemi, risalente almeno al V sec. a.C., una serie di gallerie e di by-pass sembrano testimoniare come le popolazioni tanto abili nel progettare una struttura lunga 1650 metri, scavata quasi interamente in cieco, si fossero arrese di fronte alle difficoltà di scavo rappresentate dalla presenza delle colate laviche (Castellani *et al*., 2003). Alla luce di quanto appurato nello studio dell'acquedotto di Velletri, questa ipotesi appare ora del tutto ragionevole se si pensa che ancora nei primi decenni del 1600 il superamento dei banchi di pietra che hanno regalato alla città di Roma la sua nota pavimentazione (i sampietrini) rappresentavano un serio ostacolo.



Figura 7 – Una delle tante iscrizioni presenti all'interno dell'acquedotto Fontana, qui la firma del Remiddi che lo percorse e ne fornì la puntuale descrizione pubblicata postuma (foto Carla Galeazzi archivio Egeria Centro Ricerche Sotterranee)

BIBLIOGRAFIA

Baglione G. (1733), *Le vite de' pittori, scultori, architetti, ed intagliatori, dal Pontificato di Gregorio XIII del 1572 fino a' tempi di Papa Urbano VIII nel 1642*. Con Licenza de' Superiori, e Privilegio., Napoli. Google Books, accesso 04/2017.

Bauco (Don) T. (1841), *Compendio della Storia Veliterna*. Editore Luigi Cappellacci, Tipografia Mugnoz, Roma.

Borgia A. (1723) *Istoria della Chiesa, e Città di Velletri*. Antonio Mariotti Stampator Vescovale con Licenza de' Superiori, Nocera. Google Books, accesso 04/2017.

Castellani V., Caloi V., Dobosz T., Galeazzi G., Galeazzi S., Germani C. (2003), *L'Emissario del Lago di Nemi*. Opera Ipogea 2-3/2003. Erga edizioni, Genova, pp. 55-66.

D'Ayala M. (1843), *Le vite de' più celebri capitani e soldati napoletani dalla giornata di Bitonto fino a'* dì nostri. Stamperia dell'Iride, Napoli, pag. 663.

De Rita D., Funiciello R., Parrotto M. (1988a), *Carta geologica del complesso vulcanico dei Colli Albani (Vulcano Laziale) in scala 1:50.000*. C.N.R. Gruppo Nazionale per la vulcanologia. Roma

De Rita D., Funiciello R., Sposato A. (1988b), *Il complesso vulcanico dei Colli Albani*. Quaderni de "La Ricerca Scientifica" n.5. C.N.R. Roma.

De Rita, D., Faccenna, C., Funiciello, R., Rosa, C. (1995b), *Stratigraphy*. In: Trigila, R. (Ed.), The Volcano of the Alban Hills. Tipografia SGS, Roma, pp.31-65.

Fornaseri M., Scherillo A., Ventriglia U. (1963), *La regione vulcanica dei Colli Albani, Vulcano Laziale*. Ed. Bardi, Roma.

Freda C., Gaeta M., Karner D.B., Marra F., Renne P.R., Taddeucci J., Scarlato P., Christensen J.N., Dallai L. (2006), *Eruptive history and petrologic evolution of the Albano multiple maar (Alban Hills, Central Italy)*. Bulletin of Volcanology, 68, pag. 567-591.

Germani C., Galeazzi C., Bottiglia R., Galeazzi S. (2017), *Note preliminari sulle indagini speleologiche e bibliografiche dell'acquedotto "Fontana" (Velletri-Nemi, Roma) e sua correlazione con una precedente struttura idraulica quattrocentesca*. Opera Ipogea 1/2-2017, Ed. Società Speleologica Italiana, Bologna, pp. 139-150.

Provenzani E. (1841), *Memoria sugli acquedotti di Velletri con alcuni suggerimenti proposti per la conservazione, per l'aumento, e miglior dispensa delle acque accompagnata con alcuni cenni su i pozzi artesiani*. Tipografia A. Mugnoz, Roma. Google Books, accesso 04/2017.

Remiddi A. (1972), *Velletri – memorie storiche: sorgenti, acquedotti, fontane*. Tip. Artigiana, Cori.

Servizio Geologico d'Italia (2009) *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 – Foglio 387 ALBANO LAZIALE*.

Ventriglia U. (1990), *Regione vulcanica dei Colli Albani*. Idrogeologia della Provincia di Roma, Vol. III, Ammistr. Prov. di Roma- Assessorato LL.PP. Viabilità e Trasporti.

Il censimento delle cavità naturali e artificiali della Riserva Naturale Regionale Lago di Vico (Viterbo)

Andrea Sasso
Riserva Lago di Vico - Vico Lake Nature Reserve
E-mail: asasso@regione.lazio.it

Census of caves and artificial cavities in Lake Vico Nature Reserve (Viterbo, Italy)

Parole chiave (*key words*): Lago di Vico (*Vico Lake*), vulcano di Vico (*volcano of Vico*), ignimbriti (*ignimbritic deposits*), acquedotti (*aqueducts*), Farnese (*Farnese Family*), Monte Venere (*Mt. Venere*), Neolitico (*Neolithic*), Pozzo del Diavolo

RIASSUNTO

Nelle porzioni di territorio della Tuscia in cui sono stati deposti i materiali vulcanici d'origine ignimbritica, poi consolidatisi fino a raggiungere una consistenza litoide, sono presenti migliaia di cavità artificiali. Di differente destinazione e sviluppo planimetrico, costituiscono un vero e proprio compendio architettonico ed archeologico di come gli esseri umani si siano adattati al substrato vulcanico trasformandolo in una risorsa e lasciando tracce indelebili. Queste testimonianze sono presenti anche all'interno della caldera del vulcano di Vico, oggi Riserva Naturale Regionale, e costitiscono una risorsa da conoscere valorizzare.

ABSTRACT

In every area where vulcanoes had depose ignimbritic materials becomed hard rocks during thousands of years, there are several artificial cavities. Those are different in plain and use and represents a true architectonic and archeological digest of human adaptation to the vulcanic soils, transforming it in a resource. These evidences are present into the caldera of Vico volcano, today a Regional Nature Reserve, and represent an important resource to consider in the local development.

INTRODUZIONE

La Riserva Lago di Vico si trova in provincia di Viterbo e si estende su parte del territorio dei comuni di Caprarola e Ronciglione. E' stata istituita nel 1982 ed ampliata nel 2008, per tutelare l'intera caldera vulcanica in cui si trova il lago omonimo e le risorse in essa presenti.

All'interno della cinta vulcanica, che mostra un microclima del tutto particolare, sono presenti numerosi ambienti naturali: foreste di faggio, cerrete, aree paludose e lacustri, arenili. Ma anche antropici, come coltivi, aree abitate o zone a destinazione turistica e ricettiva. Le sue acque ospitano numerose specie di uccelli, stanziali e migratori, alcune delle quali protette. L'impegno dell'Ente non è solo nella tutela degli ambienti naturali, del paesaggio, della flora e della fauna, ma anche della valorizzazione delle risorse culturali presenti nel territorio. In quest'ambito, dal 2015 è iniziato il censimento dei siti archeologici presenti nei circa 4100 ettari di competenza, con il loro posizionamento georeferenziato. Contestualmente è stata avviata un'analisi delle strutture rilevate e una serie di valutazioni sull'eventuale interesse turistico, oltre che scientifico, che alcune di esse potrebbero rivestire; tra di esse due siti hanno ricevuto interventi di carattere conservativo grazie ai fondi europei previsti dal POR FESR Lazio 2007-2013, Attività II.4 "Valorizzazione delle strutture di fruizione delle aree protette".

Tra le strutture censite meritano un cenno le numerose cavità artificiali individuate, alcune delle quali sconosciute o poco note in letteratura e meritevoli dunque di attenzione. La conoscenza di questo patrimonio sotterraneo è ritenuta di fondamentale importanza anche dal punto di vista faunistico, soprattutto in vista della redazione di una check list relativa alla fauna troglofila e troglobia, in particolare delle comunità di chirotteri. Tra i vari ipogei meritano un cenno in questa sede alcuni di essi, sia per lo sviluppo planimetrico che per la destinazione d'uso loro attribuita, come pure per l'importanza rivestita nell'ambito insediativo e produttivo delle comunità locali.

Di seguito ne riportiamo alcune, in corso di studio, con il relativo posizionamento cartografico (vedi mappa del territorio e numeri di riferimento nel testo).



Mappa: Carta d'insieme con indicati i siti numerati nel testo

1. ACQUEDOTTO DI MONTE FOGLIANO (foto 1)

Si tratta di una struttura di captazione idrica che ha una lunghezza complessiva ipotizzata di circa sette chilometri, di cui tre ancora parzialmente accessibili. Essa aveva lo scopo di addurre acqua ad un grande insediamento d'età romana sito nel comune di Ronciglione in località Poggio Cavaliere, quasi completamente distrutto da una lottizzazione moderna. Secondo alcuni autori potrebbe essere identificato con il centro di Vicus Elbii, provvisto di impianti termali, stationes e vari edifici, posto su un diverticolo che collegava la c.d. "Strada Romana" o "Via Ciminia" (importante tracciato stradale che si staccava dalla consolare Cassia in località Aquae Passeris a nord di Viterbo) alla consolare Cassia presso Vicus Matrinii.

Il lungo cunicolo è stato scavato in età romana negli strati di ignimbriti di Monte Fogliano (965 m s.l.m.), e presenta un andamento irregolare con numerosi cambi di direzione legati all'abbandono di tratti interessati da crolli, di cui si vedono le chiusure dello speco in malta cementizia e pietre. Anche la sezione appare sempre diversa: entrambi gli aspetti sono dovuti sia a ripetuti crolli e ripristini, anche d'età moderna, che alla diversa resistenza dei materiali ignimbritici attraversati, se non addirirttura, a diverse fasi costruttive e maestranze che in esso hanno operato nell'escavazione.

La captazione avviene da un'unica sorgente con una portata approssimativa di circa 0,5 l/sec, ancora attiva, le cui acque vengono convogliate in una tubazione moderna in PVC ed utilizzate per alimentare utenze che sono presenti lungo il suo tracciato. In prossimità dell'attraversamento della sella stradale della SP87, punto in cui anche nell'antichità esisteva un diverticolo stradale che collegava la Consolare Cassia al bacino lacustre, le acque venivano accumulate in una cisterna, di cui è oggi visibile parte della struttura cementizia. Lungo il percorso iniziale sono visibili alcuni dei pozzi originari, alcuni dei quali interessati da crolli che aprono pericolosi inghiottitoi nel bosco sovrastante. Il cunicolo riveste una molteplice importanza: archeologica, in quanto costituisce una testimonianza delle tecniche di scavo nel tempo, essendo in parte attiva probabilmente sin dall'età etrusca; geologica, poiché mostra il "cuore" di varie formazioni rocciose vicane; idrologica, perché consente di osservare l'accumulo e la fuoriuscita delle acque di precipitazione e circolazione sotterranea; faunistica, poiché in grado di ospitare chirotteri.

All'interno della struttura sono stati condotti alcuni sopralluoghi dalla Riserva Naturale Regionale Lago di Vico grazie alla indispensabile collaborazione con la Federazione Speleologica Hypogea.



Figura 1 – Tratto dell'acquedotto di Monte Fogliano tra le ignimbriti non compatte

2. ACQUEDOTTO FARNESIANO (foto 2)

Con l'elezione a pontefice del cardinale Alessandro Farnese nel 1534, la famiglia, originaria dell'alto Lazio, acquisisce un notevole potere che la porterà a fondare uno Stato dentro il territorio pontificio, il Ducato di Castro e Ronciglione. Quale centro "residenziale" della famiglia viene scelta Caprarola in cui è iniziata la costruzione di una fortezza, poi trasformata in sontuosa villa, il palazzo Farnese di Caprarola, una delle residenze nobiliari di maggior prestigio dell'Italia rinascimentale. L'edificio ed i suoi annessi necessitavano di un adeguato apporto d'acqua per le necessità giornaliere e le numerose fontane. A tale scopo venne intercettato, deviato ed ampliato un preesistente acquedotto d'età romana che alimentava alcune strutture presenti sulla porzione sud orientale della cinta calderica di Vico e, presumibilmente l'abitato di Vicus Elbii, citato al punto precedente. La conduttura, che attraversa il territorio di tre comuni, ha una lunghezza approssimativa di nove chilometri ed è nota in letteratura. L'acqua, che ancora oggi vi scorre su un fondo impermeabilizzato e a vista, non giunge però più copiosa a Caprarola: quella che rimane dopo essere stata captata da varie abitazioni poste sul suo percorso, confluisce in un laghetto adibito alla pesca sportiva. I vari rami dell'ipogeo, che inizia la captazione nel territorio del comune di Canepina, mostrano un notevole apporto idrico, valutabile in circa 1-1,5 l/sec. a seconda dell'andamento pluviometrico.

3. EMISSARIO DEL LAGO DI VICO (foto 3)

Sul momento storico in cui sia stato intrapreso l'abbassamento del livello delle acque del lago di Vico si è ipotizzato molto. Una serie di sopralluoghi condotti dalla Riserva Naturale Regionale Lago di Vico, in collaborazione con alcuni membri della Federazione Speleologica Hypogea (rispettivamente di Asso e di Egeria Centro Ricerche Sotterranee) sembra confermare che lo scavo sia stato realizzato in età romana per una lunghezza approssimativa di 400 metri e poi ripristinato dai Farnese in varie fasi, dopo i crolli e l'interramento avvenuti presumibilmente in età tardo antica, nel corso del XVI secolo stando ai documenti d'archivio conosciuti. Il condotto, che ha una sezione media di 60 cm per un'altezza di 1,80 m, è stato scavato attraverso gli strati ignimbritici dell'apparato vulcanico vicano, in questo settore della caldera poco coerenti e mostra un andamento non rettilineo, pre-



Figura 2 – Tratto iniziale dell'acquedotto farnesiano con i rifacimenti moderni

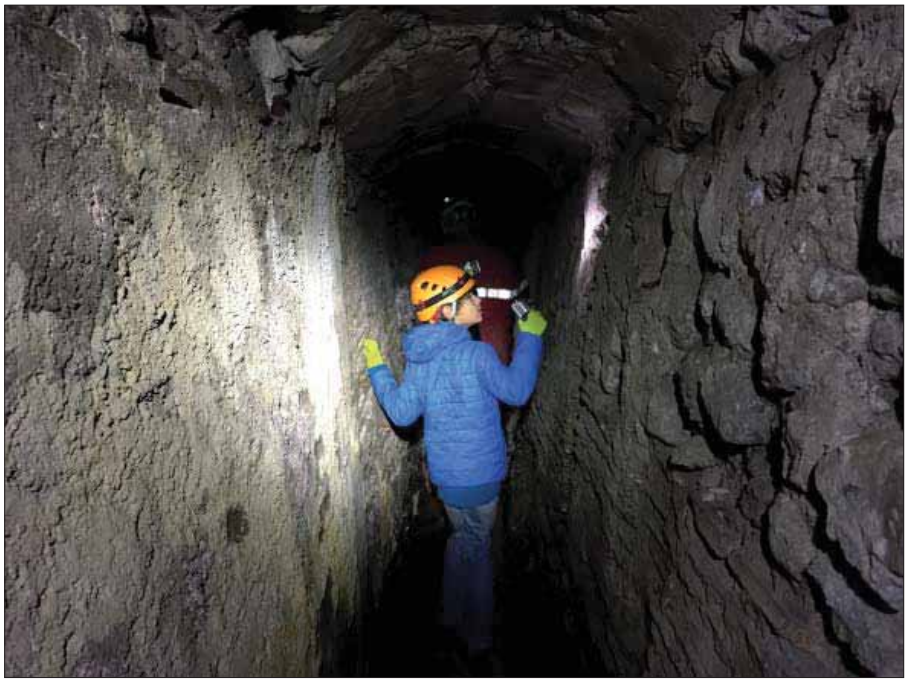


Figura 3 – L'emissario del Lago di Vico



Figura 4 – Una delle cavità artificiali della località Campo Rosano



Figura 4bis – Ipogeo ad uso abitativo con ambiente esterno per la cottura dei cibi

sumibilmente per rallentare il deflusso delle acque. Alcuni pozzi di ventilazione e controllo, a sezione circolare di diametro variabile, sono presenti lungo il condotto. Il secondo, partendo dall'imbocco posto presso il bacino lacustre, è stato interessato da un crollo nel novembre 2017, ostruendo parzialmente il condotto.

4. INSEDIAMENTO DI CAMPO ROSANO (foto 4)

Del sito non è stato possibile trovare informazioni in bibliografia e, probabilmente, si tratta di un inedito. Il testo che segue riveste a tal proposito carattere preliminare e informativo, rimandando ad una trattazione più estesa l'analisi della località che, per la vegetazione e l'inaccessibilità di alcune cavità chiuse all'interno di aree private, è stata affrontata in modo non esaustivo.

In uno dei rari affioramenti tufacei deposti attorno a 157mA, nella c.d. Formazione di Ronciglione (PERINI, CONTICELLI, FRANCALANCI 1998), già denominata "tufo grigio a scorie nere" (MATTIAS & VENTRIGLIA 1970) e "ignimbrite B" (LOCARDI 1965, BERTAGNINI & SBRANA 1986) sono presenti circa trenta cavità, con piante e quindi destinazione d'uso differenti, distribuite su un'area di circa un km^2. Le modalità costruttive, l'organizzazione degli ambienti e la disposizione degli stessi nell'area, nonché le dimensioni e l'orientamento verso sud, possono ragionevolmente far supporre che si trattasse di un vero e proprio nucleo abitato rupestre, certamente legato ad una piccola comunità dedita ad attività pastorali e, presumibilmente, alla pesca lacustre.

Le cavità artificiali sono disposte principalmente su almeno tre terrazzamenti naturali, dovuti presumibilmente ad altrettanti livelli raggiunti dal lago nel passato: il dislivello è colmato da scalini e viottoli scavati nella roccia. Significativamente ipogei non sono rilevabili al di sotto dei 525 m s.l.m., denotando che tale insediamento sia antecedente alla fase di svuotamento del lago ad opera dell'emissario artificiale realizzato dai Romani e riaperto in età farnesiana dopo l'abbandono e i crolli dell'epoca tardo antica.

Gli ipogei hanno ampiezza e, soprattutto, profondità diverse, da un paio di metri a circa una decina.

Il livello posto più in alto è contraddistinto dalla presenza di cavità assai regolari, estremamente rifinite nello scavo e regolarizzazione della roccia, alcune delle quali mostrano un ambiente esterno con un forno per la cottura degli alimenti (foto 4bis). La destinazione ad uso abitativo può esser comprovata non solo dalla fattezza dello scavo e dalla regolarizzazione delle pareti, ma anche dalla presenza in esse di numerose nicchie, di forma e dimensioni differenti.

Al secondo livello, posto qualche metro più in basso, accanto ad ambienti di dimensioni ridotte di chiaro utilizzo abitativo, sono presenti strutture utilizzate come ricovero degli animali: tale destinazione d'uso appare pressoché esclusiva delle cavità poste al terzo livello, quelle che in un periodo non precisato del passato, si trovavano presumibilmente non lontane dell'originaria superficie del lago.

Gran parte delle strutture, data la natura del substrato roccioso in cui sono state realizzate, mostra dei vistosi crolli, soprattutto in prossimità degli ingressi.

Alcune cavità sono state recentemente chiuse con cancelli e porte e non è stato possibile accedervi.

Nei punti in cui affiora la roccia vulcanica e non è presente il cotico erboso, è possibile osservare una fitta rete di canalette di scolo delle acque pluviali, realizzata, con molta probabilità, per convogliare e raccogliere le acque all'interno delle cavità stesse e poterla così utilizzare: ancora oggi in alcune cavità vengono raccolte le acque di stillicidio.

Il sito appare come un piccolo insediamento, forse a carattere temporaneo: l'esecuzione di piccoli saggi archeologici alla ricerca di reperti, soprattutto all'esterno degli ipogei, potrebbe fare luce sulle fasi più antiche di frequentazione delle cavità che mostrano ciascuna diverse fasi di utilizzo e diversa destinazione.

5. CAVE IPOGEE PER LA COLTIVAZIONE DELLE PIROCLASTITI (foto 5)

Nel territorio vicano sono numerose le cavità artificiali createsi a seguito dello scavo ed asportazione di materiali da impiegarsi nell'edilizia, soprattutto piroclastiti a granulometria fine impiegate per la realizzazione di malte. Sono state individuate in vari punti del territorio: tra quelle più interessanti alcune cave a fronte aperto in cui in antico è stata asportata la lava trachitico fonolitica idonea alla realizzazione di macine in pietra. La durezza della pietra e il peso specifico elevato erano note sin dall'età etrusca ed esemplari realizzati con detto materiale sono stati rinvenuti anche a diversi chilometri di distanza: citiamo una macina dalla loc. Sarignano a Barbarano Romano (oggi all'interno di una proprietà privata).

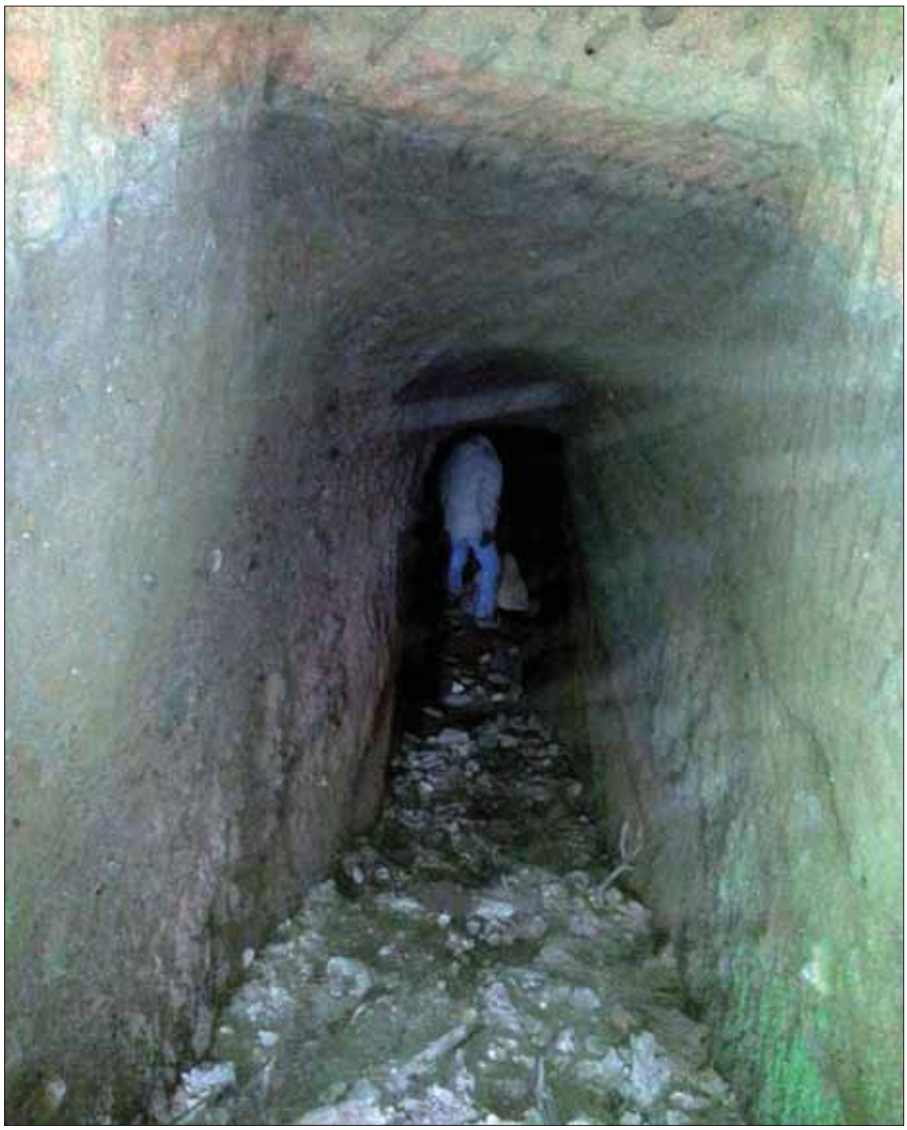


Figura 5 – Galleria sotto l'altura del Castellaccio dei di Vico, forse saggio minerario

6. "POZZO DEL DIAVOLO" (foto 6)

Si tratta della cavità di formazione vulcanica più estesa della regione Lazio (LA 1289). Il suo ingresso si apre a circa 810 metri di quota sul versante meridionale di Monte Venere, un edificio secondario intracalderico che rappresenta l'ultima fase di attività del vulcano, avvenuta circa 95.000 anni fa. Tradizionalmente considerata una vera e propria bocca vulcanica, si tratta verosimilmente di una cavità formatasi con i ripetuti crolli della volta di una piccola bocca eruttiva secondaria, a seguito della diminuzione della pressione nel camino e al conseguente raffreddamento delle lave.

Il sito, di grande suggestione e raggiungibile da un sentiero segnato dal CAI (128b), pur non essendo una cavità artificiale riveste comunque una grande importanza storica ed archeologica, testimoniando come l'Uomo, soprattutto in età preistorica, abbia frequentato le grotte. All'interno della cavità, che si apre tra le lave trachitico fonolitiche, negli anni '70 dello scorso secolo è stato scavato un importante sito risalente al Neolitico che ha restituito due datazioni assolute relative a due momenti di frequentazione risalenti all'inizio del V millennio e del IV millennio a.C.. In ripetuti sopralluoghi condotti dal personale della Riserva è stato possibile rilevare come sia presente, in alcuni piccoli ambienti laterali della grotta, l'emissione di gas di origine termale che contribuiscono a "riscaldarli": forse questo tepore ha suggerito ai neolitici il legame con la Madreterra e l'elevazione del luogo a vero e proprio luogo di culto.

CONCLUSIONI

Il censimento delle cavità presenti all'interno della Riserva Naturale lago di Vico, iniziato nel 2015, ha evidenziato come in una porzione relativamente limitata di territorio si concentri in realtà un'importante concentrazione di ambienti ipogei. Essi sono la testimonianza dell'utilizzo della roccia vulcanica da parte degli umani e costituiscono un vero e proprio "campionario" delle tipologie più diffuse di strutture artificiali. La loro conoscenza, studio e lutela rivestono una primaria importanza e rientrano pienamente nei compiti istituzionali dell'Ente Monti Cimini – Riserva Lago di Vico, sia dal punto di vista culturale che faunistico, ospitando comunità di animali troglofili e troglobii. Ma soprattutto alcune tra esse possono costituire, opportunamente valutandone loro sicurezza ed accessibilità, elementi attrattivi e potenziali risorse turistiche che potrebbero fornire un ulteriore motivo di visita per questi luoghi.

Si ringraziano i geologi Enrico Caprilli e Gabriele Trevi, nonché gli speleologi Carla Galeazzi, Carlo Germani, Sandro Galeazzi, Vittoria Caloi, Marco Vitelli, Tullio Dobosz per



Figura 6 – Il c.d. "pozzo del Diavolo", la più grande cavità vulcanica del Lazio

i sopralluoghi condotti all'interno di alcune delle cavità qui brevemente descritte.

La cartografia di base è realizzata su licenza OpenStreetMap.org.

BIBLIOGRAFIA SPECIFICA §1

(D'Orazi F.M. 1997), (Duncan G. 1958), (Francocci S., Rose D. 2006).

BIBLIOGRAFIA SPECIFICA §2

http://geoparcotuscia.provincia.vt.it/pdf/schede/24_descrizione_acquedotto/farnesiano.pdf; (Cappa G., Felici A., Cappa E. 2012), (Parise M., Galeazzi C., Germani C., Bixio R. , Del Prete S. , Sammarco M. 2016), (Germani C., Mazzoli M., Galeazzi S., Vitelli M. 2017).

BIBLIOGRAFIA SPECIFICA §3

(Dragoni W., Lotti F., Piscopo V., Sibi A. 2002), (Germani C., Parise M. 2010).

BIBLIOGRAFIA SPECIFICA §6

(Baiocchi A., Lotti F., Piscopo V., Valletta M. 2010), Battiato M.L., Cappa G., Felici A., Grassi L., Mecchia G., Piro M. 2000), (Delpino F. 1972), (Mecchia G., Mecchia M., Piro M. & Barbati M. 2003), (Sasso A. 2005), (Sasso A. 2010).

BIBLIOGRAFIA

Baiocchi A., Lotti F., Piscopo V., Valletta M. (2010), *Progetto pilota Geoparco della Tuscia, Censimento e selezione dei geositi della provincia di Viterbo*, Relazione generale, p. 45.

Battiato M.L., Cappa G., Felici A., Grassi L., Mecchia G., Piro M. (2000), *Il Pozzo del Diavolo di Monte Venere (Caprarola, Viterbo - Italia) inquadramento e descrizione dell'unica cavità vulcanica della Regione Lazio*. Poster in: "Dentro i vulcani" - Atti del IX Simposio internazionale di Vulcanospeleologia della U.I.S., 11-19 settembre 1999 Catania, p.191.

Cappa G., Felici A., Cappa E. (2012), *Il Rinascimento degli acquedotti*. In: Atti del XXI Congresso nazionale di speleologia – Sessione attività di esplorazione e ricerca, 2-4 giugno 2011, pp. 341-342.

Delpino F. (1972), *Monte Venere (Com. di Caprarola, Prov. Di Viterbo)*. In: Rivista di Scienze Preistoriche, XXVII, Firenze, pp. 460-461.

Delpino F., Fugazzola Delpino M. A. (1980), *Il deposito stratificato in grotta di Monte Venere: dati di cronologia assoluta*. In: Bollettino di Paletnologia Italiana, nuova serie, 24/82, 19-30.

D'Orazi F. M. (1997), *La via Francigena nell'area viterbese e cimina*. In: Informazioni n°13, pp. 49-57.

Dragoni W., Lotti F., Piscopo V., Sibi A. (2002), *Bilancio idrogeologico del Lago di Vico (Lazio – Italia)*. In: "Residence times in lakes, Science, Management, Education", International Conference, Bolsena (Viterbo - Italy), September 29th - October 3rd 2002, pp. 99-103.

Duncan G. (1958), *Sutri (Sutrium). Notes on southern Etruria*. In: Papers of the British school at Rome, XXVI, pp. 63-134.

Francocci S., Rose D. (2006), *Studio Topografico e modellazione digitale per l'area archeologica di Poggio Cavaliere - Ronciglione (VT)*. Relazione. In: Studi Vetrallesi - Bollettino a cura degli Amici del Museo della Città e del Territorio, n° 15, Ed. Davide Ghaleb, Vetralla.

Germani C., Parise M. (2010), *Interventi antropici nel bacino idrografico del fiume Tevere: gli antichi emissari sotterranei*, Atti dei Convegni Lincei 254, IX Giornata Mondiale dell'acqua "Il Bacino Del Tevere" Roma, 23 Marzo 2009, Roma, p. 192.

Germani C., Mazzoli M., Galeazzi S., Vitelli M. (2017), *Underground areas of the Villa Farnese in Caprarola (Viterbo, Italy)*. In: Hypogea 2017, Proceedings of the International Congress of Speleology in Artificial Cavities, Cappadocia (Turkey), pp. 215-220.

Mecchia G., Mecchia M., Piro M. & Barbati M. (2003), *Le grotte del Lazio. I fenomeni carsici, elementi della geodiversità*, ARP – Regione Lazio, Collana Verde dei Parchi, Serie Tecnica 3, p.38 e p. 96.

Parise M., Galeazzi C., Germani C., Bixio R., Del Prete S., Sammarco M. (2016), *The map of ancient underground aqueducts in Italy: updating of the project, and future perspectives*. In: "Hypogea 2015 - Proceedings of International Congress of Speleology in artificial cavities - Rome, march 11/17 2015, pp. 235-243.

Sasso A. (2005), *Limes 310. Idee per un Parco Geo-Archeologico interprovinciale in un territorio etrusco di confine: dalla Valle Tiberina alla costa tirrenica*. In: "Atlante della Geodiversità del Lazio", Ed. Regione Lazio, Assessorato Ambiente e Cooperazione tra i Popoli - ARP, pp. 173-179, in part, ibidem, geosito n° 404.

Sasso A. (2010), I geoarcheositi in Fattori C. & Mancinella D., "La Conservazione del Patrimonio Geologico del Lazio. Materiali, modelli, esperienze". Ed. ARP – Regione Lazio (Roma), pp. 199-200.

Descrizione geosito n° 24 nelle pagine dedicate al geoparco della Tuscia: acquedotto farnesiano, pp. 1-3, all'url

http://geoparcotuscia.provincia.vt.it/pdf/schede/24_descrizione_acquedotto/farnesiano.pdf

Censimento e catalogazione delle cavità di origine antropica mediante prospezioni geofisiche integrate nell'area de "Il Piano" (Isola d'Elba, Italia)

Integrated geophysical surveys in the "Il Piano" area (Elba Island, Italy) for inventory and cataloguing of artificial cavities

Maria Di Nezza[1], Michele Di Filippo[2], Flavio Cecchini[3], Siro Margottini[3], Caris De Martino[3], Veronica Pazzi[4], Tommaso Carlà[4], Federica Bardi[4], Federico Marini[4], Katia Fontanelli[4], Emanuele Intrieri[4], Riccardo Fanti[4]

[1] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italia
E-mail: maria.dinezza@ingv.it

[2] IGAG-CNR Roma, Italia
E-mail: michele.difilippo@uniroma1.it

[3] CMGeoservizi, Geologia-Prospezioni Geofisiche-Topografia, Via della Stazione di San Pietro 49, 00165 Roma

[4] Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Firenze, Italia
E-mail: veronica.pazzi@unifi.it

Parole chiave (*key words*): sprofondamenti (*sinkhole*), gravimetria (*gravity*), microgravimetria (*microgravity*), Elba (*Elba*), Il Piano (*Il Piano*), rischio (*risk*)

RIASSUNTO

Numerosi sprofondamenti si sono verificati nell'ultimo decennio in un'area di fondovalle compresa nel territorio di Rio Marina all'Isola d'Elba (località *Il Piano*), ed hanno interessato abitazioni, aree agricole e la strada di collegamento tra Rio Marina e Rio nell'Elba, la SP26. Nell'intorno affiora la formazione del *Calcare Cavernoso* dove si è sviluppato un sistema caveale, la "Grotta di San Giuseppe"; inizialmente ciò faceva ipotizzare anche la presenza di cavità all'interno del substrato carbonatico. L'integrazione di diversi metodi geofisici indiretti ha evidenziato invece un altro motivo causale di origine antropica nella formazioni di questi *sinkhole*.

Gli obiettivi dello studio sono stati ottenere un modello geologico e idrogeologico della zona; individuare possibili cavità e/o carenze di massa/densità che potrebbero evolvere in sprofondamenti; valutare la suscettibilità della zona agli sprofondamenti.

Tra i risultati delle indagini geofisiche integrate: a) i modelli gravimetrici 2D e 3D hanno fornito informazioni sulla distribuzione spaziale delle densità nel sottosuolo; b) la 3D-ERT ha caratterizzato il comportamento elettrico dei materiali; c) il metodo H/V ha permesso di stimare lo spessore medio delle alluvioni.

Le indagini geofisiche integrate, unite ad un'accurata ricostruzione della trasformazione ambientale dell'area, ha consentito una caratterizzazione geomorfologica e idrogeologica del territorio. L'interpretazione di questi dati ha permesso di comprendere l'innesco dei fenomeni di sprofondamento e di redarre mappe delle aree a rischio.

INTRODUZIONE

Numerosi sprofondamenti si sono verificati a partire dal 22 gennaio 2008, (D'ORE-FICE *et al.*, 2009) nel territorio di Rio Marina nel settore orientale dell'isola d'Elba, presso la località "*Il Piano*", interessando abitazioni, aree agricole e la SP26, strada di collegamento tra il comune di Rio Marina e il comune di Rio dell'Elba(*Fig.* 1).

L'area interessata dagli sprofondamenti è un settore di fondovalle pianeggiante, attraversato dalla SP26 e dal fosso di Riale. Dal punto di vista geologico tale depressione è colmata da alcuni metri di spessore di depositi alluvionali quaternari che poggiano

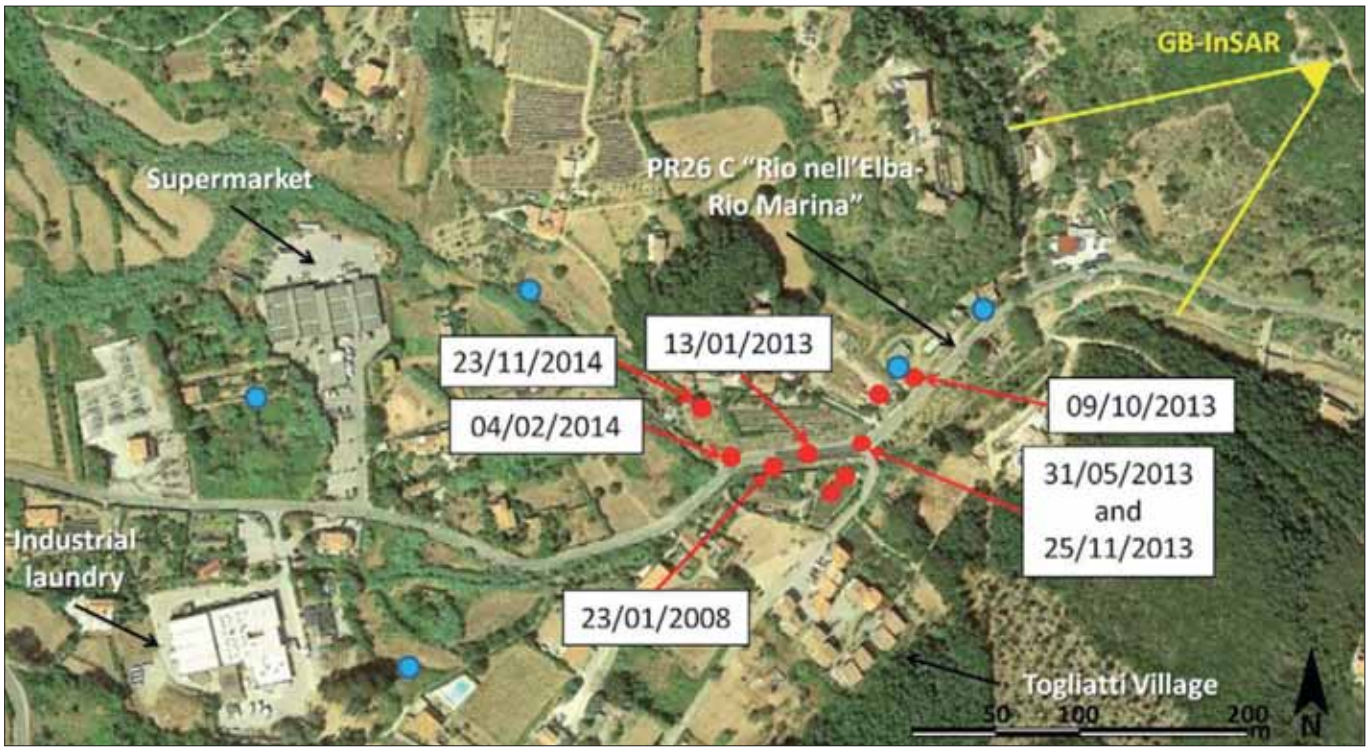


Figura 1 - Localizzazione degli sprofondamenti



Figura 2 - Immagini dell'ingresso della grotta di San Giuseppe

sui litotipi carbonatici, alterati e fratturati, appartenenti all'unità stratigrafica delle *Brecce di Rialbano* (*Calcare Cavernoso Auct.*).

Ai bordi della valle affiora la formazione delle *Brecce di Rialbano*, *Fig.* 3, dove si è sviluppato un sistema di cavità naturali abbastanza imponente, tra cui la più importante è la Grotta di San Giuseppe, ubicata sul versante sinistro del Fosso Riale; ricostruzioni speleologiche hanno permesso di definirne il massimo dislivello, pari a 23 m, e lo sviluppo orizzontale, pari a 36 m (DELLAVALLE, 1994).

La grotta si presenta attualmente a forma di imbuto, con una stretta e lunga apertura alla sommità (MAZZEI, 2008). È plausibile che la volta e le pareti siano state interessate da fenomeni di crollo, come testimoniato dalla presenza di massi di dimensioni plurimetriche, presenti all'ingresso della grotta stessa (*Fig.* 2). Tali fenomeni di crollo trovano riscontro anche nella ricostruzione storico-archeologica della grotta, la quale, prima del suo primo utilizzo come area sepolcrale, avvenuto nel III millennio a.C., avrebbe avuto l'aspetto di un'ampia cavità (MAZZEI, 2008).

Il ritrovamento al suo interno (negli anni '60) di ricchi corredi funebri riferibili alla cultura del Rinaldone, collocabile intorno ai 4.000 anni fa (ZECCHINI, 1981), e di circa 80 resti scheletrici appartenenti ad individui umani (MALLEGNI, 1972), ne fanno uno dei più importanti siti eneolitici italiani (2.000÷1.800 anni a.C.) (cfr. titolo XIII) (CREMONESI 1967, 1993; CREMONESI & GRIFONI CREMONESI, 2001).

La possibilità di una presenza diffusa di manifestazioni carsiche combinata con le osservazioni generali sull'assetto idrografico ed idrogeologico dell'area hanno in effetti costituito uno degli elementi di attenzione da cui lo studio è scaturito, nell'ipotesi di una interazione dinamica tra azione delle acque superficiali e profonde, regimi di filtrazione e, appunto, fenomeni carsici e loro conseguenze.

Inoltre nell'area pianeggiante persistono molte edifici e infrastrutture di particolare rilevanza per l'isola ed esposti a rischio; la principale è la SP26 che rappresenta la principale arteria di collegamento tra l'abitato di Rio dell'Elba e il porto di Rio Marino, nonché la presenza di numerose abitazioni rurali e il villaggio P. Togliatti che hanno risentito delle deformazioni del suolo riportando crepe e fratture. A causa dei ripetuti sprofondamenti, la SP26 è stata ripetutamente interrotta, creando seri problemi alla popolazione, con il conseguente isolamento del centro abitato di Rio Marina. Il 13 gennaio 2013 si è verificato nell'area de *Il Piano* un nuovo sprofondamento che ha determinato la dichiarazione dello stato di emergenza regionale.

Nel 2008 è partito già un monitoraggio del manto stradale per misurare il tasso di fessurazione (GEORISORSE ITALIA, 2008) a cui si è aggiunto nel 2013 il monitoraggio strumentale da interferometria terrestre posizionato sulla dorsale che sovrasta la località *Il Piano* (si veda *Fig.* 1). Il monitoraggio interferometrico in continuo ha permesso di rilevare deformazioni del suolo, legate a eventi piovosi abbondanti, precedenti agli episodi di crollo avvenuti nei primi giorni di febbraio 2014 (CASAGLI *et al.*, 2014).

Nel 2013, a seguito del movimento franoso avvenuto sulla SP26, è stata eseguita anche una campagna geognostica al fine di ricostruire l'andamento del sottosuolo interessato da tali fenomeni (INGEO, 2013). Tale campagna era caratterizzata dalle seguenti indagini:

- 5 sondaggi a carotaggio continuo spinti fino alla profondità di 20 m dal p.c. attrezzati con tubi piezometrici per il successivo controllo dei livelli di falda;
- 5 prove SPT in fase di avanzamento dei sondaggi a carotaggio continuo;
- 5 prove di permeabilità Lefranc anch'esse in avanzamento durante i sondaggi;
- misure con *pocket penetrometer* e scissometro sulle carote estratte;
- 6 tomografie geoelettriche 2D;
- 10 sondaggi geognostica distruzione di nucleo.

Infine per monitorare l'andamento del livello piezometrico della falda superficiale presente all'interno dei depositi alluvionali, furono eseguiti anche 3 carotaggi a distruzione di nucleo attrezzati a piezometro, dalla profondità di ca. 10 m. Le tomografie elettriche

hanno raggiunto una profondità media di 15-20 m dal piano campagna. Nella relazione l'interpretazione dei risultati evidenzia come i due *sinkhole* che hanno interessato la SP26 si collocano laddove maggiore è lo spessore dei sedimenti alluvionali sciolti e minore lo spessore del deposito argillitico (*Formazione di Cavo*) presente al tetto del substrato calcareo più o meno alterato. Inoltre si pone l'attenzione sul substrato costituito dalla formazione del *Calcare Cavernoso* a profondità variabili dal piano di campagna, da legarsi presumibilmente a vecchie superfici erosive e/o a possibili dislocazioni dovute a faglie, come riportato nella cartografia geologica dell'area (INGEO, 2013). Al substrato sono associabili valori di resistività superiori ai 400 Ωm. Le alluvioni affioranti sono costituite da ghiaie sciolte con poca matrice limo-sabbiosa caratterizzate da valori di resistività compresi tra 160 Ωm e 400 Ωm, mentre ai livelli argilloso-limosi e alle argilliti (*Formazione di Cavo*) sono associati valori di resistività medio-bassa, da 10 Ωm a 30 Ωm. Nella stessa relazione (INGEO, 2013) si legge ancora che la genesi dei *sinkhole* che hanno colpito l'area può essere attribuita a collassi profondi avvenuti nel substrato calcareo che hanno prodotto effetti "a catena" sulla colonna dei terreni sovrastanti. Gli effetti di tali sprofondamenti profondi generalmente vengono evidenziati in superficie con un ritardo determinato dal progredire dell'assestamento verso l'alto e sono direttamente proporzionali allo spessore dei materiali di copertura.

Infine, lo studio interferometrico poneva l'origine più probabile per la formazione degli sprofondamenti avvenuta tra il 2008 e il 2014 (INTRIERI *et al*., 2015) correlato ai processi carsici e in particolare all'erosione dei sedimenti nelle alluvioni causata dalla circolazione dell'acqua verso il basso tra gli acquiferi (INTRIERI *et al*., 2015). A seguito dell'osservazione di elementi carsici nelle *Brecce di Rialbano*, è stata eseguita una zonazione di suscettibilità preliminare di *sinkhole* secondo criteri litologici e geomorfologici.

Secondo gli studi condotti (INTRIERI *et al*., 2015; NISIO, 2015) le cause predisponenti dei *sinkhole* di Rio Marina sono da ricercarsi nel substrato carbonatico e dunque nella dissoluzione delle *Brecce di Rialbano*, poste al di sotto dei depositi alluvionali. Le caratteristiche dei *sinkhole* occorsi permettono di classificare questi fenomeni come *cover collapse sinkhole* (GUTIERREZ *et al*., 2008, 2014; NISIO, 2008).

Il monitoraggio interferometrico da terra era stato già adottato con successo per la cittadina di Camaiore (Lu) (BUCHIGNANI *et al*., 2004a, 2010a) permettendo di evidenziare aree soggette a continui movimento del terreno in seguito a forti piogge (BUCHIGNANI *et al*., 2010a). Il monitoraggio era partito in seguito ai risultati scaturiti dall'esecuzione di una prospezione gravimetrica effettuata nel 1998 effettuata in tutto il bacino intramontano di Camaiore mettendo in evidenza l'andamento e profondità del substrato carbonatico (*Calcare Cavernoso*) nonché gli spessori dei terreni fluvio-lacustri recenti (BUCHIGNANI, 2002; RIZZO *et al*., 2002; DI FILIPPO & TORO, 2004); in base a tale ricostruzione si era evidenziato che lo sprofondamento non era da imputare alla dissoluzione dei substrato carbonatico che si trovava a grande profondità. Successivamente, per comprendere la genesi a piccola scala e soprattutto i meccanismi di formazione dei *sinkhole* da imputare alla diversa tipologia dei terreni fluvio-lacustri, era stato condotto anche un rilievo microgravimetrico in tutto l'abitato. Le mappe gravimetriche avevano permesso di ricostruire l'assetto geologico del sottosuolo a scala locale e di evidenziare eventuali aree a minor densità non ancora monitorate dall'interferometro che possono tuttora rappresentare zone a maggior rischio (BUCHIGNANI *et al*., 2010b).

Pertanto si è scelto di adottare, anche nel caso dell'Isola d'Elba, le stesse procedure adottate per la piana ed abitato di Camaiore.

Quindi la ricostruzione geo-gravimetrica 3D del sottosuolo e l'integrazione e confronto con ERT-3D e H/V (PAZZI *et al*. 2018, *in press*) e le altre metodologie geofisiche, hanno consentito di comprendere le cause innescanti dei fenomeni di *sinkhole* e il ruolo del fosso di Riale.

Il contributo della prospezione microgravimetrica e l'integrazione con altri metodi geofisici hanno permesso con successo già in passato di identificare le cause degli sprofondamenti e identificare e censire aree a rischio (DI FILIPPO *et al*., 2001, 2004, 2005; ARGENTIERI *et al*., 2015; DI NEZZA & DI FILIPPO, 2015; DI NEZZA *et al*., 2015).

ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

La complessa struttura a falde dell'Isola d'Elba identifica la parte più occidentale della catena appenninica settentrionale (BORTOLOTTI *et al*., 2001). Da un punto di vista geologico, la parte occidentale dell'isola è dominata da un grande plutone di granodiorite (Monte Capanne), mentre la parte orientale è composta da un insieme di unità tettoniche liguri-toscane, per lo più composte da formazioni sedimentarie e dall'intrusione di corpi magmatici Messiniani-Pliocenici (FERRARA & TONARINI 1985; ROCCI *et al*., 2002; MAINIERI *et al*., 2003).

Secondo la cartografia geologica degli anni '60 (BARBERI *et al*., 1967, 1969) le formazioni geologiche che affiorano sull'Isola d'Elba furono inizialmente raggruppate in cinque complessi tettonici, ricoperti da depositi quaternari di origine continentale. In particolare questi sedimenti erano sabbie eoliche, depositi alluvionali terrazzati localmente, coperture eluvio-colluviali, detriti e detriti di frana, depositi di spiaggia e rifiuti minerari. Più recentemente è stato fornito un modello aggiornato della struttura dell'Isola d'Elba centrale e orientale, identificando nove complessi tettonici, generalmente con una vergenza ad est (BORTOLOTTI *et al*. 2001).

L'area di studio si trova nella parte nord-orientale dell'isola (*Fig*. 3) e corrisponde principalmente al territorio compreso tra i comuni di Rio nell'Elba e Rio Marina. La più recente mappa geologica 1: 25000 del 2015 (Istituto Superiore per la protezione e la Ricerca Ambientale, http://sgi1.isprambiente.it/website/isolaelbageo/carta_geologica_isola_elba.htm), mostra che la *Formazione di Cavo* (FCV in *Fig*. 3) e le *Brecce di Rialbano* (RBC in *Fig*. 3), noti anche come *Calcare Cavernoso* (BORTOLOTTI *et al*., 2001; INTRIERI *et al*., 2015), costituiscono il substrato roccioso della zona.

La FCV è un argilloscisto metamorfosato caratterizzato da poliscisti e calcescisti e ardesie varicolori, tettonicamente sovrapposte, per mezzo di una faglia orientata N-S con immersione di 148 W, mentre la RBC, è invece un calcare dolomitico brecciato (BORTOLOTTI *et al*., 2001; INTRIERI *et al*., 2015). Questo substrato è coperto da circa 20-30 m da depositi alluvionali (*Fig*. 3) (alluvioni quaternarie), costituiti da ghiaia lenticolare e corpi di sabbia all'interno di una matrice sabbiosa limosa.

Da un punto di vista idrogeologico, le formazioni affioranti sono abbastanza diverse: le RBC mostrano un'alta permeabilità, principalmente a causa di fratturazione tettonica e fenomeni carsici, mentre la permeabilità della FCV è molto bassa. Il bacino idrografico separa *Il Piano* per mezzo della sezione di discesa (*Fig*. 4) da mare.

Questa morfologia è il risultato dell'evoluzione geologica e geomorfologica dell'area: nel corso dell'evoluzione tardo pleistocenica e olocenica, caratterizzata da oscillazioni del livello marino di base e da alternanza di eventi deposizionali ed erosivi, l'area è stata progressivamente colmata da depositi continentali di varia natura (lacustri, fluviali, di versante, derivanti da trasporti di massa) fino a raggiungere l'aspetto attuale, al netto delle modifiche antropiche. In taluni periodi della sua storia geologica, essa ha probabilmente assunto le caratteristiche di un bacino endoreico.

In sintesi, l'area è caratterizzata da un substrato (talora affiorante ai margini de *Il Piano*) costituito dalla formazione delle RBC (ad est) o dalla FCV (ad ovest) in contatto tettonico per faglia. Al di sopra, spessori variabili di depositi detritici recenti, distingui-

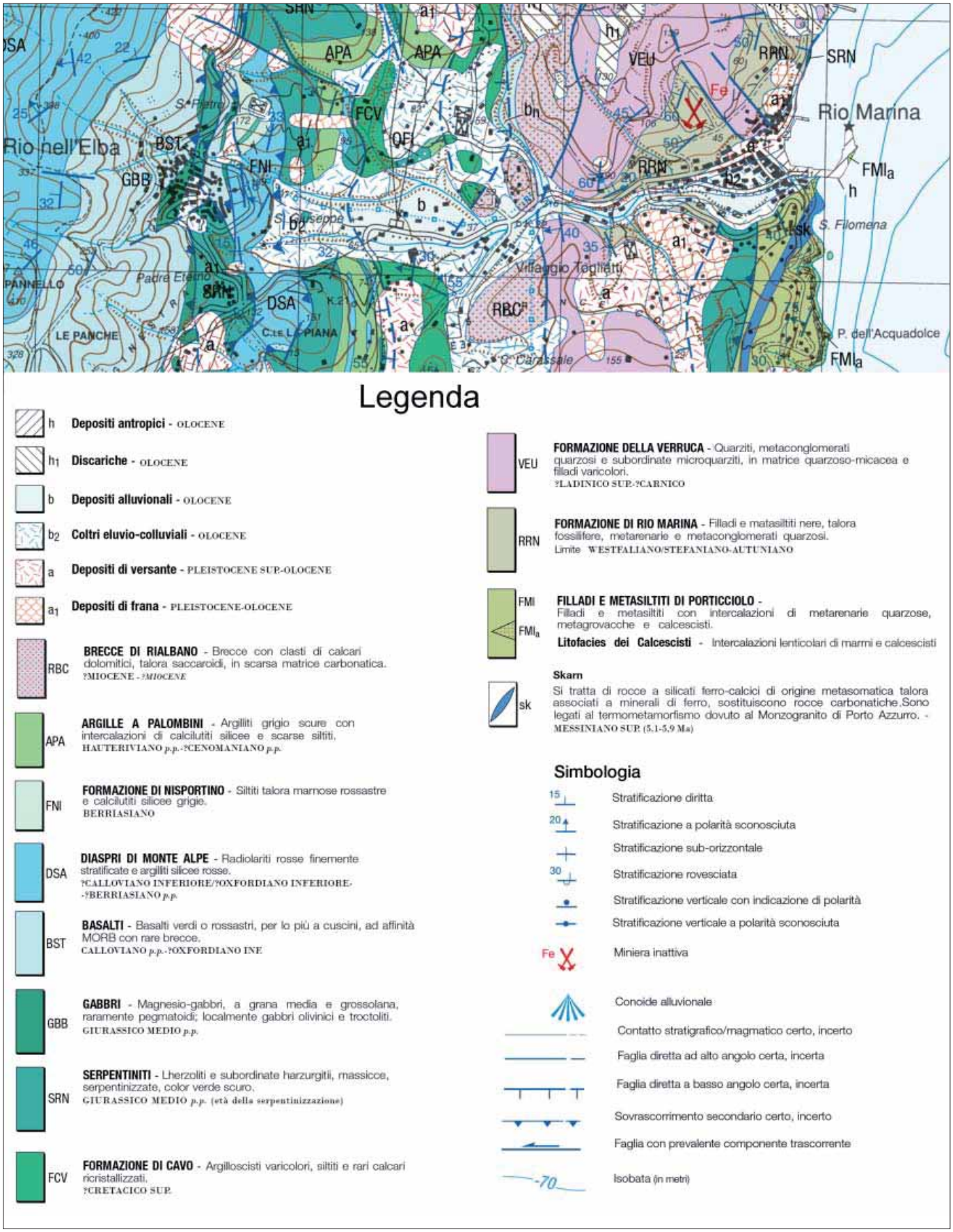


Figure 3 – Carta geologica semplificata ed ubicazione degli sprofondamenti dell'area di Rio Marina. Le Formazioni descritte sono (da quelle più superficiali a quelle più profonde): b: depositi alluvionali; a: depositi di versante; Unità Tettonica Monte Strega (Dominio Ligure interno): OFI: Oficalciti; Unità Grassera (Dominio Ligure interno): FCV: Formazione del Cavo; Brecce tettoniche tra la Falda Toscana e l'Unità Monticiano Roccastrada: RBC: Brecce di Rialbano; Unità Tettonica Monticiano Roccastrada: RRN: Formazione di Rio Marina. (Stralcio della Carta Geologica dell'Isola d'Elba in Scala 1:25.000, ISPRA 2015)

bili in prima approssimazione in materiali a granulometria fine e molto fine alla base e in materiali più grossolani nella parte superiore. Gli spessori di questi detriti sono variabili da pochi metri a oltre 30 m, in funzione dell'andamento del substrato e della morfologia superficiale, così come variabile è il loro assetto interno.

Nell'area di studio si riconoscono due falde acquifere principali: una superficiale, ospitata dalle alluvioni quaternarie, e la principale, di origine carsica ospitata nel

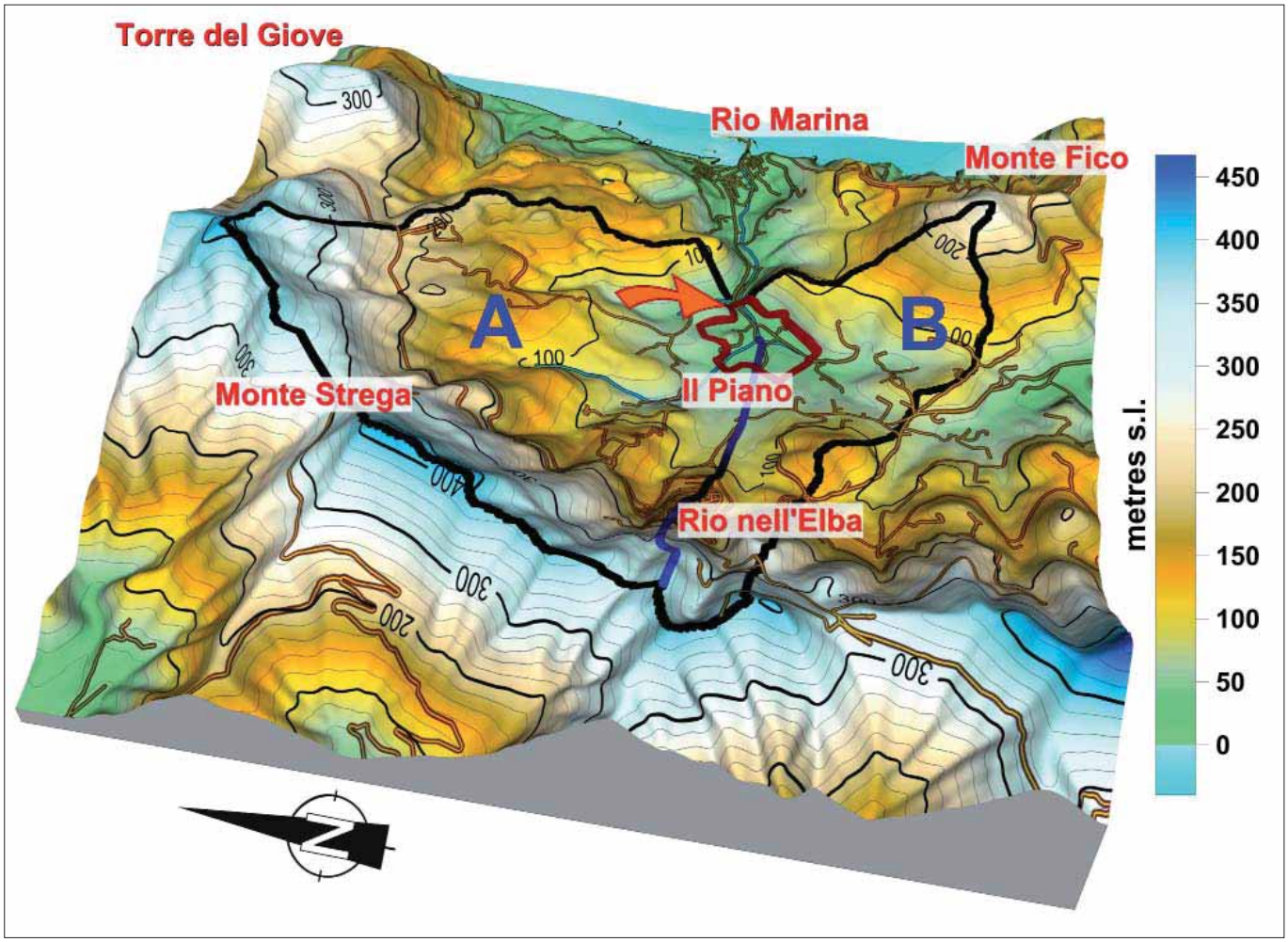


Figure 4 - Aspetto morfologico attuale della località Il Piano

calcare fratturato, e profondamente sfruttata per scopi industriali, agricoli e di consumo (INTRIERI *et al*., 2015;NISIO 2015).

Un ruolo determinante nella modifica del paesaggio è tuttavia legata all'attività molitoria nella Valle dei Mulini, attestata sin dalla metà del XVI secolo. Risalgono infatti ad allora gli statuti del Comune di Rio nell'Elba (*Statuta Rivi*; CANOVARO, 2002), nei quali sono regolamentate le attività economiche, tra le quali è citata anche quella molitoria. Benché l'agricoltura abbia avuto un'importanza economica marginale nella valle rispetta all'attività mineraria, è stata documentata la presenza di 22 mulini (PIEROTTI , 1993), l'ultimo dei quali è rimasto in uso fino agli anni '50. La necessità di approvvigionare questi opifici della necessaria energia idraulica ha determinato la presenza in passato di numerosi bottacci e prese (INTRIERI *et al*., 2018). Le rovine dei mulini sono ancora in gran parte visibili, anche se in diversi stati di conservazione (*Fig*. 5).

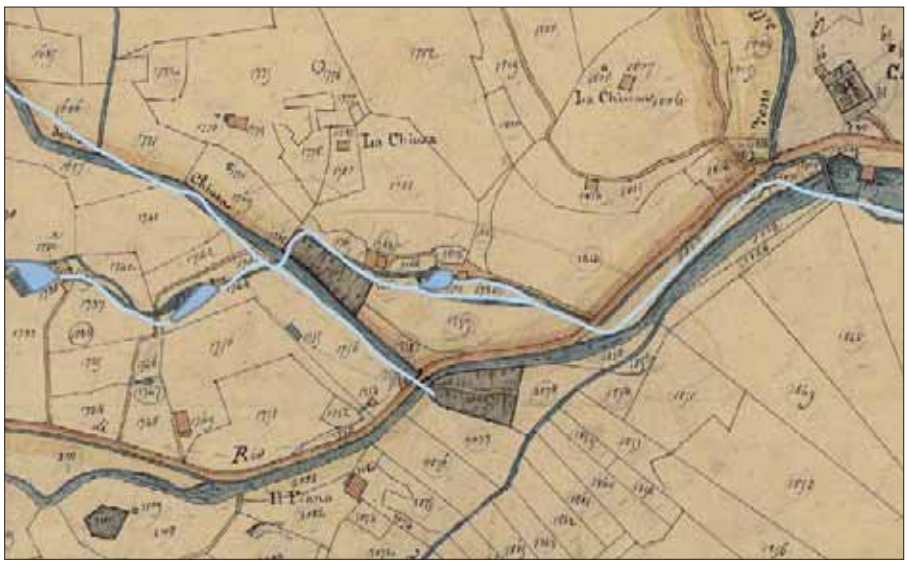


Figure 5 - Reticolo idrografico e bottacci presenti nel Catasto Leopoldino. Sono indicati tre canali di captazioni artificiali per l'alimentazione dei mulini e una diramazione del Fosso di San Giuseppe, con probabile funzione di scolo

METODI GEOFISICI

In questa sezione vengono discussi i risultati ottenuti da una prospezione microgravimetrica nella località *Il Piano* (*Fig*. 4). Tali acquisizioni hanno permesso di ottenere un quadro geologico strutturale tridimensionale del sottosuolo nel settore orientale dell'isola e della località *Il Piano*. L'integrazione con ERT sia 2D che 3D (PAZZI *et al*., 2018 in press) è stata eseguita per caratterizzare l'area di studio e comprendere quanto i terreni a bassa densità e a bassa resistività avessero o meno un ruolo determinante nella genesi degli sprofondamenti. Le misure di rumore (misure H/V) non solo hanno permesso di caratterizzare tali terreni dal punto di vista sismico, ma anche di delineare l'area interessata dai *sinkhole* in relazione alle caratteristiche geofisiche.

Dalle nuove informazioni geofisiche integrate ai dati geognostici è stato possibile caratterizzare geologicamente la porzione superficiale delle aree soggette a sprofondamento, quindi stilare una carta che ha permesso di censire le area a rischio.

Infine è stato possibile determinare la genesi della formazione degli sprofondamenti.

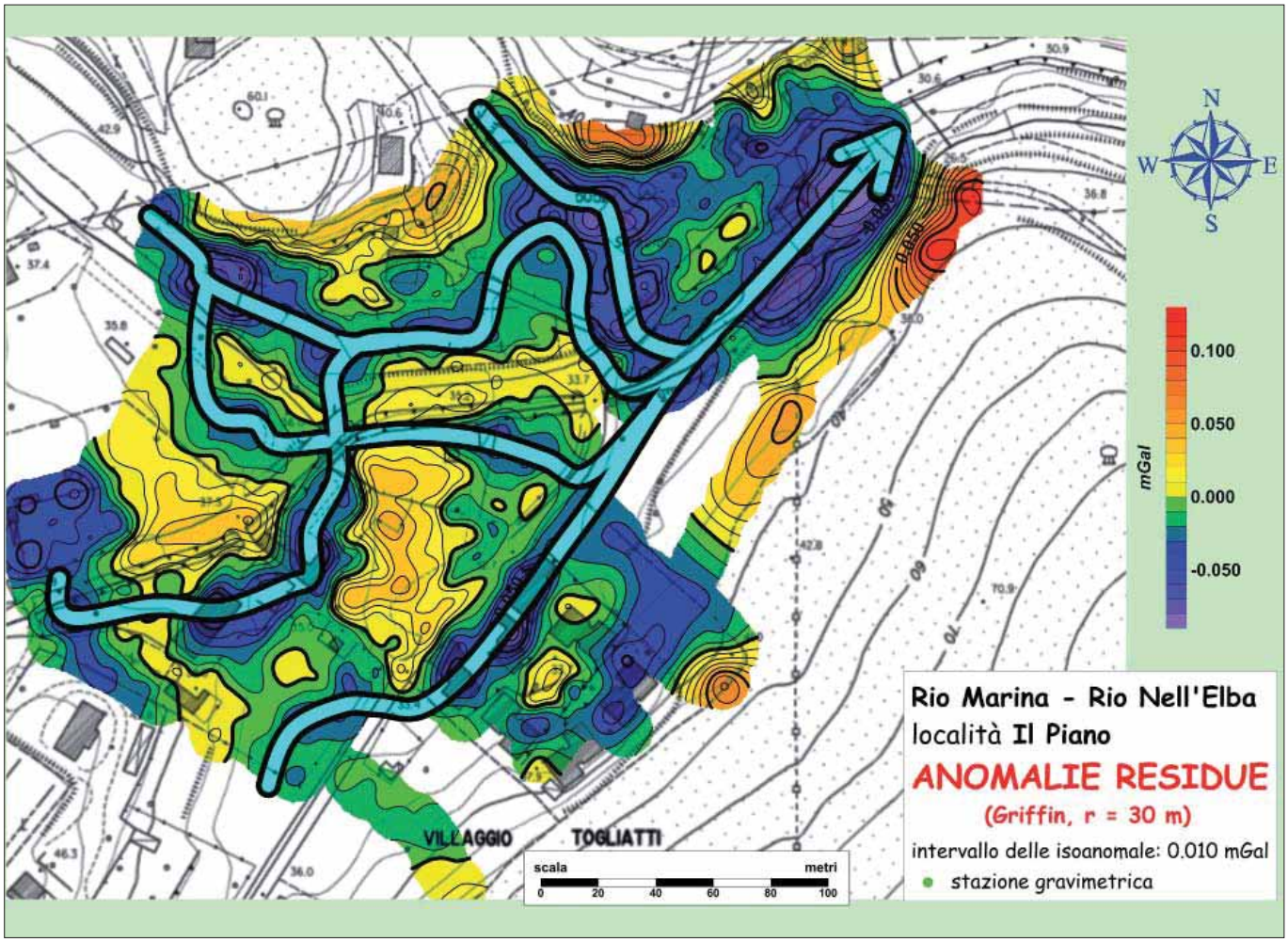


Figura 6 – Carta delle Anomalie residue ottenute con il Metodo di Griffin (raggio 30m). Vengono riportati i corsi d'acqua

PROSPEZIONE MICROGRAVIMETRICA

Adeguate differenze nella densità dei materiali del sottosuolo permettono l'ottimizzazione dei risultati delle indagini microgravimetriche.

L'identificazione di cavità utilizzando la tecnica gravimetrica e/o microgravimetrica richiede l'individuazione di anomalie negative localizzate a seconda della scala del problema, una volta sottratta al valore delle anomalie di Bouguer la variazione di gravità imputabili a corpi geologici a larga scala o a carattere regionale. La reale dimensione della cavità dipende anche dalla presenza di fessurazione nella roccia ospite che permette di comprenderne anche la genesi della formazione (BISHOP *et al*., 1997).

L'obiettivo della prospezione microgravimetrica in questo caso è stata l'individuazione di aree caratterizzate da minimi gravimetrici dovuti a cavità o zone a bassissima densità nel sottosuolo. Lavori gravimetrici precedenti che hanno interessato la zona dell'Isola d'Elba erano finalizzati all'individuazione di strutture geologiche a grande scala e poste a maggiore profondità (SALVIONI, 1953, 1955; CNR, 1986; SGN, 1989; GUALTIRI *et al*, 1993).

Considerando la peculiarità dell'assetto geomorfologico e geologico dell'isola e la ridotta estensione dell'area interessata dagli sprofondamenti de *Il Piano*, per avere una stima corretta dell'andamento dei corpi geologici posti a maggiore profondità e quantizzare il loro contributo gravimetrico, è stata condotta un'indagine gravimetrica con 60 stazioni, su un'area più vasta (*Fig*. 4 zone A e B) di quella interessata dagli sprofondamenti (*Fig*. 4). Per i rilievi gravimetrici è stato utilizzato un gravimetro LaCoste & Romberg modello D con una sensibilità di 5 µGal.

Nell'eseguire la prospezione microgravimetrica a *Il Piano* le singole letture di gravità sono state riferite ad una rete locale costituita da quattro stazioni in modo da poter controllare la deriva ogni ora ed ottenere un errore quadratico medio inferiore a 5 µGal. La rete è stata connessa alla stazione base posta presso la chiesa di Santa Barbara e tutte le misure di gravità sono state riferite a questo punto. La rete locale è stata collegata tramite la stazione di Santa Barbara alla Stazione di Gravità Assoluta di S. Angelo Romano (DI NEZZA, 2007; D'AGOSTINO *et al*., 2008) situata sulle rocce carbonatiche Meso-Cenozoico dei Monti Cornicolani vicino Roma (DI NEZZA & DI FILIPPO, 2015; DI NEZZA *et al*., 2015). Sono state acquisite 964 stazioni disposte secondo una griglia da 6 m a 6 m (*Fig*. 6).

Il valore di densità adottato per il calcolo dell'Anomalia di Bouguer è stato di 2150 kg /m^3 (depositi alluvionali del Quaternario) per la località *Il Piano* e di 2650 kg/m^3 (FCV e RBC attribuibile all'assetto geologico più profondo). Questi valori di densità sono stati stimati mediante misure di laboratorio sulla roccia campionata nell'area di studio e mediante metodi analitici o grafici come quelli proposti da NETTLETON (1942) e PARASNIS (1962).

La correzione topografica è stata calcolata utilizzandola i DEM di TINITALY (TARQUINI *et al*., 2007; 2012, http://tinitaly.pi.ingv.it/). Le Anomalie di Bouguer sono state ottenute applicando le correzioni classiche (metodo TAMURA, 1987).

La separazione dell'Anomalia di Bouguer, cioè il processo di filtraggio che divide le strutture locali (anomalie di gravità residua) dall'andamento regionale della gravità (anomalie di gravità regionale), è stato effettuato utilizzando un approccio polinomiale (SIMPSON, 1954) per l'elaborazione dei dati della prospezione. Infine, per la località di *Il Piano* è stato ottenuto anche un modello tridimensionale della distribuzione spaziale delle anomalie di gravità (*Fig*. 7) calcolato con il metodo 3D della convoluzione Euclidea (THOMPSON, 1982; REID *et al*., 1990).

RISULTATI

La carta gravimetrica delle Anomalie di Bouguer dell'area orientale dell'Isola d'Elba,

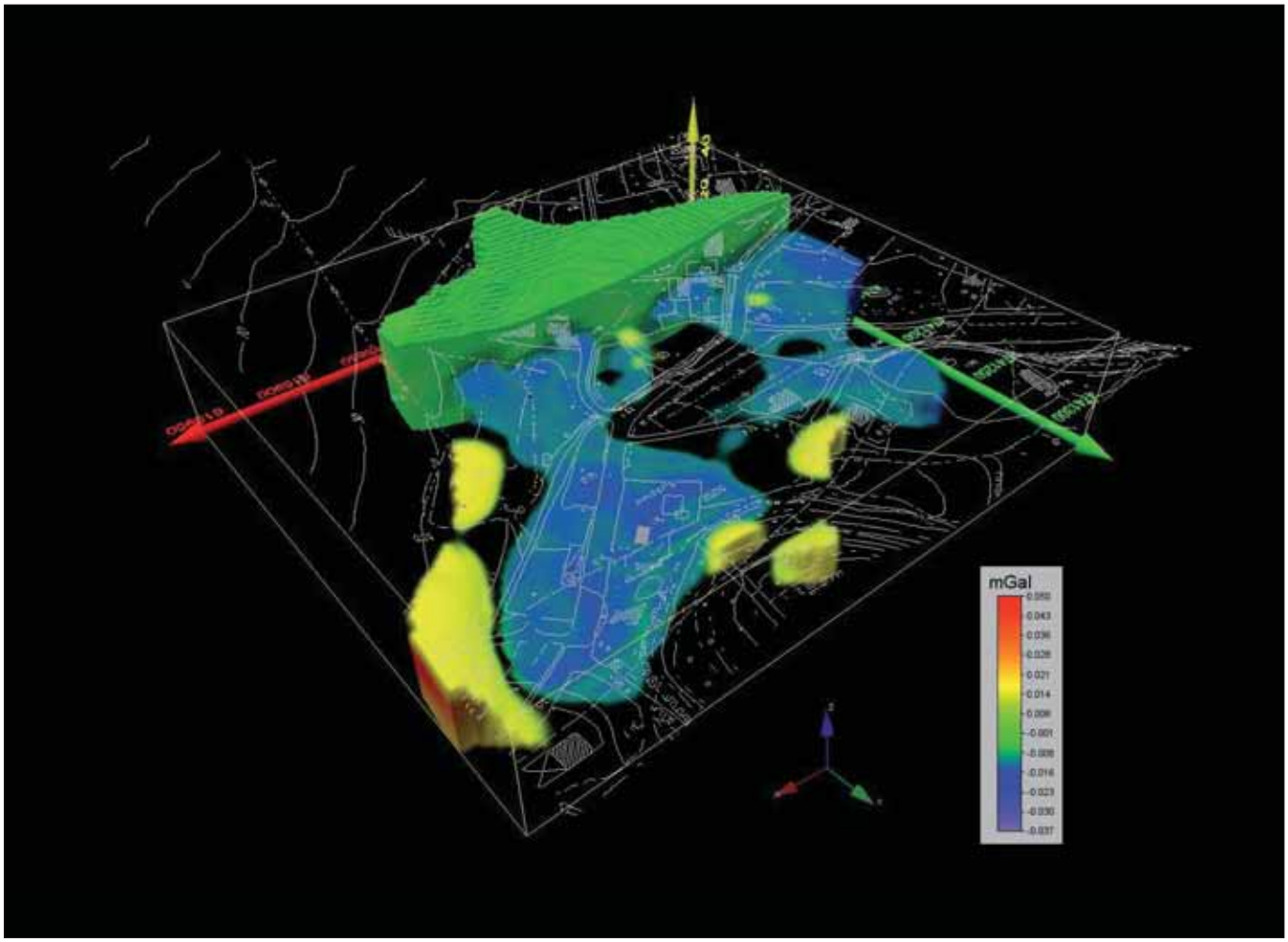


Figura 7 - Modello tridimensionale della distribuzione spaziale delle anomalie di gravità calcolato con il metodo 3D della convoluzione Euclidea (THOMPSON, 1982; REID et al.*, 1990)*

elaborata con 2150 kg/m^3, è stata realizzata utilizzando i dati di anomalia, tutti positivi da +33.580 a +35.736 mGal per un range di 2.156 mGal, delle 964 stazioni gravimetriche. Sono stati inclusi anche i valori delle misure esterne all'area in studio. L'entità dei valori di Anomalia di Bouguer è simile a quella presente sull'isola e nella vicina costa (SALVIONI, 1953, 1955; CNR, 1986; SGN, 1989; GUALTIERI *et al*, 1993).

Il quadro delle anomalie mostra un decremento dei valori da Est verso Ovest, senza evidenziare zone con anomalie chiuse sia di minimo che di massimo gravimetrico. Questo andamento generale dovrebbe essere, come prima ipotesi, l'effetto dell'approfondimento verso Ovest delle formazioni rocciose dense delle *Brecce di Rialbano* (o *Calcare Cavernoso*) e del *Verrucano* che affiorano nella parte ad Est.

L'andamento delle Anomalie di Bouguer risente dell'effetto di strutture geologiche presenti a varie profondità, anche dell'ordine del migliaio di metri; pertanto per poter fare opportune considerazioni geologiche a scala locale, queste dovranno essere ottenute sulla base delle anomalie residue di vario ordine legate a variazioni di densità confinate nella porzione più superficiali.

Per quest'ultimo motivo, sono state effettuate 60 stazioni gravimetriche intorno all'area de *Il Piano*. Il valore di densità utilizzato nelle correzioni di Bouguer e topografica è stato di 2650 kg/m^3, in quanto i litotipi interessati sono il *Verrucano*, il *Calcare Cavernoso* e la *Formazione di Cavo* (argilliti metamorfosate).

Nella mappa delle Anomalie di Bouguer del settore orientale dell'isola è evidente una zona di minimo gravimetrico impostata nella parte centrale de *Il Piano*.

Una volta eliminato il *trend* regionale, la nuova mappa delle Anomalie Residue mostra una correlazione maggiore tra anomalie gravimetriche e strutture geomorfologiche: i valori positivi di anomalia caratterizzano la catena costiera con gli affioramenti del *Verrucano* e del *Calcare Cavernoso*, mentre i valori negativi, -2.2 mGal, sono ubicati nella depressione morfologica e strutturale de *Il Piano*.

Sono state valutate le superfici polinomiali dal 1° al 5° grado: tutte hanno mostrato il decremento dei valori di gravità da Est verso Ovest mostrando una maggiore articolazione delle isoanomale con la crescita del grado polinomiale.

Il Campo Regionale del 3°ordine è risultato il più idoneo per descrivere l'andamento del campo regionale ed è rappresentato da una superficie piana con i valori decrescenti da Est, +35.700 mGal, verso Ovest, +33.500 mGal.

Una volta sottratto il Campo Regionale, sono state ottenute le Anomalie Residue, che rappresentano gli effetti delle formazioni sedimentarie più recenti, cioè dei sedimenti fluvio-lacustri affioranti ne *Il Piano* (*Fig*. 6).

Per meglio evidenziare gli effetti di eventuali cavità presenti nel sottosuolo sono state preparate alcune mappe utilizzando il metodo di Griffin (metodo della media, GRIFFIN, 1949) con vari raggi, da 40 a 7 metri (*Fig*. 7).

Le Anomalie Residue presentano un andamento molto articolato dell'immediato sottosuolo de *Il Piano*. Anomalie positive superiori a +0.050 mGal sono ubicate sugli affioramenti del *bedrock* roccioso ai bordi della valle.

Le anomalie negative sono poste principalmente lungo gli alvei fluviali o dove erano presenti vasche di accumulo dell'acqua al tempo in cui erano attivi i vari mulini. Nella Figura 6 viene rappresentato lo stralcio della carta del Catasto Generale della Toscana - Isole (1841). Le anomalie negative sono concordanti e risultano legate al sistema idraulico dei corsi d'acqua naturali e artificiali esistenti al momento di attività molitoria della Valle dei Molini.

C'è da notare tuttavia che questi corsi d'acqua sono sovraimposti ad un altro sistema idrologico più antico, che è stato coperto in superficie dalla costruzione del rilevato

stradale della SP26, sistema che è ancora visibile dall'andamento delle anomalie negative, che rappresentano pertanto l'effetto di paleoalvei sepolti con densità minore del contesto.

DISCUSSIONE

Negli ultimi anni i *sinkhole* di *Il Piano* (Isola d'Elba, Italia) hanno rappresentato per l'isola una importante criticità: almeno nove sprofondamenti hanno interessato l'area tra il 2008 e il 2014 senza alcun apparente fattore scatenante. Indagini geofisiche integrate (microgravità, tomografia elettrica 2D e 3D e misure H/V, PAZZI *et al*., 2018 in press) sono state eseguite nell'area insieme ad un'accurata ricostruzione storica e idrogeologica (INTRIERI *et al*., 2018). La grande quantità di dati raccolti è stata impiegata per ricostruire estensivamente la stratigrafia subsuperficiale e per tracciare i confini dell'area soggetta a *sinkhole*.

La distribuzione spaziale delle anomalie gravimetriche mostra una complessa struttura geologica nel sottosuolo; poiché le sorgenti delle anomalie microgravimetriche sono strutture geologiche a piccola scala e poco profonde, i loro effetti sono comunemente compresi tra 0,010 e 0,050 mGal (dal giallo al rosso nella *Fig*. 7). Le principali anomalie negative (blu scuro/viola nella *Fig*. 7) corrispondono alle aree collassate e si estendono verso est. Le zone ad anomalia negativa indicano una regione di carenza di massa, che può essere associata a depositi alluvionali quaternari soggetti a rischio di *sinkhole*. Le zone ad anomalie positive sono associate a valori ad alta densità (FCV, RBC). Infine, le zone negative sono collegate da canali sotterranei persistenti all'interno di depositi di maggiore compattezza (conglomerati). Tuttavia, questi flussi sono sovrapposti su un altro vecchio sistema idrologico, che è stato coperto in superficie dalla costruzione della strada SP26. Questo sistema idrologico è ancora visibile in base alla posizione delle anomalie negative.

La sovrapposizione tra le indagini microgravità e le tomografie elettriche (PAZZI *et al*., 2018) rivela che in corrispondenza dei punti in cui la microgravimetria ha rilevato anomalie negative (blu scuro / viola in *Fig*. 7) la tomografia elettrica ha identificato zone caratterizzate da bassi valori di resistività. Queste anomalie corrispondono principalmente a vecchi canali e piscine che sono stati utilizzati in passato per fornire acqua ai mulini, progressivamente abbandonati dalla seconda metà del IXX secolo. In effetti, i *sinkhole* si sono verificati principalmente lungo questi paleocanali.

Per ciò che concerne l'eterogeneità dei materiali detritici, essa è sicuramente notevole, con presenza di corpi e elementi a diverse profondità che determinano contrasti di proprietà fisiche (evidenziati dalle analisi geognostiche, INGEO 2013) che possono tradursi in differenze di comportamento reologico sotto diversi aspetti (geotecnico, idrogeologico, idraulico). Come risulta dai dati microgravimetrici e geoelettrici, ai valori negativi corrisponde un valore medio di resistività (50-100 Ωm) da attribuire ai depositi alluvionali del Quaternario. A 30 m di profondità si ha una zona a bassa resistività <50 Ωm imputabile a livelli di sabbia e argilla saturi. Ghiaia e sabbia asciutta o materiali con alta porosità sono identificati da alti valori di resistività > 100 Ωm. Calcari dolomitici brecciati (RBC) e siltstones metamorfici molto alterati (FCV) si identificano con una resistività > 150 Ωm (PAZZI *et al*. 2018. Tale eterogeneità assume livelli di complessità che non ne consente una rappresentazione cartografica adeguata: i materiali possono quindi essere descritti come alternanze di depositi a granulometria variabile, con presenza di eteropie, interdigitazioni e lenti di forma e dimensioni variabili, frutto della storia evolutiva sopra accennata. Puntualmente (come risulta dai log dei sondaggi, INGEO 2013) tali materiali possono essere anche ben distingui-

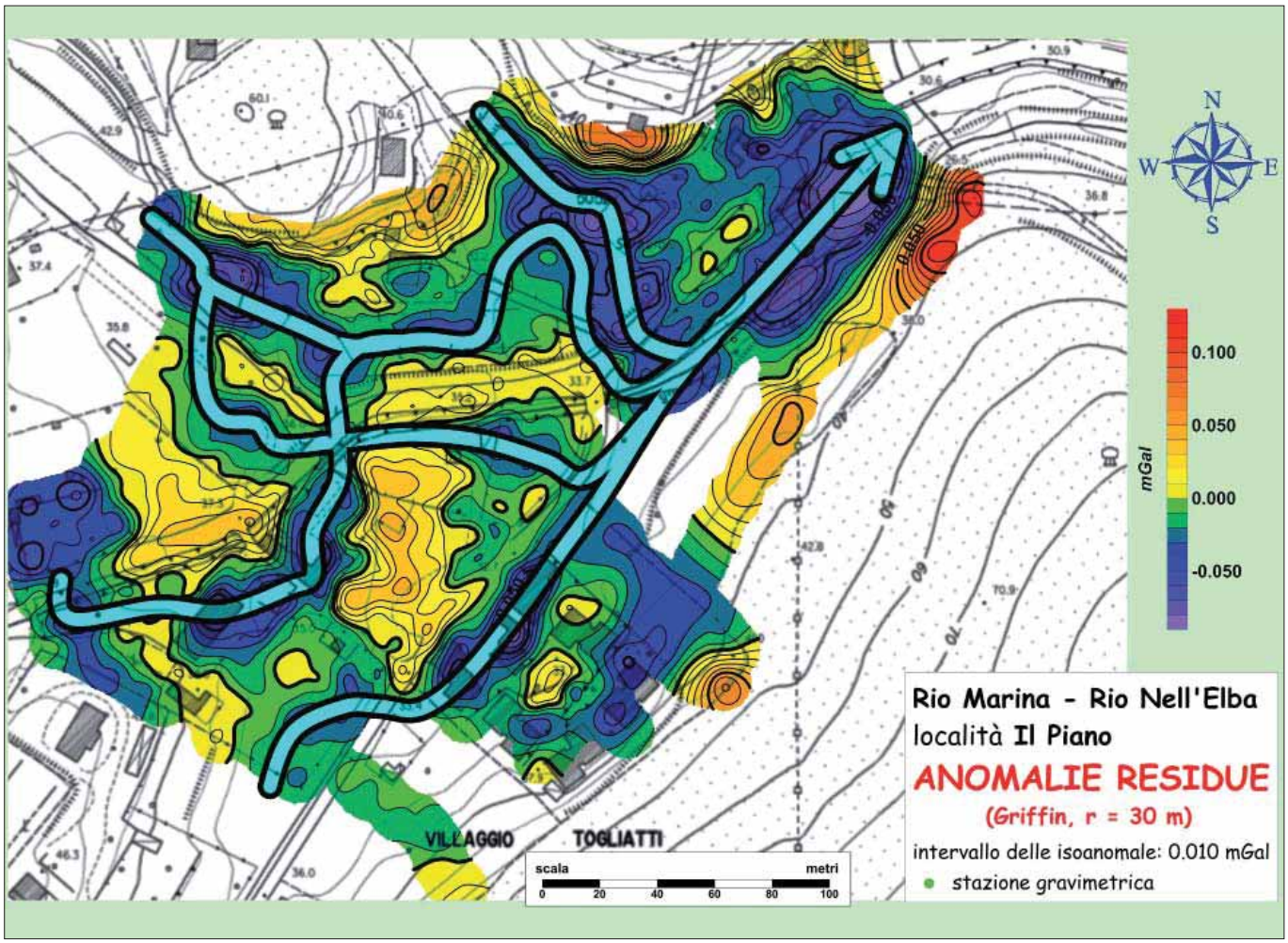


Figura 8 - Mappa delle aree a rischio sinkhole in cui per carenza di massa nel sottosuolo, possono crearsi sprofondamenti.

bili e gli spessori agevolmente definibili, ma la precisa descrizione dell'andamento nello spazio dei loro limiti (presumibilmente spesso rappresentati peraltro da transizioni graduali) non è fattibile, fatta eccezione per il dato qualitativo già descritto della presenza dei due livelli a granulometria crescente verso l'alto.

Per quanto riguarda la distribuzione delle misure di rumore sismico a singola stazione (PAZZI *et al*. 2018) è possibile identificare al massimo tre picchi H/V a bassa frequenza a cui corrispondono tre interfacce di cui è possibile calcolare le profondità (CASTELLATO, 2016). Queste profondità sono state ottenute partendo da un valore di velocità di trasmissione del primo strato compreso tra 100 m/s e 250 m/s. Il picco più superficiale è nell'intervallo 60-90 Hz e corrisponde alla prima discontinuità situata a una profondità di circa 0,2-1,5 m, il secondo è nella gamma di frequenze di 12-30 Hz che corrisponde a una discontinuità situata in un profondità di circa 1,5-7,6 m, e il più profondo è nella gamma di frequenze di 3,5-7,8 Hz che corrisponde a una profondità di circa 10,5-35 m. Questi ultimi valori potrebbero anche essere interpretati come il *range* di spessore del materiale di riempimento della valle.

CONCLUSIONI

Gli sprofondamenti rappresentano un rischio geologico che è spesso sottovalutato, principalmente a causa della natura molto localizzata dei fenomeni. Si verificano solo in circostanze particolari e, in genere, interessano piccole aree. Ciononostante, la difficoltà di prevedere l'esatta posizione e il momento del loro improvviso collasso crea gravi problemi alle autorità di Protezione Civile e ai pianificatori urbani.

L'individuazione del meccanismo e quindi il fattore scatenante degli sprofondamenti è strategicamente cruciale per lo sviluppo di piani di gestione. Le indagini geofisiche integrate, unite ad accurate indagini idrogeologiche e a uno studio approfondito di mappe storiche e fotografie aeree (INTRIERI *et al*., 2018), hanno consentito una caratterizzazione geomorfologica e idrogeologica del territorio, ma soprattutto la valutazione delle trasformazioni ambientali dell'area.

L'interpretazione di questi dati ha permesso di comprendere l'innesco dei fenomeni di sprofondamento e di redarre mappe delle aree a rischio (*Fig*. 8). Lo studio suggerisce che il principale fattore scatenante non è correlato al pompaggio dell'acqua dalla falda carsica, come inizialmente ipotizzato. Gli sprofondamenti sembrano invece essere causati da processi erosivi che avvengono interamente nella copertura sedimentaria quando forti piogge inducono una sovrappressione di acqua all'interno della falda superficiale.

Particolare importante riguarda la grotta di San Giuseppe, che si apre sul versante di una collinetta. L'origine di questa grotta sembra essere dovuta ad una paleofrana, dove grandi massi fanno da pareti e creano delle concamerazioni. Un analogo sito di grotte del paleolitico e neolitico dovuto ad una paleofrana è presente nel Parco Archeologico Naturalistico di Belverde tra Cetona e Sarteano in provincia di Siena.

La granulometria dei sedimenti porta a escludere una possibile liquefazione di orizzonti alluvionali di granulometria medio-fine: in questo caso le zone a bassa densità presenterebbero delle intense anomalie negative di forma circolare, forme che non sono state individuate dal rilievo microgravimetrico.

Infine, poiché le anomalie residue *Fig*. 6 e *Fig*. 7, si presentano con una forma allungata, è facile ascrivere tale forma alla presenza di paleoalvei con densità minore del contesto, e pertanto sembra più plausibile che la causa dei *sinkhole* avvenuti nel *Il Piano* sia dovuta all'erosione causata dalla circolazione idrica in subalveo, proprio nelle zone dove aumenta la portata e la velocità dell'acqua sotterranea.

La località *Il Piano* rappresenta la parte finale del bacino idrografico della Valle dei Mulini (*Fig*. 4), dove si raccolgono tutte le acque di scorrimento sia superficiale che nel sottosuolo, come se ci fosse uno sbarramento naturale sostituito dalla catena costiera in cui affiorano rocce metamorfiche quali la formazione del *Verrucano*.

Durante le precipitazioni atmosferiche lunghe e intense, nel bacino idrografico della Valle dei Mulini, l'acqua che si è infiltrata nei vari subalvei raggiunge la zona de *Il Piano* aumentando sempre più la portata e con una maggiore velocità di flusso; queste concause contribuiscono ad alleggerire i sedimenti in cui scorrono le acque e in qualche caso a erodere verso la superficie topografica provocando così il collasso dei terreni sovrastanti. Al di là di alcune differenze, dovute necessariamente alle diverse tipologie di tecniche impiegate, si riscontra una sostanziale concordanza fra gli esiti delle due indagini geofisiche che, è utile sottolinearlo, sono state eseguite in modo indipendente: tale convergenza di risultati è da valutare come rafforzativa della validità delle conclusioni raggiunte (PAZZI *et al*., 2018).

A partire dalle due zonazioni di corpi sub-superficiali possibili sedi di meccanismi di filtrazioni indicati come meccanismo principale, e tenendo conto dei sub-bacini idrografici si è quindi proceduto ad elaborare una "Carta della propensione al dissesto per *sinkhole* della zona de *Il Piano* (*Fig*. 8).

Si sottolinea che le aree esterne a detta cartografia, in virtù di quanto emerso dalle indagini, possono oggi considerarsi come non interessabili da significativi fenomeni di sprofondamento riconducibili ai meccanismi individuati qui come principali.

La Carta (*Fig*. 8) è stata redatta a partire dalla sintesi della zonazione ottenuta dalla sintesi delle diverse indagini e dall'integrazione di dati storici, sovrapponendo a tale informazione il dato relativo alla estensione dei bacini di alimentazione delle diverse sezioni di chiusura (*Fig*. 4), nell'ipotesi che i meccanismi più volte richiamati siano maggiormente probabili e di maggiore entità in diretta correlazione con le quantità di deflusso superficiale e sub-superficiale.

BIBLIOGRAFIA

Argentieri A., Carluccio R., Cecchini F., Chiappini M., Ciotoli G., De Ritis R., Di Filippo M., Di Nezza M., Marchetti M., Margottini S., Materni V., Meloni F., Nardi A., Rotella G., Sapia V., Venuti A. (2015), *Early stage sinkhole formation in the Acque Albule basin of central Italy from geophysical and geochemical observations*. Engineering Geology, 191, 36-47. ISSN: 0013-7952.

Barberi F., Brandi G.P., Giglia G., Innocenti F., Marinelli G., Raggi G., Ricci C.a., Squarci P., Taffi L., Trevisan L. (1969), *Isola d'Elba, F° 126*, Carta Geologica d'Italia Servizio Geologico d'Italia, E.I.R.A., Firenze.

Barberi F., Dallan L., Franzini M., Giglia G., Innocenti F., Marinelli G., Raggi G., Ricci C.a., Squarci P., Taffi L., Trevisan L. (1967), *Carta geologica dell'Isola d'Elba alla scala 1:25.000*. E.I.R.A., Firenze.

Bishop I., Styles P., Emsley S.J., Ferguson N.S. (1997) *The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments*, Modern Geophysics in Engineering Geology, Geological Society, Engineering Geology Special Publication, 12, 153–166.

Bortolotti V., Fazzuoli M., Pandeli E., Principi G., Babbini A., Corti S. (2001), *Geology of Central and Eastern Elba Island, Italy*, Ofioliti 26 (2), 97-150.

Buchignani V. (2002) *Indagini geologiche e geofisiche relative al fenomeno di crollo nell'ottobre 1995 in loc. "Le Funi"*, In: "Le Voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana", pp. 202-209, Edizioni Regione Toscana, Firenze.

Buchignani V., Binda Rossetti I., Leva D., Rivolta C. (2010a), *Monitoraggio Interferometrico con Radar da Terra in area a rischio sinkhole. L'esempio di Camaiore*. Atti del convegno: Sinkholes. The Catastrophic sinking in natural and anthropic environments 2nd International workshop, Roma, 3-4 Dicembre 2009. ISBN 978-88-448-0400-8.

Buchignani V., Di Filippo M., Di Nezza (2010b), *Individuazione di zone a rischio sinkhole, metodologie operative a Camaiore (LU)*, Atti del convegno: Sinkholes. The Catastrophic sinking in Natural and Anthropic environments. 2ND Internatinal Workshop, Rome, 3-4 December 2009, 423-434, CSR, Roma. ISBN 978-88-448-0400-8.

Buchignani V., Leva D., Nico G., Rivolta C. (2004a), *Interferometria Sar per il monitoraggio di un fenomeno di sprofondamento (Sinkhole) in Toscana*. Atti Convegno Nazionale "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", Ed. IGER, Roma, 129-138.

Buchignani V., Lombardi S., Rizzo S., Toro B. (2004b), *Il Sinkhole di Camaiore*. Atti Convegno Nazionale "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", Ed. IGER, Roma, 139-158.

Canovaro, M. (2002), *Gli Statuta Rivi nell'ordinamento giuridico degli Appiani*, Pontedera.

Casagli N., Intrieri E., Gigli G., Lombardi L., Mugnai F., Nocentini M., Dotta G., Fidolini F. (2014), *Tecniche avanzate di monitoraggio e previsione delle voragini mediante interferometria radar da terra e da satellite.* Atti 3° Workshop internazionale sinkholes. Le Voragini in Italia. I sinkholes e le cavità sotterranee, ricerche storiche tecniche di studio e di intervento. Roma, 8 maggio 2014. ISPRA.

Castellaro S. (2016), *The complementarity of H/V and dispersion curves*. Geophysics, 81, T323-T338. doi: 10.1190/GEO2015-0399.1.

Consiglio Nazianale delle Ricerche (CNR) (1986), *Carta Gravimetrica d'Italia scale 1:500,000*.

Cremonesi G. (1967), *La grotta sepolcrale di San Giuseppe nell'Isola d'Elba. Notizia preliminare*, Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., serie A, 74, 2.

Cremonesi G. (1993), *La Grotta di San Giuseppe a Rio Marina, Isola d'Elba*, Preistoria e Protostoria in Etruria, I, 117-121.

Cremonesi G., Grifoni Cremonesi R. (2001), *La grotta sepolcrale eneolitica di San Giuseppe all'Isola d'Elba*, In, La Grotta di San Giuseppe all'Isola d'Elba., a cura di R. Grifoni Cremonesi. Collana Origines XVII, Firenze, pp. 274.

DELLAVALLE G. (1994) *Alcune cavità dell'Isola d'Elba*, Talp n.10 Dicembre 1994. (http://www.speleolivorno.it).

D'orefice M., Gherarducci N., Graciotti E., Graciotti R. (2009), *Il sinkhole di Rio Marina (Isola d'Elba orientale)*, 2° Workshop Internazionale: "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma 3-4 dicembre 2009, auditorium ISPRA.

Di Filippo M., Toro B. (2004), *Indagini gravimetriche e microgravimetriche nell'abitato di Camaiore*, In: Primo seminario Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, 407-413. Roma, 20-21 maggio 2004, 399-406. ISBN: 88-448-0137-X.

Di Filippo M., Flamini M.g., Prisco G, Toro B. (2001), *Microgravity prospecting in domus vettiorum of Pompeii to locate hypogean cavities*, Quaderni dell'Istituto Centrale del restauro, 2, 70-84.

DI FILIPPO M., DI NEZZA M., NOLASCO F., TORO B. (2004) *Microgravity prospecting in order to research sinkholes risk areas*, 32th IGC, Firenze 20-28 Agosto 2004.

Di Filippo M., Di Nezza M., Piro S., Toro B., Santoro S. (2005), *Integrated geophysical and archaeological investigations in the "Domus del Centenario", Pompeii IX,8 (Italy),* VI International Conference on Archaeological Prospection, National Research Council Rome, Italy, September 14-17, 2005, Proceedings extended Abstracts, 295-298. ISBN:88-902028-0-7.

Di Nezza M. (2007) *Struttura e dinamica del Distretto Vulcanico dei Colli Albani da misure gravimetriche: implicazioni geodinamiche e vulcanologiche*. PhD Thesis. Università "Sapienza"di Roma.

Di Nezza M., Di Filippo M. (2015), *Sinkholes genesis in the Acque Albule Basin (Rome, Latium),* 3° Workshop internazionale: Voragini in Italia. I Sinkholes e le cavità sotterranee: ricerca storica metodi di studio e d'intervento. Roma 8 Maggio 2014, Roma, Mem. Descr. Carta Geol. It, 255-266, ISSN: 0536-0242.

Di Nezza M., Cecchini F, Margottini S, Di Filippo M. (2015), *Deeper geological and structural settings of Acque Albule Basin (Rome, Latium)*, 3° Workshop internazionale: Voragini in Italia. I Sinkholes e le cavità sotterranee: ricerca storica metodi di studio e d'intervento. Roma 8 Maggio 2014, Roma, Mem. Descr. Carta Geol. It, 267-272, ISSN: 0536-0242.

Ferrara G., Tonarini S. (1985), *Radiometric geochronology in Tuscany. Result and problems*, Rend. Soc. It. Miner. Petrol. 40, 11-124.

Georisorse Italia (2008), *Indagine georadar per l'individuazione di possibili cavità lungo il fosso Riale in prossimità del Villaggio Togliatti,* Relazione inedita.

Griffin W.P. (1949), *Residual gravity in theory and practice*, Geophysics, 14, 39-56.

Gualtieri L., Valenti L., Cassinis R. (1993), *Modelling gravimetrico e magnetico nella regione di transizione tra la Liguria orientale e la Toscana*, Studi Geologici Camerti, Vol. Spec. (1992/2), 107-114.

INGEO (2013), *Relazione con esito degli accertamenti e le prime indagini per la messa in sicurezza del sito interessato dall'evento franos*, Relazione inedita.

Intrieri E., Gigli G., Nocentini M., Lombardi L., Mugnai F., Fidolini F., Casagli N. (2015), *Sinkhole monitoring and early warning: an experimental and successful GB-InSAR application*, Geomorphology 241, 304-314. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.018.

Gutierrez F., Guerrero J., Lucha P. (2008), *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*. Environmental Geology 53, 993–1006.

Gutierrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H. (2014), *A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst,* Earth-Science Reviews 138, 61–88.

Intrieri E., Fontanelli K., Bardi F., Marini F., Carlà T., Pazzi V., Di Filippo M., Fanti R. (2018), *Definition of sinkhole triggers and susceptibility based on hydrogeomorphological analyses*, Environ. Earth. Sci. 77:4. https://doi.org/10.1007/s12665-017-7179-3.

ISPRA (2015), *Carta geologica dell'Isola d'Elba in Scala 1:25.000*. Principi V., Bortolotti V., Pandeli E., Fanucci F., Moretti S., Innocenti F., D'Orefice M., Graciotti R., Ed., Principi V., Bortolotti V., Pandeli E. http://sgi1.isprambiente.it/website/isolaelbageo/carta_geologica_isola_elba.htm

Mainieri C., Benvenuti M., Costagliola P., Dini A., Lattanti P., Ruggeri G., Villa I.M. (2003), *Sericitic alteration at the La Crocetta deposits (Elba Island, Italy): interplay between magmatism, tectonic and hydrothermal activity*, Miner. Deposita 38, 6-86.

Mallegni F. (1972), *Studio antropologico dei resti scheletrici rinvenuti nella grotta di S. Giuseppe presso Rio Marina*, Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., serie B, 79.

Mazzei F. (2008), *Relazione tecnico illustrativa: Progetto di recupero del sito Archeologico della Grotta di San Giuseppe-Rio nell'Elba*. (Non pubblicato).

Nettleton L.L. (1942), *Gravity and magnetic calculations*, Geophysics 7, 293-310.

Nisio S. (2015), *Sinkhole di Rio Marina (Isola D'Elba Orientale)*, In Note Illustrative della CARTA GEOMORFOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 foglio 316-317-328-329 ISOLA D'ELBA, a cura di: cura di M. D'Orefice & R. Graciotti, 175-178.

Nisio S. (2008), *I sinkholes: problemi terminologici, meccanismi genetici, classificazione*. In: Nisio, S. (ed.), Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXXV, 17-32.

Parasnis D.S. (1962), *Principles of applied geophysics*. London, Methuen. 176 p.

Pazzi V., Di Filippo M., Di Nezza M., Carla' T., Bardi F., Marini F., Fontaneli K., Intrieri E., Fanti R. (2018), *Integrated geophysical survey in a sinkhole-prone area*, Surveys in Geophysics, *in press*

Pierotti P. (1993), *La valle dei mulini*. Pacini, Ospedaletto (PI – Italy).

Reid A.b., Allsop J.M., Granser H., Millet A.J., Somerton I.W. (1990), *Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution*, Geophysics 55, 80–91.

Rizzo S., Di Filippo M., Toro B. (2002), *La geofisica applicata nel controllo e nelle indagini sui sinkholes: l'esempio di Camaiore*, "Le Voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana", pp. 210-225, Edizioni Regione Toscana, Firenze.

Rocchi S., Westerman D.s., Dini A., Innocenti F., Tonarini S. (2002), *Two-stage growth of laccoliths at Elba Island, Italy*, Geology 30, 938-986.

Salvioni G. (1953), *Rilievo gravimetrico della Toscana (Anomalie di Faye e di Bouguer)*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 13, 4, 299-344.13, 4.

SALVIONI G. (1955), *Gravimetric survey of Tuscany*, Boll. Geodesia e Sci. aff., 14, 1, 91-92.

SGN (1989), *Gravimetric map of Italy, scale 1:1,000,000. 2 sheets*, Servizio Geologico Nazionale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.

Simpson S.M. (1954), *Least-squares polynomial fitting to gravitational data and density plotting by digital computer*, Geophysics 19, 808–811.

Smith D.L., Randazzo A.F. (1975), *Detection of subsurface solution cavities in Florida using electrical resistivity measurements*, Southeastern Geoloy 16 (4), 227-240.

TAMURA Y. (1987), *A harmonic development of the tide-generating potential*, Bull. Inf. Marées Terrestres 99, 6813–6855.

Tarquini S., Isola I., Favalli M., Mazzarini F., Bisson M., Pareschi M.t., Boschi E. (2007), *TINITALY/01: a new Triangular Irregular Network of Italy, Annals of Geophysics*, 50, 407-425.

Tarquini S., Vinci S., Favalli M., Doumaz F., Fornaciai A., Nannipieri L. (2012), *Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web, Computers & Geosciences*, 38, 168-170. doi: doi:10.1016/j.cageo.2011.04.018.

Thompson D.T. (1982), *EULDPHda new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data*, Geophysics 47, 31–37.

Zecchini M. (1981), *L'Isola d'Elba dal Paleolitico all'epoca romana*, In: "Studi sul territorio livornese: Archeologia, antropologia, geologia" a cura del Centro Livornese di studi archeologici. Editrice La Fortezza, Livorno, 155-191.

http://sgi1.isprambiente.it/website/isolaelbageo/carta_geologica_isola_elba.htm.

http://tinitaly.pi.ingv.it/

Censimento e interesse storico e speleologico delle fortificazioni militari della Nurra (Sardegna)

Pierpaolo Dore
Guida Sportiva Speleologica, Gruppo Ricerche Fortificazioni Turritane, Gruppo Speleo Ambientale Sassari
E-mail: pierpa.dore@hotmail.it

Eleonora Dallocchio
Gruppo Speleo Ambientale Sassari

Inventory and historical and speleological interest to military fortifications of Nurra (Sardinia)

Parole chiave (*keywords)*: Fortificazioni militari (*military fortifications*), Speleologia (*Speleology*), Grotte (*Cavities*), Bunker (*Bunker*), Seconda Guerra Mondiale (*Second World War*), Nurra (*Nurra*), Sardegna (*Sardinia*)

RIASSUNTO

Osservando le campagne della Nurra non si può non notare i resti di un passato non troppo lontano ma che molti hanno dimenticato. È il tempo delle grandi guerre che hanno segnato enormemente la storia dell'umanità ed il suo territorio, compresa la Sardegna. Oggi di quella storia non rimane che un flebile ricordo nelle menti degli anziani o le testimonianze in cemento armato che ancora guardano al mare ed al cielo scrutando pericoli ormai dimenticati. In questo lavoro si vogliono descrivere le principali strutture militari utilizzate durante le due Guerre Mondiali, presenti nella pianura della Nurra (nord Sardegna).

La complessità delle zone esplorate, la difficile ricerca bibliografica e la ancora più ardua ricerca sul campo, sono frutto di svariati anni di studio, sopralluoghi ed escursioni dirette nei luoghi spesso impervi che caratterizzano la costa della Nurra. Negli ultimi anni molte associazioni di storia militare hanno portato all'attenzione queste strutture, valorizzandole non solo dal punto di vista storico - culturale ma anche speleologico. Queste strutture militari sotterranee sono infatti considerate Cavità Artificiali all'interno della macrocategoria "Belliche" e hanno inoltre una notevole importanza in funzione di rifugio per diverse specie animali o presenza di particolari concrezioni, comparabili e spesso anche più particolari di quelle presenti in cavità naturali.

Il censimento inoltre ha avuto valenza anche nella pianificazione territoriale dei Piani Urbanistici Comunali per una più grande attenzione a questi beni archeologici, spesso poco valorizzati.

ABSTRACT

In the area of Nurra there are yet some military structures about first and second world war. This study want to describe these.

Many cultural associations studied these military structures, with bibliographic research and inspections in the area, to valorize these from historic-culture and speleologic characteristics.

This military underground structures are considered Military Artificial Caves, with an importance about biology and geology, like natural caves.

Inventory had an importance about territorial planning of spatial planning for a big attention to these archeologic structures, often undervalued.

CONTESTO STORICO

L'area presa in esame dal lavoro di censimento si estende dalle coste dell'Argentiera passando per il Monte Forte e rientrando per l'area di Campanedda e terminando nel litorale di Platamona. In questa vasta area che chiameremo per comodità Alta Nurra, la storia delle fortificazioni fonda le sue radici già in epoca romana, passando poi per il periodo Medioevale fino all'unità d'Italia. Proprio in quest'ultimo periodo abbiamo testimonianza di realizzazione di una delle opere belliche moderne, la Batteria Antinave di Ponte Romano; questa batteria, finita di realizzare nel 1873, è stata messa a regime proprio durante la Prima Guerra Mondiale senza per fortuna mai dover entrare in funzione e rimane ancora oggi l'unica testimone di questo periodo.

Con l'avvento della II Guerra Mondiale in Sardegna iniziarono una intensa serie di operazioni per renderla il più possibile protetta dagli attacchi nemici che si facevano sempre più frequenti. Il periodo peggiore cominciò nel novembre 1942 quando le forze Alleate, partendo dalle basi dell'Africa settentrionale, decisero di sbarcare in Sicilia per invadere poi l'Europa. La Sardegna fu quindi inondata di attacchi, soprattutto durante il 1943, per far credere ad un imminente sbarco nell'isola, depistando il vero obbiettivo.

La città più colpita dalla guerra in Sardegna fu senza dubbio Cagliari con la morte di migliaia di persone e la distruzione di interi quartieri; vennero bombardate anche altre aree ritenute strategiche come le zone portuali di Olbia, Porto Torres, Alghero, Arbatax, Carloforte, San Antioco e gli aeroporti di Monserrato, Villacidro, Elmas ed Alghero. Nei porti di Cagliari, Porto Torres ed Olbia vennero affondate 84 navi italiane fra il 1940 ed il 1945.

La Nurra e il Golfo dell'Asinara durante i primi anni del conflitto bellico furono un crocevia di navi di tipo commerciale e militare per gli approvvigionamenti delle truppe. I bombardamenti già nel 1943 fecero i primi



Figura 1 – Albero delle tipologie delle cavità artificiali adottato dalla Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana, con evidenziate le tipologie di opere belliche

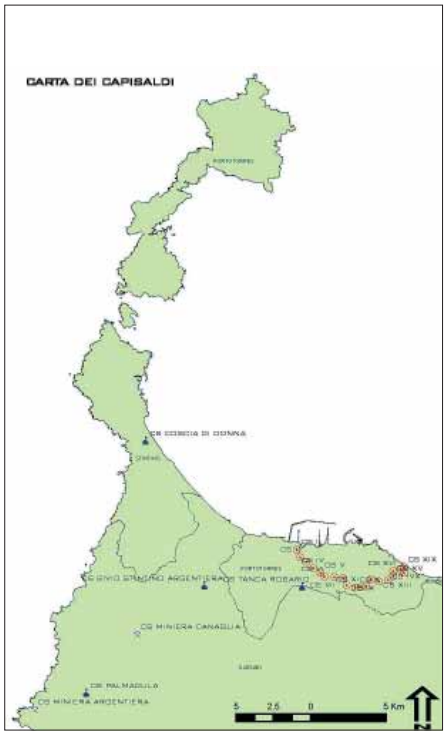


Figura 2 – Illustrazione schematica dell'Arco di Contenimento Turritano con evidenziata la disposizione dei Capisaldi di Sbarramento

morti civili nella città di Porto Torres; i cinque bombardamenti, l'affondamento dell'Onda e successivamente nel settembre 1943 della Corazzata Roma a largo dell'Asinara, riportarono questa zona tristemente alla ribalta nelle cronache nazionali.

LE OPERE BELLICHE DELL'ALTA NURRA

Le Opere belliche sono inserite all'interno dell'albero tipologico ufficiale della Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana (*Fig.* 1) in cui rientrano varie tipologie di fortificazioni realizzate fin dall'antichità per l'attacco o la difesa in caso di guerra.

All'interno di questa categoria rientrano opere sotterranee come i bunker o rifugi antiaerei, postazioni di sparo o camminamenti strategici per la popolazione o le truppe militari.

Il censimento delle opere belliche dell'Alta Nurra fonda le sue radici nella passione per la speleologia e gli ambienti bellici sotterranei, fin dal 2009 intuendo l'alto valore storico e culturale di queste strutture militari, ci siamo messi all'opera per censire queste strutture, capirne usi, tipologie e modalità costruttive documentandone, oltre agli aspetti storici, lo stato di conservazione e i caratteri speleologici e biospeleologici, esplorandone gli ambienti sotterranei.

Negli anni la ricerca ci ha permesso di catalogare 46 tra NF e POC, 10 Batterie antinave ed antiaerei da circa 60 pezzi, 2 Caposaldi a Protezione delle Opere Minerarie con circa 5 postazioni, 5 Caposaldi di Sbarramento Stradale con 47 pezzi ed infine l'Arco di Contenimento Turritano con 20 Caposaldi composti da 65 postazioni per un totale di oltre 220 opere (*Fig.* 2).

Il censimento ha visto uno studio bibliografico in primis sulla funzione svolta da queste strutture, successivamente si è fatta un'altra classificazione in base agli schemi costruttivi che caratterizzano i vari Caposaldi. Per ogni tipologia è stato fatto uno schema generale descrittivo ed ogni opera è stata inserita in un database geografico per una maggiore comprensione del territorio

Le strutture militari censite e studiate sono diverse sia per tipologia costruttiva che funzionale (*Fig.* 3).

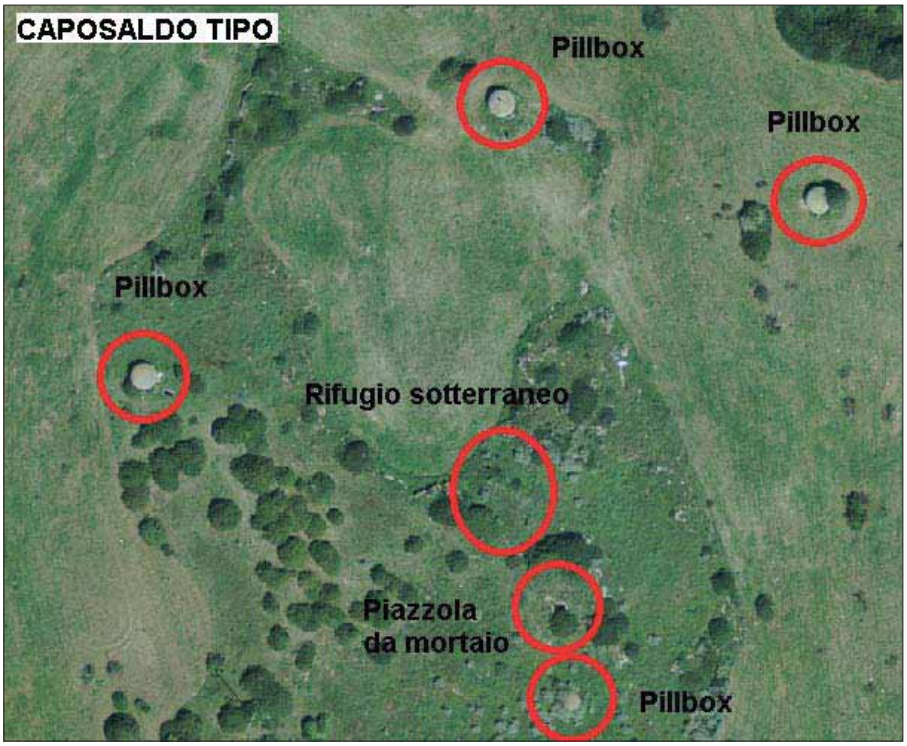


Figura 3 – Esempio schematico della composizione di un Caposaldo con le varie tipologie costruttive

Lungo la costa si possono osservare i Nuclei Fissi (NF), postazioni prestabilite scavate o realizzate in cemento armato con forme variabili spesso mimetizzate come pinnette avente compito di controllo antisbarco. Simili per funzione sono le Postazioni di Osservazione Costiera (POC) che sono dei veri e propri posti fissi di vigilanza armata contro possibili tentativi di sbarco, spesso comandati di norma da un graduato. Il POC era presidiato da 5/6 uomini armati, dotati di strumenti per segnalazioni e comunicazioni radio che si interfacciava con i comandi territoriali e le varie batterie costiere presenti nelle vicinanze. Queste opere costiere avevano una grande variabilità costruttiva, classificate principalmente come opere seminterrate oggi risultano spesso danneggiate dall'azione incessante degli agenti atmosferici e dall'azione del mare e della salsedine.

Le batterie antiaeree ed antinave sono la difesa estrema della città da attacchi dal cielo o dal mare, venivano disposte in punti strategici soprattutto nei pressi delle coste o alle spalle dei capisaldi. Erano di norma costituiti da 4/6 postazioni per cannoni o obici ed erano provviste di riservette sotterranee per munizioni. Alcune batterie potevano essere anche mobili e venivano spostate, a volte con i cavalli, a seconda delle esigenze difensive. Tra le varie batterie ricordiamo per bellezza e conservazione la batteria antinave di Ponte Romano con 4 riservette sotterranee (*Fig.* 4). Le batterie erano spesso disposte dietro le colline perché erano fornite di obici a tiro curvo per cui spesso si trovava una cabina di comando in cima ai colli; nei dintorni potevano

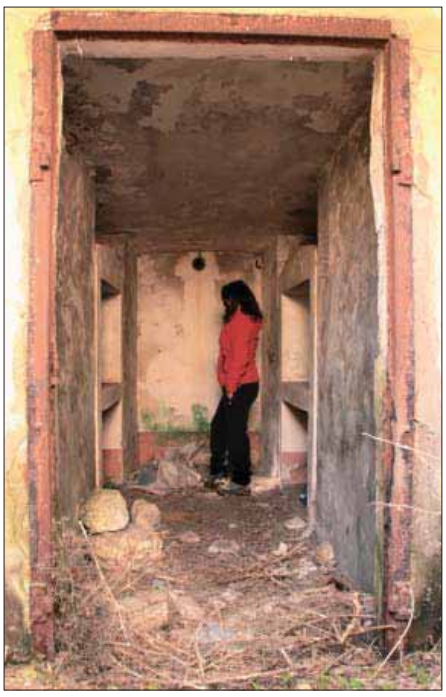


Figura 4 – Immagine dell'interno della riservetta sotterranea della Batteria Antinave di Ponte Romano



Figura 5 – Immagine della riservetta sotterranea della Batteria Antiaerea di Punta Di Lu Cappottu (Porto Torres)



Figura 6 – Immagine di un Pillbox del Caposaldo di Sbarramento Stretto Stintino

essere realizzate delle trincee e nelle retrovie era spesso presente la riservetta sotterranea scavata nella roccia (*Fig.* 5).

I Caposaldi sono un insieme di punti di fuoco (bunker) che possono proteggere il perimetro e difendersi a 360°, erano generalmente composti da una serie di 3/7 Pillbox o Tobruk disposti in cerchio intorno ad una piazzola da mortaio e ad un rifugio in sotterraneo. All'interno di ogni Caposaldo militavano una decina di soldati che alloggiavano in piccole casermette disposte oltre la linea di difesa. I caposaldi potevano essere all'interno di incroci come i Caposaldi di Sbarramento, a difesa delle opere industriali o minerarie, oppure essere parte degli Archi di Contenimento a difesa delle città portuali principali (*Fig.* 6).

Le caserme sono degli edifici semi-sotterranei, spesso divisi in alloggi truppe o per graduati, con pianta rettangolare o quadrangolare ed erano il luogo di riposo dei soldati.

I rifugi sono delle strutture corazzate tra le più interessanti, realizzate in sotterraneo, si trovavano al centro del caposaldo e potevano contenere anche viveri e materiali di sopravvivenza che dovevano provvedere al sostentamento dei soldati in caso di bombardamento aereo (*Fig.* 7).

Le piazzole sono delle postazioni semi sotterranee aperte in cui i soldati potevano utilizzare piccoli mortai portatili senza paura di essere colpiti.

Due strutture molto simili tra loro, soprattutto dal punto di vista funzionale, sono i Tobruk ed i Pillbox: i primi sono delle fortificazioni costituite da una camera sotterranea utilizzata per rifugio collegata ad una piazzola circolare per mitragliatrice aperta con potenza di fuoco di 360° mentre i Pillbox sono delle fortificazioni costituite da una camera sotterranea per rifugio collegata ad una camera a cupola con potenza di fuoco anche essa a 360° che protegge il soldato anche dall'alto.

Tutte le tipologie strutturali sono state rilevate creando un archivio specifico (*Figg.* 8 e 9), per ognuna sono state realizzate le varie sezioni identificandone i particolari costruttivi.

Il censimento di queste strutture, inserito in un supporto GIS, ha permesso anche l'inserimento come "osservazioni" al Piano Urbanistico di Porto Torres che, nella sua prima versione, ha completamente sottovalutato la presenza di queste strutture che vanno introdotte a pieno titolo come opere di interesse storico nell'elenco delle opere da tutelare in Italia.

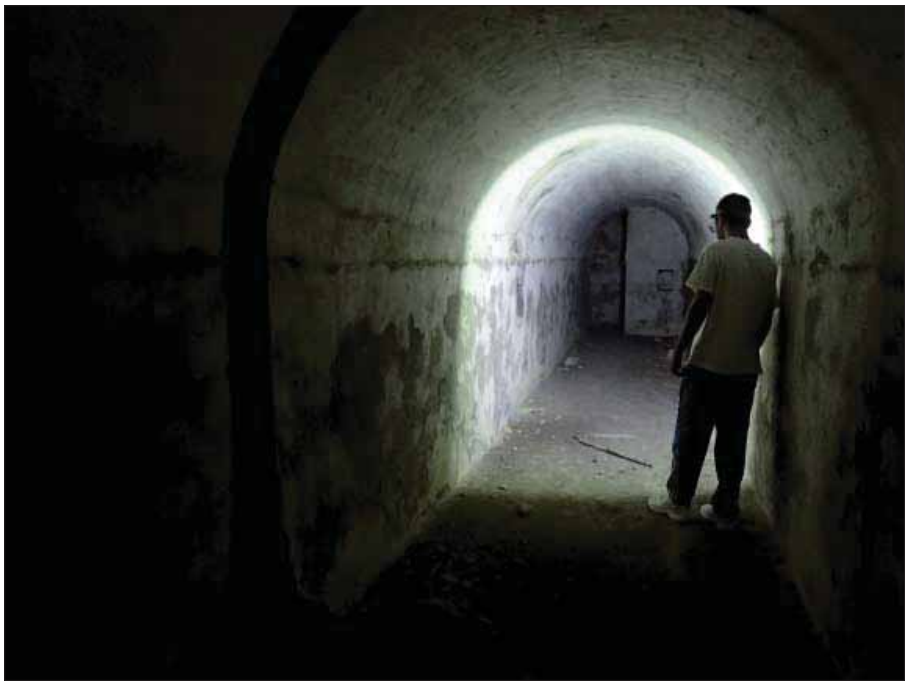


Figura 7 – Immagine dell'interno del Bunker antiaereo del Caposaldo di Sbarramento Buddi Buddi

Durante la raccolta dei dati delle varie postazioni militari sparse per l'Alta Nurra si è proceduto poi a fare una stima dello stato di conservazione delle stesse allo scopo di un possibile ripristino e valorizzazione del bene rendendolo fruibile al pubblico con la realizzazione magari di sentieri della memoria.

A questo proposito le 67 postazioni dell'Arco di Contenimento Turritano sono risultate mediamente in ottimo stato, oltre la metà infatti sono risultate in buono stato, come anche altre 4 in discreto stato con la possibilità di piccoli interventi per renderle riutilizzabili. 19 postazioni invece sono risultate ingombre, spesso l'inciviltà riempie i vuoti sotterranei di spazzatura che andrebbe rimossa, altre volte invece è il lavoro nelle terre e lo spietramento dei campi che colma queste antiche fortificazioni. 5 postazioni risultano purtroppo danneggiate da lavori moderni o dall'incuria del tempo, inoltre due sono praticamente state demolite (*Fig.* 10).

I Caposaldi di Sbarramento, forse a causa del loro maggiore isolamento, hanno certamente un minor numero di postazioni demolite, ingombre o danneggiate; 34 postazioni in stato ottimale ed altre 7 in discreto stato. Questo è un ottimo risultato paragonato alle 47 unità censite (*Fig.* 11). Va considerato però che, secondo le carte dell'epoca, molte postazioni sono state nel tempo completamente cancellate e quindi non censite.

Queste cavità oltre al loro interesse storico e culturale, hanno anche un particolare ruolo di rifugio biologico per specie invertebrate ma soprattutto vertebrate, che hanno importanza prioritaria, come per esempio i chirotteri che si possono trovare molto comunemente all'interno di questi ipogei. Particolarmente comuni sono le specie di Rinolofi che passano gran parte della loro vita all'interno di essi.

A questo lavoro speriamo possano seguire altri progetti, magari in chiave turistica, per la riscoperta di un patrimonio storico di particolare importanza.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro non sarebbe stato realizzato senza i tanti amici che ci hanno aiutato nelle ricerche bibliografiche e su campo, primo tra tutti Christiano Demontis che per primo ha studiato le difese costiere turritane, Antonio Murziani per i tanti consigli e le indicazioni, Manuel Landis, Gianluca Loi, e gli amici del Gruppo Speleo Ambientale Sassari, in particolare Anna Maria Sanna, Daniele Ara e Fiorella Caria.

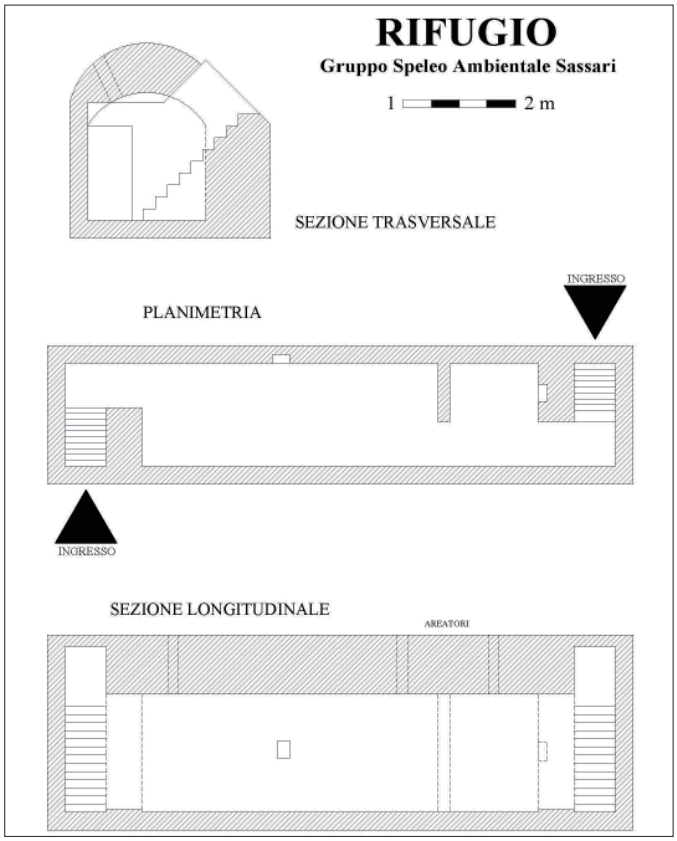


Figura 8 – Rilievo topografico del Bunker antiaereo tipo

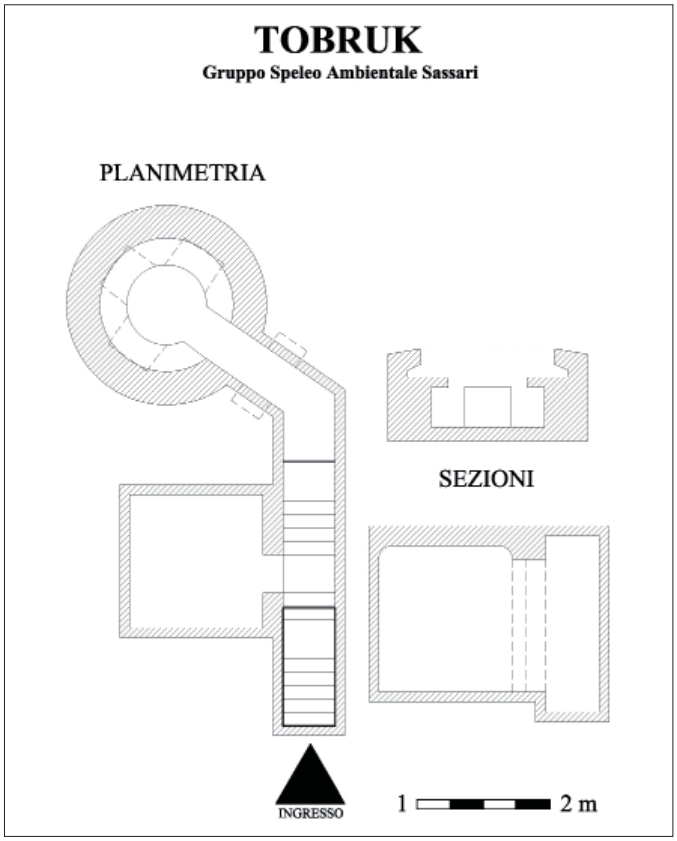


Figura 9 – Rilievo topografico del Tobruk tipo.

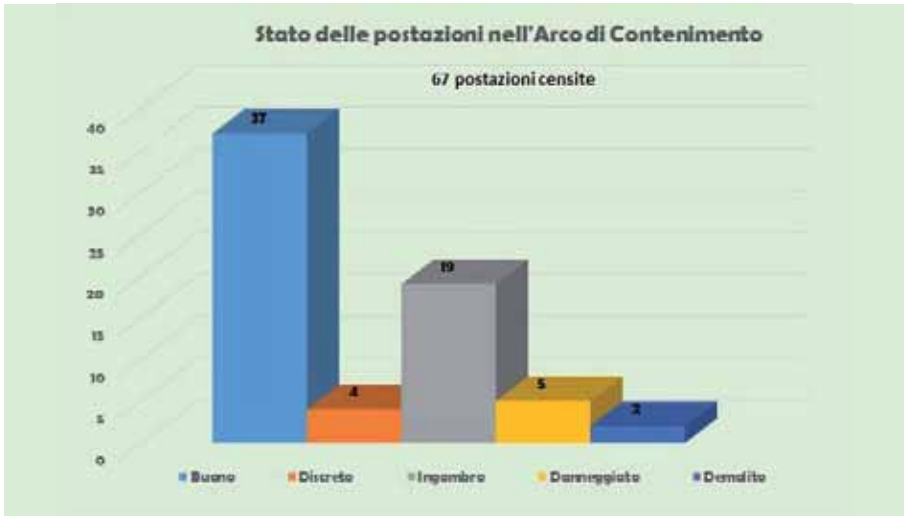


Figura 10 – Grafico dello stato di conservazione delle postazioni militari presenti nell'Arco di Contenimento Turritano



Figura 11 – Grafico dello stato di conservazione delle postazioni militari dei Capisaldi di Sbarramento dell'Alta Nurra

BIBLIOGRAFIA

Grioni D., Carro G. (2014), *Fortini di Sardegna 1940-1943 Storia di un patrimonio da salvaguardare e valorizzare*, Grafiche del Parteolla, Dolianova.

Demontis C. (2011), *Porto Torres e il Golfo dell'Asinara le difese costiere nella II guerra mondiale*, Ilmiolibro.it, Roma.

Carro G., Galligani R., Grioni D. (2011), *1943 Fortini a Porto Conte,* Carlo Delfino Editore, Alghero.

Della Volpe N. (1986), *Difesa del territorio e protezione antiaerea (1915-1943) storia, documenti, immagini*, Stato Maggiore dell'Esercito – Ufficio Storico, Roma.

Nuvoli L. (2016), *ONDA Mandati a morire, Il drammatico racconto dell'affondamento dell'Onda nelle acque dell'Asinara*, Carlo Delfino editore, Sassari.

Brigaglia M. (2014), *Ricordi della Guerra (che non ho fatto)*, Soter editrice, Villanova Monteleone.

Pani P. (2013), *Tra leggenda storia e ricordi, le Origini di Porto Torres,* Pubblidea Immagine & Comunicazione, Porto Torres.

Sanna A. (2011), *In Porto Torres*, Editoriale Documenta, Cargeghe.

Pani P. (2010), *Tra storia e ricordi, chi eravamo… come eravamo Porto Torres 1800 – 1950*, Pubblidea Immagine & Comunicazione, Porto Torres.

Soro C. (2008), *Raccontando Porto Torres*, Editoriale Documenta, Cargeghe.

Fais N. (2004), *Porto Torres le nostre radici nella storia*, Stampacolor industria grafica, Cargeghe.

Caprara R., Canu F. (1995), *Quel Caffè sul Corso, piccole storie di avvenimenti e personaggi anche importanti*, Carlo Delfino editore, Sassari.

Mastino A., Mossa V., Pinna A. (1992), *Porto Torres e il suo volto*, Carlo Delfino editore, Sassari.

Giglio N. (1974), *l'Asinara*, Rebellato old editore, Padova.

Ferrari G.C. (1929), *Relazione del campo di prigionieri colerosi dell'Isola dell'Asinara nel 1915-16 (Guerra Italo-Austriaca)*, Ministero della Guerra – Comando del Corpo di Stato Maggiore – Ufficio Storico, Roma.

Censimento e mappatura della rete di cavità che sottende il paese di Castelnuovo, San Pio delle Camere (AQ)

Inventory and mapping of the network of cavities below the village of Castelnuovo, San Pio delle Camere (L'Aquila province)

Federica Durante[1], Giorgio Pipponzi[2], Emanuele del Monte[3], Alessandro Ghinelli[3], Vidan Ilic[3], Marco Nocentini[1], Marco Tallini[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale, Università degli Studi dell'Aquila
[2] USRC - Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere, Fossa (L'Aquila)
[3] S2R s.r.l. Spin off dell'Università degli Studi di Firenze

Parole chiave (*key words*): Cavità artificiali (*Artificial cavities*), Censimento (*inventory*), San Pio delle Camere) (*San Pio delle Camere*)

ABSTRACT

Il paese di Castelnuovo si trova nel Comune di San Pio delle Camere in Provincia di L'Aquila. Dal punto di vista geologico si trova nella conca di Fossa-San Demetrio dei Vestini, una depressione tettonica. La conca di Fossa-San Demetrio è costituita da piccole depressioni chiuse e disposte en-éclelon separate da dorsali strette allungate in direzione appenninica. Il centro storico di Castelnuovo sorge su un lembo residuo di terrazzo, elevato circa 60 m rispetto alla pianura circostante. L'asse maggiore è orientato circa WNW-ESE. Sia il rilievo che la pianura sottostante sono prevalentemente costituiti dai limi calcarei bianchi di San Nicandro di origine fluvio-lacustre, poggianti su un substrato calcareo. Al tetto della formazione di San Nicandro abbiamo terreni con una granulometria ghiaiosa con giacitura sub orizzontale. L'edificato del borgo che si sviluppa sul versante Sud-Est del colle di Castelnuovo è sotteso da un insieme di cavità di natura antropica.

Nel lavoro presentiamo la campagna d'indagini eseguita con la finalità di individuare e censire tutte le cavità presenti al di sotto dell'abitato e la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione. Le cavità sono state individuate e catalogate attraverso il sistema informativo territoriale, con il software-free QGIS (QGIS http://qgis.org).

Le stesse sono state censite attraverso l'utilizzo di una dettagliata scheda di censimento. La stabilità delle cavità di Castelnuovo è stata duramente messa alla prova dall'evento sismico del 6 aprile 2009 e dalla sequenza sismica iniziata il 24 agosto del 2016. Non sono rari i casi in cui si sono osservati crolli localizzati di porzioni di volta o di pareti, i crolli non sono stati limitati, hanno a volte rappresentato una concausa dei cedimenti degli edifici soprastanti. In un caso si è assistito al cedimento totale di una cavità, fino ad arrivare all'apertura di vere e proprie voragini in superficie. Prima di questo studio non esisteva un censimento preciso e puntuale di tutte le cavità presenti nel sottosuolo del centro abitato di Castelnuovo ed era assente anche una mappatura di dettaglio con rilevi tecnici specialistici e una valutazione sulle condizioni di stabilità di una cavità e/o del sistema cavità.

1.INTRODUZIONE

Il paese di Castelnuovo si trova nel Comune di San Pio delle Camere in Provincia di L'Aquila, ad una quota di circa 840 m. s.l.m. il sottosuolo dell'area urbanizzata è caratterizzato da un sistema di cavità di origine artificiale, indicate dalla popolazione locale con il termine di "grottoni", che interessano la quasi totalità del tessuto urbano, disposto sul versante esposto a sud-ovest con uno sviluppo dei fronti in direzione circa parallelo rispetto alle curve di livello del terreno. Per dare un'idea dell'incidenza degli ambienti ipogei sul territorio, è sufficiente notare che nel nome stesso di San Pio delle Camere c'è un evidente richiamo alle gallerie tipiche del suo sottosuolo.

Senza entrare in una trattazione storico-antropologica in merito all'origine delle cavità, sembra ragionevole poterne collegare la realizzazione già in epoca medievale alla necessità di un ricovero per gli armenti lungo il Tratturo L'Aquila-Foggia, importante via di transumanza, il cui tracciato passa proprio in questa zona. In effetti allo stato attuale, l'ingresso di ciascuna cavità si colloca in corrispondenza del piano terra di un fabbricato, ad uso stalla o cantina, e gli ambienti ipogei si sviluppano con tracciati articolati che oltrepassano la sagoma del singolo aggregato edilizio, andando ad impegnare anche consistenti parti sottostanti alla viabilità pubblica ed altre proprietà private.

L'edificato di Castelnuovo è interessato quasi nella sua interezza da un vincolo di pericolosità P3 del Piano Stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico dei bacini di rilievo regionale abruzzesi e del bacino interregionale del fiume Sangro (L.18.05.1989 n.183, art.7,comma 6ter e Relazione Generale e cartografia ufficiale del PAI, 2004). La classe P3 indica un'area con pericolosità molto elevata, caratterizzata da fenomeni di dissesto allo stato attivo, dovuti alla presenza di una rete di cavità che sottende il paese di Castelnuovo.

A causa degli eventi sismici del 6 aprile 2009 e dei giorni seguenti, Castelnuovo ha subito un danneggiamento grave e diffuso alla quasi totalità delle abitazioni e delle infrastrutture, ed è stato evacuato completamente, con l'istituzione di una cosiddetta "zona rossa" che proibisce l'accesso pubblico al centro abitato ancora oggi (Fiore, 2006; Mazza *et al.* 2001 Parise 2013).

Poiché la presenza a Castelnuovo del citato vincolo di PAI vincola e subordina in maniera diretta la ricostruzione dell'abitato alla preliminare messa in sicurezza del sottosuolo interessato da cavità sotterranee instabili, nell'ambito della procedura di redazione ed approvazione del Piano di Ricostruzione di Castelnuovo è stato creato un Tavolo Tecnico permanente tra gli Enti competenti in materia (USRC- Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere sismico abruzzese, Regione Abruzzo, Autorità di Bacino, Comune di San Pio delle Camere, Università). Il Tavolo Tecnico ha lo scopo di stabilire le regole, indicare le modalità e coordinare le attività di ricostruzione dell'abitato di Castelnuovo, attraverso la realizzazione di un piano attuativo che prevede la messa in sicurezza di tutte le cavità presenti nell'area, in attuazione delle "*Linee guida per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee di Castelnuovo*" (strumento attuativo e parte integrante del Piano di ricostruzione del Comune: https://drive.google.com/folderview?id=0B78qO8VC1OF1RF96YXNwNm5QSjQ&usp=sharing) (Landolfi *et al.* 2011, Landolfi 2013).

Nell'ambito degli interventi previsti e finanziati dal Piano di Ricostruzione, approvato definitivamente nel mese di maggio 2014, il Comune di San Pio delle Camere, sotto il co-

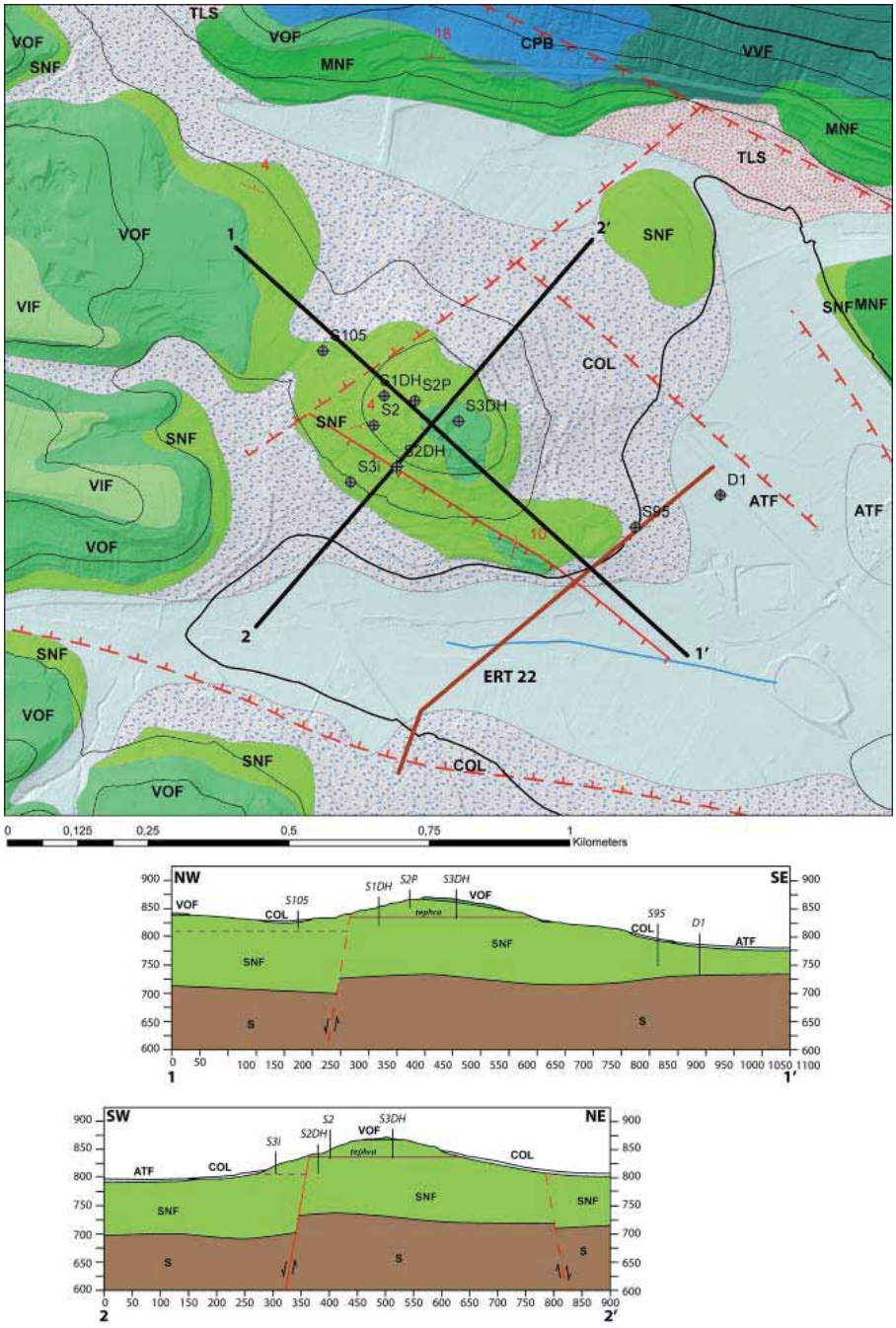


Figura 1 – Carta Geologica dell'area di Castelnuovo di San Pio delle Camere (AQ) (stralcio, modificato dagli Autori anche in base all'elaborazione delle indagini effettuate ex-novo nell'area, ripreso da Nocentini et al., *2018). Legenda delle sigle in figura indicanti i depositi cartografati, dal più recente al più antico: ATF) Formazione del Fiume Aterno; COL) Depositi Colluviali; TLS) Depositi di falda detritica; VIF) Formazione di Valle dell'Inferno; VOF) Formazione di Valle Orsa; SNF) Formazione di San Nicandro; MNF) Formazione di Madonna della Neve; VVF) Formazione di Valle Valiano; S) Substrato calcareo pre-orogenico, indifferenziato; per le sigle delle indagini geognostiche riportate in carta si fa riferimento allo standard utilizzato nelle cartografie di microzonazione sismica del DPC – Standard v. 3.0)*

ordinamento dell'USRC e con il supporto dello Spin-off dell'Università di Firenze, ha avviato una campagna d'indagini eseguita con la finalità di individuare e censire tutte le cavità presenti al di sotto dell'abitato e pervenire alla loro messa in sicurezza prima dell'avvio delle attività di ricostruzione dell'edificato.

Tale approccio è da considerarsi quale "progetto pilota" nell'ambito del più ampio *Piano di messa in sicurezza delle cavità instabili del cratere sismico abruzzese* (Pipponzi *et al.*, 2018, nel presente volume e Pipponzi *et al.* 2013).

Nel lavoro si presentano i risultati di questo studio e l'attività di censimento delle cavità conosciute e di nuova identificazione.

2. GEOLOGIA-GEOMORFOLOGIA

Il territorio di San Pio delle Camere e quindi il paese di Castelnuovo è situato nel settore nord occidentale della Regione Abruzzo e si colloca all'interno della conca di Fossa-San Demetrio dei Vestini. Questa fossa è una depressione tettonica sviluppatasi in corrispondenza del bordo Nord-Occidentale della Piattaforma Laziale Abruzzese, costituita da piccole depressioni chiuse e disposte *en-échelon* separate da dorsali strette allungate in direzione appenninica. La conca di Fossa - San Demetrio dei Vestini presenta un largo fondo valle delimitato ad ovest dalla Valle dell'Inferno, a nord-est da un fascio di dorsali appenniniche che si estende in direzione NE e a sud ovest da un fascio analogo con direzione WNW-ENE che separa questa parte della conca con l'attuale Valle dell'Aterno (Bertini *et al.* 1993, Nocentini *et al.*, 2018). Castelnuovo sorge su un colle isolato, lembo residuo di un terrazzo alluvionale, il cui asse maggiore è orientato circa WNW-ESE. Sia il rilievo che la pianura sottostante sono prevalentemente costituiti da limi calcarei bianchi appartenenti alla Formazione di San Nicandro (porzione inferiore del ciclo fluvio-lacustre del supersintema di Aielli–Pescina di età Pliocene? - Pleistocene medio)., di origine fluvio-lacustre. Questi depositi a grana molto fine sono limi argillosi con intercalazioni sabbiose, ad alto contenuto di $CaCO_3$, fittamente laminati e stratificati. In tale formazione troviamo numerose famiglie di discontinuità che individuano poliedri di forma irregolare. Tale discontinuità hanno una direzione compresa tra NNW-SSE e E-W.Al tetto della Formazione di San Nicandro si ritrovano terreni con una granulometria ghiaiosa con giacitura sub-orizzontale ascrivibili alla Formazione di Vall'Orsa, sempre di età Pliocene? - Pleistocene medio (*Fig.* 1). I depositi quaternari poggiano in discordanza erosiva su un substrato costituito dalla successione M. Ocre – Valle Aterno - M. Camarda, di età compresa tra il Giurassico e il Miocene. Queste unità, appartenenti alla serie marina meso-cenozoica in facies di piattaforma carbonatica e di soglia. Nonostante le differenze di età e di ambiente deposizionale, queste presentano caratteri comuni, quali l'organizzazione in strati generalmente spessi, da decimetrici a metrici, la grana per lo più medio-fine e una buona cementazione, motivo per cui nella carta geologica di *Fig.* 1 sono state rappresentate in maniera indistinta (S: substrato carbonatico).

La successione continentale quaternaria è il risultato della deposizione di numerosi cicli di sedimentazione che, combinandosi con intense fasi erosive nell'ambito di un generale sollevamento, hanno dato origine ad una serie di terrazzi.

Nel settore di Castelnuovo – S. Pio delle Camere le dislocazioni del substrato danno origine ad alti e bassi strutturali con la formazione di sottobacini in cui si osservano i massimi spessori di limi, conglomerati e detriti superficiali. Le zone di faglia con direzione appenninica (WNW-ESE) indicate in carta sono ritagliate da strutture subverticali orientate circa SSW-NNE.A Sud di Castelnuovo, evidenze morfo-strutturali suggeriscono la presenza di strutture di ordine minore orientate circa E-W che, a scala cartografica, mostrano una geometria *en-échelon*. Queste osservazioni, in accordo con dati di campagna, permettono di ipotizzare una componente trascorrente di queste zone di faglia.

L'originaria morfologia non è stata sostanzialmente modificata dall'uomo; i pas-

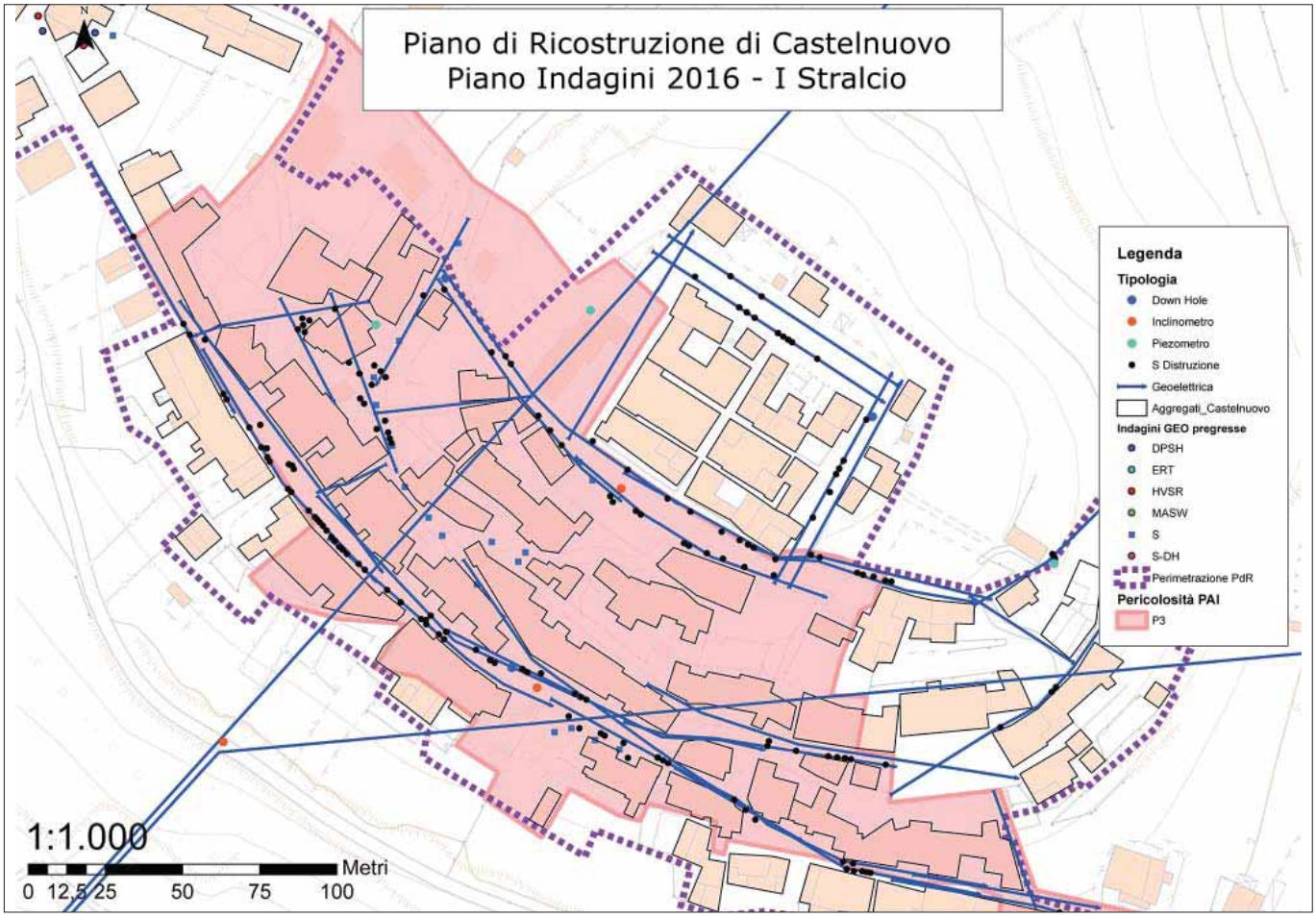


Figura 2 – Piano indagini realizzato a Castelnuovo. In totale sono stati eseguiti circa 3000 ml di stendimenti lineari ERT, e oltre 150 sondaggi a distruzione di nucleo, di profondità media di 8-10m dal p.c.; inoltre, ai fini della caratterizzazione geotecnica e sismica dei depositi sono stati eseguiti n. 3 down-hole a 35 m dal p.c., con prelievo campioni per analisi di laboratorio, n. 3 inclinometri e n. 3 piezometri con letture nell'arco di 9 mesi

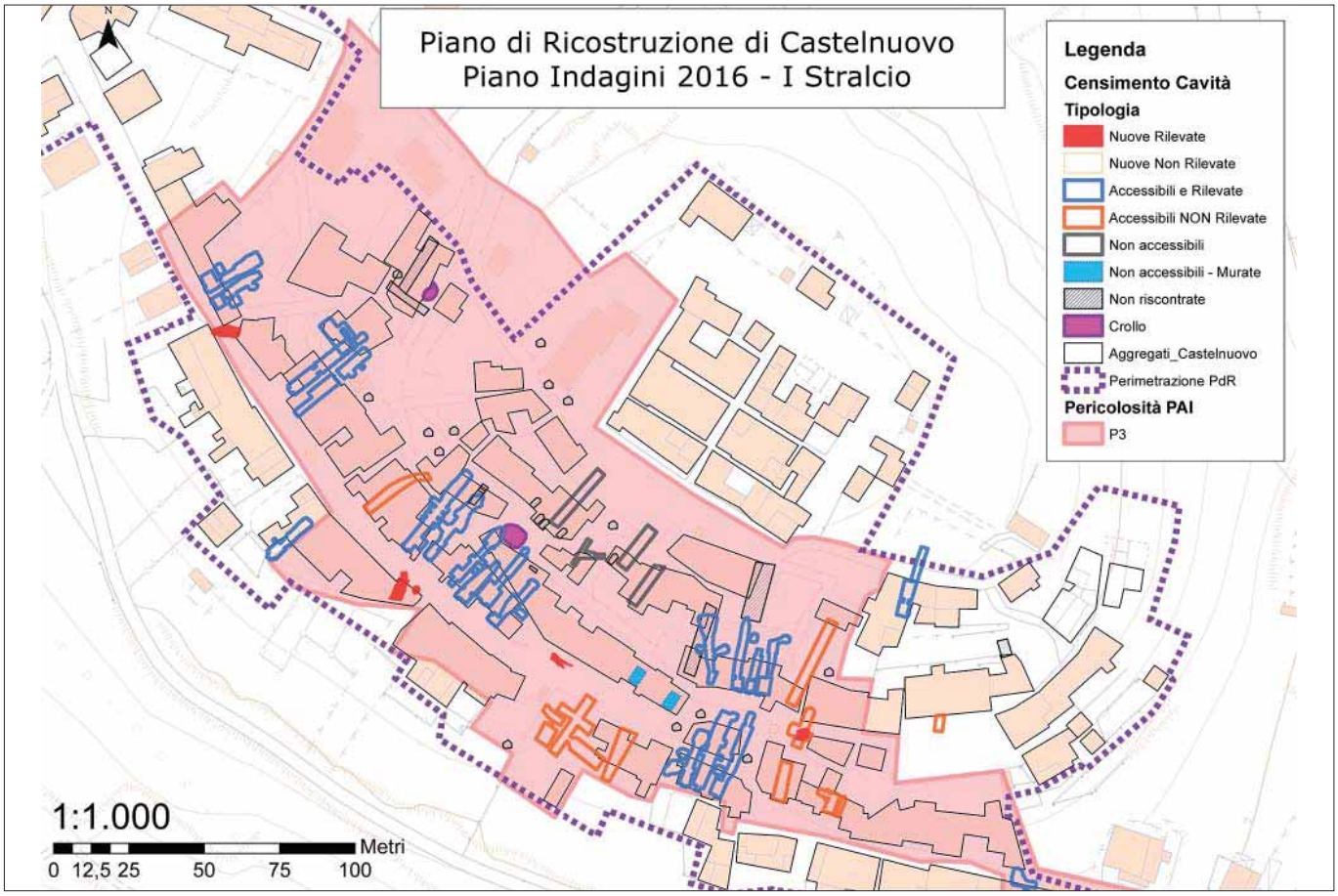


Figura 3 – Censimento e mappatura delle Cavità rinvenute a seguito del piano indagini (si veda anche il sito web dell'USRC: http://www.usrc.it/i-progetti-ed-i-cantieri-della-ricostruzione-pubblica/area-omogenea-6/pianificazione-delle-indagini-per-la-mappatura-delle-cavita-e-progettazione-preliminare-del-consolidamento-fraz-castelnuovo)

sati interventi agricoli e la realizzazione, più di recente, di strade e fabbricati hanno comportato solamente locali, modeste modificazioni della topografia. Essa, pertanto, appare ancora perfettamente leggibile.

3.INDAGINI IN CAMPO

In seguito al terremoto avvenuto il 6/4/2009 il paese di Castelnuovo si è irreversibilmente danneggiato, per la quasi totalità degli edifici, da quelli posti nell'area sommitale, costituenti il nucleo medioevale denominata Castello a quelli più recenti del borgo, costruiti tra gli anni compresi tra il 1945 e 1985 (Autori Vari, 2014, Catenacci, 1992; Ferrini *et al*. 2013).I danni prodotti dagli scuotimenti indotti dagli eventi principali della sequenza sismica del 2009 (si ricordano le tre scosse principali: 6,1 Mw del 6/4/2009, 5.4 Mw del 7/4/2009 e 5.2 Mw del 9/4/2009) sono stati oggetto di un'approfondita analisi, eseguita per la microzonazione sismica della conca aquilana, Macroarea 4 (Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010), e da studi successivi (Evangelista *et al*. 2016), effettuati anche nell'ambito della redazione del Piano di Ricostruzione dell'abitato (Durante *et al*. 2016, Del Monte *et al*. 2017)

Ai fini delle attività di ricostruzione postsisma contenute nel Piano di Ricostruzione, il paese è stato suddiviso in lotti, definiti sulla base del danneggiamento subito, sulla possibilità di messa in sicurezza degli edifici ricadenti in tali aree e con presenza o meno delle macerie. In questo lavoro si presenta il risultato delle indagini eseguite nella zona centrale dell'abitato, all'interno dell'area a vincolo PAI, ad esclusione di una piccola porzione centrale ancora occupata dalle macerie.

La fase di analisi è stata impostata sin da subito secondo un approccio integrato e multidisciplinare, con l'obiettivo del raggiungimento di un grado conoscitivo completo.

Lo studio delle cavità è stato eseguito attraverso una serie di fasi:

1. Raccolta dei dati pregressi e censimento delle cavità conosciute;
2. Esecuzione di una serie di stendimenti lineari ERT;
3. Esecuzione di oltre 150 sondaggi;
4. Ispezione di alcuni sondaggi con fotocamere;
5. Acquisizione di Laser Scanner/Disto 3D per ottenere sezioni 2D delle cave;
6. Creazione di un database con i dati ottenuti delle cavità.

Dall'analisi dei dati pregressi raccolti, provenienti da indagini eseguite nel 2007 dal Comune, da studi eseguiti dall'Università di L'Aquila e tenendo presente la Carta di Individuazione delle cavità Ipogee del Piano di Ricostruzione, sono stati posizionati gli stendimenti delle tomografie elettriche da eseguire. Questi sono state distribuite tenendo conto delle "sezioni verticali virtuali", che attraversano le possibili cavità presenti al di sotto del piano di campagna. Sono state eseguite 34 TES in totale, e sulla base della loro interpretazione e sulla definizione geometrica delle anomalie riscontrate dall'analisi, sono stati successivamente posizionati i sondaggi, prevalentemente eseguiti a distruzione di nucleo(*Fig.* 2). Questi sono serviti a: 1) confermare la presenza o meno di cavità segnalate da studi precedenti; 2) individuare le nuove cavità; 3) misurare lo spessore della calotta, nel caso di cavità conosciute e già rilevate.

A seguito dei sondaggi sono state individuate 6 nuove cavità (*Fig.* 3) mai segnalate fino ad oggi (e per le quali è andata perduta la memoria storica nel corso dei decenni).Essendo inaccessibili, ovvero non possedendo ad oggi un'entrata accessibile per le ispezioni ordinarie, su di esse è stata eseguita un'ispezione in foro tramite l'utilizzo di fotocamere, al fine di avere una visione d'insieme, seppur approssimativa, come è possibile vedere dalla *Fig.* 4. Successivamente all'utilizzo di fotocamere, è

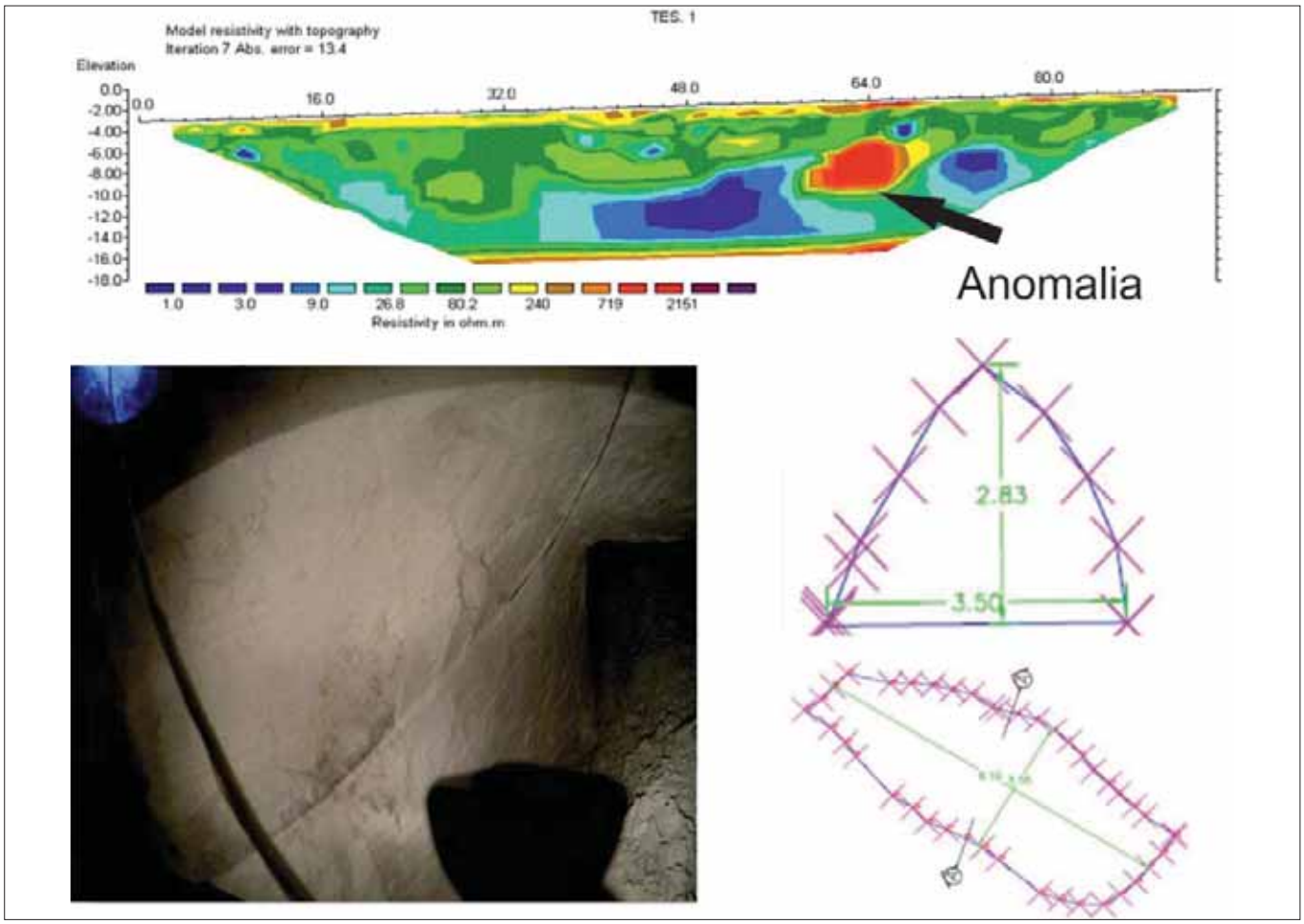


Figura 4 – Rilievo fotografico e disto3D delle cavità. Le anomalie di resistività rilevate dalle tomografie elettriche (sezione in alto) sono state indagate tramite perforazioni a distruzione di nucleo, alcune delle quali hanno permesso di rintracciare vuoti ipogei sino a quel momento non conosciuti. Le cavità di nuovo ritrovamento ma inaccessibili sono state oggetto di ispezione con fotocamere attraverso i fori di sondaggio opportunamente attrezzati (foto in basso a sinistra); successivamente è stata effettuata l'acquisizione di dati con Disto3D per ottenere sezioni 2D delle cavità (immagine in basso a destra)

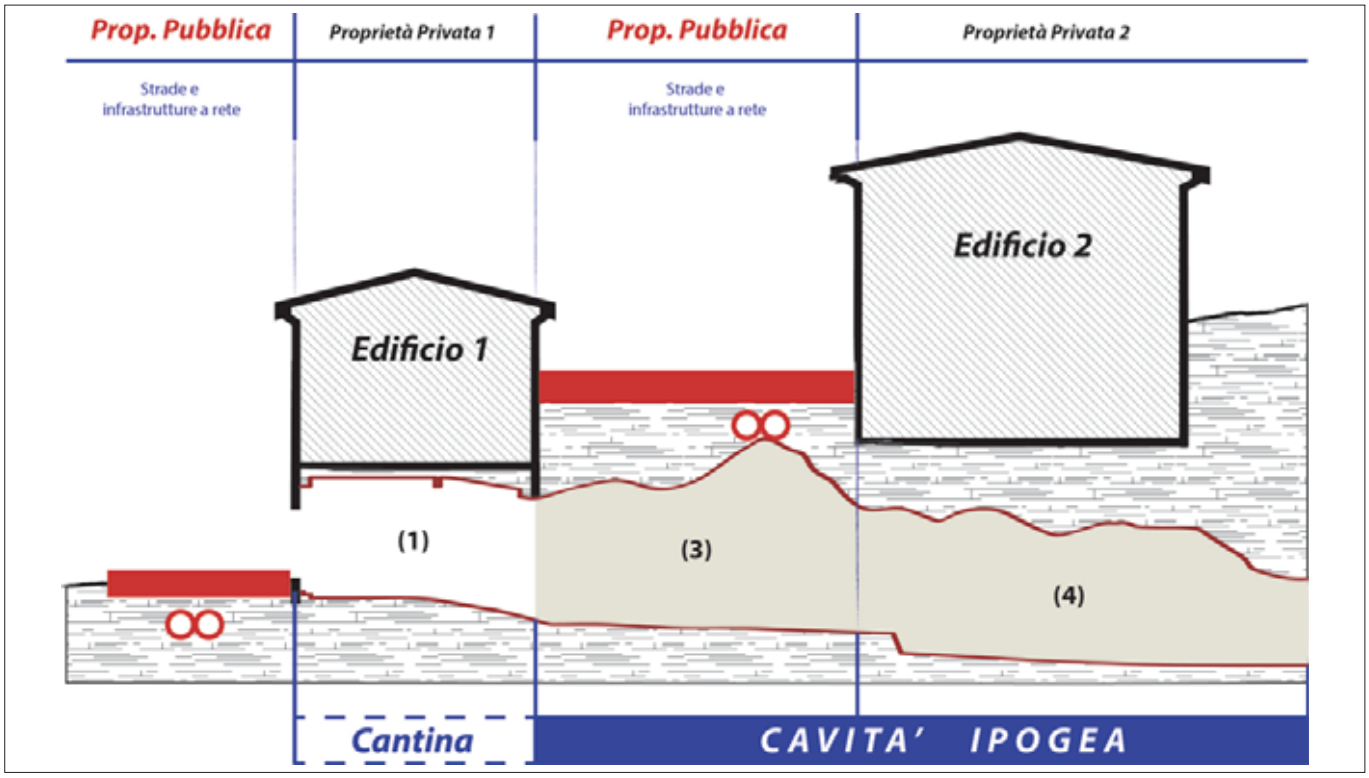


Figura 5 – Schema-tipo delle cavità presenti nel sottosuolo urbano di Castelnuovo, realizzato in base all'analisi delle cavità ispezionabili. Il tratto indicato con (1) rappresenta il tratto di cavità sottostante l'edificio privato, che ne detiene l'accesso; esso risulta generalmente connesso, dal punto di vista strutturale, con la sovrastante struttura edilizia. Il tratto indicato con (3) rappresenta la porzione di cavità interessate e/o utilizzate, a tratti, dalle reti infrastrutturali (acquedotti, fognature, etc.), le quali rappresentano un fattore di vulnerabilità a causa delle modalità di posa in opera e/o del loro danneggiamento che provoca il degrado delle caratteristiche geomeccaniche del materiale nel quale risulta scavata la cavità

stato eseguito un rilievo laser scanner 2D (Disto3D) sempre in foro, come riportato in *Fig.* 4. Tutti di dati sono stati raccolti in un database geografico informatizzato denominato "Database GIS cavità USRC" (cfr.: Pipponzi *et al.*, 2018 - in questo volume Lirer *et al.*,1997).

4.CENSIMENTO E RILIEVO DELLE CAVITÀ SOTTERRANEE

Come stabilito negli "Indirizzi Tecnici e Modalità di Attuazione del piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee nel cratere sismico abruzzese", le cavità presenti nel sottosuolo urbano di Castelnuovo sono state rilevate in base alla definizione stabilita nel piano di ricostruzione ovvero: "*qualunque vuoto di origine naturale presente nel sottosuolo e gli spazi vuoti di formazione storico-antropica che nel tempo sono stati creati o adattati per vari usi, scavati in roccia o in terreno compatto semi-litoide e con dimensioni significative in termini di diametro equivalente* D_{eq}*>1.5 metri.*"

Le stesse sono state censite attraverso l'utilizzo di una scheda di censimento predisposta dall'USRC (Pipponzi *et al.*, 2018 – *in questo volume*). Tramite il suo utilizzo è stato possibile eseguire una descrizione delle caratteristiche morfologiche e geologiche principali ed una valutazione delle sue condizioni di stabilità.

Le cavità sono state distinte tramite una categorizzazione:

A. Cavità sottostante la proprietà ed esclusivamente private, accessibili dall'interno della stessa proprietà e connesse, dal punto di vista strutturale, con il resto della proprietà.
B. Cavità di dimensioni notevoli e con sviluppo plano-altimetrico che fuoriesce dal perimetro di una singola proprietà, con più accessi da proprietà differenti (ovvero anche da spazi pubblici), con un'estensione tale da interessare anche spazi pubblici ed altre proprietà private.
C. Cavità interessate e/o utilizzate, a tratti, dalle reti infrastrutturali (acquedotti, fognature, etc.), accessibili sia dall'interno di proprietà private che pubbliche e/o di Enti di gestione di tali reti; questo risulta essere tra i casi più complicati, vista la necessità da parte dell'Ente di gestione (pubblico o privato) di monitorare ed intervenire sull'intera rete.
D. Cavità di interesse storico-archeologico, per le quali gli interventi di messa in sicurezza devono essere realizzati nel rispetto dei criteri di tutela e conservazione.

Le cavità sono state quindi individuate e catalogate in base alle definizioni citate, in un database geografico relazionale in ambiente GIS, con il software QGIS (http://qgis.org) (Gasparini 1992) (*Fig.* 3). Questi dati andranno a confluire nel sopracitato "Database GIS Cavità USRC", che ha lo scopo di raccogliere e censire in un archivio cartografico in ambiente GIS tutti gli ambienti ipogei artificiali presenti in ambito urbano nei comuni del cratere sismico abruzzese.

L'esperienza maturata a Castelnuovo porta a dire che in genere ciascuna cavità è collocata in corrispondenza di un fabbricato, di cui costituisce il piano terra, per lo più adibito a stalla o cantina. In particolare è frequente rilevare un tratto iniziale ad andamento rettangolare, a cui si accede dal livello stradale, con pareti ed orizzontamento a volta in muratura di pietrame irregolare, in alcuni casi consolidato mediante uno strato di boiacca cementizia. Al termine di questo primo tratto si passa, tramite un'apertura posta sul lato posteriore contro-terra del fabbricato, alla cavità vera e propria, scavata direttamente nel limo (*Fig.* 5). Spesso la cavità si protrae sotto la viabilità pubblica retrostante al fabbricato e, talvolta, prosegue sotto i fabbricati posti sull'altro lato della strada ubicati ad una quota del terreno superiore, con sviluppo articolato sia in pianta che in altezza. In alcuni casi, pur essendo la cavità ispezionabile, la porzione terminale risulta ostruita da pareti murarie di costruzione più o meno recente, realizzate dai singoli proprietari, probabilmente per limitare l'accesso a zone in cui erano già in atto dei dissesti avvenuti ben prima del sisma del 2009.

Per lo più ciascuna grotta consta di una cavità, con una serie di vuoti minori che si aprono sui due lati, altre volte di una sequenza di ambienti di ampiezza variabile. La sezione trasversale degli ambienti maggiori è sostanzialmente ad arco a sesto acuto piuttosto pronunciato. Alcune cavità hanno le pareti laterali rivestite in muratura per una altezza di circa 1.50 m, in cui sovente sono ricavati ripiani e mangiatoie. Altre si sviluppano su

due livelli comunicanti per mezzo di scalini ripidi. La lunghezza media è variabile, con una prevalenza, per le grotte che non hanno subito modificazioni (chiusure, diaframmi, riempimenti), intorno ai 15 m a partire dal filo esterno dei fabbricati. Tale lunghezza, si noti, è tale che, stante l'orografia delle porzioni di territorio interessate e la morfologia dell'abitato, sulla cavità insistono più porzioni di strade e di fabbricati, spesso con fondazioni dirette in muratura disordinata poste a sbalzo sulle cavità. Le calotte generalmente hanno uno spessore di 6-8 metri ma ci sono stati casi di maggiore spessore, fino a raggiungere i 15 metri.

Nell'ambito delle analisi condotte – ove possibile – all'interno delle cavità, sono stati eseguiti una serie di rilievi geologico-strutturali, sulle pareti verticali delle porzioni di cavità scavate nei limi e non rivestite da muratura, sulle quali risulta facile leggere gli elementi necessari alla effettuazione del rilievo in situ delle discontinuità strutturali. Come si evince dal diagramma della *Fig.* 6 i limi calcarei sono interessati da una diffusa fratturazione, con famiglie di discontinuità con direzione principale circa NW-SE e NE-SW, e secondariamente E-W, che rispecchiano le direzioni dei principali lineamenti tettonici individuati nell'area di Castelnuovo e riportati nella carta geologica

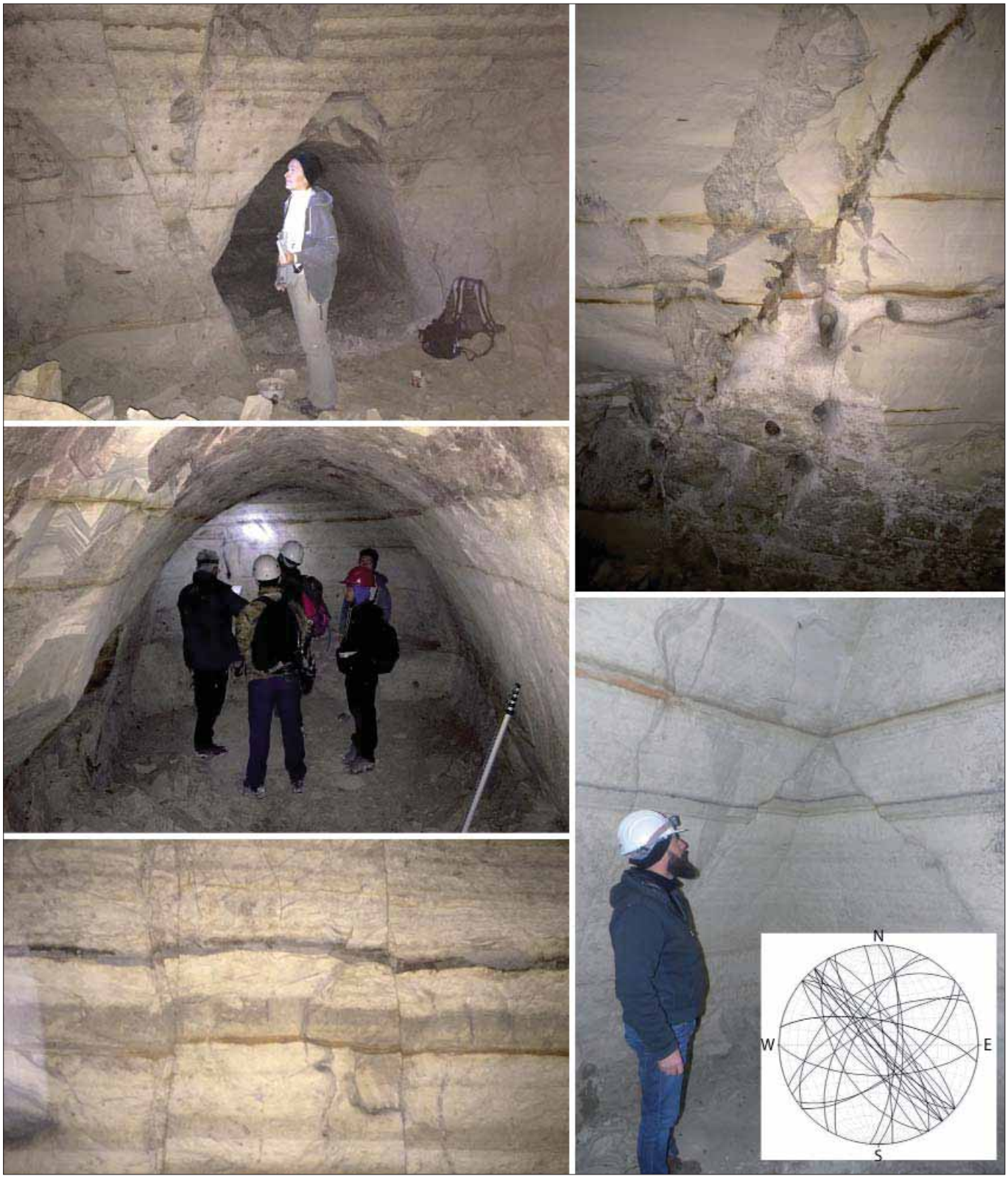


Figura 6 – Particolari dei rilievi geologico-strutturali eseguiti sulle pareti verticali delle porzioni di cavità scavate nei limi e non rivestite da muratura. Si noti la presenza diffusa di discontinuità (NW-SE, nel diagramma in basso a destra) orientate perpendicolarmente allo sviluppo longitudinale delle cavità (SW-NE, si veda anche la figura 3); tale assetto ha portato alla creazione di sezioni di volta confinate da discontinuità, circostanza che ha predisposto a crolli diffusi, anche a seguito dello scuotimento indotto dal terremoto

di *Fig.* 1. Si osserva che la famiglia di discontinuità orientata E-W disloca tali depositi con rigetti massimi dell'ordine di qualche decina di centimetri. Al contrario, le restanti famiglie di discontinuità non mostrano rigetti apprezzabili. L'intenso stato di fratturazione, con una spaziatura dell'ordine del metro circa, individua poliedri di forma sub-regolare soggetti a distacchi ampiamente diffusi.

In molti casi, il particolare assetto geometrico dovuto alla intersezione praticamente perpendicolare tra la direzione dell'asse maggiore della cavità (SW-NE) e la direzione della principale famiglia di discontinuità (NW-SE) ha determinato la "accidentale" creazione di sezioni di volta confinate da discontinuità che ne hanno favorito il crollo, anche a seguito dello scuotimento indotto dal terremoto.

In molti casi, nei tratti di cavità che sottendono le strade pubbliche, le cattive condizioni di stabilità delle cavità sono aggravate anche dalla sola presenza della rete di sottoservizi (fognature, acquedotti e reti gas etc.), a causa delle modalità di posa in opera e/o manutenzione che non ha previsto accorgimenti specifici per la presenza di vuoti sottostanti



Figura 7 – Testimonianzedi crolli a seguito del sisma del 2009: in tutte le cavità censitesi sono osservati crolli diffusi di porzioni di volta o di pareti (a), che hanno a volte rappresentato una concausa dei cedimenti degli edifici soprastanti (b). In alcuni casi si è assistito al cedimento totale delle volte, con l'apertura di voragini in superficie (c, d), che hanno destato notevole stupore nell'immediato post-sisma. In un caso si è osservato il crollo di un diaframma che sostituiva la separazione di due cavità sovrapposte verticalmente (e)

danneggiamento delle infrastrutture a rete soprastanti (reti idriche e fognarie); oppure l'occorrenza di rotture delle reti, le cui perdite determinano infiltrazioni che provocano il degrado delle caratteristiche geomeccaniche del materiale nel quale risulta scavata la cavità.

Infatti, la presenza di discontinuità favorisce una significativa circolazione idrica sotterranea, al punto che a seguito della rottura della rete fognaria causata dallo scuotimento indotto dalle scosse sismiche dell'aprile 2009, alcune delle cavità dei livelli inferiori sono state invase dalle acque bianche e grigie, anche a distanza considerevole rispetto ai punti di rottura delle tubazioni.

Nella quasi totalità delle cavità censite, la presenza di crolli diffusi ed estesi di ampie porzioni delle volte e delle pareti ha quindi determinato, al di là dei numerosi parametri presi in considerazione attraverso la citata scheda di censimento USRC, una chiara valutazione negativa delle condizioni di stabilità, al punto tale che praticamente tutti gli ipogei rilevati sono da considerarsi instabili e saranno soggetti ad interventi di messa in sicurezza (*Fig.* 7).

In ultima analisi a Castelnuovo la presenza di una cavità sotterranea, alla luce delle descritte condizioni geometriche e geologiche, ha inciso in modo significativo sulla vulnerabilità degli edifici soprastanti, fino al punto da consentire di stabilire un nesso di causalità tra la sua presenza e la occorrenza di danno grave alle strutture edilizie (con esito E di inagibilità AeDES).

5. RISULTATI

La stabilità delle cavità di Castelnuovo è stata severamente messa alla prova dall'evento sismico del 6 aprile 2009, e la sequenza sismica iniziata il 24 agosto del 2016 ha ulteriormente danneggiato le cavità e gli edifici sovrastanti con ulteriori cedimenti e crolli. (Alberico *et al*. 2000, Albertini *et al*. 1988, AA.VV.1999, Corazza *et al*. 2002).

A seguito del sisma del 2009 non sono rari i casi in cui si sono osservati crolli diffusi di porzioni di volta o di pareti, che hanno a volte rappresentato una concausa dei cedimenti degli edifici soprastanti. In un caso si è assistito al cedimento totale di una cavità, fino ad arrivare all'apertura di vere e proprie voragini in superficie (*Fig.* 7). Antecedentemente al presente studio non esisteva un censimento preciso e puntuale di tutte le cavità presenti nel sottosuolo del centro abitato di Castelnuovo, ed era inoltre assente una mappatura di dettaglio con rilevi tecnici specialistiche una valutazione sulle condizioni di stabilità di una cavità e/o del sistema cavità. In attuazione di quanto previsto nel Piano di Ricostruzione di Castelnuovo, la campagna di indagini ha permesso il censimento delle cavità presenti nel sottosuolo dell'area urbana dell'abitato; inoltre state riscontrate 6 nuove cavità finora mai conosciute. Alla luce di tutte le informazioni raccolte e definito il modello geologico-geotecnico, i parametri caratteristici dei litotipi, le condizioni di stabilità e le cause dei diversi sprofondamenti, è in via di definizione un progetto di messa in sicurezza dell'area attraverso opere di consolidamento e/o attraverso il riempimento delle stesse. La realizzazione degli interventi di messa in sicurezza delle cavità ipogee consentirà l'avvio in un prossimo futuro delle attività di ricostruzione dell'abitato di Castelnuovo.

BIBLIOGRAFIA

Alberico I., Guerra V., Lirer L. (2000), *Il rischio sottosuolo nella Provincia di Napoli*. IV Conferenza Nazionale ASITA - Informazione Geografica: Innovazione e Formazione, pp. 1411-1416, Ottobre 2000.

Alterbitini V., Baldi A., Collini L., Esposito C., Guerra V., Miraglino P., Schiattarella F., Vallario A. (1988), *Le cavità sotterranee del napoletano: pericolosità e possibili utilizzi*. Geologia Tecnica N.3.

AA.VV. (1999), Atti del Convegno "Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione", SIGEA Lazio e Ufficio Geologico della Provincia di Roma, Roma.

AA. VV. (2014), *Piano di Ricostruzione di Castelnuovo, frazione del Comune di San Pio delle Camere* (ai sensi dell'art.6, comma 4, del Decreto n.3/2010 del Commissario Delegato per la Ricostruzione) con Decreto Sindacale delibera del Consiglio comunale n.27 del 28.12.2011

Bertini T. e Bosi C. (1993), *La tettonica quaternaria della conca di Fossa (L'Aquila)*. Il Quaternario, 6(2), pp. 293-314.

Catenacci V. (1992), *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., XLVII.

Corazza A., Mazza R., Bertuccioli P., Putrino P.(2002), *Il Progetto "Cavità" - Analisi del rischio dovuto a cavità sotterranee*. Atti dei Convegni Lincei,XIX Giornata dell'Ambiente "Il dissesto idrogeologico. Inventario e prospettive", Roma 5 giugno 2001, 355-363.

Durante F., Pipponzi G., Amoroso S., Cantore L., Cosentino D., Di Domenica A., Di Giulio G., Di Naccio D., Macerola L., Milana G., Nocentini M., Pizzi A., Tallini M., Vassallo M. (2016), *Seismic microzonation of Castelnuovo (L'Aquila): investigations to refine the subsoil model for the amolification effect evalutation*, 88° Congresso della società geologica italiana, Napoli 2016; Rend Online Soc. Geol. It., Suppl.n.1, Vol.40 (2016).

Evangelista L., Landolfi L., d'Onofrio A., Silvestri F. (2016), *The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo eartquake*, Bull Earthquake Eng. Vol.14 Issue 12 Pages:3363-3387.

Ferrini G., Moretti A., Redi F. e Cordisco A. (2013), *Un insediamento ipogeo nei pressi dell'Aquila in frazione S. Martino a Picenze e l'attribuzione al XIII-XIV secolo della facies in muratura*. Archeologia Medievale. XL, pp. 259-266, e relativa bibliografia.

Fiore A. (2006), *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee*. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia. Periodico di Scienze della Terra dell'Ordine dei Geologi della Puglia, Geologi e Territorio, n. 1/2/3-2006.

QGIS http://qgis.org.

Gasparini P. (1992), *La localizzazione delle cavità con metodologie sismiche*. In: *Frane e Territorio*, pp. 444-450 Liguori Editore.

Gruppo di Lavoro MS–AQ 2010, *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.

Ilic V., Del Monte E., Boschi S., Durante F., Pipponzi G., Nocentini M., Tallini M. (2017), Abstract: *Analisi della risposta sismica locale del colle di Castelnuovo (AQ) con modelli 2D*, Anidis 2017, Pistoia SG02-1. Indirizzi Tecnici e Modalità di Attuazione del piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee nel cratere sismico abruzzese. L.18.05.1989 n.183, art.7,comma 6ter.

Lirer L., Alberico I. e Balsamo A. (1997), *Le cavità nei comuni della Provincia di Napoli. Realizzazione di un database e indirizzi per la pianificazione nei comuni con elevata presenza di cavità artificiali nel sottosuolo.* Convenzione C.I.R.AM. - Provincia di Napoli.

Landolfi L., Silvestri F (2011), *Effetti di cavità nel sottosuolo sulla risposta sismica locale: uno studio pilota ispirato al caso di Castelnuovo*. Università degli Studi di Napoli Federico II. Atti del XIV Convegno Anidis, Bari 18 settembre 2011.

Landolfi L. (2013), Tesi di dottorato dal titolo "Effetti di cavità nel sottosuolo sulla risposta sismica locale: uno studio pilota ispirato al caso di Castelnuovo"- Università degli Studi di Napoli Federico II, Dottorato di ricerca in ingegneria sismica XXV Ciclo. Tutori prof. Silvestri F e D'Onofrio A., pp1.-253.

Mazza R., Paganelli D., Campolunghi M.P.,Capelli G., Lanzini M., Sereni M., De Filippis L. (2001), *Rischio di crolli da cavità sotterranee nel settoreorientale della Città di Roma*. III Forum Italiano di-Scienze della Terra, Geoitalia (5-8 Settembre 2001,Chieti). Abstract in Abstract Book del-Congresso.

Parise M., Galeazzi C., Bixio R. & Dixon M. (2013), *Classification of artificial cavities: a first contribution by the UIS commission. Commissione per le cavità artificiali dell'Unione Internazionale di Speleologia*. In: Filippi M., Bosak P. (eds) *Proceedings of 16th international congress speleology*, Brno, vol 2, 21-28 july 2013, pp. 230-235

Pipponzi G., Del Monte E, Genitti C., Leonardis F. (2013), *Linee guida per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee di Castelnuovo. All'interno del Piano di Ricostruzione della frazione di Castelnuovo del Comune di San Pio delle Camere*. Decreto di approvazione dell'accordo di programma tra il Comune e la Provincia di L'Aquila del 12/03/2014, D.Lgs n. 267/2000 art. 34, L.R. n. 18/1983 artt. 8-bis e 8-ter.

Pipponzi G., Ferrini E., Mattucci F., *Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nel Cratere Sismico Aquilano*. Abstract Convegno Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione. CNR 01/12/2017.

Relazione Generale e cartografia ufficiale del PAI (2004), Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico "fenomeni gravitativi e processi erosivi" adottato con Delibera di Giunta Regionale n. 1386 del 22/12/2004 ed approvato in via definitiva con Delibera di Consiglio Regionale n.94/7 del 29/01/2008.

Altamura memoria del paesaggio: le cave per l'estrazione del materiale lapideo. Dal censimento alla valorizzazione dei percorsi dell'industria estrattiva

Emma Capurso
Archeologa AIPAI-Puglia, autore di riferimento
E-mail: emma.capurso@gmail.com

Teresa Ninivaggi
Geologa, C.A.R.S. Centro Altamurano Ricerche Speleologiche
E-mail: teresaninivaggi@gmail.com;

Giovanni Ragone
C.A.R.S. Centro Altamurano Ricerche Speleologiche
E-mail: info@carsismo.it

Altamura memory of landscape: the quarries for extraction of stone material. From the inventory to the enhancement of trails about the quarrying industry

Parole chiave (*key words*): cave sotterranee di Altamura (*underground quarries of Altamura*), Formazione della Calcarenite di Gravina (*Calcarenite di Gravina Formation*), industria estrattiva (*quarrying industry*), valorizzazione (*enhancement*)

1. INTRODUZIONE

Un articolato sistema di gallerie, realizzato per la coltivazione di roccia calcarenitica, si sviluppa alla periferia dell'abitato moderno di Altamura ad una profondità variabile dai 5 ai 25 m dal piano campagna. Questo dedalo di vuoti, dall'andamento piuttosto irregolare è collocato all'interno del corpo geologico, ascrivibile alla Formazione della Calcarenite di Gravina (Pliocene superiore - Pleistocene inferiore). La coltivazione e l'estrazione di conci, utilizzati come materiale da costruzione, risale probabilmente al 1800 (Pentimone, 2009).

La mancanza di una pianificazione dell'escavazione e il successivo abbandono hanno portato le cave ad un pericoloso stato di dissesto, amplificato dall'interazione tra le gallerie e il sistema insediativo in espansione. A partire dal 2007, sono così cominciate le attività di catalogazione e bonifica (Berardi *et al*., 2009). L'intensa attività esplorativa, ha portato ad una raccolta di informazioni di elevata importanza che ha permesso di documentare e descrivere un fitto e articolato sistema di gallerie, risultato delle attività di estrazione di *tufi*[1] e di *tufina*[2]. I rilievi effettuati hanno permesso di leggere la stratificazione del paesaggio rivelando la mappa dei vuoti, presenti sotto strade ed edifici che si sono creati dopo l'urbanizzazione di alcune aree (Martimucci *et al.* 2010). Nel corso di ultime indagini esplorative, svoltesi in un'area a sud-est dell'abitato di Altamura, sono stati individuati alcuni tratti di gallerie facilmente accessibili e in buono stato di conservazione.

Le informazioni ricavate dalle indagini sul campo riguardanti l'andamento in pianta delle gallerie, le tecniche di scavo, il loro stato di conservazione, rappresentano un prezioso bagaglio per la loro valorizzazione, in quanto raccontano scorci di vite passate, mestieri e usanze antiche di questi luoghi.

2. CENNI STORICI

La richiesta crescente di materiale da costruzione per la realizzazione di edifici in muratura, ha incrementato, nel corso del 1800, l'attività di estrazione della pietra locale nella regione pugliese.

Il territorio di Altamura, ricadente lungo il margine centro-occidentale dell'Altopiano delle Murge e il bordo orientale della Fossa bradanica, è stato sede di un'ampia attività estrattiva della Calcarenite di Gravina. Non esiste alcuna documentazione storica riguardo all'utilizzo delle cave, dunque, ogni informazione è stata ricavata grazie alle indagini effettuate sul campo. L'impostazione della rete caveale in sotterraneo è testimoniata dalla presenza di un articolato sistema di gallerie (*Fig.* 1), dalla lunghezza di circa 16 km, che si estende da Nord ad Est dell'abitato moderno di Altamura (Pepe *et al*., 2013a).

L'escavazione e l'utilizzo della calcarenite nel territorio di Altamura, ha origini estremamente antiche. Lo dimostrano i siti rupestri edificati in queste zone, tra cui l'esempio più importante è rappresentato dalla località di San Tommaso, sita a sud-est dell'area interessata dalle cavità. Qui è presente una vasta necropoli che testimonia la presenza dell'uomo sin dal VI secolo a.C. (C.R.S.E.C., 1982). L'area è ricca di cavità scavate a mano all'interno dello strato calcarenitico, utilizzate come fonte di materiale da costruzione nel corso del XIX secolo, informazione ricavata grazie al ritrovamento di date incise sulla roccia delle cave (Pentimone, 2009). In quest'epoca e nel secolo successivo, vi era la necessità di reperire materiale da costruzione sufficientemente resistente (Andriani *et al*., 2009), ed allo stesso tempo facile da cavare e modellare a mano (Del Prete & Parise, 2007). La calcarenite soddisfaceva perfettamente queste necessità. In quest'area, come in tutta la Puglia, si prediligeva l'impostazione delle cave in sotterraneo per motivi morfologici e geologici, in quanto la calcarenite è sovrastata da un livello argilloso e per la necessità di preservare suolo ad utilizzo agricolo (Parise, 2011). Dall'osservazione di foto aeree degli anni '40 e '70, è possibile riscontrare che alcuni degli accessi alle cave risultano ancora ben individuabili sulla superficie topografica, e dunque non sono del tutto abbandonati dai cavatori. Dalle orto-foto risalenti agli anni '90, invece, gli ingressi non sono più visibili, in quanto colmati da terreno vegetale e inerti di varia natura, risultando così abbandonati in quegli anni, quando la diffusione di mezzi di trasporto meccanici, consentì l'acquisto di materiale di più alta qualità dalle vicine cave di Gravina e Matera a costi contenuti (Pentimone, 2009).

3. STRUTTURA GENERALE

In questa zona i cavatori hanno optato per la tecnica a "fossa e a camere e pilastri" in modo da raggiungere con meno lavoro possibile la roccia da cavare. Erano realizzati degli scavi iniziali, atti a creare delle pareti subverticali su cui impostare una o più entrate delle gallerie, realizzate a sezione rettangolare o trapezoidale, alte anche fino a 10 m e larghe più di 5 m. La tecnica di escavazione in galleria consisteva nel segnare, nella porzione alta della parete di attacco, la sagoma dei

1 "Tufo" è il termine utilizzato localmente per indicare i conci di calcarenite impiegati come materiale da costruzione.

2 "Tufina" è il termine utilizzato localmente per indicare le polveri di scarto della lavorazione dei conci impiegata in edilizia per la produzione di malte.

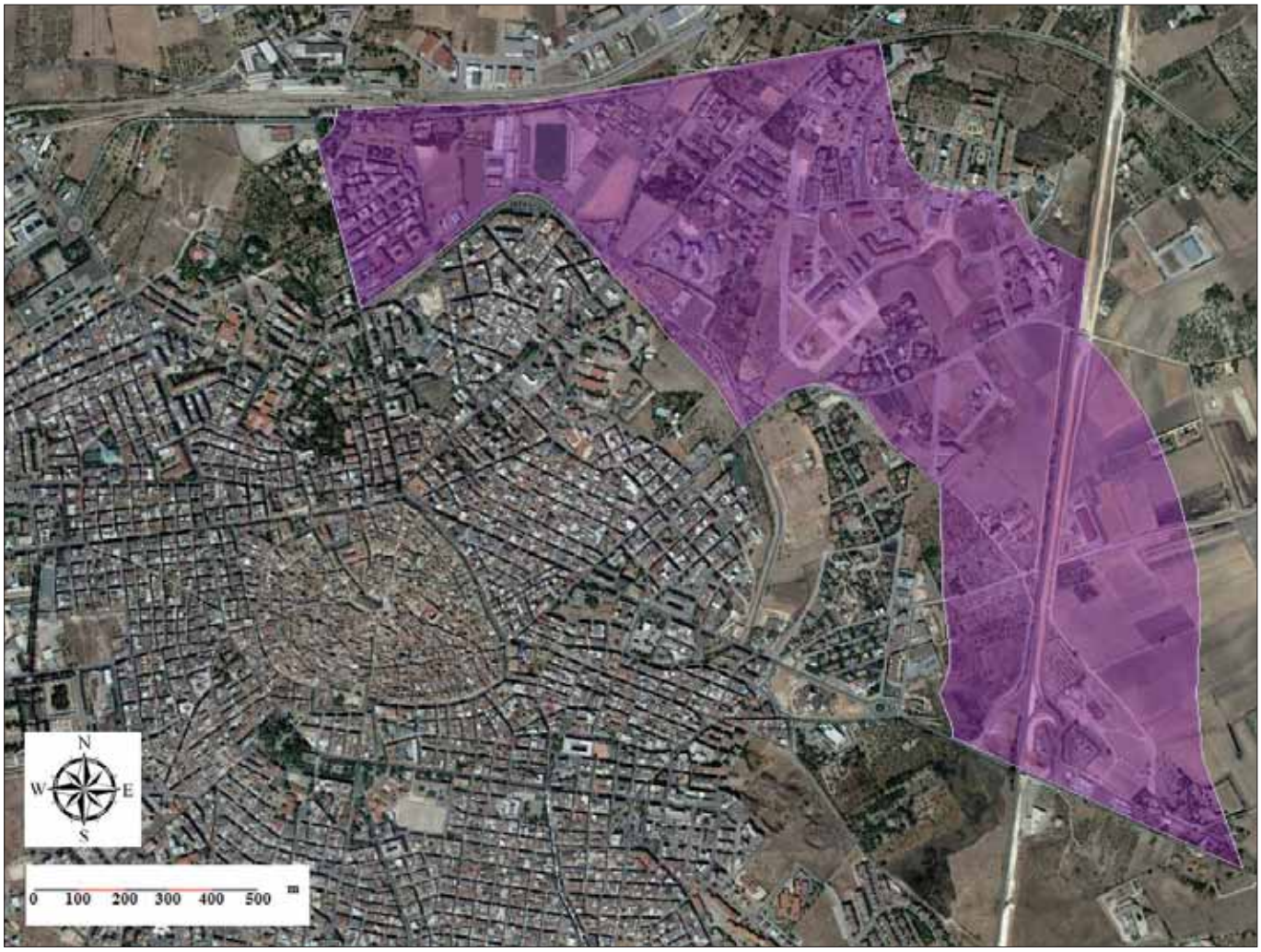


Figura 1 – Area interessata dal sistema di gallerie (elaborazione degli autori, sui dati del Catasto Cavità Sotterranee del Comune di Altamura)

blocchi da tagliare, in modo da realizzare con l'estrazione dei conci, una prima nicchia parallelepipeda e testare la qualità della roccia. Se essa risultava sufficientemente alta, si proseguiva realizzando dei gradoni digradanti verso il pavimento fino a rinnovare la parete di attacco (*Fig.* 2). L'estrazione avveniva con l'utilizzo di pochi attrezzi (*Fig.* 3): il piccone per tracciare i solchi sulla roccia, i cunei di legno per facilitare il distacco dei conci. Gli ambienti erano illuminati con lucerne ad olio (Pentimone, 2009).

Lo schema di escavazione procedeva verso i volumi calcarenitici di maggiore qualità, sotto sorveglianza di esperti cavatori, senza una pianificazione preventiva dell'andamento in pianta delle gallerie e un dimensionamento dei setti o pilastri atti a preservare la stabilità delle stesse (Berardi *et al.*, 2009).

4. STATO DI DISSESTO

Dopo l'abbandono, le cave hanno subito nel tempo processi di naturale degrado, e di esse, in particolare della loro estensione, si

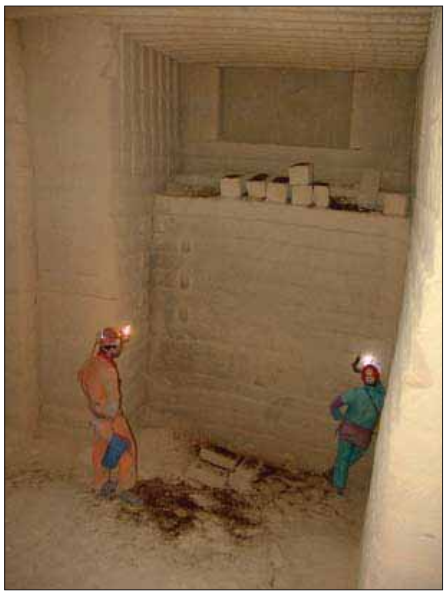


Figura 2 – Parete di attacco. In alto è presente la nicchia di escavazione e i conci estratti



Figura 3 – Alcuni oggetti utilizzati dai cavatori e ritrovati durante le esplorazioni e rilevazioni delle gallerie da parte del C.A.R.S. – Centro Altamurano Ricerche Speleologiche



Figura 4 – Lo sprofondamento avvenuto in via Barcellona nel 2007

è persa memoria. Le prime esplorazioni sono state effettuate dalla fine degli anni '90 ad opera degli speleologi del Centro Altamurano di Ricerche Speleologiche (CARS). Negli anni successivi, l'espansione del tessuto urbano verso le aree interessate dalle cave ne ha accelerato esponenzialmente il dissesto: si sono verificati sei eventi di sprofondamento (o subsidenza) documentati. Il più rilevante, avvenuto nel 2007, rivelò una cavità profonda 20 metri ed estesa al di sotto di una villetta bifamiliare, portando l'attenzione verso la pericolosità delle cave antropiche di Altamura ai massimi livelli: la mitigazione del rischio idrogeologico si rese necessaria (*Fig.* 4). L'Autorità di Bacino della Basilicata, territorialmente competente, di concerto con l'autorità comunale, attraverso l'aggiornamento del Piano di Assetto Idrogeologico, effettuò una prima perimetrazione dell'area a rischio (Martimucci *et al.*, 2007). Grazie all'attuazione della "Direttiva per la gestione e la messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee" furono definiti gli interventi tecnici sul territorio e l'istituzione di un Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) al fine di censire le cavità medesime e di valutarne lo stato di conservazione (Berardi *et al.*, 2009). Il quadro conoscitivo della rete di cavità artificiali è stato realizzato grazie all'applicazione di diverse metodologie di indagine. Attraverso rilievi speleologici effettuati dal Centro Altamurano Ricerche Speleologiche (CARS) è stato possibile mappare l'andamento delle gallerie direttamente accessibili e corredare i rilievi con foto georeferenziate. Per individuare quei tratti di cave prive dell'originario accesso, invece, è stata avviata una campagna di indagini geognostiche indirette (Pepe *et al.*, 2013b) e, successivamente, realizzati degli accessi in modo tale da proseguire con le attività di rilievo speleologico (Martimucci *et al.*, 2007). L'attendibilità dei rilievi speleologici ha permesso di riportare non solo le dimensioni e la posizione georeferita dell'intero sistema caveale ma anche la descrizione dello stato di fratturazione delle pareti e delle volte delle cavità (*Fig.* 5). Particolare attenzione è stata inoltre posta nelle attività di controllo e monitoraggio, attraverso misure geofisiche precedenti e successive alla bonifica dei tratti risultati ad alto rischio di collasso (Pepe *et al.*, 2013b).

L'approccio seguito per gestire le problematiche connesse alla presenza di cavità sotterranee nel territorio di Altamura, potrebbe rappresentare il punto di partenza per una fruizione turistica delle cave antropiche, dopo che ne sia stata accertata la stabilità (Fiore *et al.*, 2011).

5. VALORIZZAZIONE DEI PERCORSI DELL'INDUSTRIA ESTRATTIVA

Un paesaggio industriale legato all'attività estrattiva caratterizzato da accorgimenti ingegnosi descritti nelle pendenze del pavimento, nelle intercapedini per l'alloggiamento delle impalcature, dalle tracce dei sistemi di trasporto, l'uso di semplici attrezzi, sono solo alcuni degli elementi connessi alla faticosa vita del cavatore e alle attività praticate in galleria, componenti essenziali di un patrimonio di conoscenze che andrebbe recuperato. La presenza di aree in cui il sistema delle cave sotterranee non è stato intaccato da processi di urbanizzazione potrebbe essere oggetto di valorizzazione identificato come un fattore specifico in grado di determinare l'affermarsi di un recupero consapevole che miri allo sviluppo dell'intero territorio.

Le cave, giacimenti di ricchezza che hanno dato lustro alle imponenti costruzioni dall'elevato valore architettonico, oggi cadute in disuso, potrebbero essere generatori di altra cultura e contenitori per la comunità altamurana. La presenza di alcune porzioni di gallerie ben conservate, collocate nella

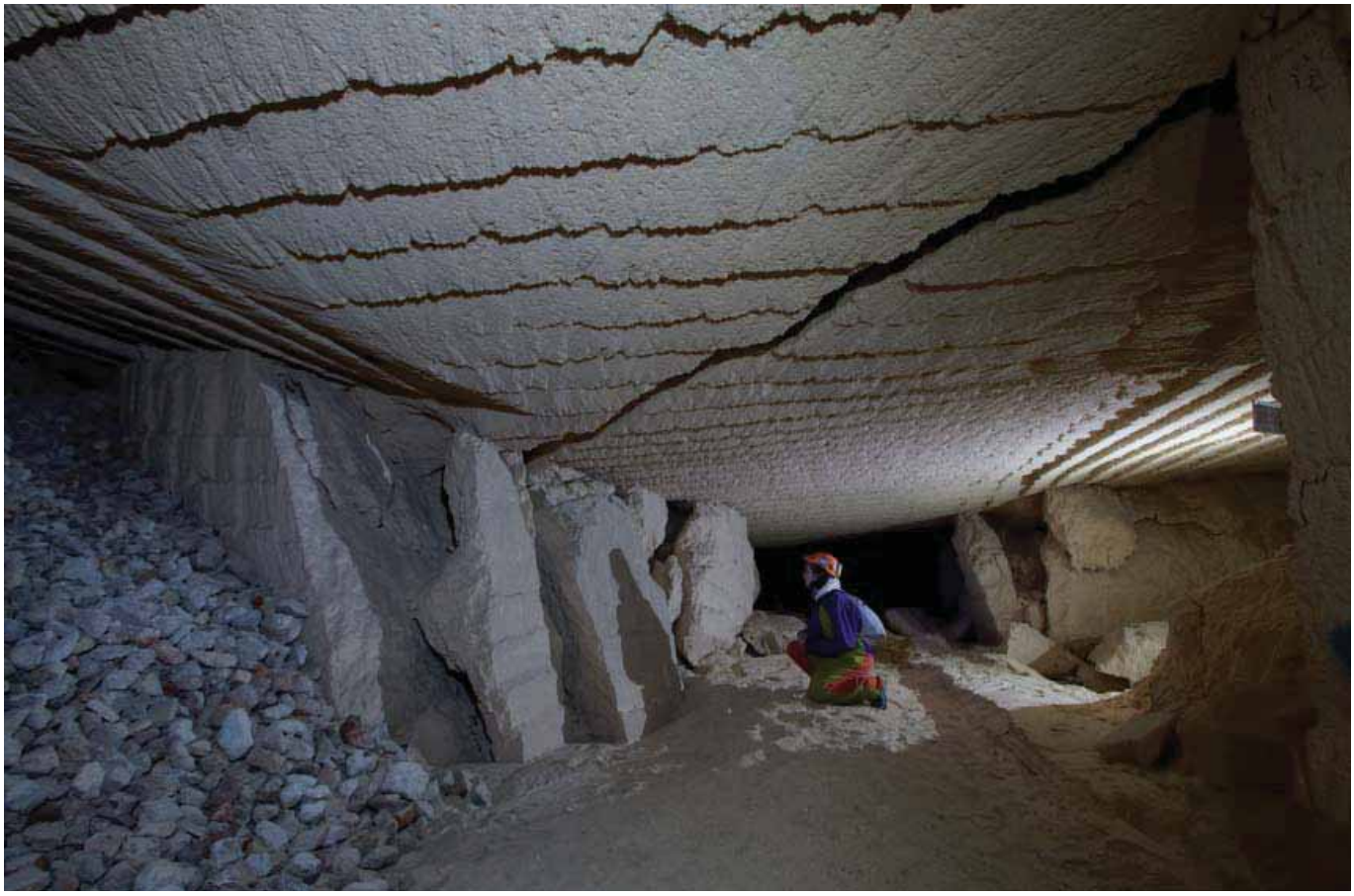


Figura 5 – Gravi fenomeni di dissesto di alcune gallerie

periferia ad est dell'abitato di Altamura, in località San Tommaso (figure 6, 7 e 8), permette di constatare quanto le cave ipogee rappresentino un'importante risorsa da tutelare e recuperare come testimonianza di un patrimonio culturale da inserire tra le aree di interesse turistico (Ponzetti, 1941).

A seguito dell'attenta ricerca condotta in circa 15 anni di ricognizioni e rilevo ad opera del CARS, l'analisi delle caratteristiche geologiche, paleontologiche, idrogeologiche, fisico-meccaniche e lo studio archeologico-industriale del sito, rappresentano un interessante connubio da elaborare al fine di poter creare uno straordinario strumento scientifico e didattico che possa fare da corredo ad un percorso di fruizione. La proposta si può tradurre nella stesura di un piano di valorizzazione che metta in rete tutte le cave inserite nel Catasto e i siti individuati di recente, ipotizzando la realizzazione di un Parco-museo, un itinerario della cultura della pietra (Labalestra, 2014), realizzando un progetto che garantisca la conservazione dei siti e allo stesso tempo li renda accessibili alla collettività nell'ambito di un turismo responsabile e ricercato.

Si tratta di un processo di valorizzazione che mira a porre l'attenzione sulla testimonianza di un'identità naturale, sociale ed artistica presente nel territorio legata verosimilmente alla pietra e al paesaggio di cava. Infatti l'immenso patrimonio custodisce degli aspetti della biospeleologia che nella rete caveale si sono stratificati, un particolare ecosistema importante per l'educazione scientifica e didattica; un patrimonio storico-artistico impresso nelle facciate di chiese, palazzi, abitazioni e tutta la cultura materiale che ruota attorno alla pietra, ha avuto origine nelle cave segnando un importante aspetto identitario per l'economia della comunità.

Infatti l'intensa attività estrattiva è documentata anche dalla presenza in città di una corposa confraternita detta dei "tufaruli" (corporazione di lavoratori dediti all'estrazione dei conci di calcarenite) una delle più importanti categorie di lavoratori che aveva realizzato e teneva in custodia una seicen-



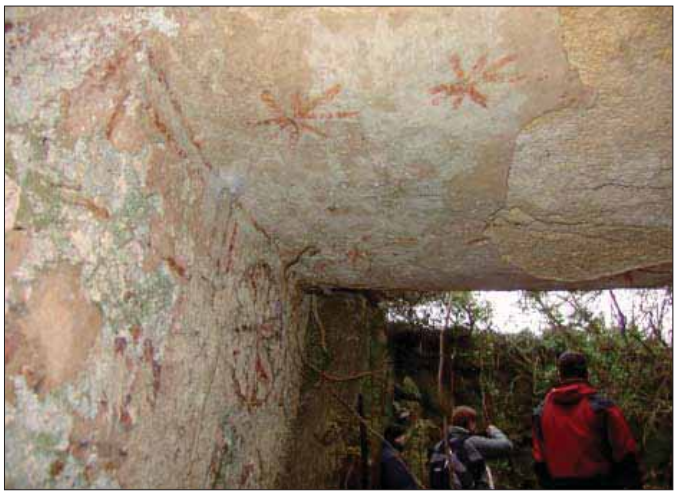


Figura 6 e 7 – Tratti di gallerie in condizioni stabili



Figura 8 – Trullo in località San Tommaso

tesca cappella votiva extraurbana (Berloco, 1989).

I numerosi siti ipogei raccontano la storia dell'attività estrattiva nelle trame di linee incise sulle pareti delle gallerie, ma pure numerose sono le miniere a cielo aperto, ben visibili segni della pratica dell'estrazione della roccia.

La descrizione delle attuali modalità estrattive va di pari passo raccontata con la descrizione degli antichi sistemi di coltivazione della calcarenite in sotterraneo. Nel passato non sempre sono state rispettate le regole costruttive e ciò ha contribuito ad indebolire notevolmente le strutture sotterranee, determinando il susseguirsi di numerosi crolli, verificatisi soprattutto nei periodi di intensa piovosità, a cui si aggiungono i processi di inquinamento che vedono l'utilizzazione delle cavità come discariche abusive di rifiuti di ogni genere. Nella visione di una possibile fruizione delle miniere per l'estrazione del materiale lapideo, sarebbe necessaria un'attenta valutazione della stabilità dei luoghi. Accanto al recente censimento, di tutte le cave ipogee, sarebbe necessario pianificare un lavoro di catalogazione specifica, una schedatura puntuale composta da una serie di voci tra cui i dati storici, la documentazione d'archivio, la descrizione dello stato di conservazione; è, infatti, auspicabile utilizzare la scheda di catalogazione specifica per il patrimonio archeoindustriale, uno strumento particolarmente utile perché rappresenta il primo atto per la salvaguardia, un lavoro puntuale necessario per gettare le basi per avviare un processo di valorizzazione (Tognarini, Nesti 2003). Si tratta di azioni che potrebbero rappresentare un punto di partenza per poter creare un prodotto multimediale didattico-divulgativo dotato di ricostruzione virtuale dell'ambiente di lavoro: quindi un patrimonio da salvaguardare e un'archeologia mineraria da fruire.

BIBLIOGRAFIA

Andriani G. F. & Tropeano M. (2009), *Modello geologico e coltivazione di materiali naturali da costruzione: l'esempio delle calcareniti Pliopleistoceniche a Matera*. Rend. Online Soc. Geol. It., 6, 15-16.

Berardi C., Buonamassa G., Denora A., Fiore A., Lorusso G., Pepe P., Walsh N., Zaccaria V. (2009), *Attività di censimento per la pianificazione nelle aree interessate da cavità antropiche. Il Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) di Altamura (BA).* ISPRA. Servizio Geologico d'Italia.

Berloco T. (1989), *Le chiese di Altamura (XXX-XLV) Montecalvario*, in *Altamura-Rivista storica/Bollettino dell'ABMC*, Cassamo Murge, p.158.

C.R.S.E.C. – Centro Regionale Servizi Educativi Culturali (2004), *Insediamenti rupestri di Altamura.*

Del Prete S., Parise M. (2007), *L'influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali.* Opera Ipogea, n. 2, pp. 3-16.

Fiore A., Martimucci V., Parise M. (2011), *Nuove opportunità per la conservazione e valorizzazione delle cavità artificiali in Puglia.* Opera Ipogea 1/2: 187-192.

Labalestra M.(2014) *Recupero Sito Carsico in Parco Madonna delle Grazie di Palagianello*, Convegno "Verso il 2015 Anno Europeo del Patrimonio Industriale e Tecnico", San Cesario di Lecce, 6 dicembre 2014.

Martimucci V., Ragone G., Denora A., Cristallo F. (2007), *Le cave di tufo di Altamura-prima relazione e notizie sulle esplorazioni,* Spelaion07, pp 91-102.

Parise M. (2011),*Alcune considerazioni sulle cave sotterranee in Puglia e sulle relative problematiche*, Opera Ipogea, n. 1, pp 217-224.

Pentimone N. (2009), *Rischio di crollo di cave in sotterraneo nel territorio di Altamura.* Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali. Università degli Studi di Bari "Aldo Moro", Bari.

Pepe P., Pentimone N., Garziano G., Martimucci V. & Parise M. (2013a), *Lessons learned from occurrence of sinkholes related to man-made cavities in a town of southern Italy.* In: Land L., Doctor D.H. & Stephenson B. (Eds.), Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Carlsbad (New Mexico, USA), 6-10 May 2013, National Cave and Karst Research Institute, p. 393-401.

Pepe P., Pentimone N., Garziano G., Parise M., Martimucci V., Lorusso G. (2013b), *Le cave sotterranee di Altamura. Fasi operative per la mappatura e per il supporto alle attività di bonifica,* Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n.2, Anno XXI, pp. 33-40.

Ponzetti F. M. (1941), *Cripte ed eremi medievali di Altamura*, Japigia, XII, pp. 77-111.

Tognarini I., Nesti A. (2003), *Archeologia Industriale. L'oggetto, i metodi, le figure professionali*, Roma, Carocci.

Cavità sotterranee di origine antropica in Francia

Underground cavities of anthropic origin in France

Maria Luisa Felici
Geologa

Parole chiave (key words): cavità artificiale (*artificial cavity*), Francia (*France*), Bacino Parigino (*Parisian Basin*), rischi (*risks*), calcari (*limestones*), gesso (*gypsum*), cave (*caves*)

Analogamente a quanto è accaduto in Italia, la Francia ha avuto un passato ricco di storia, di cui le prime tracce risalgono ai tempi del Paleolitico. Le successive fasi evolutive, le necessità legate alla sopravvivenza, le invasioni da parte di altri popoli hanno portato man mano le popolazioni ad utilizzare le risorse che il territorio metteva a disposizione.

Oltre alle cavità di origine naturale, in cui hanno trovato rifugio piccoli gruppi di persone fin dal Paleolitico (vedi grotta di Chavet-Pont'Arc nell'Ardèche, grotta di Lascaux in Dordogne-Perigord e molte altre), le cavità di origine antropica furono realizzate per i motivi più vari: magazzini per conservare il vino e i prodotti alimentari, pozzi, gallerie, rifugi, luoghi di culto, cimiteri ma soprattutto per ricavare dalle cave materiale da costruzione, da utilizzare per le prime edificazioni, e dalle miniere materie prime per l'uso metallurgico o combustibile. Proprio per questo motivo, le cavità che ne sono derivate hanno posto e pongono tuttora non pochi problemi alla sicurezza di città, edifici, infrastrutture di vario tipo (strade, ferrovie, tunnel ferroviari e di servizio, etc.) a causa dei possibili risentimenti a livello superficiale o per gli sprofondamenti del terreno.

Considerando i danni causati da questa situazione, già da alcuni anni in Francia si sta procedendo alla raccolta dei dati riguardanti le cavità di origine naturale e di origine antropica.

Questi compiti sono assegnati a soggetti differenti: il *Bureau de Recherches G*éologiques *et Minières* (BRGM) si occupa del censimento delle cavità di origine naturale e delle cave, mentre i *Mairies* (i Municipi comunali) raccolgono i dati delle altre tipologie di cavità di origine antropica. All'*Inspection générale des Carrières* è invece attribuito il compito di censire le cavità presenti in determinati dipartimenti francesi e soprattutto nella capitale, Parigi.

Dal 2001 il *Bureau de Recherches Géologiques et Minières* gestisce e sviluppa la base dati *BDCavité* con il sostegno del *Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable*, del *Ministère de l'Education Nationale*, dell'*Enseignement Supérieur et de la Recherche*, in collaborazione con l'IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Reseaux*), la *Fédération Française de Spéléologie*, e l'INERIS (*Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*).

La *BDCavité* si integra pienamente nell'azione di prevenzione dei rischi naturali, permettendo la raccolta, l'analisi e la restituzione delle informazioni di base necessarie alla conoscenza e allo studio preventivo dei fenomeni legati alla presenza di cavità.

La base dati *BDCavité* memorizza in maniera omogenea l'insieme delle informazioni disponibili in Francia e contribuisce a diffondere l'importante ruolo dello Stato in materia di prevenzione dei rischi.

Il BRGM sviluppa e gestisce anche altre banche dati che integrano i dati della *BDCavité*, come ad esempio la BSS (*Banque du Sous-Sol*) la quale raccoglie i dati concernenti sondaggi, pozzi, sorgenti, ovvero oltre 700.000 opere e lavori realizzati in più di un secolo, 2 milioni di documenti in formato digitale, uniti a profili geologici, di cui il 20% verificato da un esperto del settore.

Tra l'altro il codice delle miniere francese impone la dichiarazione di tutte le opere sotterranee effettuate a più di 10 metri di profondità mentre dal 2003 il codice ambientale prevede che i rapporti dei lavori svolti a motivo di ricerca, sorveglianza o prelievo di acque sotterranee devono essere accompagnati da un numero della BSS, che identifica informazioni a carattere amministrativo e geologico, come proprietario del terreno, localizzazione, descrizione degli strati geologici, documentali digitali, attrezzatura tecnica utilizzata, e altro.

Altre banche dati sviluppate e gestite dal BRGM concernenti la prevenzione di rischi naturali riguardano le acque sotterranee (BSSEAU), gli antichi siti industriali (BASIAS), i movimenti del terreno (BDMvt), oltre alla cartografia mirata all'esposizione delle zone soggette a fenomeni di ritiro/rigonfiamento delle argille.

Tutte le informazioni delle diverse banche dati sono accessibili tramite applicazioni web e mobile.

I RISCHI DA CAVITÀ ANTROPICHE DI PARIGI

Come tutte le città del mondo, la capitale francese è esposta a numerosi rischi di origine naturale (terremoto, inondazione, siccità, ecc.), tecnologici (trasporti, nucleare, ecc.), sanitari (epidemie, inquinamento atmosferico, ecc.), e altri.

Ai fini della prevenzione dei rischi, già da alcuni anni la città di Parigi è sottoposta ad un *Plan communal de sauvegarde*, predisposto congiuntamente da *Préfecture de Police* e *Mairie de Paris*, in cui sono elencati uno per uno i rischi a cui la città può essere soggetta ma soprattutto, essendo il documento indirizzato alla popolazione, fornisce i modi per fronteggiare tali eventualità, mettendo in risalto le azioni da svolgere in caso si verifichi uno degli eventi elencati.

Per ciò che concerne la presenza di cavità, occorre ricordare che il sottosuolo parigino presenta diversi tipi litologici il cui sfruttamento nel corso del tempo ha portato allo sviluppo di cavità sotterranee (*Fig.* 1).

Dal punto di vista geologico l'area parigina si è sviluppata in un ampio bacino sedimentario (*Bassin Parisien*) su un substrato di rocce cristalline antiche. Sabbie, argille, calcari, marne, selce hanno man mano colmato questa ampia depressione depositandosi in strati alternati seguendo le diverse ingressioni e regressioni marine, dal Trias fino alla fine dell'Eocene. La regressione delle acque ha generato evaporiti di cui il gesso e i calcari sono i caratteri litologici più salienti.

La presenza di lenti di gesso, suscettibili di dissoluzione, ha portato alla generazione di cavità sotterranee di origine naturale, sfruttate nel tempo localmente come rifugi, magazzini, cave. Le condizioni meteorologiche possono amplificare il problema e portare quindi ad una manifestazione in superficie di tali cavità.

Come si vede dalla *Fig.* 1, il territorio della città di Parigi può essere schematicamente diviso in due parti, divise tra loro dal corso del fiume Senna, il quale, nel corso del tempo

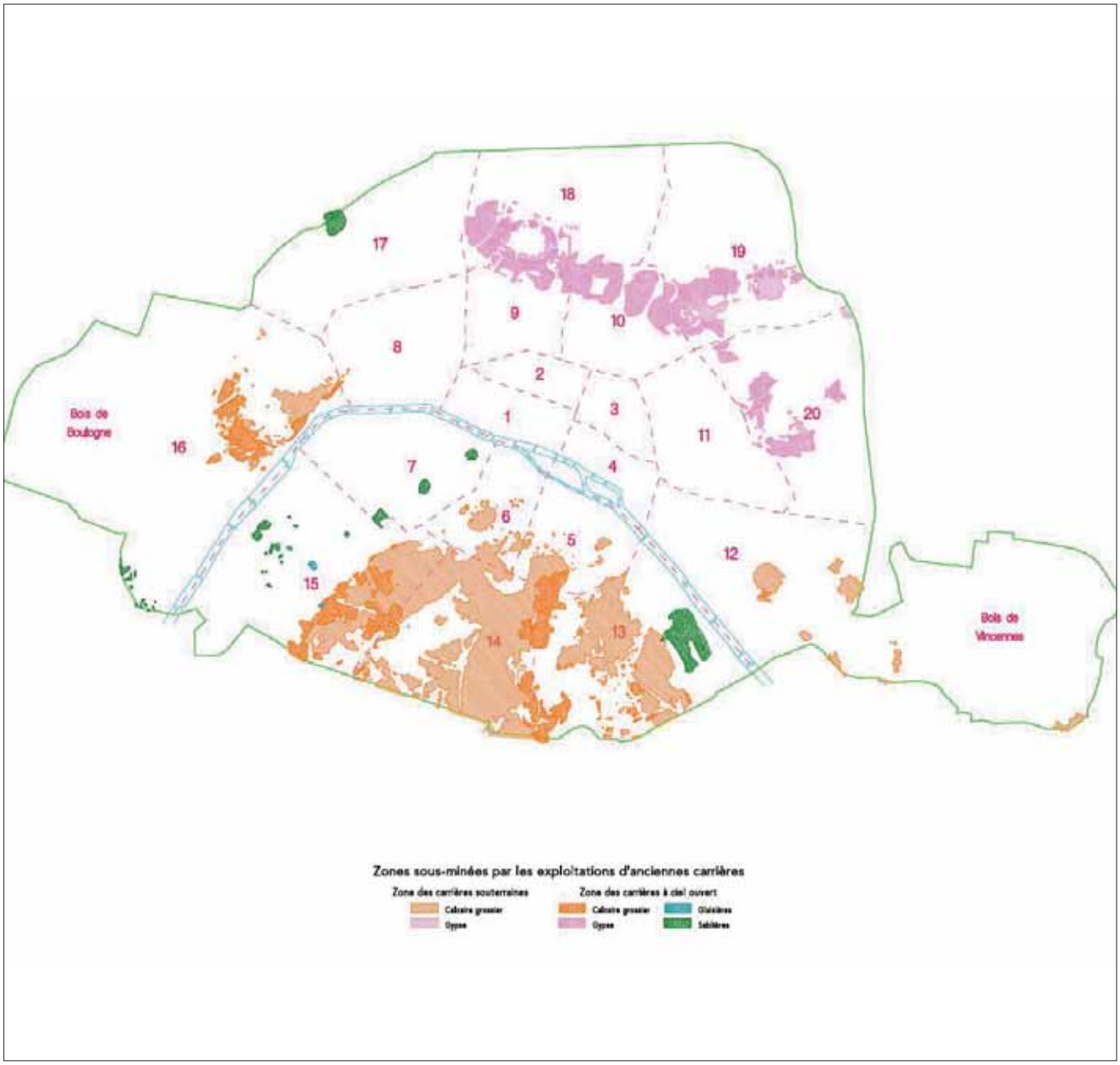


Figura 1 – Mappa sintetica delle aree di sfruttamento delle cave di Parigi.
Fonte : Préfecture de Paris, Mairie de Paris, Plan de sauvegarde communal, 2015

ha lasciato estese coltri di alluvioni fluviali. La prima parte, in alto, si caratterizza per la presenza di cave di gesso, scavate nei secoli scorsi all'aperto; la seconda parte, in basso, vede principalmente la presenza di cave sotterranee di calcare grossolano, anch'esse oramai in disuso da molto tempo.

Le cave di calcare sono state utilizzate per ospitare catacombe e cimiteri sotterranei che si estendono al di sotto della pavimentazione stradale, traccia di un passato tuttora in gran parte sconosciuto.

Si stima che esse rappresentino circa il 40% della superficie parigina, oltre 3000 ettari in sotterraneo in alternanza tra vuoti e gallerie. I vuoti sono rappresentati dalle cave di calcare sfruttate in sotterraneo a partire dal XII secolo e che, inutilizzate, sono state successivamente utilizzate per il deposito dei resti mortali dei defunti provenienti da alcuni cimiteri.

La costruzione di una imponente rete metropolitana (14 linee con diverse diramazioni) e ferroviaria (locale e nazionale), in sotterraneo ed in elevazione, ha portato alla risoluzione dei numerosi problemi tecnici che si sono via via presentati e ha richiesto la necessità di escavazione di numerosi tunnel di servizio

GLI ENTI DI CONTROLLO

Il sottosuolo parigino è posto sotto il controllo dell'*Inspection Générale des Carrières* (IGC), istituito nel 1777 con il nome di *Service des carrières du département de la Seine*. al quale è assegnato il compito di monitorare gli eventuali rischi. Tra i suoi compiti, l'IGC realizza e aggiorna un atlante delle antiche cave sotterranee di Parigi e dei dipartimenti di Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis e Val-de-Marne. Questo atlante espone con precisione i siti delle antiche cave, la profondità dei vuoti, gli sprofondamenti del terreno e i diversi accessi, oltre ad informazioni su consolidamenti effettuati, muri di sostegno, pozzi cementificati e quanto altro possa essere di utilità.

L'*Inspection Générale des Carrières* estende la sua attività di sorveglianza anche nell'Yveslines della Val d'Oise e dell'Essonne.

Il *Plan Local d'Urbanisme* (PLU) della città di Parigi impone che le costruzioni e le modifiche degli immobili in zone sensibili a rischi di cavità siano sottoposte a condizioni speciali definite dall'IGC. Il sottosuolo di spazi pubblici è oggetto di visite regolari di sorveglianza e di lavori di consolidamento qualora si rendessero necessari.

BIBLIOGRAFIA

Préfecture de Paris, Mairie de Paris, *Plan de sauvegarde communal*, 2015.
Mairie de Paris, *Les risques majeurs à Paris*, 2015.

SESSIONE B

ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ TERRITORIALE

Ricostruzione del modello tridimensionale di una cavità sotterranea nel Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo (Napoli) mediante l'utilizzo di laser scanner manuale

3D reconstruction through a lightweight hand-held laser scanner of an underground cavity located in the SS. Marcellino and Festo Monumental Complex (Napoli, Italy)

Vincenzo Allocca[1], Anna Claudia Angrisani[1], Silvio Coda[1], Maria Danzi[2], Pantaleone De Vita[1], Umberto Del Vecchio[2], Diego Di Martire[1], Domenico Massa[3], Gianluca Minin[3], Giosafatte Nocerino[3], Domenico Calcaterra[1]

(1) DiSTAR, Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, Università degli Studi di Napoli Federico II

(2) GEOfotogrammetrica s.r.l., Napoli

(3) INGEO s.r.l., Napoli

E-mail:

Parole chiave (*key words*): Cavità sotterranee (*Underground cavities*), Tufo Giallo Napoletano (*Neapolitan Yellow Tuff*), laser-scanner manuale (*lightweight hand-held laser scanner*)

RIASSUNTO

Oggetto del presente lavoro è la ricostruzione 3D di un tratto di cavità inesplorato, che si sviluppa nel sottosuolo del Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo, nel Centro Storico di Napoli. Il rilievo, eseguito con un *laser-scanner* manuale ed elaborato con *software* specifici, ha portato, oltre che alla mappatura del sistema di cavità presenti, anche ad una verifica sulle condizioni di stabilità delle stesse.

INTRODUZIONE

Il sottosuolo di Napoli è caratterizzato dalla presenza di una fitta ed articolata rete di cavità sotterranee, cunicoli e cisterne scavate prevalentemente all'interno della Formazione del Tufo Giallo Napoletano (TGN) (Nicotera & Lucini, 1967; Albertini *et al.*, 1988; AA.VV., 2000; Evangelista *et al.*, 2002; Lombardi *et al.*, 2010; Basso *et al.*, 2013). Il TGN, infatti, alla luce delle sue buone caratteristiche di estraibilità e lavorabilità, è stato sfruttato sin dall'insediamento greco-romano (VIII secolo a.C.) per fornire pietra da costruzione per la nascita e la successiva espansione della città (Colella *et al.*, 2013).

Nel corso dei secoli, lo sviluppo del sistema di cavità sotterranee di Napoli è stato sempre più legato all'esigenza di dotare la città di fognature e di un approvvigionamento idrico commisurato alla sua crescente espansione. Sono stati, infatti, realizzati nel sottosuolo cittadino tre diversi acquedotti: l'acquedotto della Bolla o della Volla, di probabile età greca, l'acquedotto Claudio, di epoca augustea (I sec d.C.) e l'acquedotto del Carmignano (1629) (Cangiano, 1843). In origine tali acquedotti, in particolare il Bolla, non avevano cisterne di grande volume. Nel corso dei secoli, tuttavia, le cisterne furono ampliate, non solo per aumentare le riserve idriche sotto i fabbricati, ma soprattutto per cavare il tufo occorrente all'edificazione di nuovi edifici e/o per edificare sopraelevazioni (Baldi, 1998).

Questo intricato sistema di cisterne e cunicoli sotterranei era ancora percorribile fino al 1940, data di entrata in guerra dell'Italia, allorché parte di tali ambienti fu utilizzata come rifugio antiaereo durante tale conflitto. Ulteriori gallerie sono state scavate nella formazione del TGN a partire da inizio '900 e fino ad anni recenti per la realizzazione di funicolari, gallerie stradali di transito (Galleria Laziale, Galleria Vittoria) e linee ferroviarie metropolitane utili a collegare il centro cittadino con le aree di nuova urbanizzazione.

È in questo contesto così articolato che si colloca la cavità oggetto del presente studio, la cui esplorazione ha mostrato i successivi utilizzi della stessa nelle diverse epoche storiche e portato alla luce gli ingressi a cunicoli obliterati da detriti di varia natura, che, pertanto, si suppone possano proseguire verso nuovi ambienti ad oggi inesplorati.

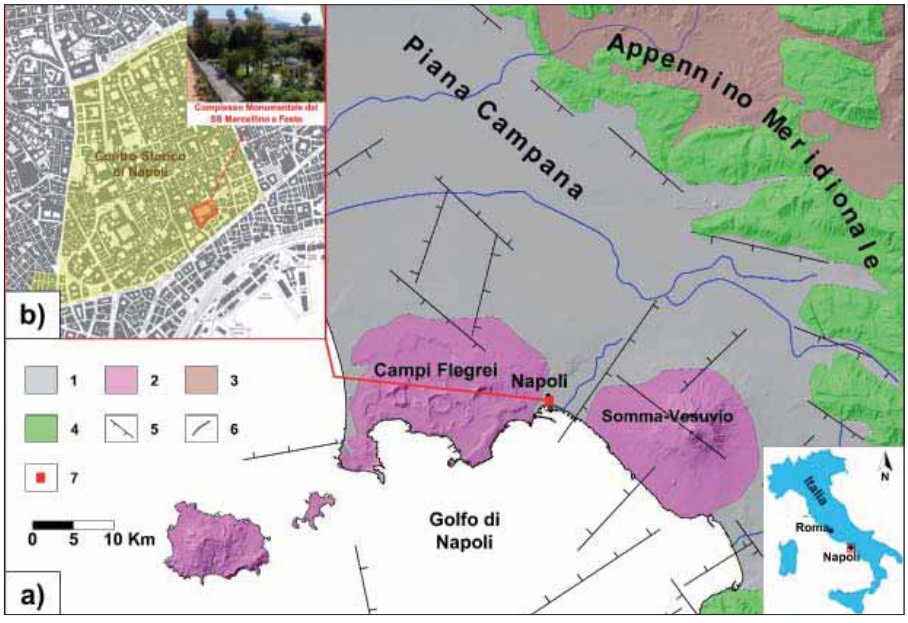


Figura 1 – a) Carta geologica della Piana Campana (ISPRA, 2016 modificato) e b) ubicazione dell'area di studio: 1) depositi epiclastici quaternari con intercalazioni di depositi vulcanici; 2) prodotti vulcanici quaternari; 3) depositi sin- e post-orogeni (Miocene-Pliocene); 4) unità carbonatiche appenniniche (Trias sup. – Miocene); 5) faglia normale (Orsi et al., *1996 modificato); 6) reticolo idrografico principale; 7) area di studio*

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La città di Napoli è posta al centro della Piana Campana ed è compresa tra il distretto vulcanico dei Campi Flegrei ad ovest e l'edificio vulcanico del Somma-Vesuvio ad est (*Fig.* 1a). Nonostante ciò, l'agglomerato urbano, ed in particolare il Centro Storico della città (*Fig.* 1b), si imposta per la quasi totalità su terreni la cui genesi è strettamente legata, in larga prevalenza, all'attività vulcanica dei Campi Flegrei, che ha preso inizio circa 50 ka fa. Le ceneri del Vesuvio, infatti, qualora presenti, difficilmente si trovano conservate in strati ancora riconoscibili (Scherillo & Franco, 1967).

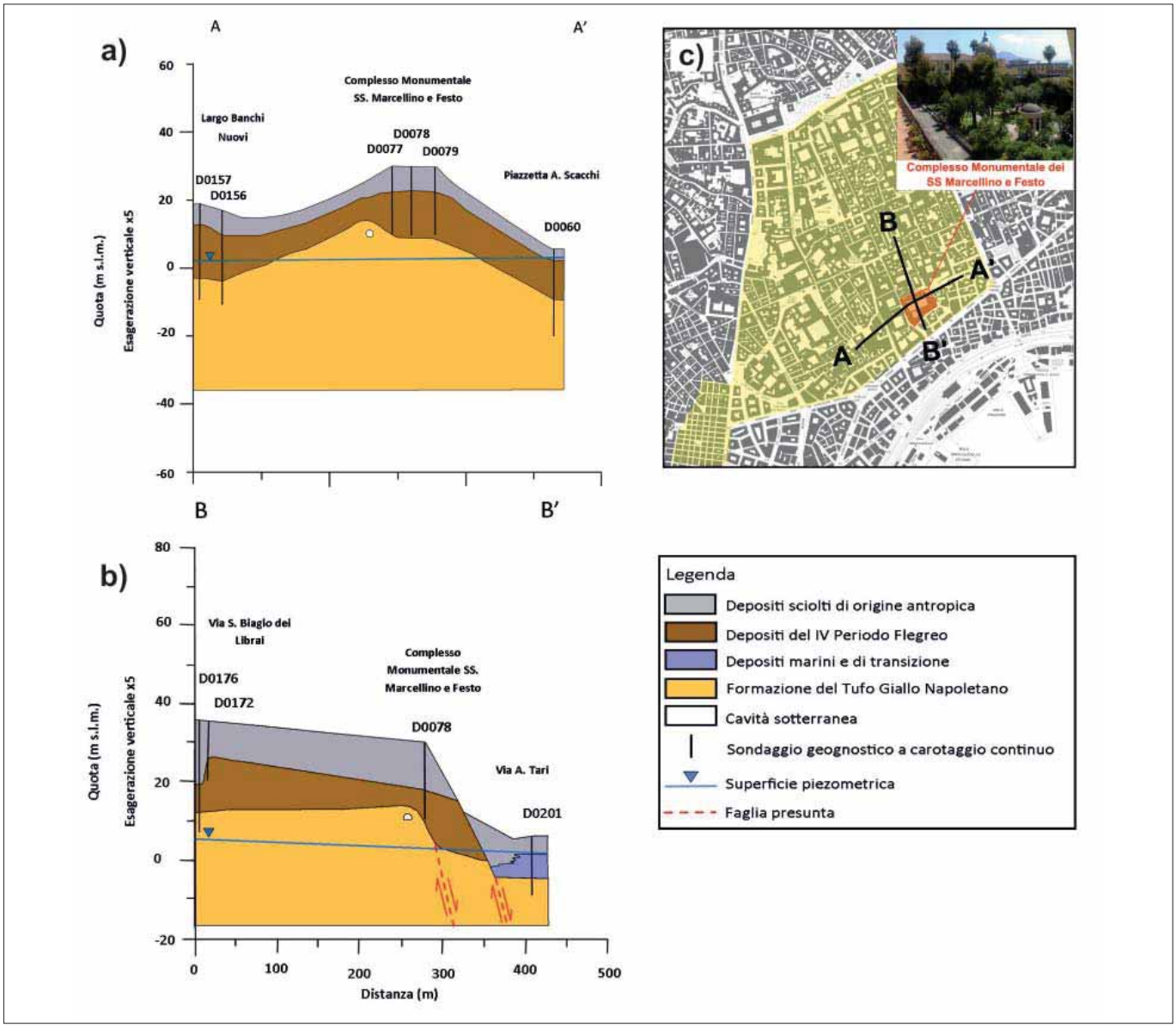


Figura 2 – Sezioni geologiche attraverso il Centro Storico di Napoli (a, b) e relativa ubicazione (c)

Le conoscenze del sottosuolo del Centro Storico della città di Napoli sono ad oggi estremamente dettagliate grazie anche ad una recente ricerca (Progetto Databenc-SNECS) che ha consentito la ricostruzione del modello geologico tridimensionale dello stesso attraverso la raccolta di oltre 290 sondaggi geognostici ricadenti al suo interno.

Più nel dettaglio, il sottosuolo del Centro Storico di Napoli è costituito, nella sua parte più alta, da depositi sciolti di origine antropica e terreni di riporto, spesso inglobanti reperti archeologici e resti di opere murarie e di piani pavimentali realizzati in epoca storica. Seguono depositi in posto e rimaneggiati ascrivibili all'attività recente dei Campi Flegrei e la Formazione del *TGN* (*Fig.* 2). Tale Formazione si presenta nelle sue tre tipiche facies: sciolta, dal colore grigio (comunemente chiamata *Pozzolana*); semi-litoide, di colore grigio scuro, talora a struttura pisolitica (*Cappellaccio*); e litoide, costituita da un tufo vulcanico per lo più giallastro, talora verdastro (Nicotera & Lucini, 1967), a composizione alcalitrachitica (Caliro *et al.*, 1997).



Figura 3 – Sviluppo in pianta della cavità sotterranea presente nel sottosuolo del Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo (rilievo effettuato dalla Ingeo S.r.l.)

Al di sotto del substrato tufaceo sono presenti depositi sciolti e litoidi legati all'attività dei Campi Flegrei antecedente l'eruzione del TGN (i cosiddetti Tufi Antichi, i Tufi Biancastri, depositi ascrivibili all'eruzione dell'Ignimbrite Campana e del Piperno, depositi piroclastici sciolti e brecce trachitiche), ma anche argille, sabbie marine e paleosuoli che indicano una continua variazione di equilibrio

tra l'ambiente continentale e quello marino (Amato *et al*., 2009).

Un sondaggio geognostico a carotaggio continuo della profondità di 120 m realizzato nell'ambito del progetto Databenc-Snecs all'interno del Chiostro del Complesso dei SS. Marcellino e Festo ha confermato l'assetto geologico precedentemente descritto anche per il sottosuolo dell'area oggetto di studio. In particolare la facies litoide del TGN, nella quale si imposta la cavità in oggetto, è stata rinvenuta al di sotto di materiali di riporto e depositi vulcanici rimaneggiati ad una profondità di circa 13 m dal p.c. e presenta uno spessore di circa 70 m. A seguire sono stati rinvenuti dapprima depositi ascrivibili ai Tufi Biancastri, subito sotto depositi piroclastici antichi perlopiù rimaneggiati e, infine, sabbie marine antiche.

RILIEVO TOPOGRAFICO DELLA CAVITÀ E DEI CUNICOLI SOTTERRANEI

Il rilievo topografico delle volte e delle pareti in tufo che costituiscono il sistema di cavità presenti nel sottosuolo del complesso monumentale dei SS. Marcellino e Festo sono stati effettuati mediante l'impego di un *laser scanner* manuale per rilievi *indoor* (*lightweight hand-held laser scanner* Modello ZEB1, prodotto dalla GeoSLAM). Questo tipo di strumentazione è dotato di una testina *laser* rotante capace di catturare più di 40.000 pt/sec con risoluzione e precisione centimetrica; inoltre sfrutta la tecnologia SLAM (*Simultaneous Localisation And Mapping*), nata recentemente nel campo della robotica, che consente l'acquisizione in continuo di scansioni dell'ambiente circostante e contemporaneamente di mappare lo spostamento. Nell'utilizzo di tali tecniche, rispetto ad una convenzionale stazione fissa, la risoluzione e il dettaglio sono minori, tuttavia presenta notevoli vantaggi in quanto permette in tempi molto ridotti di effettuare un rilievo 3D completo e continuo anche in condizioni ambientali poco favorevoli.

Alcuni dei risultati relativi alla mappatura e alla renderizzazione in 3D degli ambienti sotterranei costituenti la cavità, realizzate grazie alla suddetta tecnologia, sono riportati rispettivamente nelle *Figg.* 3 e 4.

In particolare, la cavità sotterranea, in gran parte ubicata al di sotto del settore Nord del Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo e alla quale si accede mediante un pozzo posto al primo piano seminterrato del Complesso (*Fig.* 5a), è molto articolata. Essa presenta sei pozzi, alcuni dei quali ingombri di detriti ed è così suddivisa:

i) un livello superiore, coincidente con i rami romani dell'acquedotto della Bolla rivestiti di muratura (*Fig.* 5b) a meno di un breve tratto terminale rimasto probabilmente incompiuto (*Fig.* 5c). Il cunicolo principale presenta una direttrice nord-sud e costituiva la linea di adduzione di acqua che si accumulava all'interno delle tre cisterne rinvenute; quest'ultime presentano una forma stretta ed allungata con lunghezze di 11.00, 12.00 e 14.00 m e larghezze rispettivamente di 1.20 m, 1.70 m e 1.70 m. All'interno delle cisterne sono presenti i pozzi che consentivano il prelievo della acque e dei ponticelli che consentivano la manutenzione delle stesse per tutta la loro lunghezza.
ii) un livello inferiore, costituito dalla cava di epoca romana da cui è stato estratto il TGN per l'edificazione del primo nucleo dell'edificio sovrastante; tale ambiente presenta una superficie di circa 60 mq ed era originariamente legato, tramite uno stretto passaggio nel settore meridionale della camera, ad un altro ambiente dalle caratteristiche presumibilmente similari, rinvenuto totalmente ingombro di detriti.

Più nel dettaglio, il livello del piano dei cunicoli dell'acquedotto è a circa 12 m s.l.m., mentre il piano di calpestio della cava è ubicato a 5,80 m s.l.m.. Gli ambienti, gran parte dei quali ostruiti da rifiuti e materiali di riporto, furono utilizzati, in parte, come ricovero bellico durante la Seconda Guerra Mondiale (*Fig.* 5d), come evidenziato dai residui dell'impianto elettrico in ceramica, impianto idrico e dalle panche in muratura a servizio dei rifugiati. Da quanto emerso dal rilievo statico, inoltre, le volte e le pareti della cavità non presentano fenomeni di distacco, anche se dovrebbero essere monitorate alcune lesioni da schiacciamento nella muratura del cunicolo principale, che potrebbero in futuro generare cedimenti della stessa.

Nel corso dei rilievi, sono infine state evidenziate tre infiltrazioni d'acqua probabilmente legate a perdite nella rete fognaria presente all'esterno del Complesso di San Marcellino.

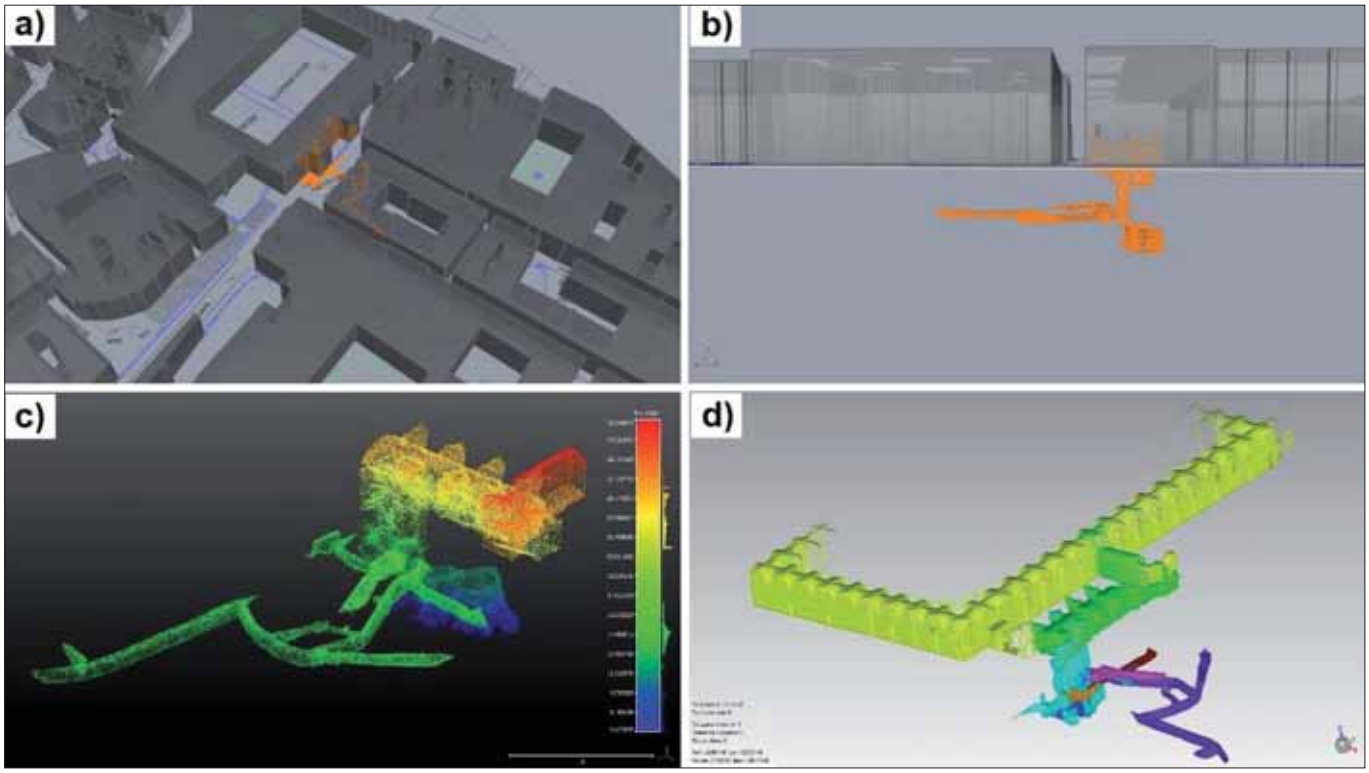


Figura 4 – a) Rappresentazione in pianta della cavità sotterranea presente nel sottosuolo del Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo con rappresentazione in 3D dell'edificato; b) Vista 3D in sezione della cavità sotterranea; c) Rappresentazione dello sviluppo 3D della cavità sotterranea mediante nuvola di punti, ricostruito grazie all'utilizzo di un lightweight hand-held laser scanner. La scala cromatica sulla destra indica la quota dei punti sul livello del mare; d) Rappresentazione 3D della cavità mediante l'utilizzo di mesh colorate

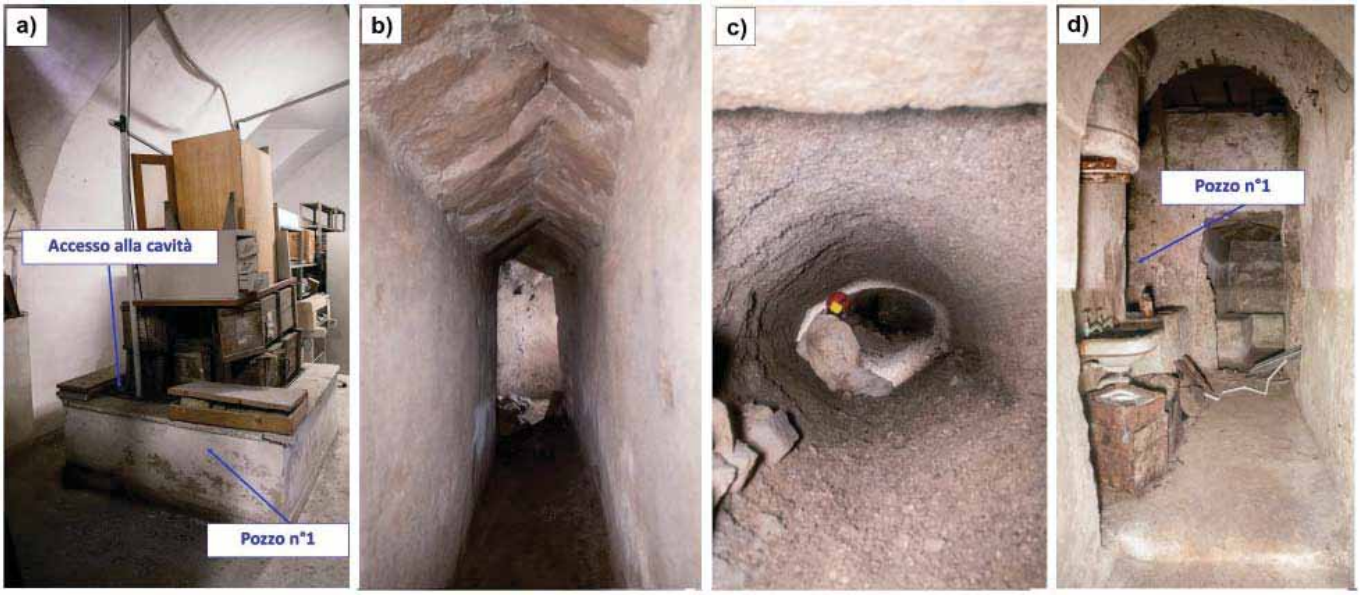


Figura 5 – Alcuni ambienti della cavità presente nel sottosuolo del Complesso dei SS. Marcellino e Festo. a) Pozzo di accesso alla cavità; b) tratto di cunicolo dell'acquedotto della Bolla rivestito in muratura; c) tratto terminale dell'acquedotto, non rivestito; d) piccolo ambiente modificato durante la Seconda Guerra Mondiale con la realizzazione di panche in muratura per i ricoverati e di un impianto idrico

CONCLUSIONI

Grazie all'impiego della tecnologia SLAM è stato possibile eseguire un rilievo 3D di dettaglio ed una verifica statica di un tratto della cavità, sinora inesplorata, presente nel sottosuolo del Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo a Napoli. Le caratteristiche della strumentazione adottata hanno consentito le operazioni di scansione 3D, altresì impossibili con metodologie convenzionali. Tale cavità è solo una delle tante presenti nel sottosuolo della città di Napoli ed, in particolare, del suo Centro Storico; alla luce dei molteplici ambienti e cunicoli obliterati da materiale di riporto, è certo che sia il sistema superiore legato all'acquedotto, sia il sistema inferiore delle cave si sviluppino ulteriormente fino a congiungersi ad altri ambienti sotterranei. Precedentemente ai rilievi realizzati, il sistema caveale era conosciuto solo per i settori più ampi delle cave, mentre i cunicoli e le cisterne dell'acquedotto non erano mai stati esplorati; di nessun ambiente era, tuttavia, nota l'ubicazione plano-altimetrica.

I rilievi hanno consentito, quindi, di ubicare perfettamente le antiche cave di tufo ed i cunicoli e le cisterne dell'acquedotto rispetto al sovrassuolo, individuando, al contempo, la presenza di un sistema caveale inferiore, costituito dalle cave da cui è stato estratto il tufo per realizzare il sovrastante edificio, ed un sistema ad una quota superiore, costituito dai cunicoli e cisterne attribuibili all'acquedotto della Bolla.

La georeferenziazione del sistema caveale ha, di conseguenza, consentito di individuare le probabili cause delle tre infiltrazioni d'acqua rinvenute nel corso dei rilievi, quasi sicuramente legate a perdite nella rete fognaria presente all'esterno del Complesso di San Marcellino.

Le verifiche effettuate sulla stabilità dell'interno sistema caveale hanno evidenziato che non sono presenti fenomeni di distacco nelle volte e nelle pareti degli ambienti; sono state rilevate unicamente alcune lesioni da schiacciamento nella muratura di rivestimento lungo il cunicolo principale che andranno monitorate con il tempo al fine di prevenire fenomeni di dissesto.

I risultati ottenuti da questo studio dimostrano l'efficacia e il notevole potenziale dei *lightweight hand-held laser scanner*, con l'auspicio che nei prossimi anni si possa continuare con l'esplorazione di questa e di altre cavità sotterranee, al fine di realizzare una mappatura di dettaglio della fitta rete di cavità presenti nel sottosuolo della città. Ciò risulterebbe funzionale per una corretta pianificazione territoriale oltre ad avere notevole rilevanza storico-culturale e geologica.

RINGRAZIAMENTI

Ricerca svolta nell'ambito del Progetto PON-03PE_00163_1 SNECS - Social Network delle Entità dei Centri Storici, coordinato dal Distretto ad Alta TecnologiA per i BENi Culturali DATABENC – (Resp. Scientifico DiSTAR: D. Calcaterra).

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (2000), *Napoli - Indagine sullo stato del sottosuolo - quadro organico degli interventi*. Rapporto Aprile 2000, Comune di Napoli.

Albertini V., Baldi A., Bartoli L., Collini F., Esposito C., Guerra V., Miraglino P., Schiattarella F., Vallario A. (1988), *Le cavità sotterranee del napoletano: pericolosità e possibili utilizzazioni*. Geol. Tec., 3: 54-63.

Amato L., Carsana V., Cinque A., Di Donato V., Giampaola D., Guastaferro C., Irollo G., Morhange C., Perriello Zampelli S., Romano P., Ruello M.R., Russo Ermolli E. (2009), *Ricostruzioni morfoevolutive nel territorio di Napoli. L'evoluzione tardo pleistocenica-olocenica e le linee di riva di epoca storica*. Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography, 112: 23-31.

Baldi A. (1999), *Variante al P.R.G. di Napoli: centro storico, zona orientale, zona nord-occidentale*. Relazione geologica, Comune di Napoli.

Basso N., Ciotoli G., Finoia M.G., Guarino P.M., Miraglino P., Nisio S. (2013), Suscettibilità ai fenomeni di sinkholes antropogenici nel territorio di Napoli. Mem. Descr. Carta geol. d'It. XCIII, 73-104.

Caliro S., Franzese G., Galateri C., Galateri G., Imperato M., Milia A., Monetti V., Nardi G., Ortolani F., Pagliuca S., Putignano M.L., Stanzione D., Toccaceli R. (1997), *Area urbana di Napoli: principali caratteristiche geologiche stratigrafiche ed ambientali*. In: Atti del convegno "Geologia delle grandi aree urbane", Bologna, 4-5 novembre 1997, 119-144.

Cangiano L. (1843), *Su le acque pubbliche potabili della città di Napoli, e de' modi di aumentarle*. Napoli, 1843.

Colella A., Calcaterra D., Cappelletti P., Di Benedetto C., Langella A., Papa L., Perrotta A., Scarpati G., De Gennaro M. (2013), *Il Tufo Giallo Napoletano*. In: de Gennaro M., Calcaterra D., Langella A. (eds.) *Le Pietre Storiche della Campania - dall'oblio alla riscoperta*. Luciano Ed., Napoli, 2013, 129-154.

Evangelista A., Flora A., Lirer F., De Sanctis F., Lombardi G. (2002), Studi ed interventi per la tutela di un patrimonio sotterraneo: l'esempio delle cavità di Napoli. Associazione Geotecnica Italiana, XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, L'Aquila 11-14 Settembre 2002, 579-588.

ISPRA (2016), *Note illustrative della Carta Geologia d'Italia alla scala 1:50.000 (foglio 446-447 Napoli)*. Litografia Artistica Cartografica, Firenze, 2016.

Lombardi G., Feola A., Miraglino P. (2010), Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico della città di Napoli. Geologi, 28: 7-17.

Nicotera P., Lucini P. (1967), *La costituzione geologica del sottosuolo di Napoli nei riguardi dei problemi*. Atti dell'VIII Convegno di Geotecnica.

Orsi G., Di Vito M., De Vita S. (1996), *The restless, resurgent Campi Flegrei Nested Caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 74:179-214.

Scherillo A., Franco E. (1967), *Introduzione alla carta stratigrafica del suolo di Napoli*. Atti Acc. Pontaniana, Napoli, 16: 27-37.

Le acque nelle cavità sotterranee di Roma

The water in the underground cavities of Rome

Pio Bersani
Ricercatore autonomo
E-mail: piobersani@tiscali.it

Stefania Nisio
ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico Nazionale
E-mail: stefania.nisio@isprambiente.it

Luca Pizzino
INGV- Roma
E-mail: luca.pizzino@ingv.it

Parole chiave (*key words*): Roma (*Rome*), cavità sotterranee (*underground cavities*), catacombe (*catacombs*), sorgenti (*springs*)

RIASSUNTO

Nel sottosuolo della città di Roma sono presenti molte cavità di grandi dimensioni scavate dall'uomo; esse costituiscono una rete di gallerie a volte comunicanti, ubicate per lo più sulla sinistra idrografica del fiume Tevere.

Le cavità di maggiori dimensioni corrispondono per la maggior parte ad antiche cave realizzate nelle rocce piroclastiche. Spesso la coltivazione si arrestava soltanto quando si raggiungeva la falda idrica, pertanto in molte gallerie si sono formati veri e propri laghetti sotterranei, il cui livello seguiva e segue tuttora, le oscillazioni della falda idrica principale o di piccole falde sospese.

La formazione di questi specchi d'acqua è stata probabilmente favorita dalla coltivazione dei terreni piroclastici nel periodo estivo, in condizioni di massima soggiacenza della falda che poi nei mesi invernali colmava le parti più profonde delle gallerie.

In sinistra idrografica del Tevere, per le sue dimensioni, è da ricordare il lago situato presso il Tempio di Claudio al Celio, accanto alla chiesa dei SS. Giovanni e Paolo. In destra idrografica, sono stati rinvenuti due specchi d'acqua: il laghetto che si trova sotto la collina di Monteverde e quello ubicato proprio nei sotterranei dell'ospedale Forlanini.

Nell'area del Campo Marzio, nel centro storico, la risalita della falda acquifera, dovuta in particolare alla costruzione dei muraglioni ottocenteschi (avvenuta tra il 1880 e il 1890), ha causato l'allagamento di molte cavità sotterranee. Un esempio è la tomba romana del console Aulo Irzio al di sotto del Palazzo della Cancelleria nell'omonima piazza, nei pressi di Campo dei Fiori.

Un'altra causa che può aver influito sulla presenza di acqua nelle cavità sotterranee del centro storico, è l'innalzamento del piano campagna, dall'epoca romana all'attuale. È questo il motivo per cui parte della Meridiana di Augusto nel Campo Marzio è oggi sommersa. Nell'antica Roma, infatti, era consuetudine dopo un terremoto, un incendio o un'alluvione del Tevere, ricostruire a quota più elevata sulle macerie causate da incendi o da terremoti oppure sui detriti sabbiosi portati dalle piene del fiume.

Nella maggior parte della città si è assistito, invece, all'abbassamento della falda, molte sorgenti e pozzi si sono estinti nel tempo.

Le fonti storiche descrivono la presenza di acque sorgive in sotterraneo (in alcune cave o in alcuni ipogei utilizzati come luoghi di culto) utilizzate anche come fonti battesimali, scomparse a causa di tale abbassamento della falda. Il presente lavoro costituisce un contributo al censimento delle acque in sotterraneo.

INTRODUZIONE

La presente ricerca prescinde dall'inquadramento idrogeologico della città di Roma (Boni *et alii*, 1988; Ventriglia, 1989, 2002; Corazza & Lombardi, 1995, 2008; APAT, 2008; Capelli *et al*., 2008; La Vigna *et al*., 2015; La Vigna *et al*., 2016, a cui si rimanda), e vuole essere semplicemente un primo passo verso il censimento della presenza di acque nelle cavità sotterranee della città di Roma.

Nel sottosuolo di Roma sono presenti molte gallerie sotterranee di grandi dimensioni, che costituiscono una rete a volte comunicante, ubicate in particolar modo in sinistra idrografica del fiume Tevere, e realizzate per la coltivazione di materiali da costruzione (Ciotoli *et alii*, 2013; 2015 a, b, 2016; Nisio *et alii*, 2017).

Le gallerie maggiormente estese sono scavate nelle rocce piroclastiche; alcuni ritengono che esse si estendessero molto più di quanto conosciamo oggi e che addirittura potessero esistere gallerie che passavano al di sotto del Tevere (D'agincourt Serouux; 1834).

Nella città di Roma, l'escavazione delle rocce piroclastiche era effettuata principalmente per due ragioni: avere materiale da costruzione (tufo lapideo per ricavarne blocchi o pozzolane sciolte utilizzate per la malta cementizia) e creare grandi cavità sotterranee utilizzate per scopi cimiteriali. Quasi sempre lo scavo soddisfaceva entrambe le necessità. Subordinatamente vi era necessità di creare cunicoli idraulici e cisterne sotterranee.

Nella maggior parte dei casi la coltivazione delle cave si arrestava soltanto quando si raggiungeva la falda idrica, per cui in molte erano presenti, e lo sono ancora oggi, dei veri e propri laghi sotterranei il cui livello segue le oscillazioni della falda. La formazione di alcuni di questi laghi è stata probabilmente favorita dal fatto che i terreni tufacei venivano coltivati soprattutto nel periodo estivo, quando il livello della falda era più basso. Nel periodo autunnale-invernale, con la risalita della falda idrica, la coltivazione veniva arrestata, pertanto alcune parti di tali gallerie venivano allagate.

Nella letteratura archeologica sono descritte, inoltre, vere e proprie sorgenti in sotterraneo presenti in alcune catacombe, che venivano utilizzate stranamente, in epoca cristiana, come fonti battesimali o captate per uso potabile (Panvinio, 1568; Bosio, 1632; Boldetti, 1720; Marchi, 1844; Armellini, 1893; Brocchi, 1820; D'Agincourt Serouux, 1834; Nibby, 1849; De Rossi, 1864-1877; De Rossi,1860; Marucchi, 1933).

RICERCA STORICA DELLE FONTI D'ACQUA NATURALE NEI CIMITERI E NEGLI IPOGEI CRISTIANI

Diversi testi storici riportano la descrizione di sorgenti e fonti d'acqua purissima che scaturivano in sotterraneo, soprattutto nei cimiteri cristiani (Bosio, 1632; Boldetti, 1720; D'Agincourt Serouux, 1834; Kirsch 1933; *Fig*. 1).

È stato svolto un primo censimento di tali punti d'acqua in sotterraneo; sono stati censiti al momento trenta punti, alcuni di difficile ubicazione, con acque attualmente presenti o estinte (*Tab*. 1).

La prima sorgente di acqua fredda e limpida era localizzata all'interno del cimitero di Calepodio, presso la Via Aurelia Antica (Bosio, 1632; D'Agincourt Serouux, 1834). La temperatura dell'acqua sorgiva era bassa, otto gradi centigradi, rispetto ai quattordici o quindici gradi della temperatura esterna e delle altre sorgenti; nei pressi della sorgente l'ambiente ipogeo risultava raffreddato.

In Bosio (1632) è riportata la descrizione di altre due fonti naturali in sotterraneo: una presso un prolungamento del cimitero di San Callisto, a cui si accedeva dalle Terme di Caracalla; l'altra sorgente era ubicata in alcune catacombe sulla Via Nomentana, al settimo

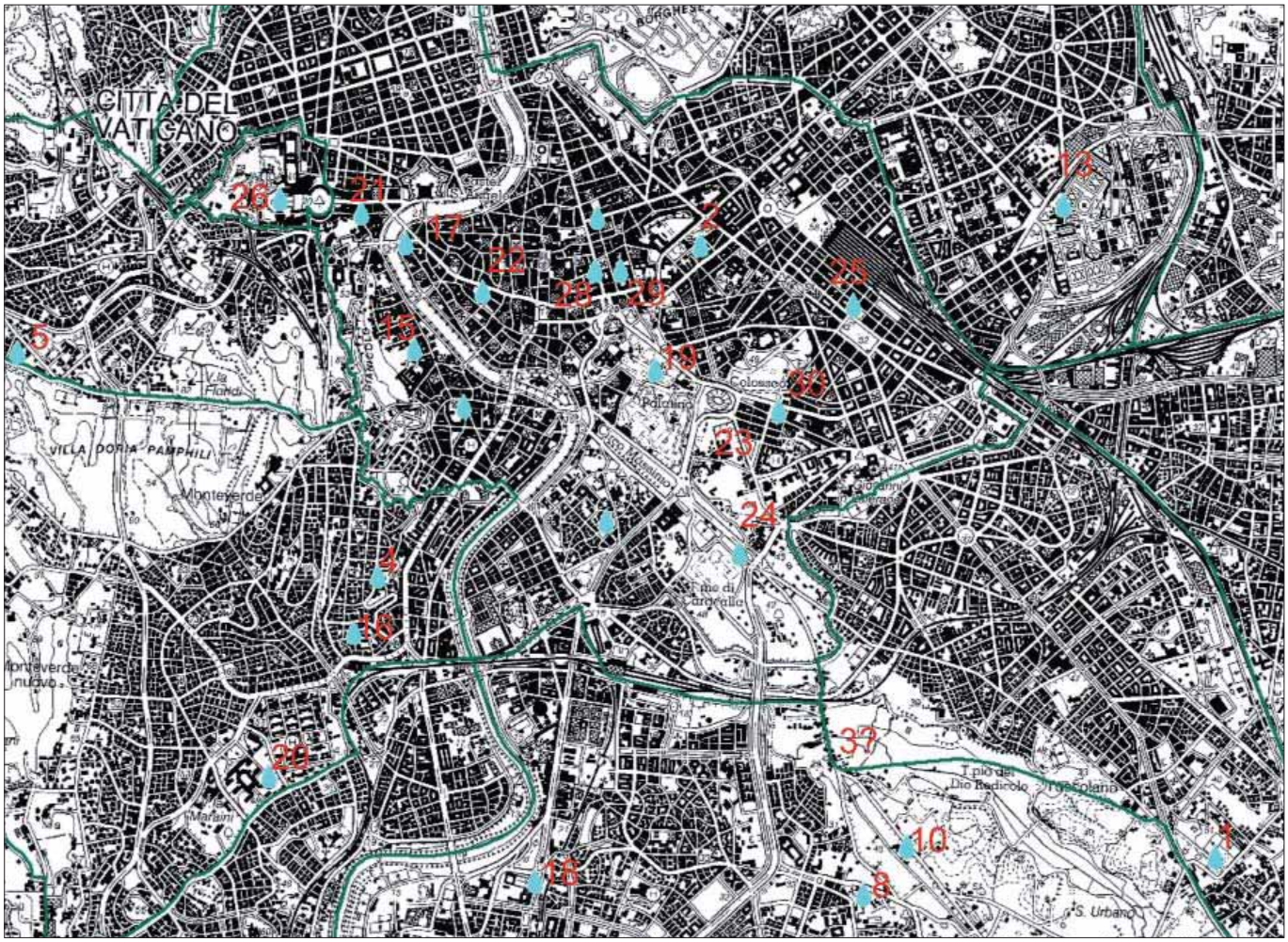


Figura 1 – Ubicazione delle acque censite in sotterraneo (indicate con una goccia azzurra) nel Centro storico di Roma

Tabella 1 - Elenco delle acque in sotterraneo presenti a Roma, e descrizione della tipologia

N°	Area in sotterraneo con presenza di acque	Tipologia delle acque	Evoluzione
1	Basilica di S. Stefano sulla via Latina	Fonte - Battistero	esaurita
2	Basilica di San Vitale	Fonte - Battistero	esaurita
3	Catacomba di San Callisto	Sorgente - Fonte d'acqua pura	scomparsa
4	Catacombe di Ponziano	Sorgente - Fonte d'acqua pura	presente
5	Catacomba di Calepodio	Sorgente - Fonte d'acqua pura	scomparsa
6	Catacombe *ad Nynphas* sulla Via Nomentana	Sorgente - Fonte d'acqua pura	Catacombe scomparse
7	Catacombe *ad Nynphas Catabasso* sulla Via Cornelia	Sorgente - Fonte d'acqua pura	Catacombe scomparse
8	Catacombe di Domitilla	Acqua di falda - Fonte battistero	presente
9	Catacombe di Marco e Marcelliano (o Basileo)	Acqua di falda	presente
10	Catacombe di Pretestato	Acqua di falda	presente
11	Catacombe di S. Agnese	Fonte - Battistero	scomparsa
12	Catacombe di Priscilla, presso basilica di san Silvestro	Battistero	esaurita
13	Catacombe di Ciriaca sulla Via Tiburtina	Fonte - Battistero	esaurita
14	Catacombe di Sant'Agata in Fundum Lardarium Via Aurelia Nova	Fonte - Battistero	Catacomba scomparsa
15	Cave di Monteverde	Lago sotterraneo	presente
16	Chiesa San Giovanni dei Fiorentini – Altare di Dite e Proserpina	Sorgente minerale	esaurita
17	Grotta Corsini al Gianicolo	Acqua di falda	presente
18	Ipogeo Basilica San Paolo fuori le Mura	Fonte - Battistero	esaurito
19	Lapis Niger Foro Romano	Acqua di falda	presente
20	Ospedale Forlanini	Lago sotterraneo	presente
21	Sepulchra presso Porta Aurelia	Fonte - Battistero	esaurita
22	Sotterranei Palazzo della Cancelleria	Acqua di falda	presente
23	Sotterranei del Tempio di Claudio al Celio	Lago sotterraneo	presente
24	Sotterranei della Chiesa di S.S. Nereo e Achilleo	Sorgente - Fonte d'acqua pura	esaurita
25	Sotterranei della Chiesa di S. Eusebio	Acqua di falda	esaurita
26	Sotterranei di San Pietro	Sorgente - Fonte d'acqua pura	n.d.
27	Sotterranei Sant'Anastasio alle Tre Fontane	Sorgente - Fonte d'acqua pura	esaurita
28	Sotterranei della Chiesa di Santa Maria in via Lata	Acqua di falda	presente
29	Sotterranei Basilica S.S. Apostoli	Acqua di falda	presente
30	Sotterranei Basilica di San Clemente, Via Labicana	Acqua di falda	presente



Figura 2 – Le Catacombe di Sant'Alessandro sulla Via Nomentana, vi si accede da una Basilica Paleocristiana oggi interrata, durante il sopralluogo non sono stati osservati battisteri o tracce di antiche fonti

o all'ottavo miglio fuori Roma. Essa scaturiva in un cimitero chiamato *Ad Nynphas,* da Panvinio (1568), per la grande quantità di acque che vi scorrevano (Bosio, 1632; Boldetti, 1720); l'apostolo Pietro praticava il battesimo con queste acque. Il cimitero *Ad Ninphas* non è stato ancora trovato, qualcuno lo identifica con il Cimitero di S. Alessandro sulla Nomentana oltre il Grande Raccordo Anulare (Boldetti, 1720), ma in quest'ultimo, a parte l'eccessiva distanza, non si riscontra presenza di acque in sotterraneo (*Fig.* 2).

Una fonte d'acqua perenne e pura era presente anche presso il Gianicolo, all'interno delle catacombe di Ponziano; essa serviva agli antichi cristiani come fonte battesimale (Bosio 1632; Dandolo 1865). Nel 1632, Bosio descrive questa fonte d'acqua purissima e freschissima che alimentava un battistero per una profondità di 1,5 m, nonché il ritrovamento presso di essa di vasi cristiani contenenti sangue. De Angelis D'Ossat osservò la stessa fonte nel 1939 e riportò che la temperatura dell'acqua era di 16°C rispetto a quella esterna che era di 9° (9 °C la massima e 1°C la minima). L'acqua sgorgava in altri tre punti all'interno delle gallerie del cimitero di Ponziano e aveva le stesse caratteristiche dell'acqua della fonte battesimale; le acque venivano emunte da tre pozzi, di cui uno di pertinenza del Monastero soprastante.

Nel cimitero di San Pietro, al di sotto dell'omonima basilica, era presente una sorgente d'acqua che l'Apostolo utilizzava per battezzare i cristiani (Boldetti, 1720); per tale motivo il cimitero fu denominato *Cimitero del Fonte di San Pietro*.

Sulla Via Cornelia, presso il Cimitero di San Mario e Santa Marta, era nota un'altra sorgente in sotterraneo; per tale ragione il cimitero fu detto, similmente a quello ubicato sulla via Nomentana, *Ad Ninphas Catabasso* (Boldetti, 1720). Il cimitero sorgeva in un'area agricola al dodicesimo miglio della Via Cornelia che veniva denominata *Nynphas Catabasso*, proprio perché la sorgente emergeva in un'area particolarmente depressa.

Altre sorgive e acque freatiche furono rinvenute nei nelle gallerie di cava della zona delle Tre Fontane (Bacci 1642, De Angelis D'Ossat 1939).

Nel 1709 le acque dei sotterranei dell'Abbazia delle Tre Fontane erano descritte come mineralizzate, leggermente calde e acidule, e si rivenivano al di sotto dell'edicola di Sant'Anastasio. Al di sotto della stessa Abbazia erano presenti altre acque mineralizzate che fuoriuscivano a giorno nelle depressioni naturali nell'area del parco circostante.

I cimiteri cristiani erano costituiti a volte da più livelli di gallerie sovrapposte e le coltivazioni si arrestavano quando si raggiungeva il livello di falda. Nel cimitero di Domitilla, ad esempio, il punto più profondo della catacomba era spesso sommerso per la risalita della falda; le caratteristiche fisiche dell'acqua di Domitilla erano le stesse di alcuni fontanili presenti nelle vicinanze (De Angelis D'Ossat, 1906; 1939; Testini, 1980). Presso questo cimitero sembra che fosse presente una vasca di raccolta delle acque ed un battistero ma non ancora rinvenuti.

Presso la catacomba di Marco e Marcelliano (note anche con il nome di Basileo), sulla via Appia, che si snoda su tre piani di gallerie, l'acqua affiorava costantemente al piano più profondo.

Nella catacomba di Pretestato sull'Appia, uno scalone raggiungeva, il livello idrico, a contatto tra pozzolane rosse e l'orizzonte impermeabile sottostante. Un gradino profondo, che periodicamente veniva sommerso dall'acqua, stava a testimoniare una certa oscillazione del livello di falda, che si aggirava intorno a 25 m s.l.m.

Un'altra fonte di acqua sorgiva era presente nei sotterranei della Chiesa di S.S. Nereo e Achilleo presso le Terme di Caracalla, a una profondità di 5 m dal p.c. Acque di falda scaturivano anche nei sotterranei della Chiesa di sant'Eusebio a Piazza Vittorio.

Presso le rovine dell'antica Basilica di Santo Stefano, sulla Via Latina, viene descritto un antico battistero interrato di epoca cristiana, da cui emergevano acque naturali. Questo era ubicato in fondo alla navata destra della Basilica, in corrispondenza di una porticina, ed era costituito da una piccola piscina a forma di quadrifoglio scavata nel terreno, nella quale si scendeva per mezzo di una scaletta; gli antichi cristiani erano battezzati nella piscina per immersione (Testini, 1966; 1980).

L'antico cimitero sotterraneo di "Sant'Agata *ad fundum lardarium*" non è stato mai rinvenuto (Silvagni, 1932; Kirsch, 1924, Nestori, 1959); esso distava circa 2 o 3 miglia da Porta San Pancrazio e da Porta San Pietro. La catacomba custodiva in profondità un battistero le cui acque probabilmente derivavano dall'acquedotto sabatino (Bosio, 1632).

Una fonte d'acqua e un battistero vengono, inoltre, segnalati presso il cimitero di Sant'Agnese sulla Nomentana, dove, durante la Pasqua, venivano eseguiti i battesimi per i cristiani. I pareri rimangono, tuttavia, discordanti circa la presenza di un battistero in tali catacombe; la grande moltitudine di persone che probabilmente affollava il luogo durante la Pasqua ha fatto ritenere che la fonte d'acqua non potesse essere all'interno delle stretta gallerie cimiteriali ma presso il mausoleo di Santa Costanza (Testini 1980; De Santis & Biamonte,1997).

LE ACQUE DI FALDA NEI SOTTERRANEI DI ROMA

Nel centro storico di Roma il substrato impermeabile è costituito dal complesso idrogeologico delle argille plioceniche, che si trova a profondità molto variabile, avendo subito nel tempo sia dislocazioni tettoniche sia profonde erosioni da parte dei principali corsi d'acqua: il Tevere e l'Aniene.

Ad una circolazione idrica profonda contenuta nelle ghiaie immediatamente sovrastanti il substrato argilloso pliocenico, e rappresentata da una falda in pressione, si sovrappone una circolazione idrica più superficiale di tipo freatico che si sviluppa in destra idrografica del Tevere per lo più in rocce sedimentarie pleistoceniche e più limitatamente in terreni vulcanici, mentre in sinistra idro-



Figura 3 – Il lago sotterraneo presso le cave di Monteverde; a) il livello del lago nel febbraio 2014; b) il livello del lago nel marzo 2017

grafica è contenuta principalmente in terreni vulcanici (tufi e pozzolane).

Dall'epoca romana si è generalmente assistito ad un progressivo abbassamento dei livelli di falda sia in destra che in sinistra del Tevere, a causa dell'urbanizzazione che ha comportato tagli di rilievi collinari, scavi, prelievi di acqua sotterranea, etc. Molte delle sorgenti della antica Roma sono così scomparse ed altrettanto è avvenuto per le polle in sotterraneo (Lugli, 1938; 1970).

In alcuni punti della città, dove prevalgono i riporti che hanno colmato antichi corsi d'acqua, il livello della falda risulta invece innalzato e i corsi d'acqua sommersi dal riporto rimangono nel tempo delle direttrici preferenziali di drenaggio delle acque sotterranee. È questo il caso dell'antica Valle delle Camene (l'attuale Via delle Terme di Caracalla) dove scorreva un corso d'acqua che determinava una vasta zona paludosa il *Velabrum maius* (Corazza & Lombardi, 1995), che si estendeva fino alla piana del Circo Massimo. Questa palude era così ampia da essere percorribile dalle barche. Anche l'antica chiesa di San Sisto (ora chiamata San Sisto vecchio) del XII secolo, ubicata all'incrocio tra Via Druso e Via Valle delle Camene, era situata lungo questo antico corso d'acqua; l'attuale chiesa è stata ricostruita colmando di terra l'antica basilica e innalzando quindi il piano di calpestio di diversi metri.

A Roma le cavità sotterranee che possono ospitare veri e propri specchi d'acqua sono solo quelle scavate dall'uomo nelle rocce piroclastiche; l'estensione in superficie di tali rocce è molto maggiore in sinistra che non in destra idrografica (Capelli *et al.*, 2008). In sinistra sono presenti i prodotti del Vulcano dei Colli Albani, maggiormente coltivati per le loro caratteristiche fisico-meccaniche, mentre in destra idrografica sono presenti principalmente i prodotti del Vulcano Sabatino.

Attualmente sono conosciuti nel sottosuolo romano solo tre laghi sotterranei. In sinistra idrografica del Tevere per le sue dimensioni è da ricordare in particolare il laghetto nei pressi del Tempio di Claudio in prossimità della Chiesa dei SS. Giovanni e Paolo al Celio. In destra idrografica è invece presente un lago, scoperto di recente, sotto la collina di Monteverde (Lanzini *et al.* 2015). Le cave di Monteverde, il cui ingresso è sulla Circonvallazione Gianicolense, si estendono su una vasta area e sono state riscoperte alcuni anni fa. Esse sono state utilizzate durante la seconda Guerra Mondiale come rifugio antiaereo, che sembra potesse ospitare fino a 3.000 persone. In esse è presente un lago sotterraneo perenne, con diametro di una ventina di metri e profondità massima di un metro e mezzo. Il livello del lago, che rappresenta l'emergenza



Figura 4 – Emergenza della falda presso il Palazzo della Cancelleria a campo dei Fiori

della falda idrica, è regolato dai corsi d'acqua superficiali e in particolare dal fiume Tevere (*Fig.* 3). Nel 2017, anno particolarmente siccitoso, il lago si è quasi prosciugato; infatti durante l'estate, il livello del Tevere all'idrometro di Ripetta, ubicato a Ponte Cavour, è sceso fino a 4,60 metri, come dimostra anche l'eccezionale emersione dei resti dell'antico ponte di Nerone nei pressi dell'attuale ponte Vittorio Emanuele II. Il livello idrometrico raggiunto in quell'anno all'idrometro di Ripetta rappresenta un valore minimo nei periodi di siccità (si ricorda che il livello della banchina all'idrometro di Ripetta è pari a circa 6,75 metri). Essendo lo zero idrometrico dell'idrometro di Ripetta pari a circa 0,70 m s.l.m. significa che il recapito della falda idrica, che è drenata dal fiume, all'altezza di Ponte Cavour è a circa 5,30 m s.l.m. durante i periodi di maggiore magra.

Altro specchio d'acqua è presente sotto l'ospedale Forlanini, ma attualmente non è visitabile per problemi di inquinamento.

Nel centro storico, nell'area del Campo Marzio, vi è stata una risalita della falda idrica sotterranea dovuta alla costruzione dei muraglioni ottocenteschi (avvenuta tra il 1880 e il 1890). Così luoghi costruiti originariamente all'asciutto, risultano ora sommersi, come ad esempio la tomba romana del console Aulo Irzio al di sotto del Palazzo della Cancelleria nell'omonima piazza nei pressi di Campo dei Fiori. Anche parte della Meridiana di Augusto nel Campo Marzio risulta oggi sommersa dalla falda idrica per lo stesso motivo (*Fig.* 4).

Un'altra causa che può aver influito sulla presenza di acqua nelle cavità sotterranee nel centro storico di Roma è dovuta all'innalzamento del livello del terreno dall'epoca romana ad oggi. Nell'antica Roma infatti era consuetudine dopo un terremoto, un incendio o un'alluvione del Tevere, ricostruire a quota più elevata sulle macerie o sui detriti sabbiosi portati dalla piena del fiume. A tale proposito,particolare risulta il caso della Grotta Corsini al Gianicolo (Bersani *et alii*, 2013 e 2015; Nisio *et alii*, 2016). Tale grotta, normalmente allagata al fondo, veniva probabilmente utilizzata nel '600 come una "ghiacciaia" naturale per tenere freschi i cibi. In essa si riscontra tuttora la presenza di anidride carbonica in concentrazioni notevolmente superiori al livello naturale in aria (Bersani *et alii*, 2013). È molto probabile che la grotta rappresenti una cavità realizzata per sfruttare e conservare integra un'emissione naturale di gas (*Fig.* 5).

Il pozzo nei sotterranei della Chiesa di S. Maria in Via Lata rappresenta bene l'innalzamento del terreno dall'epoca romana ad oggi (*Fig.* 6).

Anche la Basilica di San Clemente sulla Via Labicana nei pressi del Colosseo rappresenta molto bene l'innalzamento del terreno in quella parte della città; infatti l'antica sorgente che un tempo veniva a giorno, oggi è a diversi metri al di sotto dell'attuale piano stradale e l'acqua che ne fuoriesce viene drenata direttamente nella fognatura.



Figura 5 – Grotta Corsini presso il Gianicolo

Altri pozzi sono presenti in molte cripte di chiese del centro storico: nella Chiesa di San Callisto, ad esempio in Trastevere, dove, secondo la tradizione, fu decapitato il martire Callisto che ha dato il nome alla chiesa o come nella Basilica di San Lorenzo in Lucina, dove l'acqua prelevata veniva bevuta dai fedeli il giorno dell'Assunta, o ancora nella Chiesa di S. Maria in Via nei pressi di Via del Tritone, dove l'acqua viene tuttora bevuta con devozione dai fedeli a ricordo del miracolo del 1256, quando dal pozzo fuoriuscì, secondo la tradizione, un quadro rappresentante la Vergine Maria, tuttora conservato nella chiesa. Nella cripta della Basilica dei SS. Apostoli vi è infine un pozzo non per il prelievo di acqua, ma per mettere in mostra (musealizzare) un tratto di fognatura romana a cappuccina di probabile età repubblicana (*Fig.* 7).

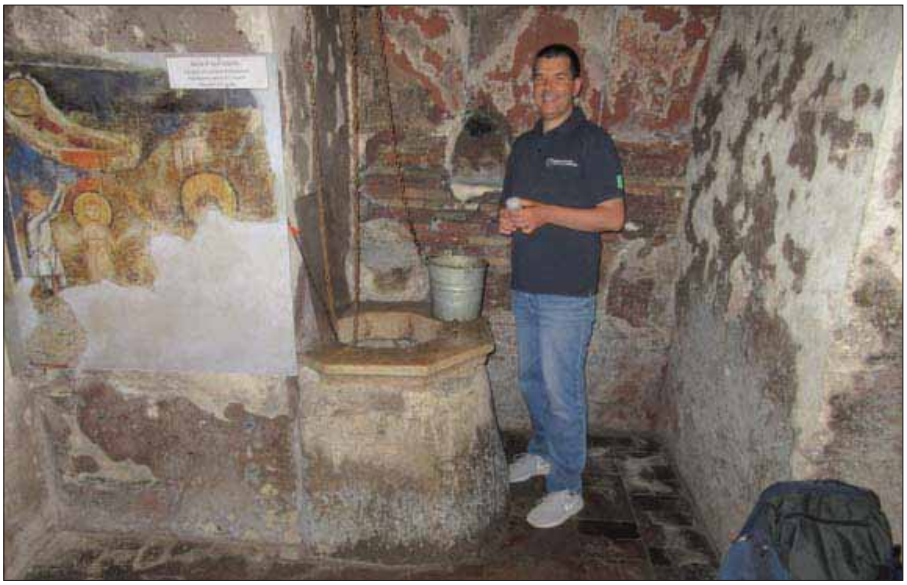


Figura 6 – Il Pozzo presente nei sotterranei della Chiesa di Santa Maria in Via Lata



Figura 7 – Sotterranei della basilica di S.S. Apostoli

Pozzi per uso potabile venivano realizzati nelle catacombe, ne è un esempio quello realizzato nella catacomba di Domitilla nell'area in cui si usava banchettare per festeggiare i defunti (*Fig.* 8).

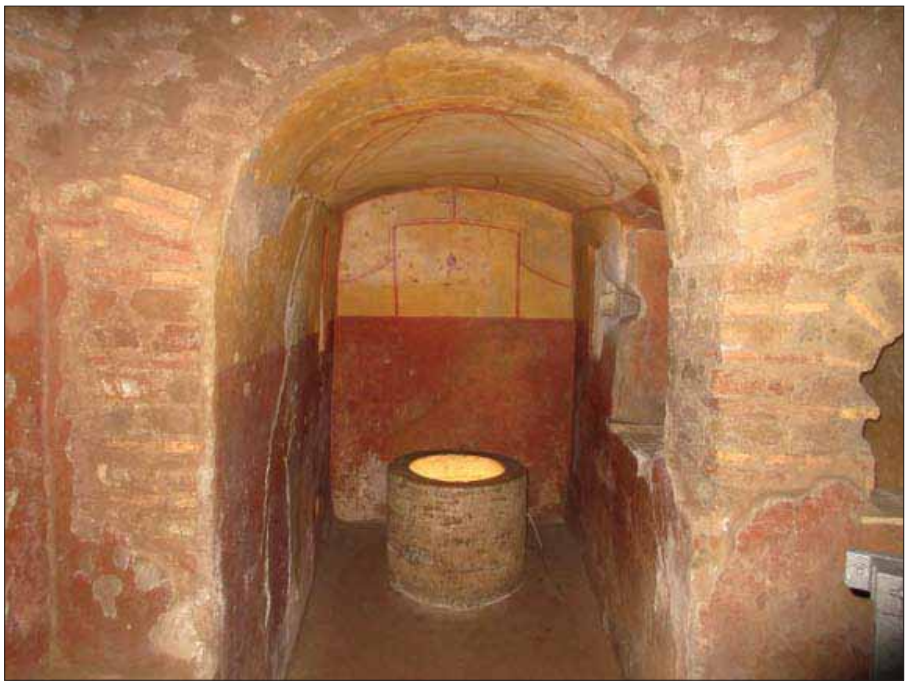


Figura 8 – Pozzo nelle catacombe di Domitilla, presso l'ipogeo dei Flavi, utilizzato durante i banchetti di festeggiamento per i defunti

Anche l'area del Lapis Niger al foro Romano, per la sua quota ribassata, può essere considerata una cavità sotterranea allagata (*Fig.* 9)



Figura 9 – Le acque presenti presso il Lapis Niger, Foro Romano

I parametri chimico-fisici e le caratteristiche chimiche di alcune acque sotterranee del centro storico di Roma sono riportate in *Tab.* 2. La temperatura della falda varia tra 15,4°C (Grotta Corsini e Lago di Monteverde) e 19°C (Lapis Niger), il pH tra 7,27 (Lago del Tempio di Claudio al Celio) e 7,95 (San Callisto), il residuo fisso (TDS) tra 461 (Lapis Niger) e 743 mg/L (Grotta Corsini). Le acque analizzate appartengono alla *facies* bicarbonato-alcalina-terrosa, la più frequente nelle acque sotterranee di Roma (Pizzino, 2015; Pizzino *et al.*, 2015). La composizione chimica mostra un generale andamento caratterizzato da Ca > Na > Mg > K per i cationi e HCO_3 > Cl > SO_4 per gli anioni. Il dato analitico riflette i processi di interazione delle acque circolanti con le rocce e/o i sedimenti con cui entrano in contatto nel loro percorso sotterraneo: terreni di riporto, alluvioni e ghiaie del Tevere, come riportato da Corazza & Lombardi (1995). L'arricchimento in K mostrato da alcuni campioni (San Callisto e Palazzo della Cancelleria) suggerisce miscelamenti con acque che hanno interagito con le vulcaniti albane, particolarmente arricchite in questo elemento. I valori di alcalinità e pH misurati indicano valori non elevati della pressione parziale dell'anidride carbonica(pCO_2<0.02 bar), come riscontrato in altri settori della capitale (Pizzino, 2015). L'analisi isotopica del carbonio disciolto ha evidenziato, per queste acque, una prevalente origine organica (i.e. superficiale) della CO_2 (Pizzino, 2015). I valori dei nitrati (NO_3) sono generalmente bassi, con l'eccezione del campione della sorgente San Clemente, indice di inquinamento di probabile origine antropica.

LE SORGENTI MINERALIZZATE SCOMPARSE

Alcune sorgenti di acque minerali dell'antica Roma descritte nei testi storici, perché ritenute sacre, sono oggi scomparse (Bersani *et alii*, 2013, 2015; Corazza & Lombardi, 2015). Si tratta per lo più di sorgenti mineralizzate, sulfuree, con emissioni gassose, che fanno ipotizzare una risalita da grandi profondità o scaturigini di acque dolci di cui gli antichi hanno assistito all'origine. Tra queste tre scaturivano in ambienti sotterranei: la sorgente di *Dite e Proserpina* presso la sponda del Tevere, l'*Acqua Tulliana* nel Carcere Mamertino e la *Fons Olei* in Trastevere (Bersani *et alii*, 2013,2015; Corazza & Lombardi, 2015; Nisio *et alii*, 2015).

La sorgente di *Dite e Proserpina* era ubicata in una cavità sotterranea (Bersani *et alii*, 2009, 2015), e presso di essa fu costruito un altare. Essa costituiva nell'immaginario romano la porta per gli inferi; scaturiva probabilmente in una grotta naturale ed era caratterizzata da acqua calda e esalazioni di zolfo. La sorgente era un luogo frequentato per il culto delle divinità ctonie degli inferi ed era nota per le sue proprietà terapeutiche già nella Roma regia. Questa sorgente, descritta sulla sponda del fiume Tevere, oggi scomparsa, era ubicata con ogni probabilità sotto l'attuale Chiesa di San Giovanni dei Fiorentini a Via Giulia e sarebbe quindi andata dispersa durante la realizzazione del terrapieno cinquecentesco su cui è stata poi edificata la Basilica dei Fiorentini.

L'*Acqua Tulliana* sgorgava, in epoca romana forse già nel VII sec. a. C., nell'area del Foro Romano, sulle pendici del Campidoglio. Il suo nome deriva probabilmente da *Tullus* (polla d'acqua) e fa ritenere che essa fosse un'acqua sorgiva. L'esatta ubicazione era nel Carcere Mamertino, il carcere in cui fu rinchiuso l'apostolo Pietro prima di essere giustiziato. Secondo la tradizione la sorgente scaturì dal pavimento dell'ambiente inferiore sotterraneo in cui era rinchiuso l'apostolo, nel

Tabella 2 – Parametri chimico-fisici, elementi maggiori e minori nelle acque sotterranee di Roma

Sito	Tipo	Data campionamento	Temp.	pH	TDS	F	Cl	NO_3	SO_4	HCO_3	Na	K	Mg	Ca
San Callisto	p	22/04/2010	16,1	7,95	572	0,2	30,1	14,2	60,7	293	43,8	50,6	10,2	69,0
Palazzo della Cancelleria	s	22/04/2010	17,4	7,62	628	0,3	24,9	7,5	3,4	415	37,2	39,9	14,4	85,4
Grotta Corsini	s	20/07/2010	15,4	7,70	743	0,8	53,9	2,6	67,7	409	52,1	27,6	18,6	111,0
Lapis Niger	s	22/07/2010	19,0	7,78	461	0,3	27,6	27,6	34,7	244	31,2	33,3	13,2	49,1
San Clemente	s	18/06/2013	16,1	7,33	648	0,5	41,8	49,0	37,3	336	37,0	26,4	17,8	102,4
Lago del Tempio di Claudio al Celio	l	18/05/2015	15,7	7,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lago di Monteverde	l	23/05/2016	15,4	7,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Santa Maria in Via Lata	p	06/06/2017	16,7	7,38	598	0,6	49,0	8,7	31,0	335	27,0	28,0	18,0	100,0
SS. Apostoli	p	06/06/2017	17,0	7,49	640	0,6	78,0	24,0	35,0	311	39,0	31,0	17,0	104,0

Nota: s = sorgente; p = pozzo; l = lago. T in °C, TDS, F, Cl, NO_3, SO_4, HCO_3, Na, K, Mg e Ca in mg/L

68 d.C. durante la sua prigionia. In base alla leggenda, Pietro avrebbe utilizzato quest'acqua, che fuoriuscì dal pavimento in seguito ad uno "*scuotimento del terreno*", per battezzare tutti coloro che decisero di convertirsi al cristianesimo, quarantasette persone, tra cui i suoi carcerieri i SS. Processo e Martiniano (Cancellieri, 1788). Nel sito è presente un fonte battesimale e il punto esatto della polla sorgiva, ubicata al lato della stanza, segnata da un ricettacolo rotondo (*Fig.* 10) che originariamente aveva un diametro di un palmo e



Figura 10 – Sorgente dell'Acqua Tulliana nei sotterranei del Carcere Mamertino, alla base del Campigoglio, presso la Chiesa di San Giuseppe dei falegnami

mezzo. La sorgente era perenne il suo livello era ad un palmo dal terreno e non diminuiva mai di portata anche quando veniva prelevata in grandi quantità (Cancellieri, 1788). L'*Acqua Tulliana*, probabilmente già sacra in epoca romana, divenne, così, consacrata anche secondo la religione cristiana dopo il XI sec.

La sorgente sotterranea termale della *Fons Olei* (Bersani *et alii*, 2013, 2015, Nisio *et alii*, 2016) presso la chiesa di Santa Maria in Trastevere, sgorgava vicino ad una taberna utilizzata dai centurioni romani. Secondo la tradizione, alcuni anni dopo la nascita di Cristo, nell'anno 753 di Roma sgorgò nella taberna romana una fonte d'olio o nafta, che per un giorno corse fino al Tevere. La cronaca Eusebiana (Cecchelli, 1935) descrive così l'episodio: "*Alla taverna meritoria del Trastevere scaturì l'olio dalla terra e continuò a scorrere per tutto un giorno senza interruzione, significando la grazia di Cristo che sarebbe venuta alle genti*". La *Fons Olei* viene menzionata da molti Autori antichi, tra cui Dione Cassio, che ne colloca l'origine qualche tempo prima, nell'anno 716 della storia di Roma, cioè nel 38 a.C. Per alcuni autori l'olio era acqua mista a vapore.

LE ACQUE DI ACQUEDOTTO PRESENTI IN SOTTERRANEO

Nel centro storico di Roma, al di sotto delle abitazioni, erano presenti già in epoca romana alcuni grandi serbatoi di distribuzione per l'acqua noti con il nome di *castellum acquae.*

Tali serbatoi, scavati in sotterraneo, erano costituiti da grandi vasche e piscine dotati di cannucce al muro per la raccolta dell'acqua ad uso potabile.

Alcuni serbatoi interrompevano nel cuore della città l'acquedotto dell'Acqua Vergine, di



Figura 11 – Castellum Aquae *di* Vicus Ciprianus*: un ambiente sotterraneo che costituiva un serbatoio di raccolta d'acqua proveniente dall'acquedotto dell'Acqua Vergine*

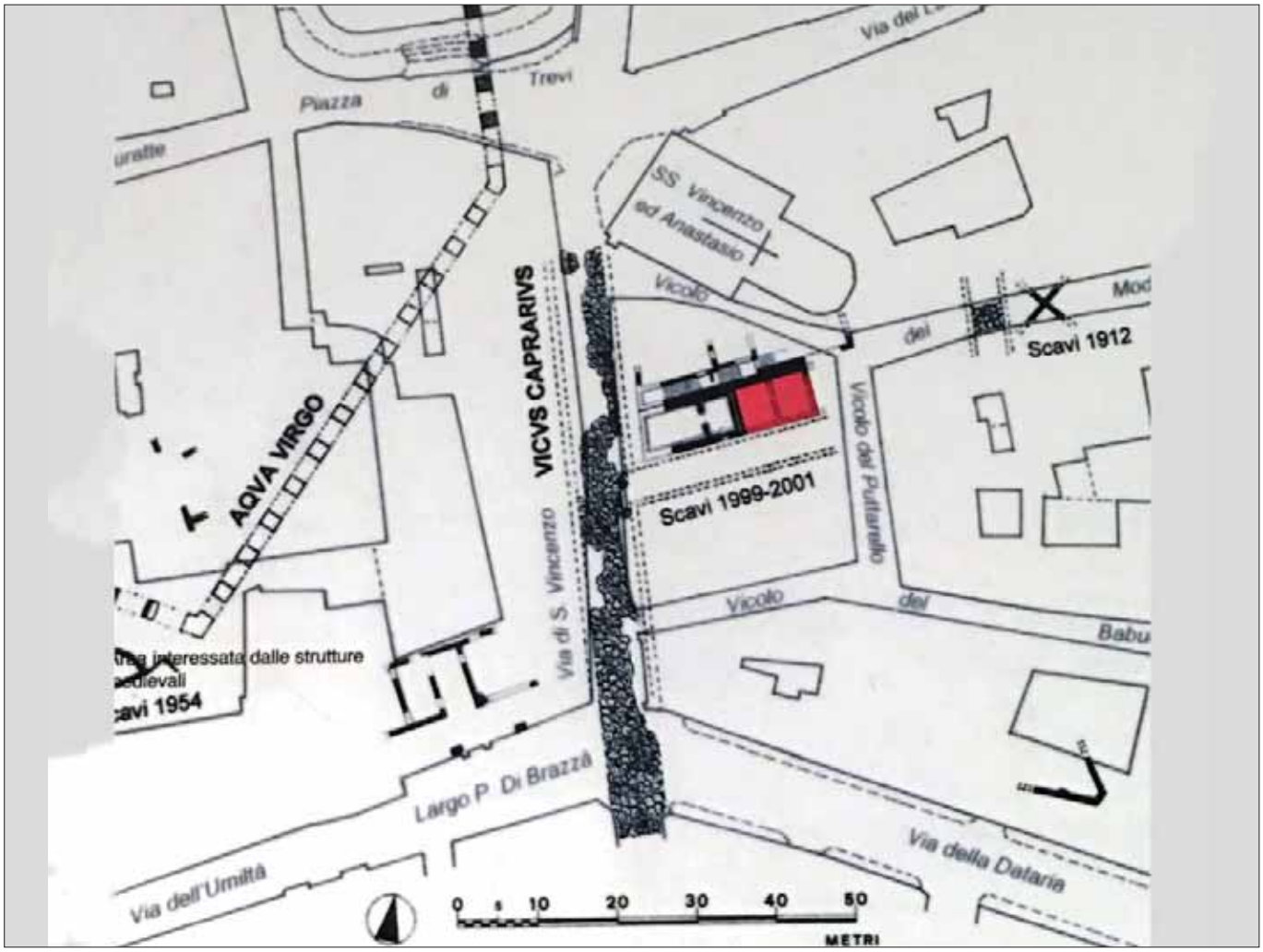


Figura 12 – Ubicazione dell'area archeologica di Vicus Ciprianus nel Rione Trevi di Roma, oggi nota come la "Città dell'Acqua". Il serbatoio d'approvvigionamento d'acqua fu scoperto per caso durente alcuni scavi nel 1999

cui il principale sfioro pubblico era la *Fonte dell'Acqua Vergine,* oggi Fontana di Trevi. Nel Medioevo tale fonte rappresentava l'unica alternativa all'acqua del Tevere. Tuttavia, in sotterraneo sorgevano nei pressi della Fonte suddetti serbatoi per l'approvvigionamento sia pubblico che privato cioè riservato alle grandi *domus.* I *castella* acquae, alimentati unicamente con l'*Acqua vergine* (a basso contenuto di calcare), sono oggi scomparsi, ovvero nascosti sotto il tessuto urbano.

Le fonti letterarie documentano la presenza di diciotto *castella* lungo il tratto urbano dell'Acqua Virgo, ma fino ad oggi ne è stato messo in luce solo uno, il *castellum* di *Vicus Caprarius* (*Fig.* 11) a pochi passi dalla Fontana di Trevi rinvenuto durante il restauro di un edificio nel 1999 (*Fig.* 12).

Il serbatoio d'acqua svolgeva una funzione pubblica già nei primi decenni d.C. e si è conservato perfettamente sotto le abitazioni dove raccoglie ancora oggi l'acqua dell'acquedotto.

Il *castellum* fu abbandonato quasi certamente intorno alla metà del VI d. C. a causa del taglio degli acquedotti operato dai Goti di Vitige nell'anno 537, seguito anche da un incendio.

CONCLUSIONI

La circolazione delle acque in sotterraneo a Roma è variata nel tempo, generalmente con un progressivo abbassamento del livello di falda (Bersani & Bersani, 2010; Bersani *et al*., 2013, 2015, 2017; Nisio *et al*., 2016).

In antichità venivano descritte sorgenti sacre e mineralizzate, fonti d'acqua pura nei sotterranei di Roma che erano utilizzate stranamente per battezzare i cristiani (Bersani *et al*., 2013, 2015, 2017).

Alcune di esse sono estinte, altre erano presenti all'interno di catacombe mai più ritrovate, nascoste probabilmente sotto il tessuto urbano.

È difficile credere che i primi cristiani usassero praticare il battesimo in sotterraneo proprio all'interno di cimiteri, eppure molte catacombe devono il loro nome proprio alla presenza di tali polle sorgive ritenute sacre.

Tra queste ultime vengono annoverate le sorgive limpide delle catacombe *Ad Ninphas* sulla Via Nomentana di cui si sono perse le tracce, nonché il cimitero del *Fonte di San Pietro*; altri punti di emergenza di acqua sotterranei non sono stati ancora ubicati con esattezza al di sotto delle vie consolari della città o all'interno della rete di gallerie di cava (Partenio 1802; Panvinio; 1568; Testini, 1966, 1980). Le sorgenti in sotterraneo alimentavano a volte sacri battisteri descritti nella letteratura, tra questi il battistero delle catacombe di Ponziano, utilizzato dai primi cristiani.

In tale lavoro è stato compiuto un primo censimento delle risorgive che scaturivano in sotterraneo, tratto da fonti storiche e documentali, nonché il censimento degli attuali specchi d'acqua presenti nelle cave sotterranee.

Le maggiori cavità sotterranee del sottosuolo romano sono presenti nelle rocce piroclastiche che talvolta ospitano suggestivi ed estesi laghetti. Tra questi i più importanti sono: il laghetto nelle ex cave di Monteverde (Lanzini *et al*., 2015) sulla destra idrografica del Tevere; è da ricordare, poi, il lago presso il Tempio di Claudio al Celio accanto alla Basilica dei SS. Giovanni e Paolo (Ciotoli *et al*., 2013; 2015 a, b; Nisio *et al*., 2017) ubicato sulla sinistra idrografica. Tali laghi hanno mostrato un lento e progressivo abbassamento di livello.

Non mancano, tuttavia, esempi dove, al contrario, è stato registrato un innalzamento del livello di falda riscontrabile in ambienti sotterranei, causato ad esempio dal colmamento di antiche valli. Anche i muraglioni ottocen-

teschi del fiume Tevere, costruiti dal 1880 al 1890, hanno causato una risalita della falda idrica in particolare nell'area di Campo Marzio.

Dal punto di vista idrochimico, le acque analizzate in sotterraneo appartengono alla *facies* bicarbonato-alcalino-terrosa, la più frequente nelle acque sotterranee di Roma (Pizzino, 2015; Pizzino *et alii*, 2015). Il chimismo riflette infatti i principali processi di interazione delle acque sotterranee con i terreni di riporto, le alluvioni e le ghiaie del Tevere. Possibili miscelamenti con acque che hanno interagito con le vulcaniti albane sono evidenziati dall'arricchimento in potassio riscontrato in alcuni campioni. Bassi valori della CO_2 caratterizzano le acque investigate; tale gas ha una prevalente origine organica (i.e. superficiale). I valori dei nitrati (NO_3) sono generalmente bassi, con l'eccezione del campione della sorgente San Clemente, indice di inquinamento di probabile origine antropica.

Attualmente vi è sempre maggiore considerazione per lo studio della cavità sotterranee nelle città e delle acque sotterranee in esse presenti, per la sicurezza dei cittadini (prevenzione di crolli e di aperture di voragini). Lo studio contemporaneo dell'acqua presente in esse può contribuire alla loro messa in sicurezza, oltre ad avere risvolti anche utili anche per la fruizione delle cavità stesse per il valore aggiunto dovuto alla presenza dell'acqua sorgiva.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dr. Daniele Cinti dell'INGV di Roma per aver effettuato le analisi chimiche riportate in tab. 2. Si ringraziano, inoltre, i Parroci delle chiese di Santa Maria in via Lata e della Basilica dei SS. Apostoli per aver permesso le misure e i prelievi di acqua dai pozzi di loro competenza.

BIBLIOGRAFIA

APAT - Servizio Geologico d'Italia (2008), *La Geologia di Roma: dal centro storico alla periferia*. Vol. 80 delle Mem. Descr. della Carta geol. D'It., a cura di Funiciello R., Praturlon A. e Giordano G.

Armellini (1893), Gli *antichi cimiteri cristiani di Roma e d'Italia.* Roma, 1893, p. 513.

Bacci G. P. (1642), *La vita di San Filippo Neri fondatore della Congregazione dell'Oratorio*. Roma Ed. Vitale Mascardi. 487 p.p.

Bersani P., Bersani A. (2010), *L'antica sorgente dell'Acqua Acetosa a Roma*. Professione Geologo n.24

Bersani P., Ferrari S., Pizzino L. (2009), *Un'antica sorgente termale nel Campo Marzio a Roma*. L'Acqua n. 2.

Bersani P., Nisio S., Pizzino L. (2013), *Presenza di acque mineralizzate ed emissioni gassose nell'area compresa tra Roma e il litorale sud: dati storici e nuovi contributi*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 409-438.

Bersani P. Nisio S. & Pizzino L. (2015), *Manifestazioni gassose, solfuree e eventi di collasso nel centro storico di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It. 99, 43-68.

Bersani P., Nisio S., Pizzino L. (2017), *La sismicità storica della città di Roma, danni subiti dal patrimonio artistico in passato e importanza della microzonazione per la tutela del patrimonio artistico ed edilizio*. XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica, "L'Ingegneria Geotecnica nella conservazione e tutela del patrimonio costruito". Roma 20 giugno, 2017, pg 435-445.

Boldetti M. (1720), *Osservazioni sopra i cimiteri de' santi Martiri, ed antichi cristiani di Roma.*

Bosio A. (1632), *Roma sotterranea*. Vol. II,. Roma, 1632.

Brocchi G.B. (1820), *Dello Stato fisico del suolo romano*, Stamperia De Romanis.

Cancellieri F.G. (1788), *Notizie del carcere Tulliano Detto poi Mamertino Alle radici del Campidoglio.* 133 pp.

Capelli G., Mazza R., Taviani S. (2008), *Acque sotterranee nella città di Roma.* Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. Vol. 80, a cura di Funiciello R., Praturlon A. e Giordano G.

Ciotoli G. Corazza A., Finoia M.G., Nisio S. Succhiarelli C. (2013), *Gli sprofondamenti antropogenici nell'aria urbana di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 143-182.

Ciotoli G., Ferri G., Nisio S., Succhiarelli C., (2015 a), *The underground cavities in the territory of Rome: typologies, distribution and sinkhole susceptibility*. Hypogea 2015 - Proceedings of International Congress of Speleology in Artificial Cavities - Rome, March 11/17 2015 311.

Ciotoli G., Nisio S., Serafini R. (2015 b), *Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma: analisi previsionale*. (2015) Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 99, 167-188.

Ciotoli G., Nisio S., Amanti M. (2016), *La Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici*. professione Geologo, Ordine Geologi del Lazio.

Corazza A. & Lombardi L. (1995), *Idrogeologia del centro storico di Roma*. Mem. Descr. della Carta geol. d'It., Vol. 50.

Corazza A. & Lombardi L. (2015), *Le sorgenti storiche di Roma*. Acque sotterranee Italian Journal of Groundwater – Vol. 4, n.4. Special issue Hydrogeology of Rome, 71-73.

D'Agincourt Serouux (1834), *Viaggio nelle Catacombe di Roma*, Milano, 1834 per G. Silvestri.

De Angelis D'Ossat G. (1943), *La geologia delle catacombe romane*, Città del Vaticano, 1943, p. 5.

De Angelis D'Ossat G. (1906), *I veli acquiferi di Monteverde presso Roma.* Boll. Soc. Ing. Arch. It., 14, Roma. 1906.

De Rossi G.B. (1864-1877), *La Roma Sotterranea Cristiana descritta e illustrata*, Stamperia Vaticana. Vol. III; p. 647-697; Roma, 1864-77.

De Rossi M.S. (1864-1877), *Analisi geologica ed architettonica in La Roma Sotterranea Cristiana descritta e illustrata*, 3 voll.

De Rossi M.S.(1860), *Dell'ampiezza delle romane catacombe e d'una macchina icnografica ed ortografica per rilevarne le piante e i livelli, Atti dell'Accademia Pontificia de' Nuovi Lincei*. Sessione VI del 6 maggio 1860.

De Santis L., Biamonte G. (1997), *Le catacombe di Roma*, Newton & Compton Editori, Roma 1997, p. 140.

Kirsch P. (1924), *Le memorie dei martiri sulle vie Aurelia e Cornelia*, in Studi e Testi, Città del Vaticano, 38 (1924) 63-100.

Kirsch P. (1933), *Le catacombe romane*, Roma, 1933, p. 228.

La Vigna F., Mazza R., Amanti M., Di Salvo C., Petitta M., Pizzino L. (2015), *La sintesi della conoscenza maturate negli anni sulle acque sotterranee: la nuova Carta Idrogeologica di Roma. The synthesis of decades of groundwater knowledge: the new Hydrogeological Map of Rome*. Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater, 4/142, 9-17.

La Vigna F., Mazza R., Amanti M., Di Salvo C., Petitta M., Pizzino L., Pietrosante A., Martarelli L., Bonfà I., Capelli G., Cinti D., Ciotoli F., Ciotoli G., Conte G., Del Bon A., Dimasi M., Falcetti S., Gafà R.M., Lacchini A., Mancini M., Martelli S., Mastrorillo L., Monti G.M., Procesi M., Roma M., Sciarra A., Silvi A., Stigliano F., Succhiarelli C. (2016), *Groundwater of Rome*. Journal of Maps, 1-6.

Lanzini M., Concas M., Morabito A. (2015), *La recente scoperta della cave di Monteverde*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 99, 303-314.

Lombardi L. & Corazza A. (2008), *L'acqua e la città in epoca antica*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. Vol. 80, a cura di Funiciello R., Praturlon A. e Giordano G.

Lugli G. (1938), *Acque urbane in Roma Antica.* Scienze e Lettere dal 1919; già Bardi Ed. 182 pp.

Lugli G. (1970), *Itinerario di Roma antica*, Milano, 1970, p. 83.

Marchi G. (1844-1847), *Monumenti delle arti cristiane primitive nella metropoli del cristianesimo* – Architettura.

Marucchi O. (1933), *Le catacombe romane, Roma*, 1933, p. 77.

Nestori A. (1959), *Osservazioni sulla topografia cimiteriale dell'Aurelia antica*, in Rivista di Archeologia Cristiana 35 (1959) 5-47.

Nibby A. (1849), *Analisi storico-topografico antiquaria della Carta de' dintorni di Roma*, III, Roma, 1849, p. 598/599.

Nisio S., Allevi A., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Pascucci R., Stranieri I., Succhiarelli C. (2017), *Carta delle Cavità sotterranee di Roma*. ISPRA.

Nisio S., Bersani P., Pizzino L. (2016), *Rome: seismic events of the past and tectonic lines that cross the city.* Accademia dei Lincei – La resilienza delle città a gli eventi sismici. 3-4 nov. 2015; Vol. Atti Accademia dei Lincei, 271-285.

Partenio G. M. (1802), *Vie sacre* – Seconda Edizione, tomo 1, riveduta da L. Adami. Saperia Salvioni, 255 pp.

Panvinio O. (1568), *De ritu sepeliendi mortuos apud veteres christianos et eorundem coemßteriis liber*, Colinia, 1568, p. 99-101.

Pizzino L. (2015), *Fluid geochemistry and Natural Gas Hazard in the urban area of Rome (in Italian).* Tesi di dottorato, Università degli Studi Roma 3, 152 pp.

Pizzino L., Cinti D., Procesi M., Sciarra A. (2015), *Caratterizzazione chimica preliminare delle acque sotterranee di Roma Capitale. Preliminary chemical characterization of groundwater in the Rome municipality.* Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater, 4/142, 47-57.

Silvagni A. (1932), *La topografia cimiteriale della via Aurelia*, in Rivista di Archeologia Cristiana 9 (1932) 103-118.

Testini P. (1966), *Le catacombe e gli antichi cimiteri cristiani in Roma,* Bologna, 1966, p. 249)

Testini P. (1980), *Archeologia Cristiana.* Roma.

Ventriglia U. (1989), *Idrogeologia della provincia di Roma* –. Amministr. Provinc. di Roma Ass.to LL PP, Viabilità e Trasporti. Roma.

Ventriglia U. (2002), *La geologia del territorio del Comune di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Ass.to LL PP, Viabilità e Trasporti, Roma.

Il fattore *nshape* dei pilastri di cave sotterranee e il loro fattore di sicurezza a compressione desunto da analisi di regressione multivariata

Giovanni Bruno
DICATEch Politecnico di Bari
E-mail: giovanni.bruno@poliba.it

The nshape factor of the pillars of underground quarries and their compression safety factor inferred from multivariate regression analysis

Parole chiave (*key words*): cave sotterranee (*underground quarries*), fattore *Nshape* dei pilastri (*Nshape factor of the pillars*), analisi multivariata (*multivariate analysis*), fattore di sicurezza dei pilastri (*safety factor of pillars*)

ABSTRACT

In Apulia there are numerous underground quarries of calcarenitic rocks classifiable, from the geomechanical point of view, as "weak rocks" due to their low uniaxial compression strength. These quarries have long been the subject of scientific research also for the problems of instability of the territory, generated by the collapse of some pillars left in support of the overlying rocks. The resistance to the vertical loads of the pillars is the function of several factors among which some can be supposed to be constant or little variable, such as the uniaxial compression strength of the rock forming them; others, such as the eccentricity of the load acting on the pillar and its shape and size, have a significant variability between the different quarries and within the same quarry. The presence of eccentric loads depends on the irregularity of the shape of tributary and pillars areas and on the distribution of the latter and it increases with them. The analysis of numerous Apulian quarries of calcarenites showed load eccentricity values on the pillars of several decimeters order; if these values are not corrected by using the effectively compressed area, with one of the methods proposed by Meyerhof, can lead to a dangerous overestimation of the pillars safety factor. Another important aspect is that related to the compression strength of the pillars, which, as well known, is quite different from the one of the rock that forms them. This comes from a number of factors, among which the most studied is the *Nshape* factor. Here, specific equations are proposed to calculate this factor and, consequently, the compression strength of the pillar σ_p, according to the geometric shape of its section. A parameter, called coefficient of form C_f, is introduced in such equations. From the analysis carried out, it seems that the value of C_f it is sensitive to identify the pillars that are anomalous, in form and/or size, compared to the average ones in the quarry.

In order to evaluate the reliability of the new proposed formulas, a simulation was performed on an abandoned quarry of calcarenites. The simulation was conducted using a statistical analysis implemented on two models, one based on the new proposed equations and one based on analogues equations proposed by Bekendam & Price (1993). The analysis allowed us to establish that the *Nshape* (pillar form factor), E_d (compression tension acting at the base of the pillar) and A_{pil} (pillar area), represents the combination of independent variables that explain the major variability of the safety factor F_s. Hence, by successive multiple regression analysis, either by considering all the pillars of the quarry and by excluding the anomalous pillars by form and/or dimension, it has been possible to derive an equation for the F_s, implemented on the model that takes into account the new formulas of *Nshape* and σ_p here proposed, able to explain 94.2751% of its variability.

Finally, a comparison was made between the stability conditions of the pillars derived from the classification of the fracture state of the pillars, as proposed by Bekendam & Dirks (1990), and the pillars F_s values obtained with the multiple regression equation. From the comparison it can be seen that the method proposed by Bekendam & Dirks tends to underestimate the percentage of collapsed or almost collapsed pillars. The evolution of the quarry instability state, monitored for over 22 years, and also modeled with numerical distinct elements analysis that took into account the creep effect, under static and dynamic conditions, is well in line with the values of the F_s obtained from the model of multiple regression proposed here.

RIASSUNTO

In Puglia sono presenti numerose cave sotterranee di rocce calcarenitiche classificabili, dal punto di vista geomeccanico, come "rocce tenere" per la loro bassa resistenza a compressione uniassiale. Tali cave sono da tempo oggetto di ricerca scientifica anche per i problemi di instabilità del territorio, generati dal collasso di alcuni pilastri lasciati a sostegno delle rocce sovrastanti. La resistenza ai carichi verticali dei pilastri è funzione di diversi fattori fra i quali alcuni possono essere supposti costanti o poco variabili, come la resistenza a compressione uniassiale della roccia che li costituisce; altri, quali l'eccentricità del carico che agisce sul pilastro e la sua forma e dimensione, sono dotati di una significativa variabilità sia fra le diverse cave sia all'interno della stessa cava. La presenza di carichi eccentrici è tanto più elevata quanto maggiore e l'irregolarità della forma delle aree tributarie e dei pilastri e la distribuzione areale di questi ultimi. L'analisi di numerose cave pugliesi di calcareniti ha evidenziato valori di eccentricità del carico sui pilastri dell'ordine di diversi decimetri; tali valori, se non corretti utilizzando l'area effettivamente resistente a compressione, ricavata con una delle metodiche proposte da Meyerhof, possono indurre ad una pericolosa sovrastima del fattore di sicurezza dei pilastri. Un altro aspetto rilevante è quello legato alla resistenza a compressione dei pilastri che, notoriamente, è ben diversa da quella della roccia che li costituisce. Ciò scaturisce da una serie di fattori fra i quali quello più studiato risulta essere il fattore di forma *Nshape*. In questa sede si propongono delle equazioni specifiche, per calcolare tale fattore e, conseguentemente, la resistenza a compressione del pilastro σ_p a seconda della forma geometrica della sua sezione. In tali equazioni viene introdotto un parametro, de-

finito coefficiente di forma C_f. Dalle analisi condotte, in via preliminare, sembra che dal valore del C_f sia possibile individuare i possibili pilastri che risultano anomali, per forma e/o dimensioni, rispetto a quelli mediamente presenti nella cava.

Al fine di valutare l'affidabilità delle nuove formule proposte si è condotta una simulazione su una cava dismessa di calcareniti. La simulazione è stata condotta mediante un'analisi statistica implementata su due modelli, uno basato sulle nuove formule qui proposte e uno basato su anologhe relazioni proposte da Bekendam & Price (1993). L'analisi ha consentito di stabilire che, fra quelle considerate, *Nshape* (fattore di forma del pilastro), E_d (tensione di compressione agente alla base del pilastro) e A_{pil} (area del pilastro) rappresenta la combinazione di variabili indipendenti che spiega la maggior percentuale di variabilità del fattore di sicurezza F_s. Quindi, successive analisi di regressione multipla, eseguite sia considerando tutti i pilastri della cava sia escludendo i pilastri risultati anomali per forma e/o dimensione, hanno permesso di ricavare un'equazione per il F_s, implementata sul modello che tiene conto delle nuove formule di *Nshape* e σ_p qui proposte, in grado di spiegare il 94.2751% della sua variabilità.

Infine, si è eseguito un confronto fra le condizioni di stabilità dei pilastri desunte dalla classificazione dello stato di fratturazione dei pilastri, come proposto da Bekendam & Dirks (1990), e dai valori dei F_s dei pilastri ottenuti con l'equazione di regressione multipla. Dal confronto si evince che la metodica proposta da Bekendam & Dirks tende a sottostimare la percentuale di pilastri collassati o prossimi al collasso. L'evoluzione temporale dello stato di dissesto della cava, monitorato per oltre 22 anni e modellato anche con analisi numeriche agli elementi distinti che hanno tenuto conto dell'effetto creep, in condizioni statiche e dinamiche, ben si accorda ai valori dei F_s ottenuti dal modello di regressione multipla qui proposto.

GENERALITÀ SUL CALCOLO DELLA STABILITÀ DEI PILASTRI

Nelle cave sotterranee di materiale litoide è frequente la tecnica di coltivazione a "camere e pilastri". In questo tipo di cava, la stabilità dei pilastri di roccia, lasciati a sostegno del tetto di cava, è di vitale importanza sia per tutelare l'incolumità delle maestranze durante la vita attiva della cava sia per evitare pericolosi fenomeni di subsidenza indotta in superficie e/o collassi delle eventuali sovrastanti infrastrutture antropiche.

La valutazione della stabilità dei pilastri riveste un ruolo fondamentale specie quando, come nel caso del territorio pugliese, la roccia cavata è costituita dalle Plio-pleistoceniche Calcareniti di Gravina che hanno le caratteristiche geomeccaniche di una "roccia tenera" (Bruno G., 2012). Prove di laboratorio condotte su queste calcareniti hanno evidenziato una forte dipendenza delle caratteristiche meccaniche di resistenza e deformabilità delle stesse sia dal contenuto naturale d'acqua (Zezza F., 1981; Cotecchia V. *et al.*, 1985; Spilotro G. *et al.*, 1993; Bruno G. & Cherubini C., 2005) sia dal tempo "effetto creep" (Cherubini *et al.*, 1996).

L'approccio deterministico convenzionale per la valutazione della stabilità di un pilastro di cava, a breve-medio termine, è quello del calcolo del suo fattore di sicurezza F_s mediante l'uso di una relazione del tipo:

$$F_s = \frac{\sigma_p}{E_d} \qquad [1]$$

dove:

σ_p Resistenza a compressione del pilastro
E_d Tensione di compressione agente alla base del pilastro

Nella relazione [1] il numeratore è dato dalla resistenza a compressione del pilastro di roccia; essa, come si dirà nel paragrafo successivo, può essere calcolata correggendo il valore della resistenza a compressione semplice della roccia del pilastro σ_c, ottenuta in laboratorio, mediante delle relazioni che tengono conto dell'altezza H_{pil} e della forma dello stesso *Nshape*. Per quanto riguarda il denominatore della [1], invece, bisogna dire che esso è funzione del rapporto fra l'area tributaria o d'influenza A_{trib} del pilastro e la porzione di area dello stesso effettivamente reagente a compressione A_{efpil}.

Nel calcolo di tale rapporto, le difficoltà scaturiscono dal fatto che le coltivazioni in sotterraneo, specialmente quelle più antiche, risalenti alla fine del XIX inizio del XX secolo, presentano un'elevata irregolarità sia nella forma che nella dimensione ed allineamento dei pilastri lasciati a sostegno del tetto di cava. Ciò comporta un frequente disallineamento fra i baricentri dell'area tributaria e del pilastro e, conseguentemente, l'insorgere di un'eccentricità totale del carico verticale (*e*), che può essere scomposta nelle due componenti x (e_x) e y (e_y) del sistema di riferimento topografico adottato, la quale fa si che parte della sezione del pilastro reagisca a compressione e parte a trazione (*Fig.* 1).

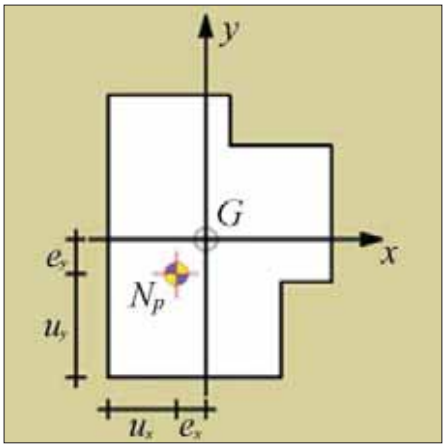


Figura 1 – Sezione basale di un pilastro con indicazione: del suo baricentro (G) del baricentro dell'area tributaria N_p e dell'eccentricità del carico nelle direzioni x (e_x) e y (e_y)

Nella pratica geomeccanica corrente, operando a vantaggio della sicurezza, si è soliti trascurare il contributo della porzione di sezione di pilastro reagente a trazione specialmente quando si tratta di "rocce tenere" (Bruno G., 2012). In tal senso, quindi, per non sovrastimare la resistenza di un pilastro soggetto a carico eccentrico è necessario parzializzare la sua area reagente, con uno dei noti metodi proposti per le fondazioni da Meyerhof G. G. (1953).

L'autore propone due metodi per ricavare l'area effettivamente reagente a compressione del pilastro A_{efpil}, uno approssimato (*Fig.* 2a) e uno rigoroso (*Fig.* 2b). L'applicazione di entrambe le metodiche a numerosi casistiche reali consente di affermare che l'uso di uno qualsiasi dei due metodi conduce, sostanzialmente, allo stesso valore di area del pilastro effettivamente reagente a compressione (*Fig.* 3).

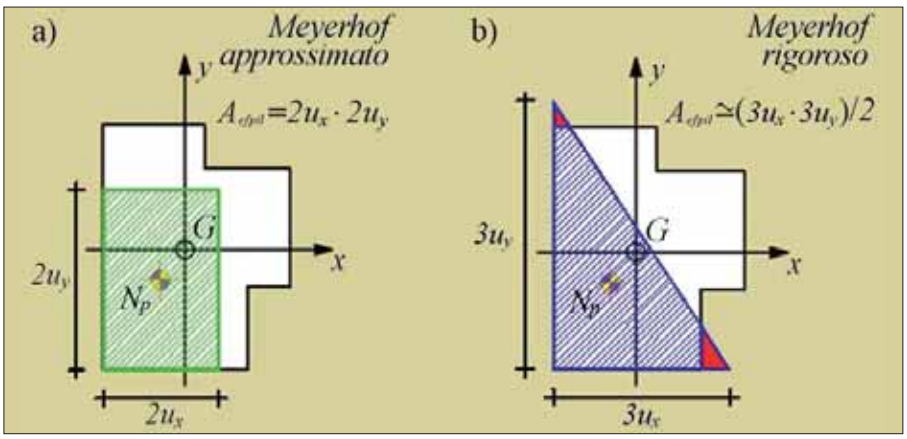


Figura 2 – Procedura per calcolare l'area del pilastro effettivamente reagente a compressione A_{efpil}: a) Metodo di Meyerhof approssimato (area rigata in verde); b) Metodo di Meyerhof rigoroso (area rigata in blu)

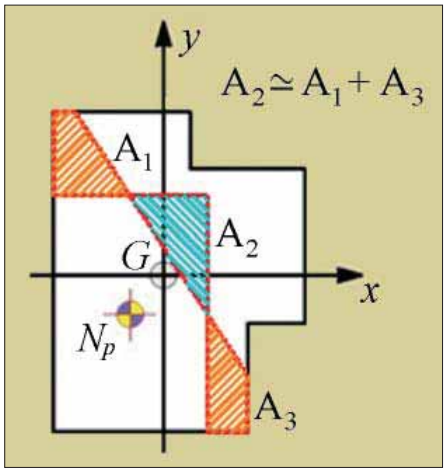


Figura 3 - Dimostrazione grafica dell'approssimativa equivalenza delle aree effettivamente reagenti a compressione calcolate con i due metodi proposti da Meyerhof

È evidente che la riduzione dell'area effettivamente reagente a compressione è un artifizio che ci consente di calcolare in modo più efficace la capacità di resistenza a compressione del pilastro ma non annulla la presenza nello stesso di una sollecitazione a trazione.

Nel caso di progetti di recupero o di messa in sicurezza di cave di "rocce tenere", come le pugliesi Calcareniti di Gravina, ove si riscontri la presenza di pilastri soggetti a un carico eccentrico, resta la necessità di calcolare l'entità dello sforzo di trazione cui è sottoposto il pilastro.

Infatti, l'esigua resistenza a trazione che queste rocce presentano potrebbe innescare, nel tempo, l'insorgere di fratture che, a prescindere da altre concause, andrebbero certamente a detrimento della stabilità del pilastro. In questi casi, quindi, sarà necessario adottare opportuni accorgimenti tecnici per migliorare le caratteristiche di resistenza della roccia e/o la stabilità del pilastro nel suo insieme.

L'AREA TRIBUTARIA DEI PILASTRI E LA TENSIONE VERTICALE AGENTE SU DI ESSI

Nella valutazione della stabilità di una cava sotterranea, coltivata con la tecnica a "camere e pilastri", a prescindere da fatto che i pilastri siano disposti secondo uno schema regolare di file parallele con pilastri allineati e sfalsati cioè a scacchiera o, come accade più raramente e solo per le cave più antiche, siano disposti in modo casuale, si rende necessaria la definizione della loro area tributaria A_{trib} o d'influenza.

Si tratta cioè di definire, il più delle volte a posteriori nel caso delle cave dismesse, la forma geometrica e le dimensioni del volume di roccia soprastante il tetto di cava che viene sostenuto dal sottostante pilastro la cui sezione A_{pil} è sensibilmente inferiore di quello della sua area tributaria, per effetto dei circostanti vuoti "camere" determinati dal cavamento (*Fig.* 4).

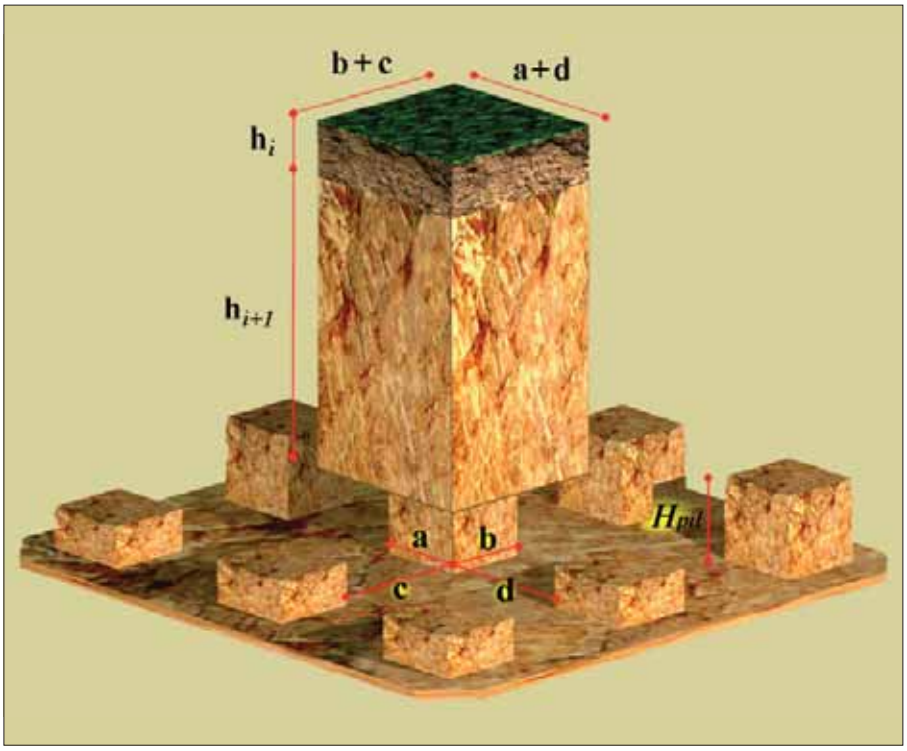


Figura 4 - Spaccato di cava con indicazione dell'area tributaria e dei relativi rapporti dimensionali nel caso di pilastri a sezione quadrata

Note che siano la geometria e le dimensioni del pilastro e della sua area tributaria nonché i pesi di volume e i relativi spessori degli orizzonti stratigrafici che gravano sul tetto di cava è possibile, mediante le relazioni [2 ÷ 7], calcolare la tensione verticale totale agente al tetto o alla base dell'i-esimo pilastro.

$$A_{pil} = (a_i + b_i)$$ Area in sezione trasversale dell'i-esimo pilastro [2]

$$A_{trib} = (a_i + d_i) \cdot (b_i + c_i)$$ Area tributaria o d'influenza dell'i-esimo pilastro [3]

$$\sigma_{vt} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i$$ Tensione litostatica verticale al tetto dell'i-esimo pilastro [4]

$$\sigma_{vb} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i + \gamma_{pil} \cdot H_{pil}$$ Tensione litostatica verticale alla base dell'i-esimo pilastro [5]

$$D = \left(\frac{A_{trib}}{A_{efpil}}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i$$ Tensione totale verticale agente al tetto dell'i-esimo pilastro [6]

$$E_d = \frac{(A_t \cdot \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i) + (A_{pil} \cdot \gamma_{pil} \cdot H_{pil})}{A_{efpil}}$$ Tensione totale verticale agente alla base dell'i-esimo pilastro [7]

Dalla relazione [7] si evince chiaramente che la tensione totale verticale agente alla base di un pilastro è proporzionale in modo diretto alla sua area tributaria e inverso all'area effettivamente reagente a compressione. Ne consegue, come già detto nel paragrafo precedente, che il fattore di sicurezza del pilastro [1] è funzione non solo del grado di eccentricità del carico agente alla base dello stesso, al crescere della quale si ha una riduzione di A_{efpil}, ma anche dalla forma ed estensione dell'area tributaria.

Considerato che la sommatoria di tutte le aree tributarie dei pilastri coincide con la superficie totale dell'area di cava, ne consegue che la forma assunta da ciascuna area tributaria dipende in modo esplicito dalla simmetria con la quale i pilastri sono distribuiti sull'intera superficie di cava e, implicitamente, dalla loro forma geometrica e dimensione.

LA FORMA DEI PILASTRI E LE RELAZIONI PER IL CALCOLO DELLA LORO RESISTENZA A COMPRESSIONE

Per calcolare la resistenza a compressione di un pilastro sono comunemente utilizzate delle relazioni empiriche che adeguano, mediante dei fattori correttivi, la resistenza a com-

pressione uniassiale della roccia ricavata dai provini di laboratorio σ_c alla forma e dimensione in situ dello stesso:

$$\sigma_p = \sigma_c \cdot Nshape \quad [8]$$

dove:
σ_c = resistenza a compressione uniassiale da prove di laboratorio;
Nshape = fattore di forma del pilastro.

Il fattore di forma del pilastro è di fondamentale importanza per la definizione della resistenza a compressione di un pilastro di cava σ_p e nel passato è stato oggetto di numerosi studi, prevalentemente condotti in cave sotterranee di carbone. In tabella 1 si riportano le relazioni più utilizzate per ricavare il fattore di forma *Nshape* delle quali, comunque, non tutte sono specificamente calibrate per una particolare forma geometrica del pilastro.

Osservando le formule in tabella 1 si nota che tutte quante presentano il rapporto fra i parametri *W* e H_{pil}, rispettivamente, dimensione caratteristica e altezza del pilastro. Anche

Tabella 1 – Formule per il calcolo del fattore di forma *Nshape* e della resistenza a compressione di un pilastro di roccia

Fattore di forma	Resistenza a compressione pilastro	Autore
$\left[\frac{W^{0.46}}{H_{pil}{}^{0.66}}\right]$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[\frac{W^{0.46}}{H_{pil}{}^{0.66}}\right]$	Salomon M. D. G. & Munro A. H. (1967)
$\left[0.64 + \frac{0.36 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[0.64 + \frac{0.36 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	Bieniawski Z. T. & Van Heerden W. L. (1975)
$\left[0.778 + \frac{0.222 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[0.778 + \frac{0.222 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	Hustrulid W. A. (1976)
$\left[0.875 + \frac{0.25 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[0.875 + \frac{0.25 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	Goodman R. E. (1980)
$\left[0.935 + 0.69 \cdot log\frac{W}{H_{pil}}\right]$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[0.935 + 0.69 \cdot log\frac{W}{H_{pil}}\right]$	Price D. G. & Van Steveninck R. (1988)
$\left[0.928 + \frac{0.829 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[0.928 + \frac{0.829 \cdot W}{H_{pil}}\right]$	Beckendam R. F. & Price D. G. (1993)

$W = \frac{A_{pil}}{P_{pil}}$ (dimensione caratteristica del pilastro)
H_{pil} (altezza del pilastro)
σ_c (resistenza a compressione uniassiale della roccia del pilastro)

ricerche più recenti, che approcciano il problema da un punto di vista statistico (Bruno G. & Cherubini C., 2002) o probabilistico (Bruno G. *et al.*, 2007; Ghasemi E. *et al.*, 2017), individuano in tale rapporto uno dei parametri discriminanti ai fini della stabilità dei singoli pilastri e della cava nel suo insieme.

Il fattore *Nshape*, attraverso il parametro *W*, tiene implicitamente conto della forma geometrica in sezione del pilastro la quale si può ipoteticamente approssimare ad un cerchio, quadrato o rettangolo. Queste tre forme geometriche mostrano dei valori teorici della loro dimensione caratteristica *W* che possono essere espressi nel caso del cerchio, quadrato o rettangolo, rispettivamente, in funzione del raggio (*R*) o del lato (*L*); in particolare, nel caso del rettangolo (*L* = lato maggiore e *B* = lato minore) si è considerato il seguente rapporto dimensionale fra i due lati $B = 0.7 \cdot L$.

Tabella 2 – Valori teorici della dimensione caratteristica *W* e formule per il calcolo del coefficiente di forma C_f, del fattore di forma *Nshape* e della resistenza a compressione σ_p in funzione della forma geometrica del pilastro

Geometria sezione del pilastro	Dimensione caratteristica teorica	Coefficiente di forma	Fattore di forma	Resistenza a compressione pilastro
Cerchio	$W = \frac{A_{pil}}{P_{pil}} = 0.500 \cdot R$	$C_f = \left(\frac{P_{pil}^2}{4\pi \cdot A}\right)$	$C_f \cdot \frac{0.500 \cdot R}{H_{pil}}$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[\left(\frac{P^2}{4\pi \cdot A}\right) \cdot \frac{0.500 \cdot R}{Hpil}\right]$
Quadrato	$W = \frac{A_{pil}}{P_{pil}} = 0.250 \cdot L$	$C_f = \left(\frac{P_{pil}^2}{16 \cdot A}\right)$	$C_f \cdot \frac{0.250 \cdot L}{H_{pil}}$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[\left(\frac{P^2}{16 \cdot A}\right) \cdot \frac{0.250 \cdot L}{Hpil}\right]$
Rettangolo*	$W = \frac{A_{pil}}{P_{pil}} = 0.206 \cdot L$	$C_f = \left(\frac{P_{pil}^2}{3.4 \cdot A}\right)$	$C_f \cdot \frac{0.206 \cdot L}{H_{pil}}$	$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left[\left(\frac{P^2}{3.4 \cdot A}\right) \cdot \frac{0.206 \cdot L}{Hpil}\right]$

A_{pil} (area del pilastro) P_{pil} (perimetro del pilastro) H_{pil} (altezza del pilastro)
R (raggio pilastro)
**L* (lato maggiore pilastro); $B = 0.7 \cdot L$ (lato minore pilastro)

Nella realtà, tuttavia, la forma dei pilastri di cava, oltre ad essere molto diversa da quella dei provini utilizzati in laboratorio per ricavare la σ_c, spesso si discosta molto anche da quelle teoriche ipotizzate.

Per la valutazione della stabilità di una cava sotterranea e una più adeguata applicazione della relazione [8] è necessario, innanzitutto, stabilire a quale delle tre forme teoriche il pilastro può essere assimilato e valutare mediante un coefficiente di forma C_f il suo grado di scostamento dalla forma geometrica perfetta.

Alla luce di quanto appena detto, i fattori di forma *Nshape* proposti in passato (*Tab.* 1) sono stati riformulati in funzione della forma del pilastro considerato; ciò ha consentito di ricavare anche la loro resistenza a compressione σ_p mediante delle formule più performanti (*Tab.* 2).

In teoria si ha che quando il coefficiente di forma di un pilastro $C_f \rightarrow 1$ la relativa dimensione caratteristica $W \rightarrow$ valore teorico.

Nella pratica delle diverse analisi condotte, invece, sembra che i pilastri con C_f che si discostano di oltre 3÷4 Dev. St. dal valore medio di tutti i pilastri della cava, siano dei pilastri anomali per forma e/o dimensioni.

ANALISI MULTIVARIATA DI UN CASO DI STUDIO REALE PER RICAVARE IL F_S A COMPRESSIONE DEI PILASTRI E LA VALIDAZIONE DELLE FORMULE PROPOSTE PER NSHAPE E σ_P

Al fine di ricavare una relazione per il F_s a compressione dei pilastri che tenga conto del peso statistico dei diversi fattori che concorrono alla sua determinazione e di valutare la bontà delle formule qui proposte per il calcolo di *Nshape* e σ_p si è condotta una simulazione su una cava sotterranea di calcareniti, ubicata lungo la Via S. Allende, nei pressi dell'ex mattatoio del Comune di Mottola (*Fig.* 5).

Considerata la tematica trattata e per brevità di esposizione, l'inquadramento geologico-stratigrafico dell'area di cava viene omesso rimandando il lettore ai lavori già pubblicati (Cherubini C. *et al.* (1990); Bruno G., Cherubini C. (2002); Bruno G., Cherubini C. (2005); Bruno G. *et al.* (2007)). La scelta di questa cava è giustificata dal fatto che il suo stato di dissesto è stato monitorato da chi scrive per circa 25 anni a partire dal 1990, data del primo rilevo topografico (Cherubini C. *et al.*, 1990) effettuato a seguito di un esteso fenomeno di sprofondamento del piazzale antistante il mattatoio verificatosi nel 1987.

Da un'analisi preliminare dei 98 pilastri presenti nella cava si è visto che la loro geometria può generalmente essere assimilata alla forma rettangolare; quindi, fra le diverse formule di *Nshape* disponibili (*Tab.* 1), si è scelto di mettere a confronto la formula pro-



Figura 5 – Ubicazione geografica della cava di Mottola (da: Google Hearth - modificata)

posta da Beckendam R. F. & Price D. G. (1993), ampiamente utilizzata e ritenuta valida per questa geometria dei pilastri, con quella proposta in questo studio.

Per ognuno dei 98 pilastri, rilevati nella porzione di cava accessibile, si è calcolato il fattore di sicurezza a compressione F_s mediante la relazione [1] implementata sia con il fattore *Nshape* di Beckendam R. F. & Price D. G. (1993) sia con quello proposto per i pilastri di forma rettangolare nel presente studio (*Tab.* 2). Fatto ciò, mediante un'analisi statistica multivariata sono stati costruiti i seguenti due modelli che, inizialmente, per ogni pilastro della cava hanno tenuto in conto le seguenti variabili:

MODELLO 1 – OTTENUTO CALCOLANDO F_s CON LE FORMULE *NSHAPE* E σ_p (TAB. 2), PROPOSTE IN QUESTO STUDIO PER PILASTRI RETTANGOLARI

MODELLO 2 – OTTENUTO CALCOLANDO F_s CON LE FORMULE *NSHAPE* E σ_p (TAB. 1), PROPOSTE DA BEKENDAM & PRICE (1993)

Variabile dipendente

F_s	fattore di sicurezza

Variabili indipendenti

A_{pil}	area del pilastro
P_{pil}	perimetro del pilastro
H_{pil}	altezza del pilastro
W	dimensione equivalente
L	lato maggiore del pilastro
A_{trib}	area tributaria metodo B&B
C_f	coefficiente di forma
Nshape	fattore di forma
e	eccentricità totale del carico verticale
A_{efpil}	area effettivamente reagente a compressione
E_d	tensione di compressione agente alla base del pilastro

Tabella 3 – Percentuale di variabilità di F_s spiegata da ognuna delle 5 migliori combinazioni di tre variabili indipendenti del sistema

Combinazione di variabili indipendenti	Percentuale di variabilità spiegata
Nshape - E_d - A_{pil}	93.8267
Nshape - E_d - A_{efpil}	93.8135
Nshape - W - A_{efpil}	93.7006
Nshape - E_d - P_{pil}	93.5588
Nshape - A_{pil} - W	93.5102

Per ognuno dei due modelli si è fatta un'analisi delle componenti principali o *PCA*, combinando fino a 5 delle 11 variabili indipendenti del sistema, al fine di individuare quale combinazione di tre di esse riuscisse a descrivere la maggiore variabilità di F_s (*Tab.* 3).

Dall'analisi dei risultati in tabella 3 si evince chiaramente che la variabile indipendente che governa il modello di regressione, in quanto presente in tutte e 5 le combinazioni, è il fattore di forma del pilastro *Nshape*. A seguire, con peso decrescente, si hanno la variabile tensione di compressione agente alla base del pilastro E_d, presente in 3 delle 5 combinazioni, quindi le variabili area del pilastro A_{pil}, dimensione equivalente W e area effettivamente reagente a compressione A_{efpil}, ognuna delle quali è presente in 2 combinazioni, e infine la variabile perimetro P, presente solo in 1 delle 5 migliori combinazioni.

Tenuto conto di quanto detto, ai fini delle simulazioni per valutare la bontà e l'affidabilità delle relazioni qui proposte per il calcolo del fattore di forma *Nshape* e della resistenza a compressione del pilastro σ_p (*Tab.* 2), si è scelto di effettuare una regressione multipla per ricavare un'equazione di correlazione fra il fattore di sicurezza F_s e le due variabili indipendenti che hanno il maggior peso percentuale sulla variabilità del sistema, *Nshape* e E_d.

La prima simulazione ha riguardato il **modello 1**, è stata condotta utilizzando i dati di tutti e 98 i pilastri della cava (*Fig.* 6) e ha fornito la seguente equazione:

$F_s = - 0.0764101 + 1.00173 \cdot Nshape - 0.473349 \cdot E_d$ [9]

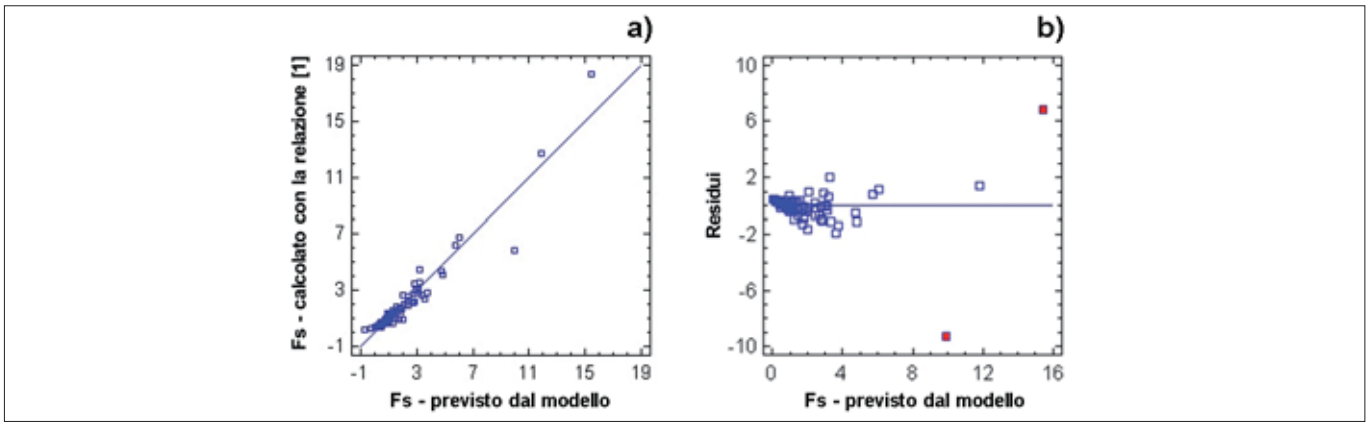


Figura 6 – **Modello 1***: a) Equazione per stimare il F_s a compressione dei pilastri, ottenuta con i dati di tutti e 98 i pilastri della cava; b) Distribuzione dei residui del F_s stimato stimato con l'equazione di regressione multipla*

La seconda simulazione ha riguardato il **modello 2**, è stata condotta utilizzando i dati di tutti e 98 i pilastri della cava (*Fig.* 7) e ha fornito la seguente equazione:

$F_s = - 0.294449 + 1.18785 \cdot Nshape - 0.302186 \cdot E_d$ [10]

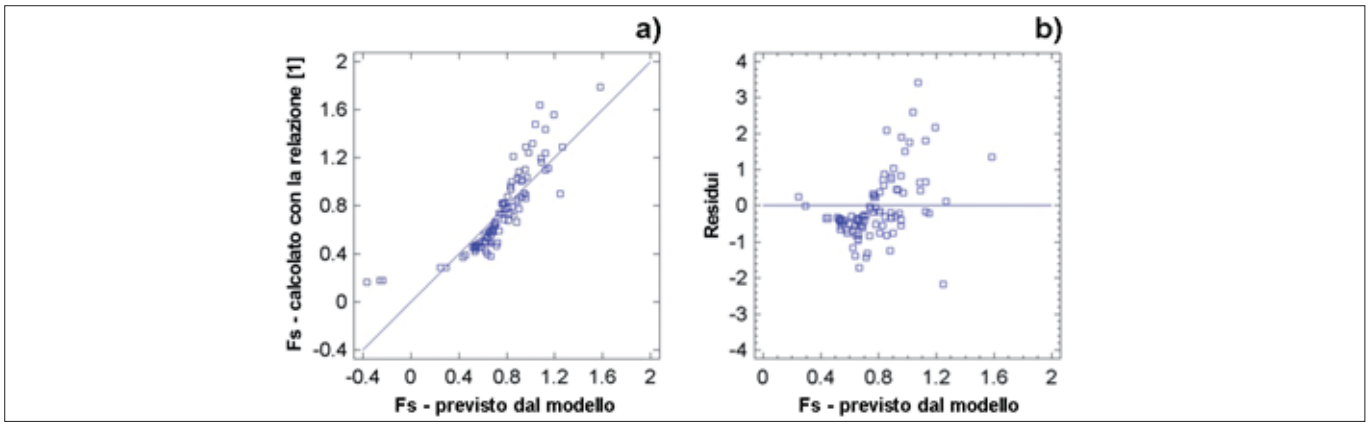


Figura 7 - **Modello 2***: a) Equazione per stimare il F_s a compressione dei pilastri, ottenuta con i dati di tutti e 98 i pilastri della cava; b) Distribuzione dei residui del F_s stimato con l'equazione di regressione multipla*

L'equazione [9], del modello 1, spiega il 92.920% della variabilità del F_s, mentre l'equazione [10], del modello 2, riesce a spiegare solo il 72.554% della variabilità del F_s. L'analisi dei residui dei valori stimati (*Figg.* 6b e 7b), mette in evidenza il fatto che nel modello 1, ottenuto con l'*Nshape* proposto in questa sede (*Fig.* 6b), sono presenti dei pilastri anomali (*Fig.* 6b in rosso) con valore assoluto del residuo maggiore di 2 (*Tab.* 4).

Tabella 4 – Modello 1: pilastri con valori dei residui anomali cioè con valore assoluto del residuo > 2

Numero pilastro	Fs calcolato	Fs stimato	Residuo	Studentized Residual
39	18.3004	15.4339	2.86649	6.84
92	5.87913	9.91628	-4.03715	-9.29

La presenza di pilastri anomali è confermata anche dagli elevati scostamenti del coefficiente di forma C_f di tali pilastri rispetto al C_f medio ottenuto per tutti i pilastri della cava (*Tab.* 5).

Tabella 5 - Possibili pilastri anomali, per forma e/o dimensioni, individuati grazie all'elevato valore del loro C_f

Numero pilastro	Valore del coefficiente di forma	Media dei C_f della cava	Deviazione Standard del C_f della cava	Valore limite C_f anomali (5.47 + 3·Dev. St.)
1	9.76	5.47	1.47	9.88
19	11.26			
39	14.44			
92	10.68			

Accertata la presenza di due pilastri anomali (nn. 39, 92) che falsano il modello di regressione, si è proceduto all'eliminazione degli stessi e ad una nuova regressione multipla, considerando le stesse variabili, ma per il solo **modello 1** che, come detto, spiega una maggiore variabilità del F_s (*Fig.* 8).

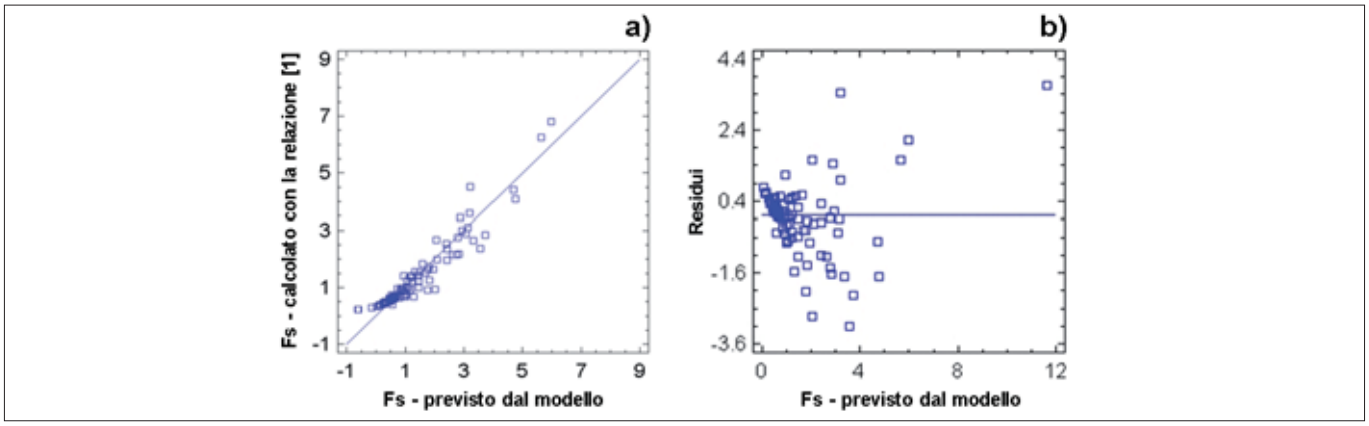


Figura 8 - **Modello 1***: a) Equazione per stimare il F_s a compressione dei pilastri, ottenuta con i dati di 96 pilastri, cioè senza i pilastri anomali; b) Distribuzione dei residui del F_s stimato con l'equazione di regressione multipla*

La nuova regressione multipla per il **modello 1**, utilizzando 96 pilastri, ha fornito la seguente equazione di correlazione:

$$F_s = - 0.0457539 + 0.981314 \cdot Nshape - 0.453951 \cdot E_d \qquad [11]$$

L'equazione di questa nuova regressione [11] spiega il 94.2751% della variabilità del F_s mentre l'errore standard delle stime del modello mostra una deviazione standard dei residui pari a 0.409389 e cioè un valore sensibilmente inferiore rispetto a quello fornito dall'equazione [9].

A valle della verifica statistica del modello di regressione proposto, si è deciso di eseguire un ulteriore test confrontando il grado di stabilità effettivamente rilevato in situ e quello prevedibile in base all'equazione [11] del modello di regressione.

Lo stato di dissesto dei pilastri in situ, valutato in occasione di un rilievo geomeccanico condotto negli anni 1995-1996, è stato definito mediante la classificazione proposta da Bekendam R.F. & Dirks W.G (1990). Tale classificazione prevede 5 classi a stabilità decrescente, dalla classe 1 alla 5, assegnate in relazione allo stato di fratturazione che i pilastri presentano (*Fig.* 9).

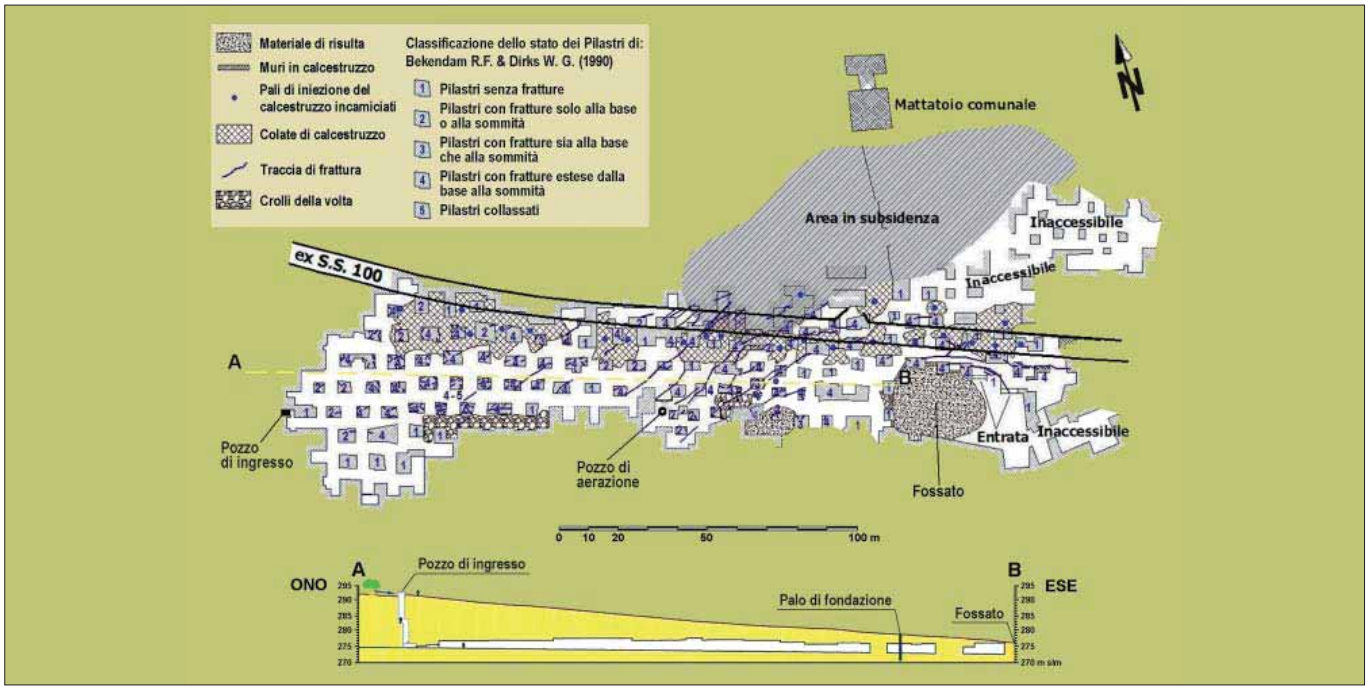


Figura 9 - Planimetria e sezione longitudinale della cava di Via S. Allende, Mottola (TA) con classificazione della stabilità dei pilastri, secondo la metodica proposta da Beckendam R. F. & Dirks W. G. (1990), da rilievo geomeccanico del 1995-1996

Dopo aver calcolato con la [11] i fattori di sicurezza a compressione dei pilastri F_s, gli stessi sono stati raggruppati in tre classi stabilendo un'equivalenza fra essi e le classi di stabilità proposte da Bekendam & Dirks (*Tab.* 6).

Tabella 6 – Equivalenze fra le classi di stabilità stabilite in base al valore di F_s calcolato con la relazione [11] e le classi desunte in base al grado di fratturazione dei pilastri rilevato in situ

Classi di stabilità da F_s calcolato con la [11]	Classi di stabilità di Bekendam & Dirks (1990) da rilievo geomeccanico
$F_s > 1.2$	1 ÷ 2
$1.2 \geq F_s \geq 0.8$	3 ÷ 4
$F_s < 0.8$	5

Si è, quindi, eseguito un confronto sullo stato evolutivo del dissesto della cava, espresso in termini percentuali, confrontando il grado di stabilità dei pilastri scaturito dal rilievo geomeccanico del 1995-1996 e quello ottenuto dal modello di regressione (*Tab.* 7).

Tabella 7 - Confronto fra lo stato di dissesto dei pilastri rilevato in situ negli anni 1995-1996 e quello previsto dal modello di regressione mediante i F_s calcolati con la relazione [11]

Classi di stabilità di Bekendam & Dirks (1990) da rilievo geomeccanico	Numero di pilastri nella classe	Percentuale di pilastri nella classe	Classi di stabilità da F_s calcolato con la [11]	Numero di pilastri nella classe	Percentuale di pilastri nella classe
1 ÷ 2	23	23.71 %	$F_s > 1.2$	38	40.00 %
3 ÷ 4	72	74.23 %	$1.2 \geq F_s \geq 0.8$	20	21.05 %
5	2	2.06 %	$F_s < 0.8$	37	38.95 %

La distribuzione percentuale dei pilastri nelle tre classi di stabilità, fatta salva la sostanziale diversità metodologica dei due approcci, sembra evidenziare una propensione della classificazione di Bekendam & Dirks a sovrastimare, rispetto all'equazione [11], il grado di stabilità dei pilastri, in particolare la percentuale di quelli che si trovano più o meno in condizioni di equilibrio limite ($F_s \approx 1$) e a sottostimare fortemente i pilastri prossimi al collasso o collassati (*Fig.* 10).

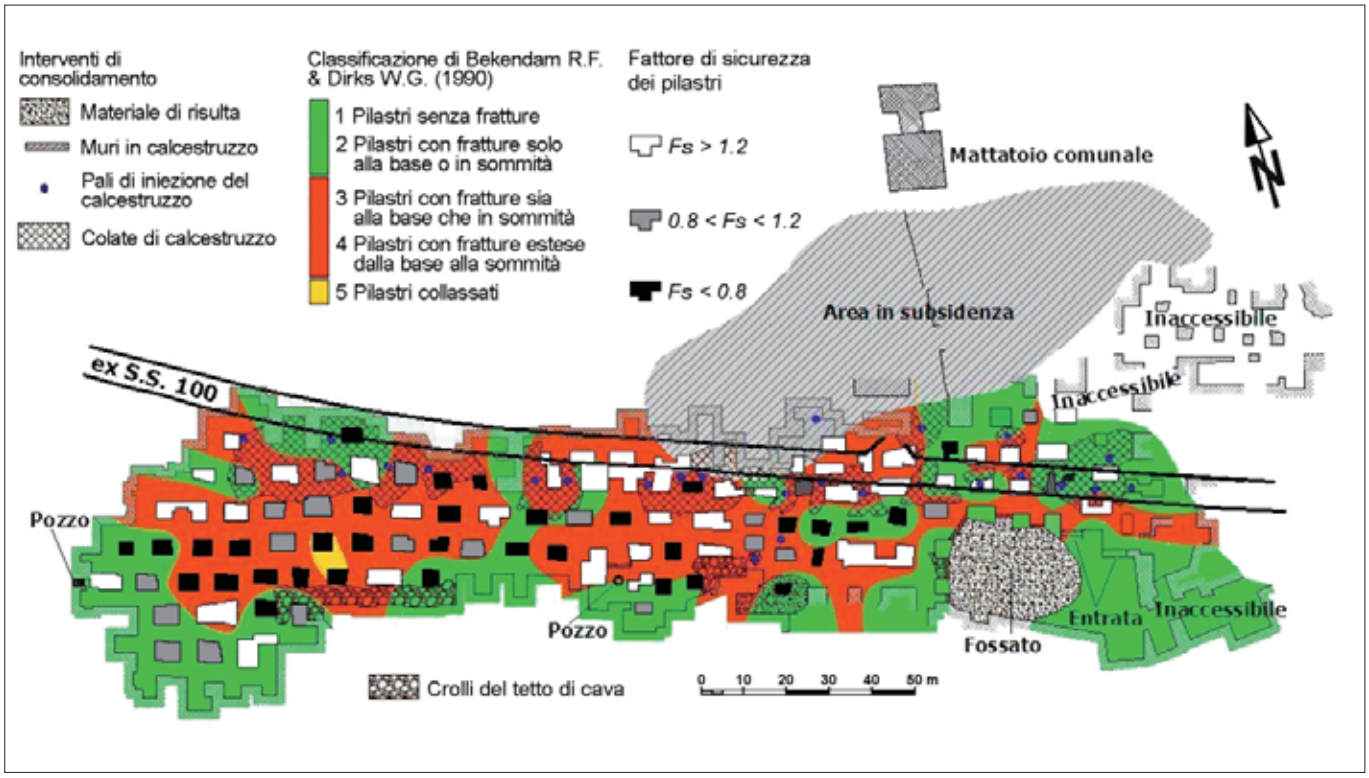


Figura 10 - Cava di Mottola (TA): Confronto fra il grado di stabilità dei pilastri stimato con la classificazione proposta da Beckendam R. F. & Dirks W. G. (1990) e i valori di F_s ricavati dall'equazione [11]

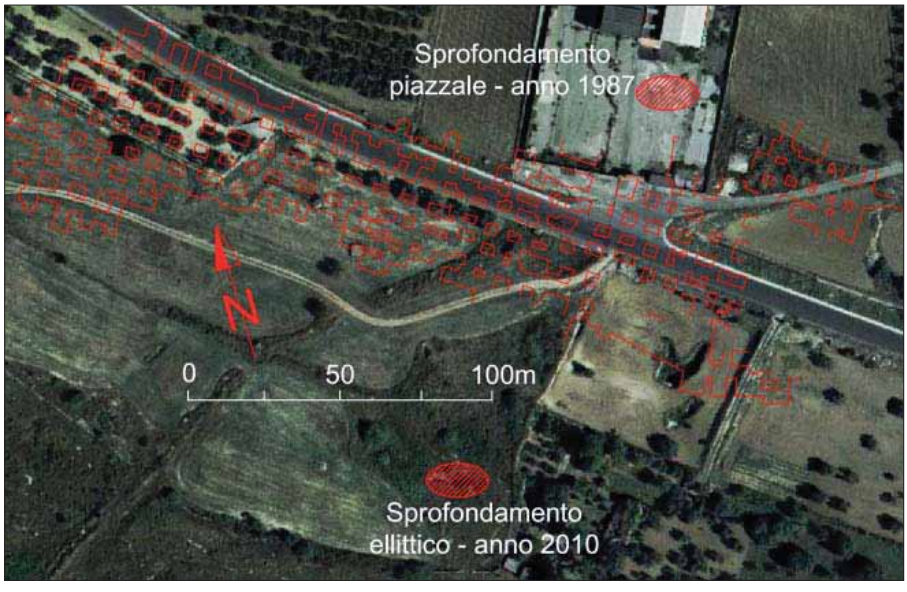


Figura 11 - Foto aerea con la planimetria di cava e l'ubicazione degli sprofondamenti rilevati negli anni 1987 e 2010

Anche le evidenze concrete dei fenomeni di dissesto che hanno interessato l'ex S.S. 100, che corre sopra la cava, e gli sprofondamenti verificatisi nel piazzale dell'ex mattatoio adiacente la cava e, in tempi più recenti, in una porzione di territorio ubicato circa 60m a SW dalla stessa (*Fig.* 11), sembrano confermare che le previsioni di stabilità basate sulla classificazione dei pilastri di Bekendam & Dirks sottostimino il grado di pericolosità da sinkole connesso al collasso dei pilastri di cava.

CONCLUSIONI

L'approccio deterministico per valutare la stabilità di una cava sotterranea, basato sul calcolo del F_s a compressione dei pilastri, è ancora molto utilizzato nella comune pratica ingegneristica. Tale approccio si basa

sulla formula [1], nella quale in presenza di eccentricità del carico verticale, il più delle volte e con grande approssimazione, per il calcolo della tensione di compressione agente alla base del pilastro E_d, non viene considerato l'effetto di riduzione della sezione del pilastro effettivamente reagente a compressione.

L'analisi di diversi casi di studio, condotti in Puglia in cave di rocce calcarenitiche classificabili come "rocce tenere" e con bassissima resistenza a trazione, ha evidenziato che tale approssimazione può condurre a una pericolosa sovrastima delle condizioni di stabilità di alcuni pilastri e della cava nel suo insieme.

Tale sovrastima, inoltre, è ancora più significativa nelle cave o porzioni di cava più antiche, quelle cioè dove la coltivazione avveniva con mezzi manuali e i pilastri hanno forme e disposizioni geometriche molto irregolari.

Un altro aspetto, che è stato oggetto di numerosi lavori scientifici, è quello legato alla determinazione del numeratore dell'equazione [1] cioè la resistenza a compressione dei pilastri σ_p. Le ricerche pregresse hanno assodato che essa è sensibilmente maggiore di quella ottenuta in laboratorio, mediante prove di compressione uniassiale σ_c, e dipende dalla reale forma e dimensione del pilastro che vengono esplicitate mediante un coefficiente correttivo denominato fattore di forma *Nshape*.

In passato sono state proposte diverse formulazioni per il fattore *Nshape*, non tutte calibrate per una specifica forma geometrica del pilastro, che si basano su un parametro denominato dimensione caratteristica del pilastro *W* pari al rapporto fra l'area e il perimetro dello stesso. In questa sede vengono proposte delle nuove formule per l'*Nshape* e, conseguentemente, per il calcolo di σ_p.

Le formule di *Nshape* e σ_p, messe a punto per pilastri a sezione circolare, quadrata e rettangolare, sono state ricavate a partire dal valore teorico che assume la dimensione caratteristica *W* per ognuna delle tre sezioni geometriche considerate e da un coefficiente di forma C_f che, invece, misura lo scostamento da tale valore teorico. Il valore del C_f del pilastro sembra sia in grado di individuare, quando maggiore di 3 Dev. St. rispetto al valore medio di tutti i pilastri della cava, la presenza di pilastri anomali per dimensioni e forma, al pari di altre metodiche statistiche.

Al fine di valutare l'affidabilità delle nuove formule proposte si è condotta una simulazione su una cava sotterranea dismessa di calcareniti, ubicata nei pressi dell'ex mattatoio del Comune di Mottola (TA), della quale lo stato di stabilità è stato monitorato per circa 25 anni a partire dal 1990.

La simulazione è stata condotta mediante un'analisi statistica implementata su due modelli, uno basato sulle nuove formule qui proposte e uno basato sulle relazioni proposte da Bekendam & Price (1993). L'analisi ha consentito di stabilire, preliminarmente, che la combinazione di variabili indipendenti, fra le 11 considerate, che spiega la maggior percentuale di variabilità del fattore di sicurezza F_s è quella costituita dalle variabili: *Nshape* (fattore di forma del pilastro), E_d (tensione di compressione agente alla base del pilastro) e A_{pil} (area del pilastro).

Mediante un'analisi di regressione multipla, per ognuno dei due modelli considerati, sono state ricavate le equazioni che permettono di stimare il valore di F_s a partire dalle due variabili *Nshape* e E_d. Inizialmente l'analisi è stata condotta considerando tutti i pilastri della cava; dal confronto fra la varianza spiegata si è accertato che il modello 1, basato sulle equazioni proposte in questa sede, è più performante rispetto al modello 2, implementato sulle equazioni di Bekendam & Price. Quindi, un'analisi dei residui del modello 1 ha consentito di individuare dei pilastri anomali, gli stessi individuati dal C_f, che sono stati esclusi dal database utilizzato per una nuova regressione multipla dalla quale si è ottenuta un'equazione in grado di spiegare il 94.2751% della variabilità del F_s.

Infine, sono state messe a confronto le condizioni di stabilità dei pilastri, desunte con due metodiche completamente differenti. Una si è basata sul rilievo in situ e classificazione dello stato di fratturazione dei pilastri, come proposto da Bekendam & Dirks (1990), l'altra su tre classi di valori dei F_s dei pilastri ottenuti con l'equazione di regressione [11]. Il confronto ha evidenziato il fatto che la metodica proposta da Bekendam & Dirks tende a sottostimare la percentuale di pilastri collassati o prossimi al collasso.

Il periodico monitoraggio del grado di stabilità dei pilastri della cava e del territorio limitrofo, dal 1990 al 2012, e le simulazioni numeriche eseguite con codici di calcolo agli elementi distinti, tenendo conto dell'effetto creep in condizioni statiche e dinamiche, hanno evidenziato un significativo e progressivo peggioramento dello grado di stabilità sia dei pilastri che delle volte che ben si accorda ai valori dei F_s ottenuti dal modello di regressione multipla qui proposto.

BIBLIOGRAFIA

Beckendam R. F. & Dirks W. G. (1990), *Stability assessment of the Hoorensberg mine, Southern Limburg, using separate factors for intact and cracked pillars*. Proc. of VI Congr. Intern. IAEG, 2627-2635, Amsterdam.

Beckendam R. F. & Price D. G. (1993), *On the stability of abandoned room and pillar mines in very weak Maastrichtian calcarenites in the Nederlands*. Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Anagnostopoulos *et al.* (Eds.), Balkema, Rotterdam.

Bieniawski Z. T. & Van Heerden W. L. (1975), The significance of in situ tests on large rock specimens. Inter. J. of Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 12, 101-113.

Bruno G., Cherubini C. (2002), *Valutazione della stabilità di cave sotterranee in roccia calcarenitica: analisi comparata di alcune caratteristiche geometriche delle coltivazioni*. Quaderni di Geologia Applicata, 9-2(2002), 119-132.

Bruno G., Cherubini C. (2005), *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia*. Giornale di Geologia Applicata 1 (2005), 33-39, DOI: 10.1474/GGA.2005-01.0-04.0004.

Bruno G, Cherubini C., Vessia G. (2007), *Affidabilità di pilastri in roccia tenera nelle cave in sotterraneo*. Atti del Convegno "Sicurezza nei sistemi complessi", Bari 16-18 ottobre 2007;

Bruno G. (2012), *Caratterizzazione geomeccanica per la progettazione ingegneristica*. Dario Flaccovio (Ed.) - Palermo, ISBN 978-88-579-0150-3.

Cherubini C., Ramunni F., Greco A., Del Vecchio F. & Rizzi I. (1990), *Studio geologico-tecnico di una antica cava in sotterraneo in rocce calcarenitiche nel territorio comunale di Mottola (TA).* VII Congresso Nazionale Ordine Geologi, Roma.

Cherubini C., Di Cuia N., Pagliarulo R., Ramunni F. P. (1996), *Caratteri petrografici e meccanici delle calcareniti di Matera*. Memorie della Società Geologica Italiana, 51, 761-769.

Cotecchia V., Calò G. & Spilotro G. (1985), *Caratterizzazione geolitologica e tecnica delle calcareniti pugliesi*. Atti del 3° Convegno Nazionale sull'Attività Estrattiva dei Minerali di 2^ categoria, Bari.

Ghasemi E., Kalhori H., Bagherpour R. (2017), *Stability assessment of hard rock pillar using two intelligent classification techniques: A comparative study*. Tunneling and Underground Space Technology, 68, 32-37.

Goodman R. E. (1980) - *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons, N.Y.

Hustrulid W. A. (1976), *A review of coal pillar strength formulas*. Rock Mech., 8, 115-145.

Meyerhof G. G. (1953), *The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads*. Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., ICSMGE, Zurich, Svizzera, vol. n. 1, 440-445.

Salomon M. D. G. & Munro A. H. (1967), *A study of the strength of cool pillar*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., vol. 8, 59-62.

Spilotro G., Fidelibus M. D., Fidelibus C. & Zinco M. R. (1993), *Lithological and geotechnical features of the calcarenites in the west of the Murgian platform.* Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Anagnostopoulos *et al.* (Eds.), Balkema, Rotterdam.

Price D. G. & Van Steveninck R. (1988), *On the stability of ancient mine working for building stone in southern Limburg, The Nederlands*. in "Engineering Geology of ancient works, monuments and historical sites", Marinos & Koukis (Eds.), Balkema Rotterdam, ISBN 90-6191-793-X.

Zezza F. (1981), *I processi di degradazione delle pietre da costruzione della Puglia*. Convegno Internazionale "La Pietra, interventi conservazione restauro", Lecce.

Analisi sistemica per una valutazione della suscettibilità al dissesto di territori dell'Agro Nolano (provincia di Napoli) con presenza di cavità antropiche in tufo

Analysis for the assessment of instability susceptibility in areas of the Agro Nolano (Province of Naples) with presence of cavities dug in the tuff

Gianfranco Caccavale
Geologo, libero professionista, Dottore di Ricerca in Analisi dei Sistemi Ambientali, Università degli Studi di Napoli Federico II
E-mail: geosunda1@libero.it

Domenico Calcaterra
Ordinario di Geologia Applicata, Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, Università degli Studi di Napoli Federico II
E-mail: domenico.calcaterra@unina.it

Massimo Ramondini
Aggregato di Indagini e Monitoraggio Geotecnico, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli Studi di Napoli Federico II
E-mail: ramondini@unina.it

Parole chiave (*key words*): GIS (*GIS*), tufo grigio campano (*Campanian Ignimbrite*), cavità sotterranee (*anthropical cavities*), voragini (*anthropogenic sinkholes*), subsidenze (*subsidence*)

RIASSUNTO

L'esistenza di una diffusa rete caveale di origine antropica nel sottosuolo del territorio della Provincia di Napoli costituisce un ostacolo al sicuro sviluppo delle aree di sviluppo ed un fattore predisponente a fenomeni di dissesto di superficie. Scopo del presente studio è quello di disporre di un inventario geolocalizzato delle cavità antropiche e dei dissesti geostatici nell'area nolana. Le peculiarità di questi ipogei sono state successivamente analizzate in funzione del dato stratigrafico, geomorfologico e geologico locale. In questa sede, viene presentata una procedura sistemica per la valutazione delle suscettibilità al dissesto potenziale, all'origine della formazione di un sinkhole di superficie.

PREMESSA

I dissesti del sottosuolo dell'area napoletana rappresentano una delle cause più diffuse di crolli di manufatti abitativi e di danni alle infrastrutture, spesso legati alla presenza di vuoti di varia natura (cunicoli, cisterne, acquedotti), in generale, di un'ignota rete di cavità antropiche. A nord-est della metropoli partenopea, nel lembo di pianura che si interpone tra il Vesuvio e l'Appennino, noto come Agro Nolano, la facies zeolitizzata dell'Ignimbrite Campana fu oggetto di un intenso sfruttamento in loco per la realizzazione di edifici monumentali o di strutture abitative. La coltivazione del tufo e dei materiali di copertura è terminata alla metà del XX secolo, lasciando da una parte grandi cave a fossa disperse sul territorio e, dall'altra una rete di condotti verticali attraverso i quali si esercitava l'antica attività estrattiva del tufo. Tali condotti comunicano nel sottosuolo con camere ipogee disposte in serie e dalla ricorrente forma a campana che rappresentano attualmente la maggiore fonte di pericolo per i franchi di volta piuttosto esili e per una generale diminuzione dei coefficienti di sicurezza globali. I fenomeni di dissesto più frequenti sono voragini (*anthropogenic sinkholes*) che si creano o per cedimento del fronte di scavo o per crollo della canna di pozzo nei primi 20 m di profondità, prevalentemente nelle piroclastiti sciolte. Le cause di tali dissesti sono da ricercare per lo più nei sovraccarichi esterni, negli eventi pluviometrici estremi, nelle perdite dalle reti idriche o nell'infiltrazione delle acque meteoriche. La mancanza di database adeguati ed aggiornati sull'ubicazione e sulla geometria delle cavità oggetto del presente studio, per una serie di fattori limitanti quali mancanza di tempo, inconsapevolezza, l'incuria, rende difficile ancora oggi l'esatta individuazione delle aree più esposte al rischio, soprattutto nei centri storici. Alcuni censimenti delle cavità sotterranee della Città Metropolitana di Napoli sono consultabili sul web e si riferiscono al dataset principale della rete caveale dei comuni della provincia napoletana realizzato tra il 1999 ed il 2002 ed a quello della Federazione Speleologica Campana. L'attivazione di analisi multidisciplinari ha permesso di sviluppare una procedura sistemica per la valutazione della suscettibilità al dissesto collegato a questa rete per mezzo di modelli previsionali del rischio di natura geomorfologica innescato da ragioni geologiche ed antropiche, attualmente non contemplato negli strumenti di pianificazione delle Autorità di Bacino (PSAI).

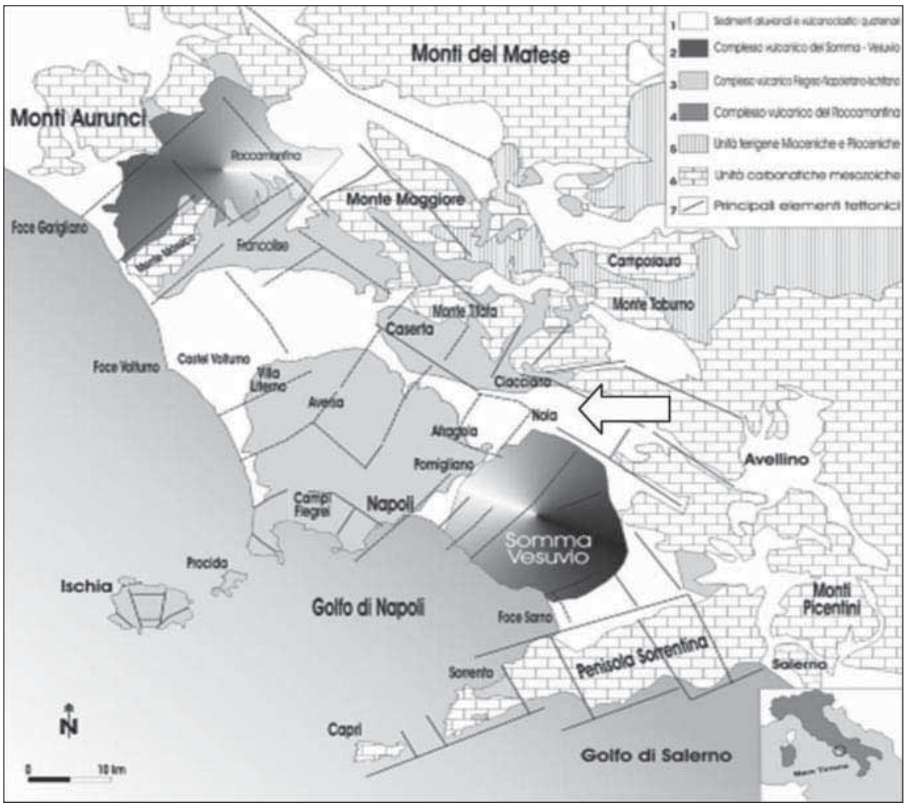
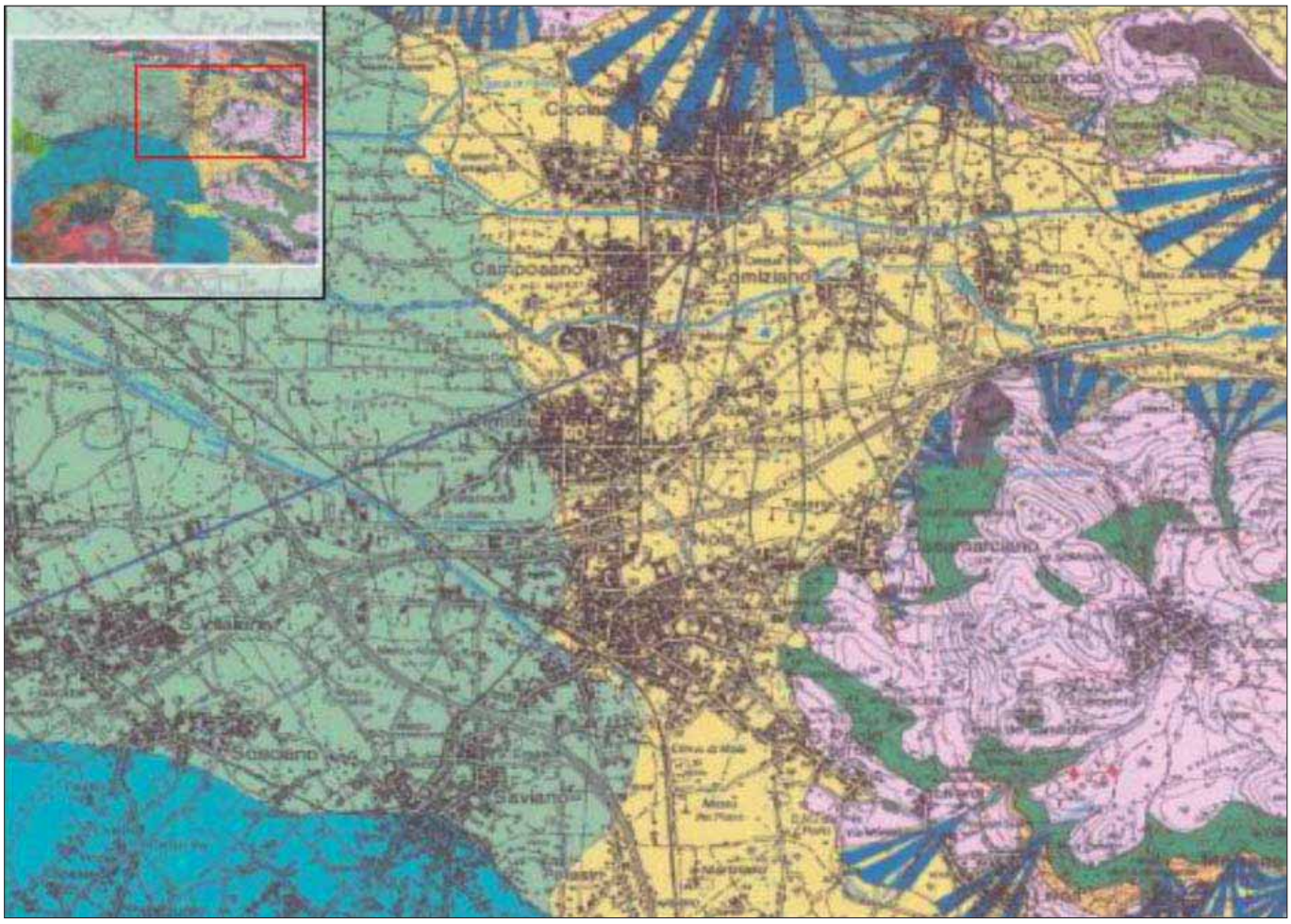


Figura 1 - L'Agro Nolano nella Piana Campana

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICODELL'AREA IN STUDIO

L'area di studio si inserisce nella valle del Fiume Clanio posta sul margine orientale della Piana Campana (*Fig.* 1), comprendente una zona rilevata e più acclive collocata a nord-est e ad est di piccoli centri urbani (Monti di Avella e di Visciano) ed una appartenente alla pianura degradante verso ovest (Agro Nolano) ai piedi del Vesuvio, che si raccordano attraverso una fascia pedemontana a modesta pendenza. I domini geolitologici, distinti per genesi, età e modalità di evoluzione geomorfologica, sono evidenziati nel paesaggio attraverso la lettura della *Carta Geologica* Foglio n. 448 (Ercolano) realizzata dall'ISPRA quale sintesi dei rilevamenti eseguiti a scala nazionale per il progetto CARG, Cartografia Geologica Nazionale, a scala 1:50.000 (*Fig.* 2). La struttura dei gruppi montuosi fa capo ad *elementi carbonatici giurassico-cretacici*, formatisi in mari poco profondi, sollevati dall'orogenesi terziaria e variamente smembrati dalla tettonica nel Pliocene (C.-Sub-Unità Mesocenozoiche Picentini-Taburno). I depositi che mantellano i versanti o si collocano tra i medesimi riempiendo il fondovalle sono rappresentati, prescindendo da rari depositi miocenici di alta quota, da *sedimenti clastici prevalentemente quaternari (DA)*, *depositi vulcanici (TGC) e depositi piroclastici in sede (DP) e/o indifferenziati (DPI) (Sintema Vesuviano Flegreo - Subsintema Agro).* L'elemento litologico caratterizzante il sottosuolo dell'alta pianura è rappresentato dalla formazione dell'Ignimbrite Campana (TGC, 39 Ka), messa in posto a seguito di particolari processi eruttivi della Caldera Flegrea, avente composizione da trachitica a trachitica fonolitica iperalcalina. Esso si rinviene nella facies zeolitizzata, di colore da gialla ad ocra, ad una profondità che è alquanto variabile passando dalle zone collinari a quelle a modesta pendenza, la cui parte basale si presenta con la tipica ed originaria colorazione grigio-scura. A copertura della formazione ignimbritica, si rinvengono sequenze clastiche quaternarie, brecce di versante, ghiaie di conoide e depositi alluvionali (VF2b2- Ghiaie Carbonatiche di Tufino, 37-10 Ka) che riempiono la valle e modulano le zone di raccordo tra i versanti calcarei e la pianura sottostante. Chiude la serie litostratigrafica un pacco di materiali piroclastici sciolti (PNV- Piroclastiti Sciolte, 18,3 Ka- 472 AD) riferibili a cineriti e livelli di pomici di provenienza vesuviana e flegrea, la cui distribuzione, pur seguendo gli originari assi di dispersione dei diversi eventi vulcanici, è stata compromessa da azioni ripetute di trasporto, rimescolamento e rideposizione. L'idrografia dell'area è il risultato di numerosi interventi di bonifica che, a partire sistematicamente dal XVI secolo ed in un territorio più vasto compreso tra la pianura di Maddaloni, i Campi Flegrei ed il Vesuvio, sottrassero vaste aree paludose all'eccessiva ramificazione dell'antico Clanio e degli alvei del Monte Somma (FIENGO, 1988). I torrenti che scendono dai rilievi appenninici confluiscono nella pianura del Nolano in un *"lagno mastro",* arginato e separato lateralmente dai *"controfossi"* di scolo delle acque provenienti dalle campagne, ma la cui pendenza tende gradualmente a diminuire verso ovest-



Legenda:
DEPOSITI MARINI DI PIATTAFORMA CARBONATICA (Giurassico-Cretacico Medio-Superiore):
(UNITÀ MESOCENOZOICA DEI MONTI PIACENTINI-TABURNO) C1 (verde scuro) = Calcari di Monte Fellino-Sant'Angelo Palomba; C2 (verde chiaro) = Calcari di Mugnano e Montagnella; C3 (rosa) = Calcari di Campimma-Calcari di Viscicano; C4 (rosso) = Calcari Oolitici.
DEPOSITI QUATERNARI (Pleistocene-Olocene):
TGC (arancio) = Ignimbrite Campana; DA, DPR (verde molto chiaro) = Depositi alluvionali e piroclastici in sede o rimaneggiati; DPI (rosa chiaro) = Depositi piroclastici indifferenziati; DT (blu) = depositi di conoide.

Figura 2 – Schema geologico dell'area nolana

nord-ovest sino alla forcina di Casapuzzano. La bonifica dell'area montana, diversamente da quella eseguita in pianura nel corso del viceregno spagnolo, fu compiuta solo a partire dalla metà del XIX secolo ed ebbe termine dopo l'eruzione vesuviana del 1906. Essa si concretizzò prioritariamente nella costruzione di robusti muri di sponda per i tratti vallivi del Gaudo e dell'Avella, nell'imbrigliamento montano degli affluenti dei due torrenti e, in ultimo, nella costituzione di vasche di trattenuta delle torbide provenienti dal Monte Partenio.

INDAGINI DISPONIBILI, RACCOLTA ED ORGANIZZAZIONE DEI DATI

La raccolta dei dati e la loro relativa organizzazione ha richiesto un articolato lavoro di catalogazione ed omogeneizzazione. In particolare, per la individuazione delle cavità presenti si è fatto riferimento alla banca dati elaborata dal C.I.R.Am. (Centro Interuniversitario Rischio Ambientale dell'Università di Napoli Federico II) nell'ambito di una convenzione stipulata nel 2001 con la Provincia di Napoli. Tale convenzione portò anche alla creazione di una specifica cartografia tematica in ambiente GIS, utilizzata successivamente per lo sviluppo del relativo S.I.T. presso la Direzione Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Napoli (AA.VV., 2004). Lo studio citato mostra che l'Ambito 5 (Camposano, Casamarciano, Cicciano, Comiziano e Tufino) risulta essere il secondo più ricco di cavità e pozzi singoli dopo quello ubicato a nord della città di Napoli. Questi vuoti sotterranei, in ogni caso, risultavano sottostimati rispetto alla realtà, soprattutto per l'incidenza delle particolari condizioni del sottosuolo nel corso della realizzazione di manufatti e per l'accadimento di frequenti voragini in ambito urbano. L'esigenza di riunire e sistematizzare in un unico quadro conoscitivo informazioni relative ai fattori predisponenti ed innescanti i fenomeni di sprofondamento antropico si inquadrava con l'attività di ricerca tra l'ISPRA ed il SIT della Città Metropolitana di Napoli attraverso la quale sono stati diffusi alla comunità scientifica nuovi dati per l'area di Napoli (Basso *et al.*, 2013; Nisio, 2013; Guarino *et al.*, 2012) consultabili su http://sgi2.isprambiente.it/cmnapoli/ e http://sgi1.isprambiente.it/sinkhole/. Una seria diagnostica per individuare ed eventualmente quantificare il pericolo di crollo e/o di stabilità di questo sistema sotterraneo ha richiesto la messa in campo di strategie conoscitive di previsione e prevenzione (LOMBARDI *et al.*, 2002; EVANGELISTA, 1991) che richiedono una definizione quanto più accurata possibile dei seguenti elementi: *numero e densità di cavità presenti sul territorio; geologia, litologia, stratigrafia, idrogeologia, caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni nell'intorno dei pozzi di accesso; dimensioni planimetriche e volumetriche delle cavità e rapporti geometrici fra gli elementi di queste ultime; entità dei fenomeni evolutivi di alterazione della calotta e dei piedritti della cavità; reti idriche e fognarie; presenza di sovraccarichi.* La fase di acquisizione degli elementi territoriali è stata orientata su due direttrici complementari (*Tab.* 1): l'una tecnico-operativa, l'altra storico-amministrativa. Sul piano tecnico-operativo, si è vagliata e selezionata la corposa documentazione geologica e geofisica acquisita dal mondo professionale e si sono effettuati rilevamenti di superficie relativi ai punti-cava, ai dissesti presenti e a quelli avvenuti nel passato, anche con il supporto logistico e testimoniale dei cavamonti in vita e della popolazione locale. Sul piano storico-amministrativo, è stata analizzata la documentazione custodita presso gli Archivi di Stato di Napoli e di Caserta, reperendo informazioni inedite sull'attività estrattiva nel XVII e XIX secolo. Tutti i dati sono stati accuratamente georeferenziati all'interno di un database tramite palmare GPS (Mobil Mapper 6, 2010), rappresentati graficamente ed elaborati. Ad esempio, sono state realizzate carte della profondità e dello spessore delle principali formazioni geologiche con l'intento di ricercare eventuali relazioni tra l'attività estrattiva e la frequentazione dei siti e tra assetto stratigrafico e geotecnico della sequenza-tipo e l'insorgenza delle voragini da sprofondamento.

Tabella 1 – Acquisizione ed elaborazione dei dati territoriali

PERCORSO STORICO-AMMINISTRATIVO	PERCORSO TECNICO-OPERATIVO
Presso i Comuni: documentazione geologica interventi edificatori in aree cavate autorizzazioni sindacali apertura varie cave rapporti VV.UU e VV.FF.. dissesti negli abitati **presso emeroteche specializzate:** articoli dai quotidiani e periodici più letti e diffusi nel Nolano tra il 1973 ed il 2011 **presso gli Archivi di Stato di CE e NA:** Intendenza Borbonica, Affari Comunali Casamarciano ASC 1805-1861 bb. 1177-1190 Tufino ASC 1805-1861 bb. 1320 -1337 Comiziano ASC 1805-1861 bb. 1276-1290 Incartamenti della Direzione Generale Ponti e Strade per la realizzazione delle infrastrutture viarie del Regno: ASN Ponti e Strade f.1383 fs.lo 560 la bonifica dei RR. Lagni: ASN Min. Int. II inv. fs 4677-4768-4679 Catasti Onciari del XVIII sec.: Casamarciano, 1755 Tufino con annesse frazioni, 1746-1753-1754 Comiziano e Gallo, 1754	**Informatizzazione dei seguenti elementi:** occhi di monte o punti-cava grotte-cantina anthropogenic sinkholes sondaggi stratigrafici dati idrogeologici dissesti areali cave aree risanate **Tematismo significativo:** Carta delle attività estrattive e dei dissesti di superficie nei Comuni coinvolti nella ricerca **Tematismi di supporto allo studio:** Isopache delle piroclastiti (PNV) Isobate del top dell'I.C. (o TGC) Isopache delle ghiaie (VEF2b2) a tetto del TGC Isopache totali dell'I.C. (o TGC) Isopache sola facies gialla LYT Morfologia di deposizione dell'I.C. (o TGC) **Organizzazione di schede descrittive:** grotte-cantine cavità ispezionate e rilevate

DISTRIBUZIONE TERRITORIALE DEI PUNTI-CAVA

Nella Carta delle Attività Estrattive e dei Dissesti di Superficie (*Fig.* 3) sono stati cartografati numerosi condotti verticali che si distribuiscono su lotti terrieri prospicienti i principali assi viari del XVII-XIX secolo (AVELLA, 2006). La ragione di questa collocazione fu soprattutto di convenienza tecnico-commerciale favorendo il veloce trasferimento del materiale cavato dalla zona di recupero al suo luogo di impiego e, in secondo luogo, di ordine litostratigrafico privilegiando i siti dove la formazione tufacea si rinvenisse a modesta profondità o/e sottoposta ad uno minor spessore della coltre alluvionale. L'attività estrattiva, rigidamente concordata tra il proprietario ed il cavatore specializzato secondo Prammatiche e Statuti Municipali Urbani del XIX secolo, prevedeva una fascia di rispetto (5 m) dalle strade principali, modeste penetrazioni nella proprietà (150 m) per la creazione di mulattiere destinate al trasporto esterno dei blocchi tufacei e un interasse tra i pozzi di accesso al giacimento (12 m) per evitare lo sconfinamento in lotti attigui (MASCOLO *et al.*, 1983). Il metodo di attacco denominato *"a bottiglia"*, caduto in disuso dal 1929 a Napoli, fu impiegato nell'area nolana sino al 1957. Nello specifico, un pozzo cilindrico verticale non rivestito veniva approfondito sino a raggiungere la formazione tufacea sottostante a un banco di terreni incoerenti con spessore variabile tra 10 e 15 m. Dopo aver attraversato la roccia per 1-2 m, il taglio verticale procedeva dall'alto, per zone successive. Lo sfruttamento della formazione avveniva sino alla sua base, determinandosi una camera ipogea con diametro max. di 8-10 m e un'altezza compresa tra 10 e 13 m, secondo una forma *quasi semicircolare, spesso parabolica e di rado quasi semiellittica o a più centri,* tale da assicurare, mediante un idoneo franco, il sostegno dei terreni superiori

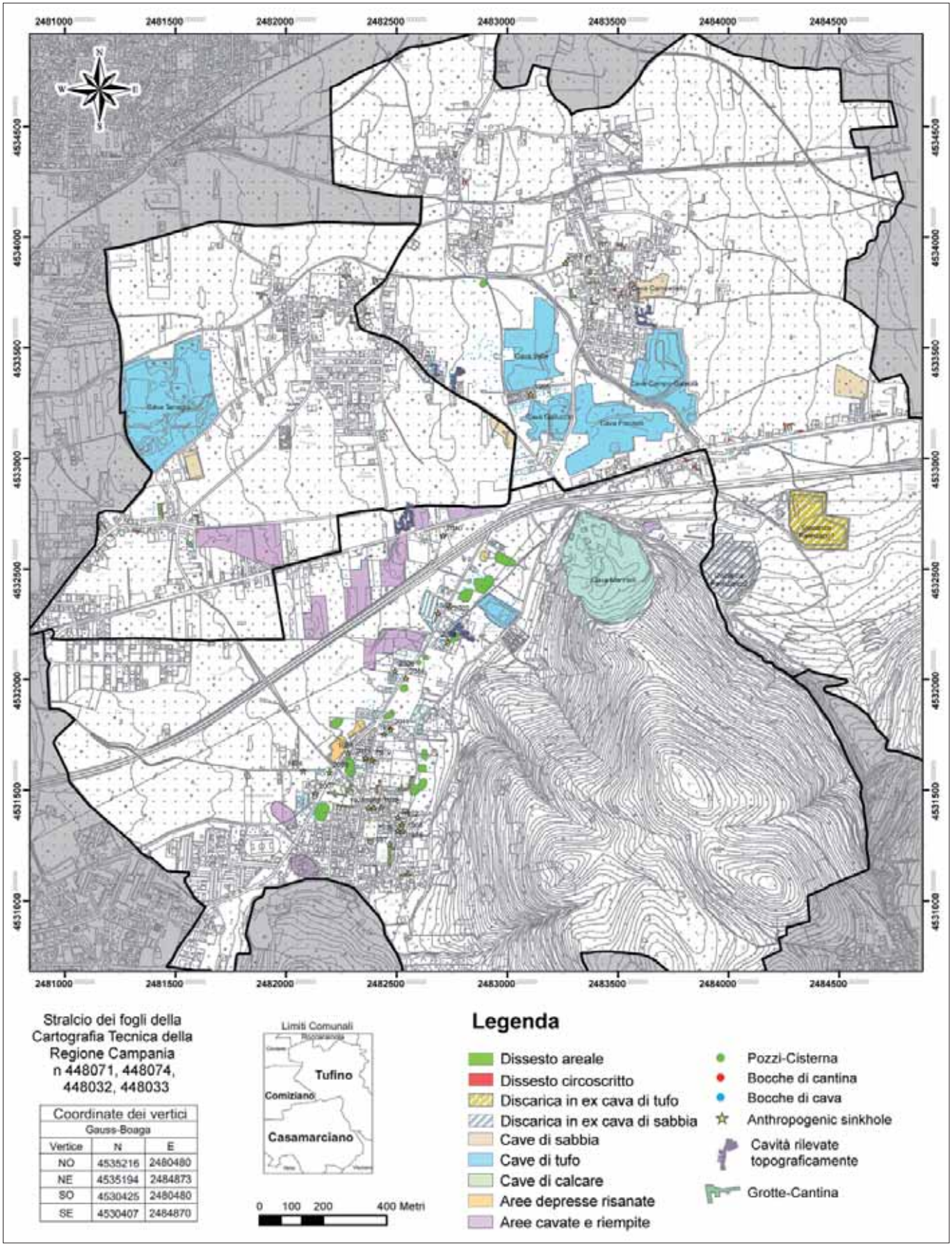


Figura 3 – Carta delle attività estrattive e dei dissesti di superficie

(*Fig.* 4). A fronte di una coltivazione più vasta e meno pericolosa per le maestranze, che accusavano spesso la mancanza di aria, il metodo di avanzamento mutò con l'adozione di pozzi *allineati o a quadriglia*, secondo una rete di gallerie ortogonali che lasciavano delle pareti che fungevano da pilastri a sostegno della volta e della sovrastante copertura piroclastica, infine, le camere venivano collegate con cunicoli di passaggio. I condotti verticali costituivano il mezzo più importante per il recupero dei blocchi tufacei che, staccati in profondità con particolari attrezzi (smarra, cunei di ferro, zeppe di legno) venivano portati in superficie con un argano manuale (*piccola ruota*) o dota-

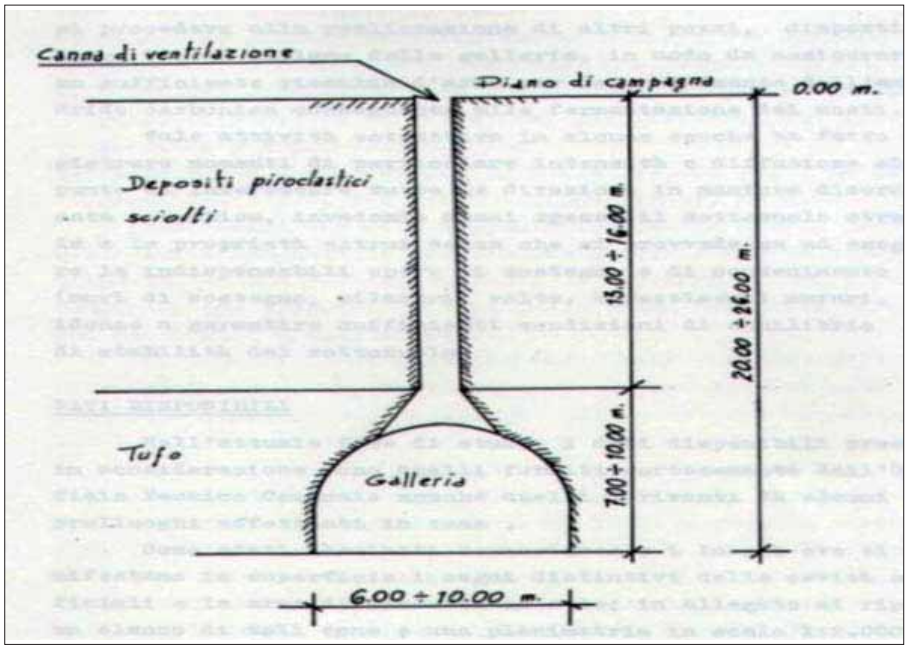


Figura 4 – Sezione verticale di una cavità a campana

to di un un'asta lignea collegata a un cavallo *(ruota dentata),* legati a una fune di canapa e successivamente d'acciaio (*Fig.* 5).

I due metodi di coltivazione inducono di per sé azioni differentemente invasive nel sottosuolo: il primo metodo attaccava con cavità piccole e accostate, nel secondo, attraverso un numero ridotto di pozzi di accesso ma si operava in profondità con grandi scavernamenti, affidando la tenuta geostatica degli scavi antropici alla capacità di resistenza di pochi pilastri. Esaurita la cava, i proprietari rimettevano il suolo a coltura, pianando i cumuli di sfrido della lavorazione dei blocchi tufacei o, ancora riversandoli parzialmente nella cavità, il foro di estrazione veniva poi occluso mediante una "*lamia*", una voltina realizzata nel collo della bottiglia, costituita da travetti in robusto legno su cui appoggiare pezzame tufaceo bene incastrato e terreni sciolti, si provvedeva successivamente al censimento dei punti di prelievo con contrassegni tradizionali (alberi di ciliegio, arancio amaro, nespolo). La fase della ruota dentata, il cui inizio è databile intorno agli anni 1942-45 si protrasse nel Nolano fino all'applicazione di disposizioni prefettizie provinciali e della Legge Barba degli anni '60 che, anche a seguito di maestranze decedute, deliberarono il divieto assoluto dell'estrazione del tufo in sotterraneo, permettendone il prelievo con cave a fossa congiuntamente a pozzolana, sabbia e ghiaia calcarea. Allo stato attuale, i punti-cava sono occlusi e poco accessibili, alcuni di essi sono stati recintati con palizzate e rete metallica, lasciati al degrado con assenza di qualsiasi accorgimento di sicurezza. Un attento rilievo speleologico delle cavità antropiche ha permesso la ricostruzione topografica e geometrica degli scavi e l'individuazione di aree soggette a maggiori criticità strutturali. Laddove il rilevamento ha costituito il primo passo per un giudizio di edificabilità del relativo soprassuolo o nella ricerca di responsabilità penali nell'insorgenza di dissesti in aree private. Gli ambienti ipogei si sviluppano alla base di un rilievo collinare (DE LUZIO. 2004), in aree agricole poco frequentate (CACCAVALE, 2004), tra aree edificate (BOCCHINO, 2010) o risultano coesistenti con complessi residenziali (MIELE *et al.,* 1997).

Gli accessi sono sempre impegnativi, nella discesa da condotti e progressione in corda, a raso da anfratti in aree sprofondate, o più morbidi, attraverso le discenderie con gradini discontinui o per lunghi tratti inesistenti, ma i percorsi sono spesso ostacolati da abbondante sfrido di cava. L'estensione delle cavità raggiunge anche i 4.000 m². Esse si sviluppano secondo più rami, con camere che hanno una profilatura a campana, un'altezza del tunnel di 13 m circa e una larghezza media di 20 m. L'indagine strutturale delle cavità

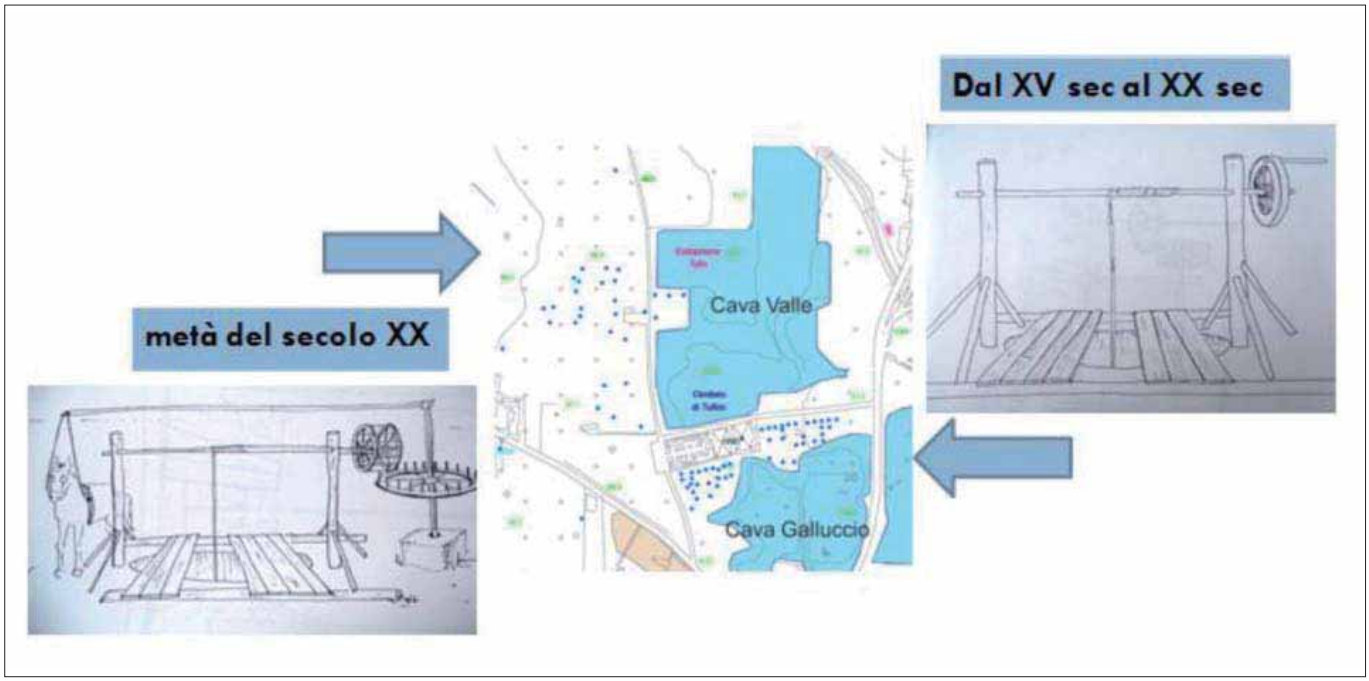


Figura 5 – La ruola a piolo (a destra) e la ruota dentata (a sinistra)

ha evidenziato: *la presenza di crolli dei rami più estremi,* provocati dal cambio di tenacità dell'ammasso tufaceo o da eteropie stratigrafiche riscontrate nel corso della coltivazione, con un veloce abbandono dei percorsi; *uno stato di fratturazione/ fessurazione* che, di fatto, si concentra lungo alcuni pilastri con grosse porzioni di roccia fratturata alla base (dislocazione) o per tutta la sua lunghezza sino all'attacco delle volte (sfettatura); *il mancato rivestimento* di pozzi di accesso che si

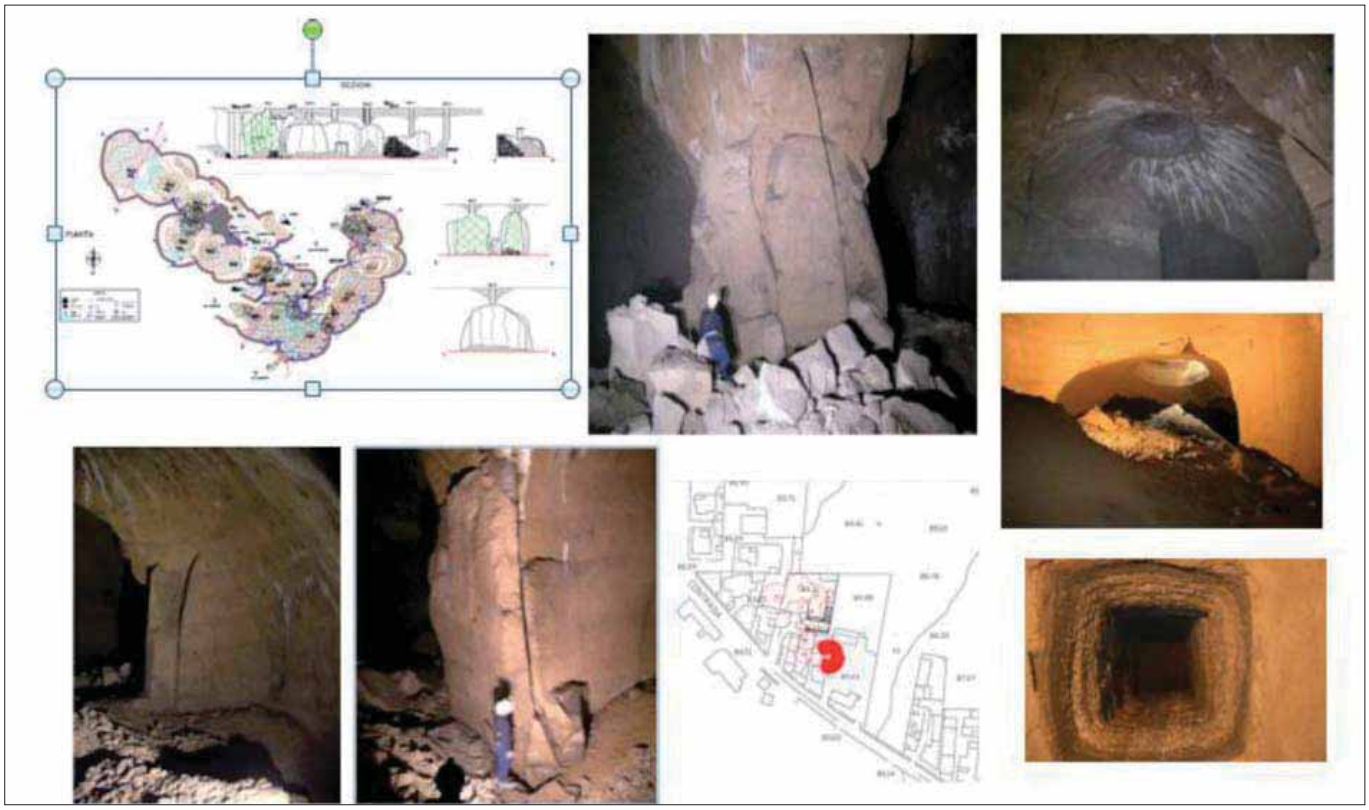


Figura 6 – Rilievo topografico e strutturale di cavità accessibili

sviluppano in vari metri di piroclastiti sciolte o moderatamente consolidate; *infiltrazioni d'acqua*, talora a carattere di stillicidio più o meno intenso, particolarmente concentrato nelle volte esposte o ben visibili lungo i pozzi; *semplici scollamenti* di porzioni superficiali e esposte del tufo lungo alcune pareti delle cavità, a causa di fratture con andamento parallelo a queste ultime (*Fig.* 6).

LE CAVITÀ-CANTINA

La localizzazione di profondi ipogei nei centri abitati è conseguente alle modalità di approvvigionamento dei materiali necessari alla costruzione dei manufatti, che avveniva, ove possibile, in loco (LUCCI, 1991). Al di sotto degli insediamenti, al servizio di fabbricati nobiliari o di masserie padronali, si realizzavano scale, lunghe discenderie o pozzi approfonditi fino al bancone tufaceo che veniva cavato a navata, secondo un sistema di gallerie di apprezzabili dimensioni, illuminate e ventilate da pozzi protetti in superficie con sistemi diversi.

A partire dalla prima metà del XVII secolo, l'uso di queste cavità è stato finalizzato prevalentemente all'immagazzinamento ed alla conservazione del vino (PIANCASTELLI, 2001), coesistendo nei locali a piano terra vasche di fermentazione e torchi in legno e, nelle profonde grotte, enormi botti poggianti su muretti in pietra di tufo destinate alle operazioni di travaso (*Fig.* 8).

Ulteriori usi documentati sono quelli della solforazione delle ciliegie e della raccolta di acqua piovana. Dal punto di vista geometrico la sezione delle grotte-cantina è a campana, con altezze che variano dai 4 a 12 m e larghezze non superiori a 12 m.

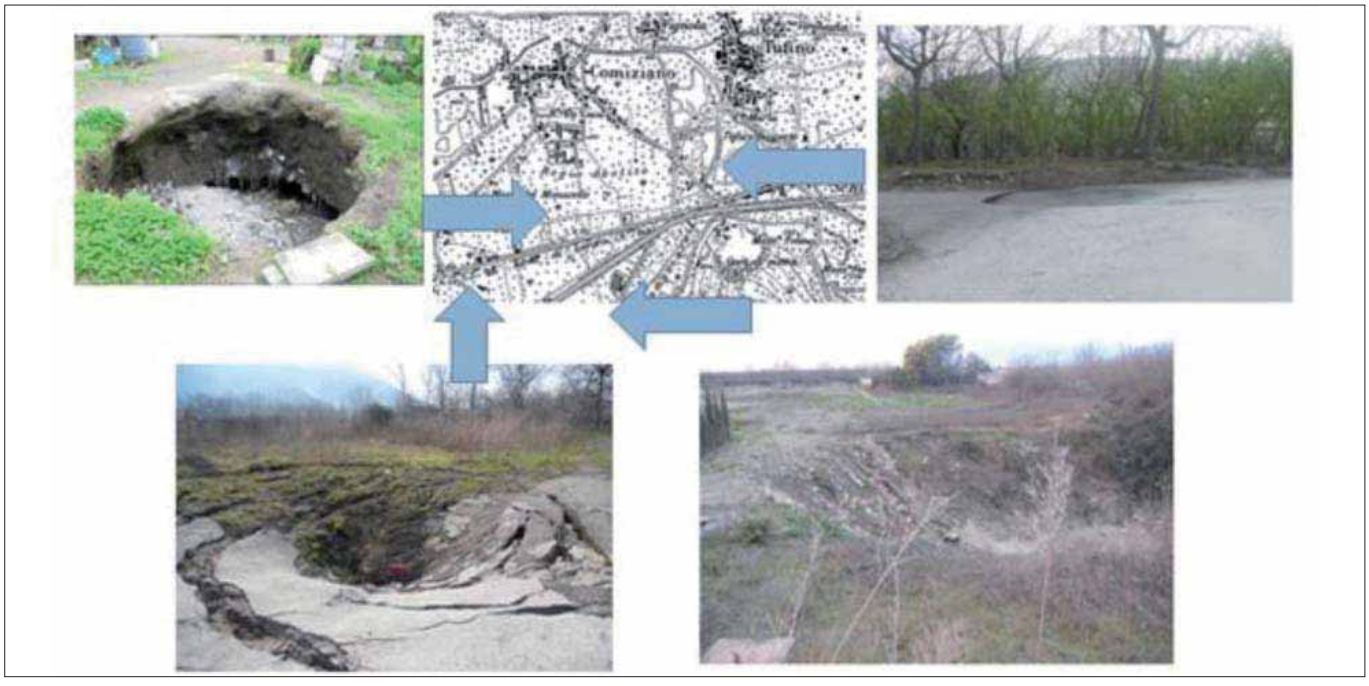


Figura 7 – Dissesti circoscritti

Le condizioni di questi ambienti, a seguito del declino delle attività rurali e del progressivo abbandono, sono andate via via peggiorando, a scapito della loro staticità. Gli elementi di degrado riconosciuti sono i seguenti: *occlusione di pozzi di luce* con solai in putrelle e tavelloni per alloggiarvi piante di nocciolo; *presenza di macerie* dovute a crolli dei locali antistanti le rampe di accesso; *presenza di materiale di diversa natura e di sterpaglia* che occludono le gallerie; *problemi di staticità* di alcune discenderie e di pozzi di accesso malamente rivestiti e/o conci murari in fase di disgaggio.

DISSESTI DI SUPERFICIE ED AREE RICOMPOSTE O RISANATE

I dissesti rilevati sulla superficie dell'area di studio consistono prevalentemente in avvallamenti circolari, di profondità variabile, dovuti a vari processi di degradazione delle cavità antropiche. Le subsidenze semplici (*gaussiane*) sono deformazioni del terreno che si originano nel punto-cava, causate dal distacco di *lamie* che chiudono le cavità e di piccoli cunei rocciosi in chiave di volta (*Fig.* 7), le dinamiche di queste deformazioni sono state studiate da vari Autori (ATTEWELL, 1982; RANKIN, 1988; MAIR *et al.*, 1993; VERRUIJT e BOOKER, 1996; GONZALES, 1987). A seguito

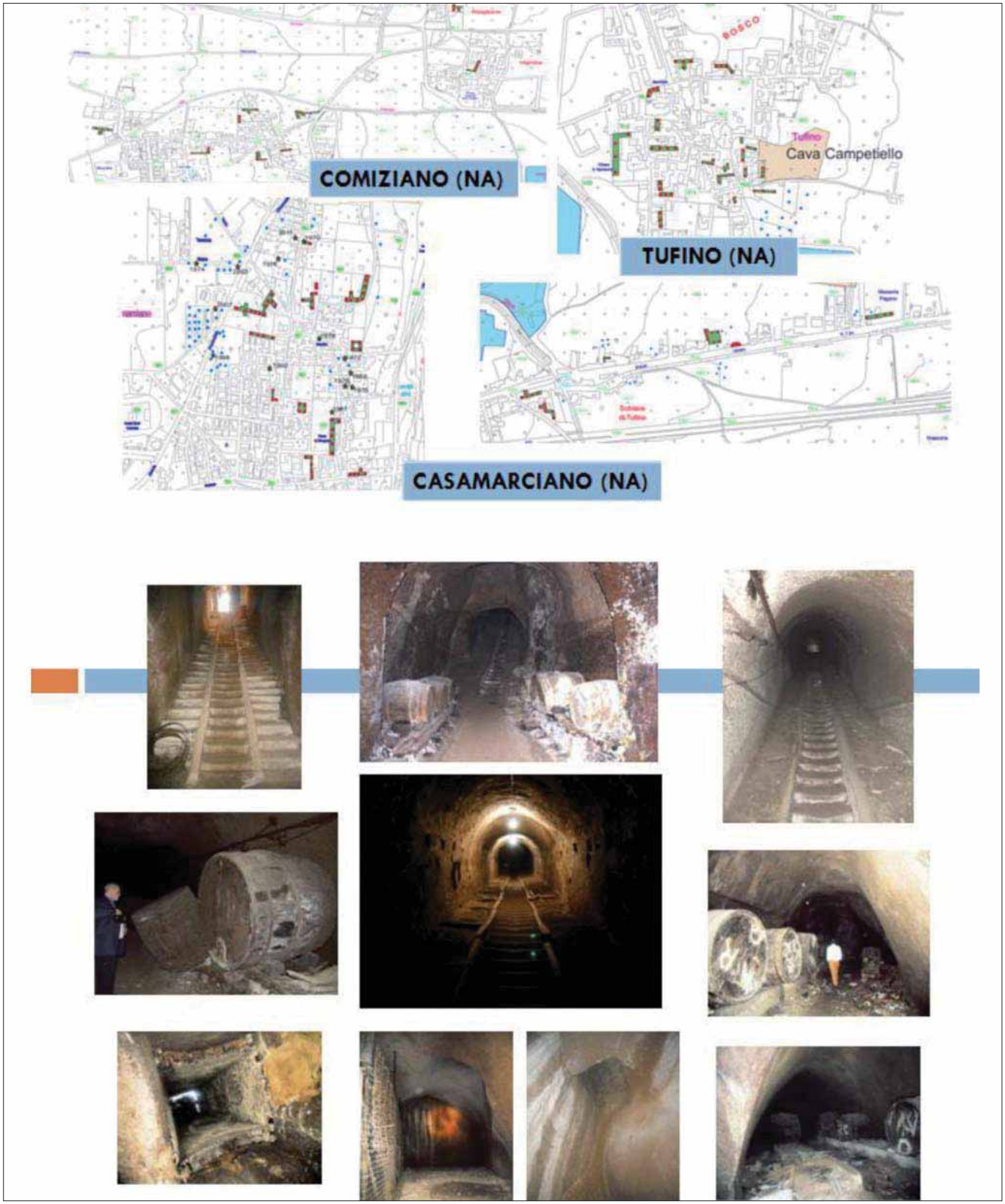


Figura 8 – Le cavità-cantine

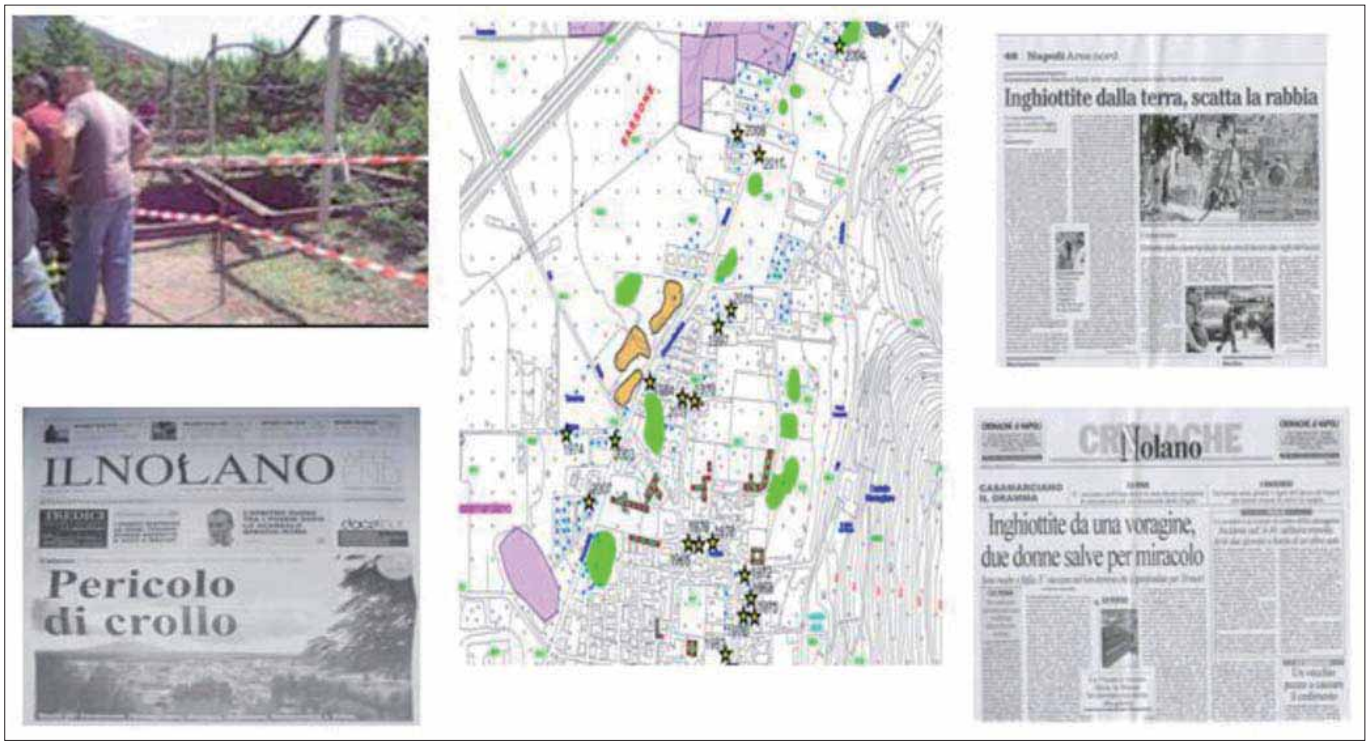


Figura 9 – Antrophogenic sinkhole

del crollo del materiale sovrastante, il fenomeno rappresenta una elevata pericolosità e coinvolgendo spesso edifici urbani, arterie stradali e a volte ignare persone, un elevato rischio. L'ampiezza delle voragini dipende dalla copertura della volta, dalle dimensioni dell'ipogeo e dall' intensità dell'azione delle acque di infiltrazione di origine meteorica (CAPOLONGO, 2008; FAIRBRIDGE, 1968).

Negli ultimi 40 anni sono stati registrati circa trenta dissesti di simile fattura, alcuni in evoluzione altri stabilizzati nelle campagne nolane con seri danni in aree pubbliche e su arterie stradali (*Fig.* 9).

Un particolare interesse meritano gli *sprofondamenti* coincidenti con crateri di collasso più o meno estesi (*Fig.* 10); in questi casi le nuove superfici di scorrimento si sono instaurate a partire dal tetto del materiale crollato fino in superficie (*subsidenze primarie*) ed a partire dal tetto della formazione fino in superficie (*subsidenze secondarie*). In ogni caso, la genesi degli sprofondamenti si deve al crollo parziale o totale di zone più sollecitate dei sistemi di cavità, a seguito di interventi impropri dell'attività estrattiva, quali l'abbattimento di pilastri, o per le attività correlate all'opera di ricostruzione postbellica, quando le cave di tufo furono riutilizzate, utilizzando per l'estrazione a volte anche esplosivi, o procedendo ad una rastrematura dei pilastri.

I dissesti areali, circoscritti in zone pedecollinari o nel raccordo con la pianura, sono stati invece senz'altro accelerati da un regime di circolazione idrica instauratosi nel reticolo



Figura 10 – Crateri di collasso

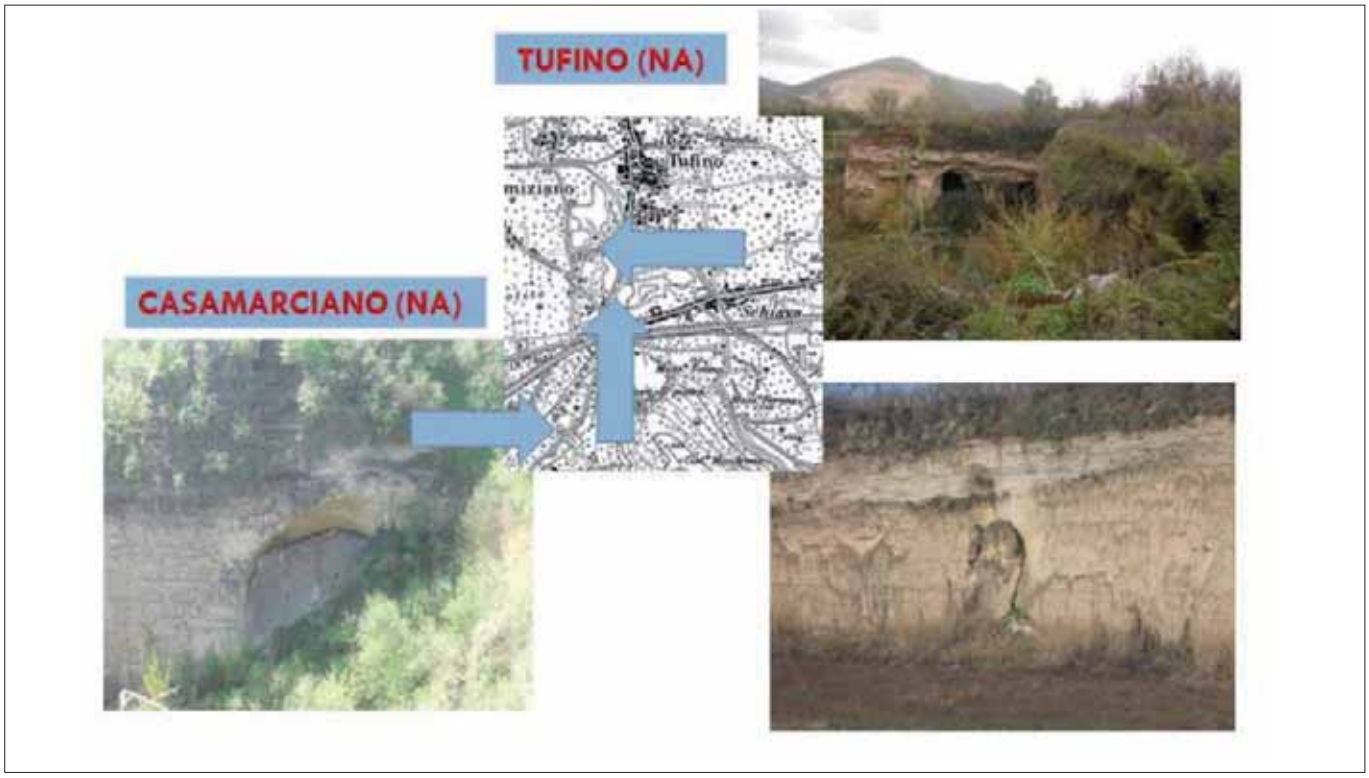


Figura 11 – Dissesti presso cave a fosse

strutturale dell'ammasso tufaceo. L'ampliamento delle cave a fossa ha cancellato molte prove puntuali dell'attività estrattiva sotterranea con elementi residuali che degradano sui bordi (*Fig*. 11)**.**

VALIDAZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO LOCALE

L'obiettivo di questa fase di studio, propedeutico alla messa a punto di un'analisi del rischio ipogeo, è consistita nella validazione di un modello di deposizione delle pertinenti facies litologiche, finalizzato a riprodurre e confermare l'eterogeneità dei fattori che determinano i dissesti sotterranei. La banca dati utilizzata è costituita da:

- *descrizioni litologiche* provenienti da n. 200 colonne stratigrafiche messe a disposizione della ricerca da parte di Organizzazioni Statali (ISPRA), Istituzioni Pubbliche Locali (Uffici Tecnici Comunali), Settore Acque dell'Amministrazione Provinciale di Napoli), Liberi Professionisti;
- *misure dei livelli della falda idrica sotterranea* eseguite in n. 60 pozzi perenni censiti dalla SOGIN nel 2003 per il Monitoraggio e Controllo della Qualità dell'Ambiente.

Preliminarmente si è reso necessario procedere alla revisione delle diverse litostratigrafie redatte per finalità differenti da diversi professionisti, procedendo ad un accorpamento delle facies geologiche in unità litologiche secondo una distinzione macrocategorica peraltro già estensivamente adottata dal Progetto CARG per il pertinente Foglio N. 448 (Ercolano) della Nuova Carta Geologica d'Italia in Scala 1:50.000, associando le facies geologiche O-PA, P_FI, P_MG e D_MG e D_VF-7 rispettivamente ai complessi litologici VEF2b2 e PNV, e la facies geologica IG_C al complesso litologico TGC (o I.C.).

Le variabili stratigrafiche, all'interno del tufo grigio campano e delle unità sovrastanti. hanno permesso l' elaborazione di carte ad isolinee funzionali all'analisi e al controllo del sistema ambientale. In relazione alla distribuzione ed alla struttura dei punti campionati, la disposizione areale dei depositi è inquadrabile in modelli matematici sferici quasi sempre con assenza di nugget (POSA D. *et al*., 2009). Il confronto tra i valori di soglia (sill) e la zona di influenza (range) osservata nei diagrammi di variabilità omnidirezionali, indica una complessa variazione spaziale, ossia:

- un diverso spessore del complesso vulcanico sciolto (PNV- 18.3 Ka??-472 AD) attestato lungo un'elevata distanza di correlazione (>400 m);
- la potenza del sottostante complesso detritico-alluvionale delle Ghiaie Carbonatiche di Tufino (VEF2b2, 37-10 Ka) oscilla significativamente entro distanze spaziali ristrette (<30 m);
- la profondità del tetto dell'Ignimbrite Campana (TGC, 39 Ka) misurato dalla superficie del suolo risulta correlata entro distanze accettabili (<2 Km).

I risultati statistici, di fatto, hanno permesso di ricostruire le superfici di deposizione o la potenza dei depositi attraverso l'applicazione di un algoritmo di interpolazione esatta, quale il kriging. Il sofware utilizzato è ArcGis 9.3.

Alcune superfici di deposizione, inoltre, sono state analizzate con l'algoritmo di natura deterministica, quale il TSA, fortemente consigliato nei casi di pre-processing, con il fine di rimuovere un eventuale trend di fondo della variabile da stimare e fornire nuovi spunti di lettura dell'architettura geologica, geomorfologica, tettonica e idrografica alla base di questo sistema ambientale. La formazione dell'Ignimbrite Campana costituisce un corpo continuo in tutta la Piana Campana (ORSI *et al*., 1996, BELLUCCI *et al*., 1992; ROSI *et al*., 1987; FISHER *et al*., 1983; ORTOLANI *et al*., 1985; BARBERI *et al*.,1978;), con un prelievo sotterraneo che, nell'Agro Nolano, inizia dalla fascia nord del Lagno di Avella e interessa le pendici occidentali di Casamarciano. Il modello di distribuzione spaziale del tetto di questa formazione evidenzia una variabilità compresa tra 4 m e 12 m a settentrione, tra 12 m e 16 m a meridione, tra 12 m e 24 m ad oriente. L'orizzonte tufaceo è interessato da fasi erosive post-deposizionali che, nella zona centrale hanno modulato il tetto secondo una morfologia a catino, in asse con le paleoconoidi delle propaggini meridionali dei Monti di Avella (*Fig*. 12).

Le isobate del tetto dell'unità tufacea, riferite alla superficie del mare, sono più regolari e presentano vergenze verso i quadranti occidentali, in accordo con gli studi di ricostruzione paleo-ambientale di vari Autori (DI VITO *et al*., 1998; ORTOLANI *et al*., 1985).

Le Ghiaie Carbonatiche di Tufino (VEF2b2), derivanti dallo smantellamento dei contrafforti carbonatici in un clima arido o semi-arido freddo con scarsa copertura arborea, pre-

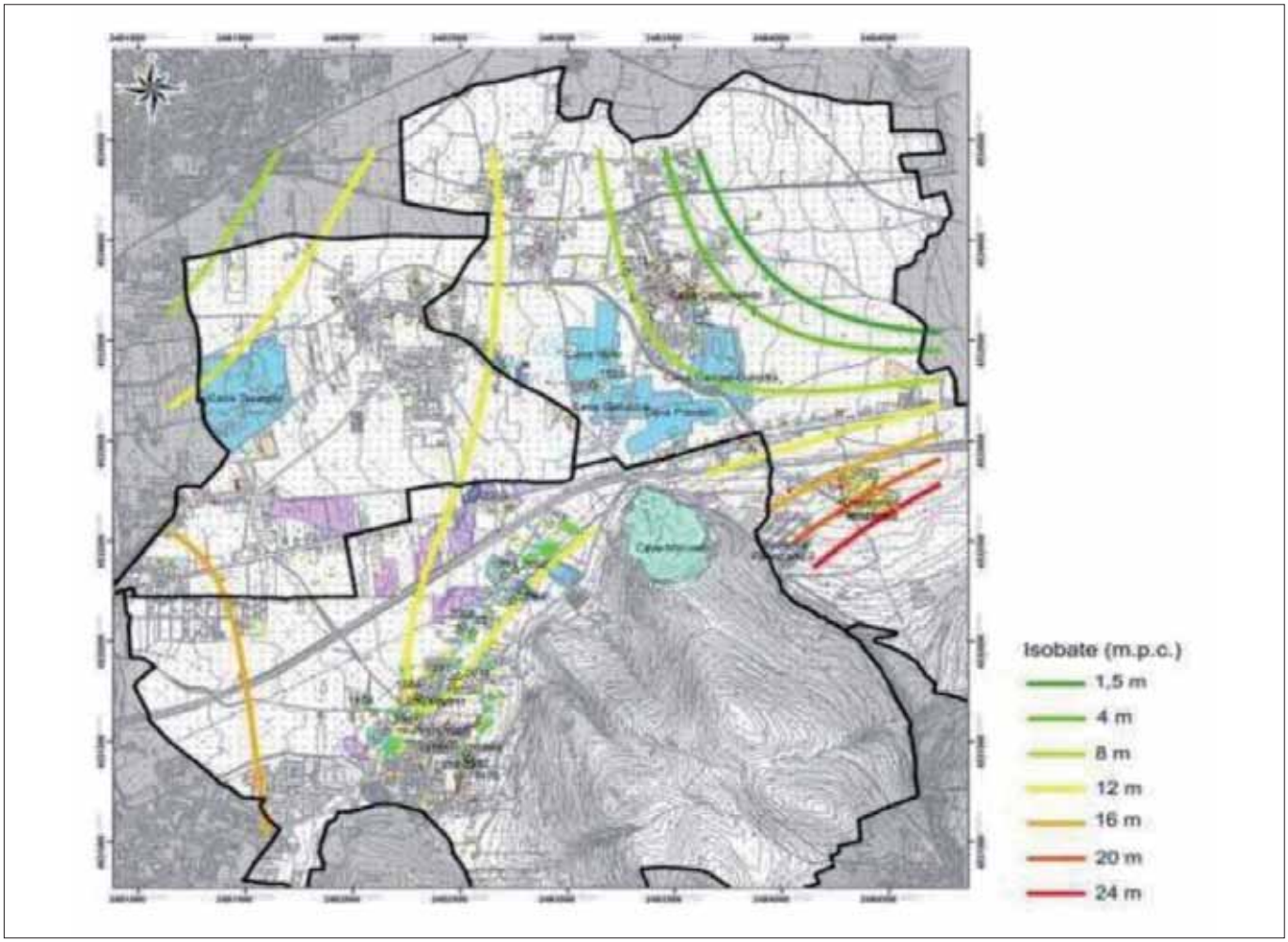


Figura 12 – Profondità del tetto dell'ignimbrite campana (TGC)

sentano una generale conformità con quello dell'orizzonte del TGC (DI VITO *et al*., 1998), le isopache vergono da est verso ovest, entro un intervallo prevalente tra 3 m e 6 m, risultando compresse o con divagazioni (*Fig*. 13).

Quest'aspetto geometrico è sintomatico di un'area a forte energia cinetica, sottoposta all'azione di conoidi di deiezione molto estese, ad alimentazione sia carbonatica con matrice vulcanoclastica e, successivamente, di una rete sinuosa di aste fluviali riconducibile all'Antico Clanio. I risultati sottolineano l'elevata capacità della valle di aver recepito e spaiato i cospicui materiali alluvionali con un accentuato crioclastismo favorito dall'abbassamento generale del livello di base e dal riassetto dei profili di equilibrio delle aste fluviali dopo la deposizione dell'Ignimbrite Campana. (BARD *et al*., 1990; SHAKLETON, 1987). Le ghiaie alluvionali riempiono le incisioni prodotte nel tetto del TGC da paleoalvei, ben visibili sui fronti superiori delle cave a fossa, disposti parallelamente all'asse della valle attuale (DEL PRETE *et al*., 2009), si rileva anche come un deposito di sabbie e ghiaie calcaree su un impluvio collinare possa rispondere ad una conoide di II generazione che, incidendo una placca tufacea, abbia ostacolato lo sviluppo di una cavità antropica. La drastica riduzione di apporto di materiale carbonatico, inquadrata nella transizione Pleistocene-Olocene a seguito della rapida espansione delle aree forestali, rende sempre meno frequenti i depositi fluviali che vengono sostituiti dalle piroclastiti di caduta dei Campi Flegrei e del Somma Vesuvio, ricoperti ed intervallati da frequenti paleosuoli. La coltre piroclastica (PNV), pertanto, svolge una funzione di livellamento delle morfologie di erosione prevalentemente fluviale, evidenziando una sostanziale omogeneità nella pianura, con spessori compresi tra 4 e 8 m (*Fig*. 14).

Le sezioni geologiche, ricavate mediante interpolazione e correlazione delle informazioni puntuali, hanno consentito di visualizzare l'assetto deposizionale delle unità stratigrafiche, la variazione di quota della formazione tufacea e lo sviluppo verticale ed orizzontale dei sistemi di cavità (*Fig*. 15).

Viene confermato l'ispessimento dell'unità ignimbritica verso i quadranti nord-orientali (CELICO *et al*., 1995), con l'isopaca 30 m posta tra i centri abitati di Comiziano e Tufino. Si rileva successivamente un aumento dei valori dello spessore tufaceo sino a 30 - 45 m nell'area estrattiva delle cave a fossa per pori ritrovare un isopaca a 20 m nell'area di Casamarciano.

La distribuzione della facies zeolitizzata presenta spessori variabili da 12 m a 32 m, secondo un quadro stratigrafico che avvalora le varie ipotesi sui meccanismi deposizionali della formazione vulcanica (APRILE *et al*., 2004; ORT *et al*., 2003; FISHER *et al*., 1993) e sui meccanismi minerogenetici che hanno luogo alle diverse facies (CAPPELLETTI *et al*., 2003; de GENNARO *et al*., 1999). La principale fonte di alimentazione della falda di fondovalle è costituita dall'apporto sotterraneo profondo dell'ampio bacino idrogeologico dei Monti di Avella-Nola, individuandosi più settori della profondità del corpo idrico (CACCAVALE, 2014) che non dovevano essere diversi da quelli all'epoca dell'apertura delle cavità più antiche (*Fig*. 16):

- tra -20 m e -40 m dal p.c., dove le maestranze non rischiavano di trovarsi la cavità allagata o, ancora prelevare del tufo marcio;
- tra -40 m e -60 m dal p.c.,dove si concentra la gran parte delle cavità del territorio;
- tra -60 m e -80 m dal p.c., dove i sistemi ipogei sono anche più profondi ed estesi.

FATTORI DESTABILIZZANTI NELLE CAVITA' DEL NOLANO

I meccanismi di collasso delle cavità tufacee dipendono da numerosi fattori (*caratteristiche petrografiche, tessiturali, fessurali e meccaniche dell'ammasso lapideo, carat-*

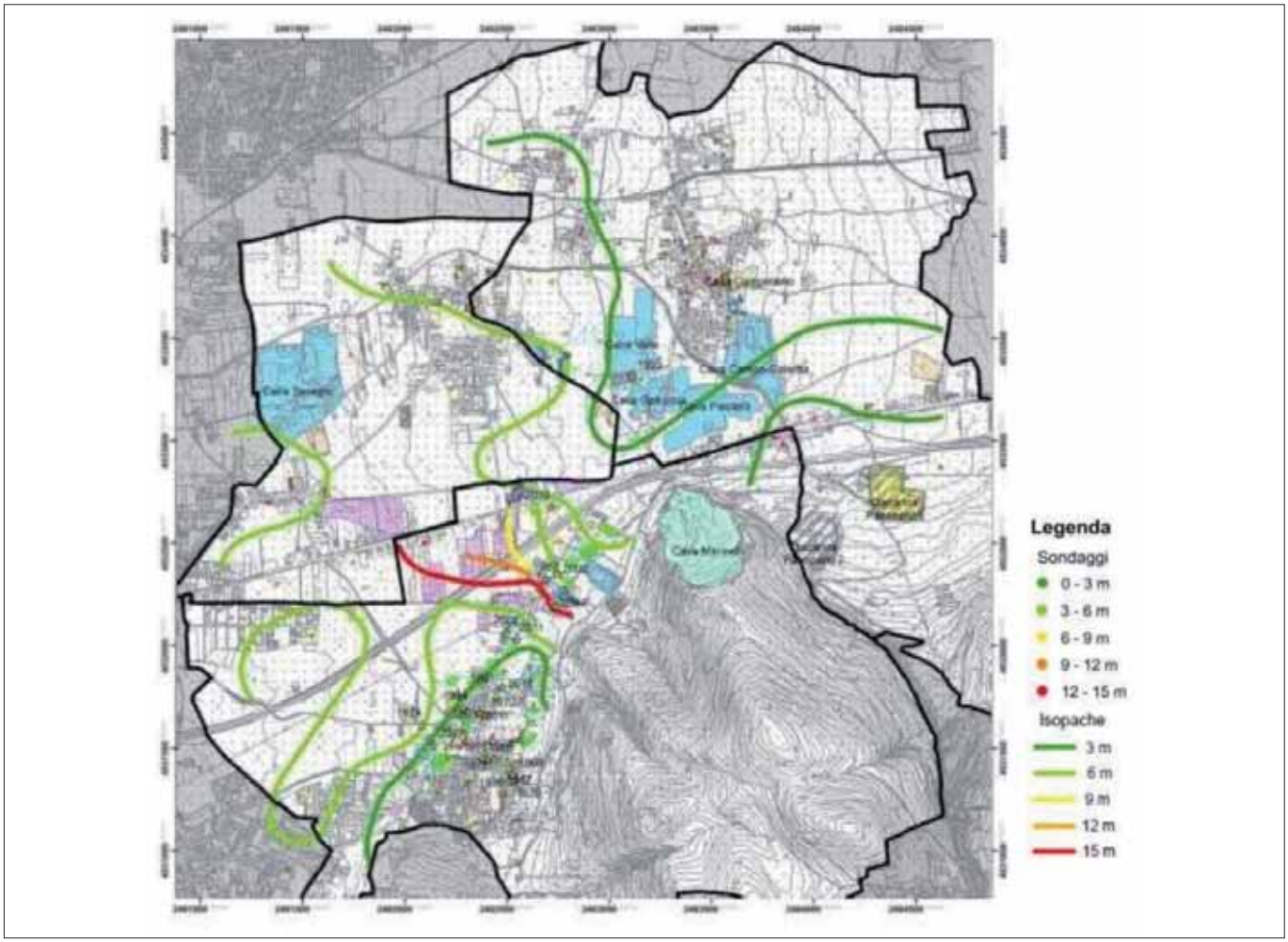


Figura 13 – Spessore dell'unità fluviale di fondo valle (VEF2b2)

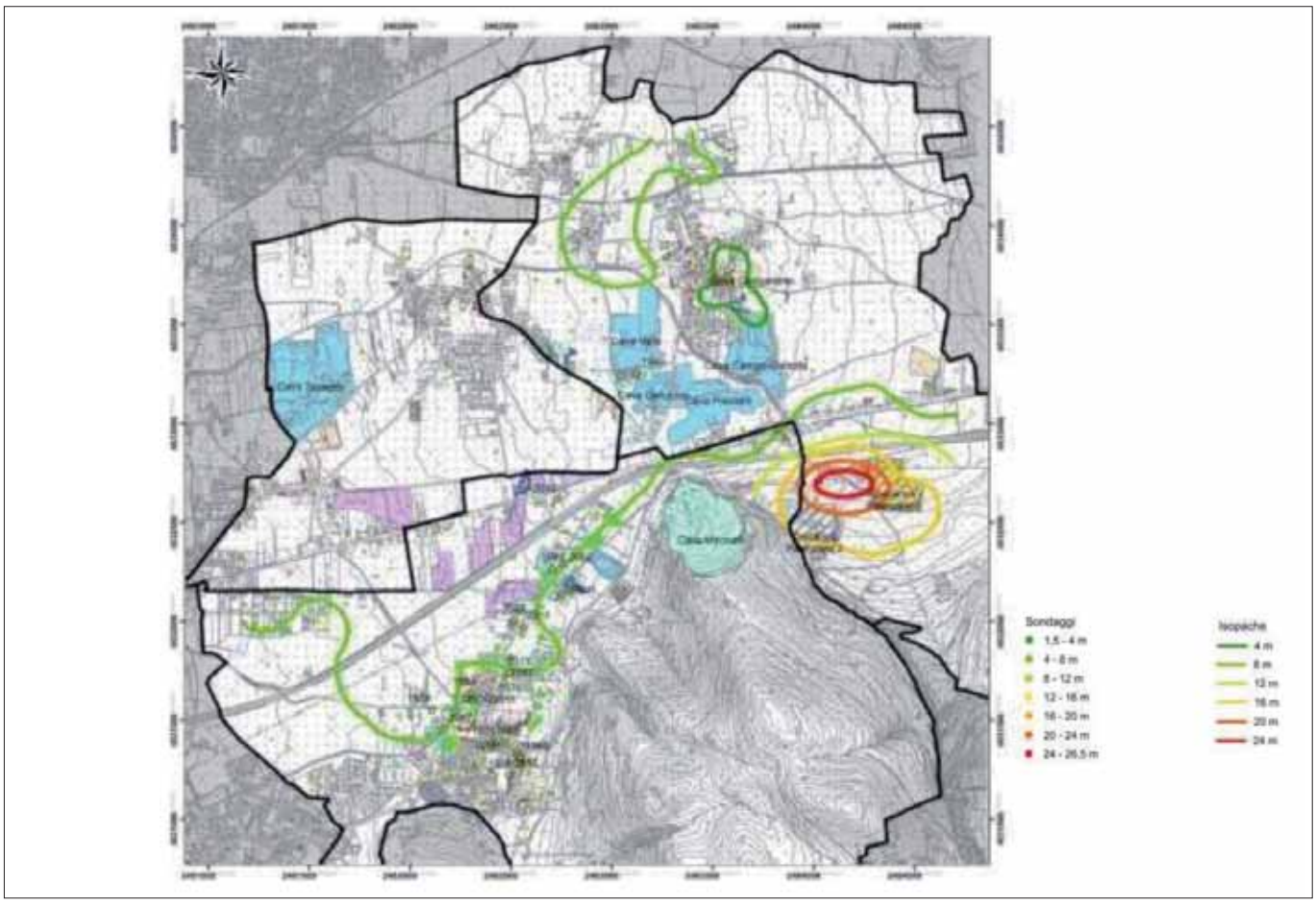


Figura 14 – Spessore dell'unità detritico colluviale (PNV)

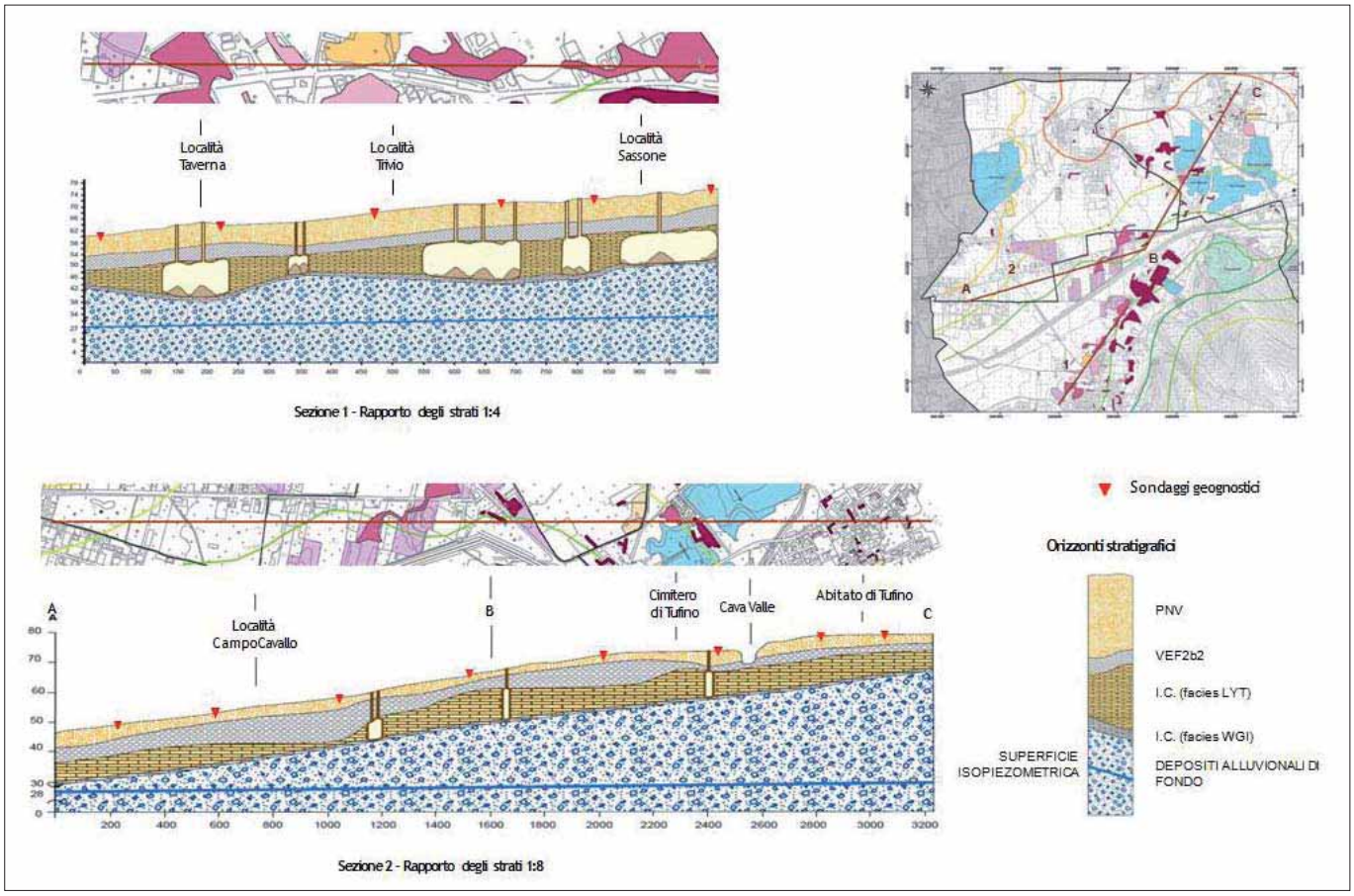


Figura 15 – Profili geologici

teristiche geometriche delle cavità, aspetti tecnologici, tempo, etc…) che influenzano il coefficiente di sicurezza sulle tensioni in volta, minacciando direttamente la stabilità e la conservazione dell'opera sotterranea. Gli ultimi studi ipotizzano la genesi del tufo nolano dalla deposizione e raffreddamento di una coltre piroclastica dove il fenomeno zeolitico si è espletato per la presenza di una matrice con grana sottile, uniforme, con inclusi piccoli pomicei.

Le proprietà petrografiche sarebbero da mettere in relazione alla velocità di degassamento prima e durante l'evento eruttivo (LANGELLA *et al.*, 2013; CAPPELLETTI *et al.*, 2003), con lenti fenomeni degassativi che hanno impedito la formazione di "carie" nelle aree centrali dell'Agro Nolano (DEL PRETE & BOCCHINO, 1999; DI GIROLAMO, 1968) e limitato il processo di cementazione nei siti più marginali (MIELE *et al.*, 1994). Sebbene il tufo grigio campano sia caratterizzato in sito con prove SPT o con il parametro R.Q.D, impiegato nella classificazione negli ammassi rocciosi di Beniawsky, i parametri fisico-meccanici rappresentativi di laboratorio sono fortemente influenzati dall'eterogeneità tessiturale e dalla pseudo-cementazione degli elementi pomicei (FIORE & LANZINI, 2007), dalla capacità di imbibizione e dal tempo di saturazione (RIPPA *et al.*, 1983), dal comportamento fragile-duttile al diverso livello di sollecitazione (AVERSA *et al.*, 1991; PELLEGRINO, 1968), annoverandolo tra gli ammassi rocciosi di classe E con resistenza σc molto bassa (>25 MPa). Lo stato tensionale dell'ammasso muta già dall'inizio dell'attività estrattiva, con un carico verticale che agisce nella sezione dei pilastri più sottili e soggetti ad un confinamento sempre meno efficace. Il collasso delle volte è invece indotto dall'insorgere di tensioni di trazione nella regione centrale dell'intradosso della volta che inducono fessurazione del materiale. La progressione del fenomeno può produrre distacco di materiale sino al cinematismo dell'intera volta o alla rottura locale delle porzioni in cui si suddivide (GESUALDO *et al.*, 2001). I crolli di blocchi tufacei di discreta dimensione (<5 m³), favoriti dalla presenza di fratture beanti, sia in volta che intorno ai pilastri, avvengono in modo improvviso e senza alcun segno premonitore, anche a distanza di centinaia di anni dall'abbandono delle cavità, con danni contenuti in superficie. Se gli strati di terreno sovrastanti sono caratterizzati da scadenti caratteristiche meccaniche, la rottura può propagarsi verso l'alto, sino alla formazione di "*anthropogenic sinkholes".*

I successivi fenomeni *"subsidenti"* diventano espressione della graduale tendenza al collasso dei sistemi sotterranei provocato nel tempo dall'interazione e propagazione delle *fratture singenetiche* e *post-genetiche* che solcano i pilastri e la chiave di volta delle varie camere. Sebbene l'attento rilevamento delle varie discontinuità presenti nell'ammasso tufaceo possa fornire importanti informazioni sulla deformabilità, resistenza e permeabilità della roccia scavata (MIGLIORE, 2001), un blocco tufaceo isolato dall'intersezione di più piani di frattura può sempre possedere una sorta di stabilità aggiuntiva dipendente dal tempo, per effetto di "*ponti di roccia*" tra fessure contigue. Affinché avvenga il fenomeno di instabilità in cavità, più fattori concomitanti devono dunque sussistere, quali la presenza di discontinuità non persistenti, l'evoluzione temporale delle proprietà meccaniche della roccia, la presenza di un elevato stato tensionale in volta o nei pilastri. Le discontinuità rilevate nelle cavità nolane sono costituite da famiglie di giunti con spaziature che variano da un minimo di 0,2 ÷ 0,6 m ad un massimo di 0,6 ÷ 2,0 m e rientrano, rispettivamente, nei termini da moderatamente ravvicinati a spaziati. La morfologia di queste discontinuità, confrontata con una serie di profili tipici o direttamente acquisita con il pettine di Barton, fornisce una scabrezza il cui JRC è variabile tra 8 e 14 (SPIZUOCO, 2003, 2002). Nell'insorgenza ed estensione di una "*voragine da sprofondamento*", un importante ruolo è svolto dall'assetto geometrico dei terreni di ricoprimento presenti nell'intorno dei puntica-va, le cui proprietà geotecniche (PELLEGRINO, 1967) si modificano, in area vasta, per le erosioni prodotte dalle piogge intense e, in area strettamente urbana, per perdite idriche dei sottoservizi, vibrazioni, etc….

PROCEDURA SISTEMICA PER IL RISCHIO DA SPROFONDAMENTO DI POZZI DI ACCESSO A CAVITÀ SOTTERRANEE

Gli archivi nazionali gestiti dal Dipartimento di Protezione Civile (CORAZZA *et al.* 2002; 2004 a, b) e dall'ISPRA (NISIO, 2013) evidenziano come i dissesti provocati dalla presenza di cavità ipogee presentino meccanismi genetici e di innesco ancora poco conosciuti. Dal punto di vista tecnico-normativo si avverte l'urgenza di avviare procedure ed atti di indirizzo per la protezione di queste aree come avvenuto per le frane e le alluvioni attraverso gli strumenti di pianificazione delle Autorità di Bacino (PSAI).

Gli attuali criteri di perimetrazione, essenzialmente di tipo qualitativo, segnalano le aree di maggiore attenzione con elaborati tematici che evidenziano la concentrazione dei dissesti indotti dalle cavità sotterranee su edifici e infrastrutture, le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e strutturali dell'area e la circolazione idrica superficiale e sotterranea. Un'analisi compiuta con criteri più rigorosi, tuttavia, non intende sostituirsi all' approccio prettamente deterministico dove un'attenta diagnostica dello stato delle cavità, quando facilmente ispezionabili, prevede la conoscenza *dell'esatta geometria degli scavi antropici, della misura dello stato tensionale tra le calotte ed i pilastri, della quantificazione di elementi esterni che inducono ulteriore instabilità, etc..* e l'impiego di *analisi numeriche con codici di calcolo ad elementi finiti*. Il rischio geologico Rk=Pn*Dn può essere reputato attraverso la nota formula R=P*E*V dove Pn è la propensione al crollo sotterraneo e Dn il danno atteso, quest'ultimo è notoriamente definito come il prodotto del valore esposto E e della vulnerabilità V.

Lo studio di previsione di un simile evento, seppure concentrato sul carattere spaziale, tipologico ed evolutivo (HARTLEN & VIBERG, 1988) e non strettamente probabilistico (FIORE *et al.*, 2007; MAZZA *et al.*, 2001), permette valutazioni di rischio geomorfologico atemporale con più classi di suscettibilità.

Il processo di sintesi è stato realizzato attraverso la sovrapposizione di strati informativi degli indicatori di pericolo con le caratteristiche peculiari del sistema insediativo. Gli indicatori di pericolo da dissesto e i livelli di vulnerabilità territoriale, dipendendo da diversi fattori o condizioni, sono risultati idonei all'applicabilità di un metodo parametrico a punteggi e pesi, a ciascuno dei quali è associato un valore minimo e massimo in funzione della sua influenza nella genesi del dissesto. L'analisi del rischio potenziale sviluppa una relazione funzionale (FERRARO, 2010; TEOLI *et al.*, 2009; MAZZA *et al.*, 2001) con la quale vengono sommati i sub-indici attribuiti agli indicatori di pericolo di natura geologica e antropica (*Tab.* 2).

Nel calcolo viene introdotta un'ulteriore variabile legata al peso (λ) che ogni indicatore di pericolo assume, con il fine di sottolineare che, nonostante tutti gli indicatori individuati siano da ritenersi scatenanti e predisponenti di un fenomeno di degrado, crollo o voragine

Tabella 2 – Indicatori di Pericolo e della Vulnerabilità

INDICATORE DI PERICOLO DA DISSESTO	
NEL SISTEMA IPOGEO:	
GEOLOGICO	**ANTROPICO**
D-TGC- Profondità dell'unità litologica Ignimbrite Campana, dentro la quale si sviluppano le diverse cavità tufacee	**SBC** - Stato conservativo e manutentivo dei pozzi di accesso alle cavità dismesse
PNV/VEF2b2 - Rapporto di Spessore delle Unità Litologiche che fungono da terreni di ricoprimento dell'orizzonte tufaceo	**SPB** - Stato conservativo e manutentivo dei pozzi di luce delle grotte-cantine
FPI Condizioni Geomorfologiche del sito	**SEZ** - Sezione della cavità
	SPV - Spessore del tufo riscontrato nelle volte delle cavità accessibili e nelle grotte-cantine
INDICATORE DI VULNERABILITA' TERRITORIALE	
NEL SISTEMA INSEDIATIVO:	
Presenza o meno di edifici	
Tipologie strutturali e fondazionali delle aree edificate	
Presenza gerarchica di strade e sottoservizi	

Tabella 3 – Valore dei Pesi degli Indicatori di Pericolo

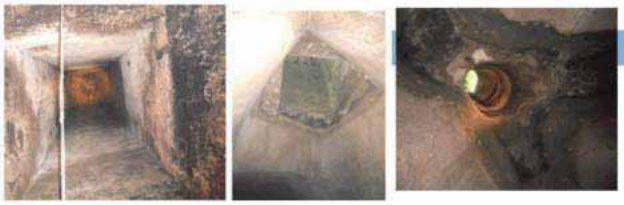
	INDICATORE DI PERICOLO NEL SISTEMA IPOGEO	PARAMETRO	PESO λ	DESCRIZIONE QUALITATIVA E QUANTITATIVA	VALORE
GEOLOGICO	Unità litologica di substrato (D-TGC)	Profondità (metri dal p.c.)	0.20	≥ 10.80 10.80 – 7.20 7.20 – 3.60 ≤ 3.60	1 2 3 4
GEOLOGICO	Unità Litologiche di copertura (PNV, VEF2b2)	Rapporti di potenza degli strati	0.30	≤ 1.00 1.00 – 1.50 1.50 – 2.00 ≥ 2.00	1 2 3 4
GEOLOGICO	Condizioni Geomorfologiche (FPI)	Fascia di Pericolosità Idraulica	0.30	Nullo Basso Medio Alto	1 2 3 4
ANTROPICO	Stato conservativo di una bocca delle cavità dismesse (SBC)	Presenza o meno di un rivestimento, aperta o chiusa, con segni di dissesto più o meno evidenti	0.20	Buono Medio Scarso Scarsissimo	1 2 3 4
ANTROPICO	Stato conservativo di un pozzo di luce delle cavità-cantine (SPC)	Presenza o meno di un rivestimento murario, di una protezione esterna, di segni di dissesto o in avanzato degrado	0.20	Buono Medio Scarso Scarsissimo	1 2 3 4

	INDICATORE DI PERICOLO NEL SISTEMA IPOGEO	DESCRIZIONE	PESO λ	DESCRIZIONE QUALITATIVA E QUANTITATIVA	VALORE
GEOLOGICO	Unità litologica di substrato (D-TGC)	Profondità (metri dal p.c.)	0.10	≥ 10.80 10.80 – 7.20 7.20 – 3.60 ≤ 3.60	1 2 3 4
GEOLOGICO	Unità Litologiche di copertura (PNV, VEF2b2)	Rapporti di potenza degli strati	0.10	≤ 1.00 1.00 – 1.50 1.50 – 2.00 ≥ 2.00	1 2 3 4
GEOLOGICO	Condizioni Geomorfologiche (FPI)	Fascia di Pericolosità Idraulica	0.30	Nullo Basso Medio Alto	1 2 3 4
ANTROPICO	Stato conservativo di una bocca delle cavità dismesse (SBC)	Presenza o meno di un rivestimento, aperta o chiusa, con segni di dissesto più o meno evidenti	0.20	Buono Medio Scarso Scarsissimo	1 2 3 4
ANTROPICO	Stato conservativo di un pozzo di luce delle cavità-cantine (SPC)	Presenza o meno di un rivestimento murario, di una protezione esterna, di segni di dissesto o in avanzato degrado	0.20	Buono Medio Scarso Scarsissimo	1 2 3 4
ANTROPICO	Sezione della cavità	Trapezia Parabolica	0.10	Buona Scarsa	2 4
ANTROPICO	Spessore del tufo nelle volte delle cavità accessibili e cantine (SPV)	Spessore (m)	0.20	> 1.50 1.50 - 1.00 1.00 –0.50 < 0.50	1 2 3 4

Tabella 4 – Rilevamento osservativo dei punti-cava



Condizioni interne dei pozzi di accesso



I INDICATORE DI PERICOLO ANTROPICO DESCRIZIONE Stato conservativo e manutentivo dei pozzi di accesso alle cavità dismesse (SBC)	GRADO	VALORE
Bocca di cava, chiusa o aperta, priva di rivestimento parietale: - Non visibile in superficie, ma chiusa dalle lamie di fine cavatura del tufo e con contrassegni tradizionali (alberi di ciliegio, nespolo, arancio amaro, etc.....) -Recintata, ma con il camino di accesso parzialmente interrato; - In stato di completo abbandono	SCARSISSIMO	4
Bocca di cava, aperta e con parziale rivestimento parietale: -Abbandonata ed in degrado, senza recinzione -Recintata, ma con il camino di accesso parzialmente interrato -Recintata con semplice palizzata in stato di degrado	SCARSO	3
Bocca di cava rivestita: -Evidenti segni di sgrottamento interno del camino e delle lamie di chiusura -Limitati segni di sgrottamento interno del camino e dei lamie di chiusura - Assenza di segni di sgrottamento interno del camino e dei solarini di chiusura	MEDIO	2
Bocca chiusa: -Non più visibile perché la cavità collegata è stata riempita con pozzolana e malta liquida; -Non più visibile, perché è stata oggetto di un piano di risanamento o di sistemazione dell'area a seguito di un intervento operato su una voragine; -Non più visibile, previa irrigidimento del camino con traliccio metallico attraversata da pali di fondazione profondi o, ancora, sottoposta a fondazioni di tipo compensativo (platea)	BUONO	1

II INDICATORE DI PERICOLO ANTROPICO DESCRIZIONE Stato manutentivo e conservativo dei pozzi di luce delle cavità-cantina (SBC)	GRADO	VALORE
Bocche-cantina con camini rivestiti in muratura di tufo o mattoni, sono assenti i segni di degrado meccanico ed idraulico, la protezione esterna è attuata con muretto con pilastri e volta	BUONO	1
Bocche-cantina con camini rivestiti in muratura di tufo/mattoni, pochi se non rari sono i segni di degrado meccanico ed idraulico, la protezione esterna è attuata con muretto o/e grata in ferro	MEDIO	2
Bocche-cantina con camini rivestiti in muratura non squadrata, in parziale situazione di disgaggio, sono più contenuti i segni di degrado meccanico e idraulico, la protezione esterna è semplice	SCARSO	3
Bocche-cantina con pareti dei camini non rivestiti, sono presenti segni alquanto diffusi di degrado geomeccanico ed idraulico, mancanza di un'adeguata protezione esterna e invasione da parte di apparati radicali arbustivi	SCARSISSIMO	4





Condizioni esterne dei pozzi di accesso

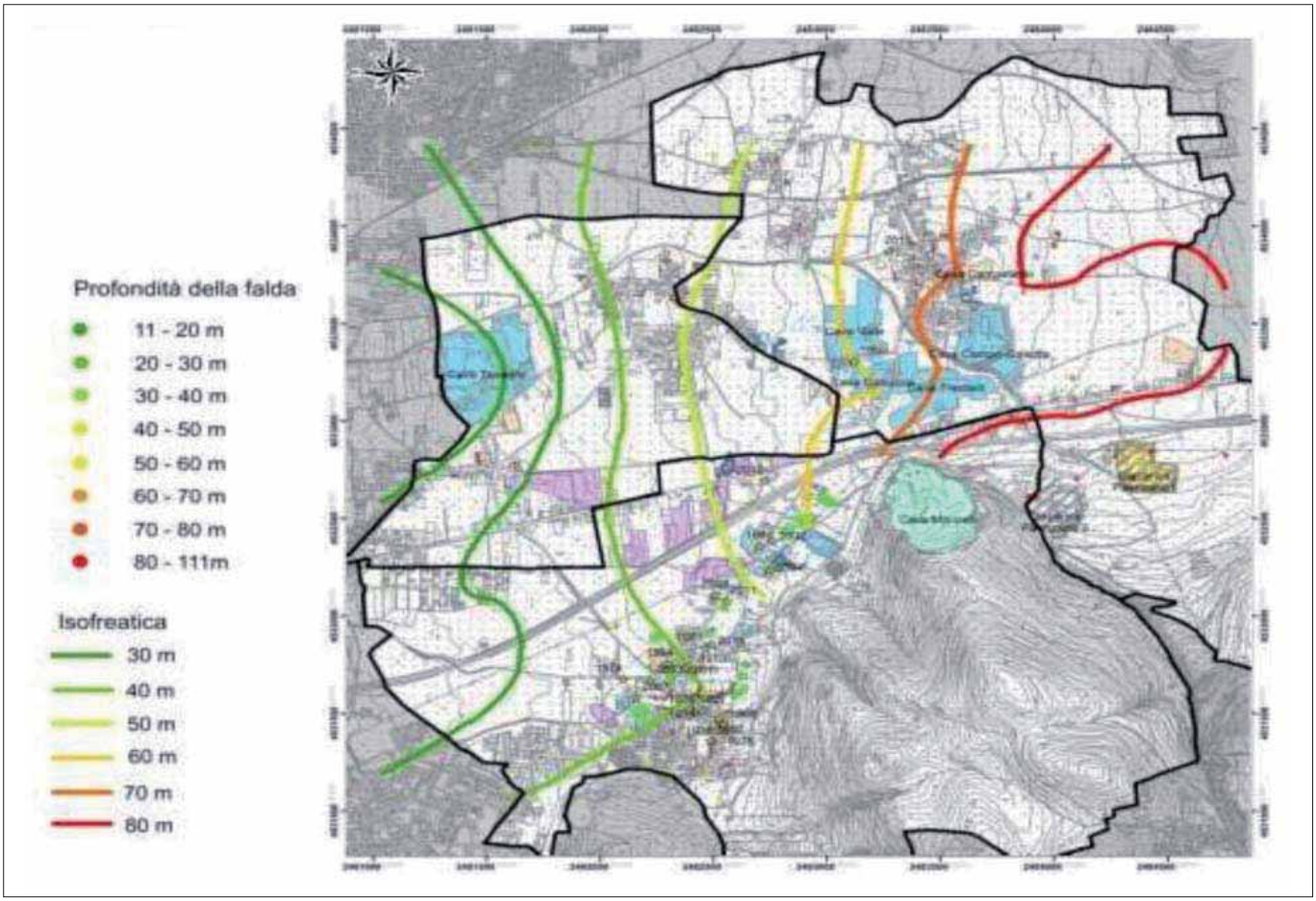


Figura 16 – Carta della profondità della falda idrica sotterranea

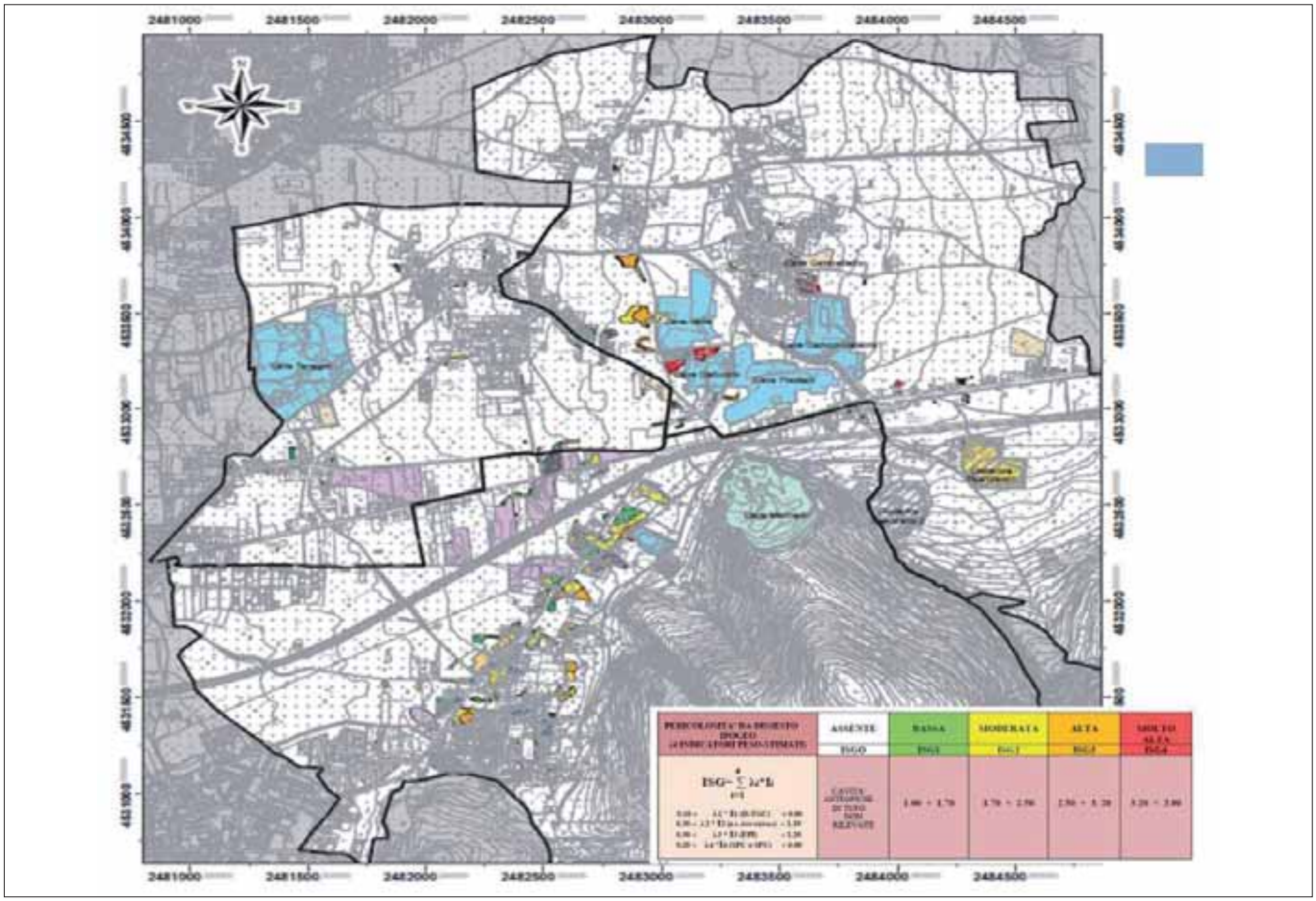


Figura 17a – Pericolosità indotta dalle cavità antropiche (4 indicatori di pericolo)

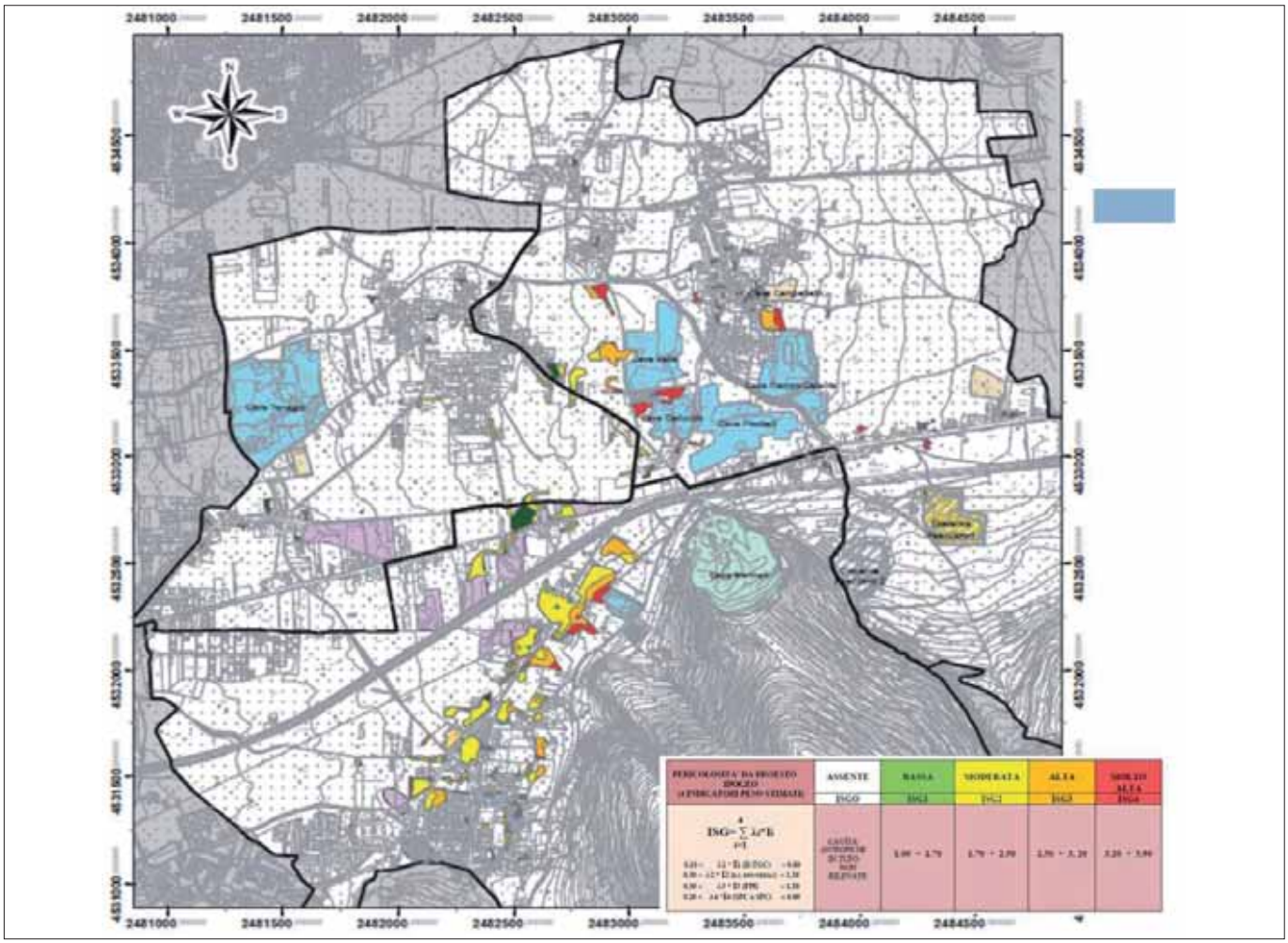


Figura 17b – Pericolosità indotta dalle cavità antropiche (6 indicatori di pericolo)

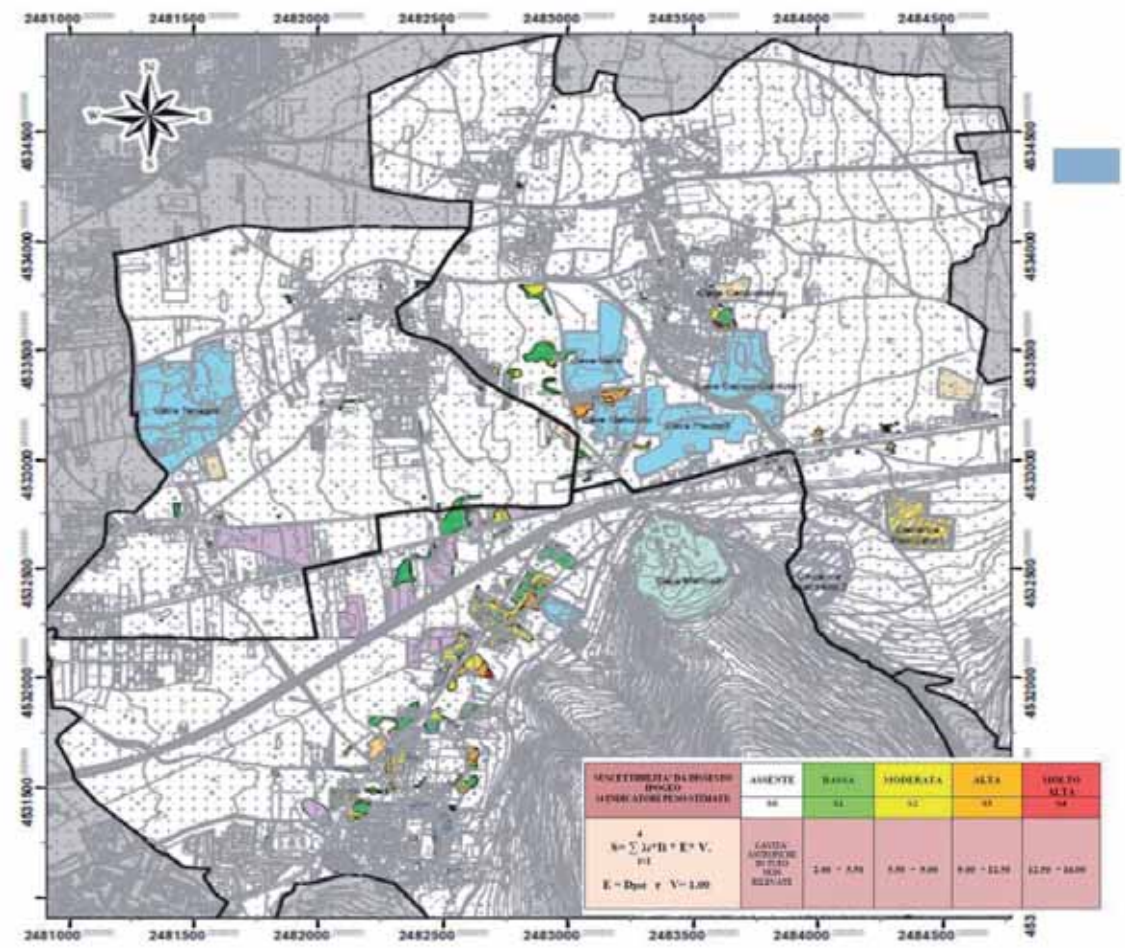


Figura 18a – Suscettibilità al dissesto sotterraneo (4 indicatori di pericolo)

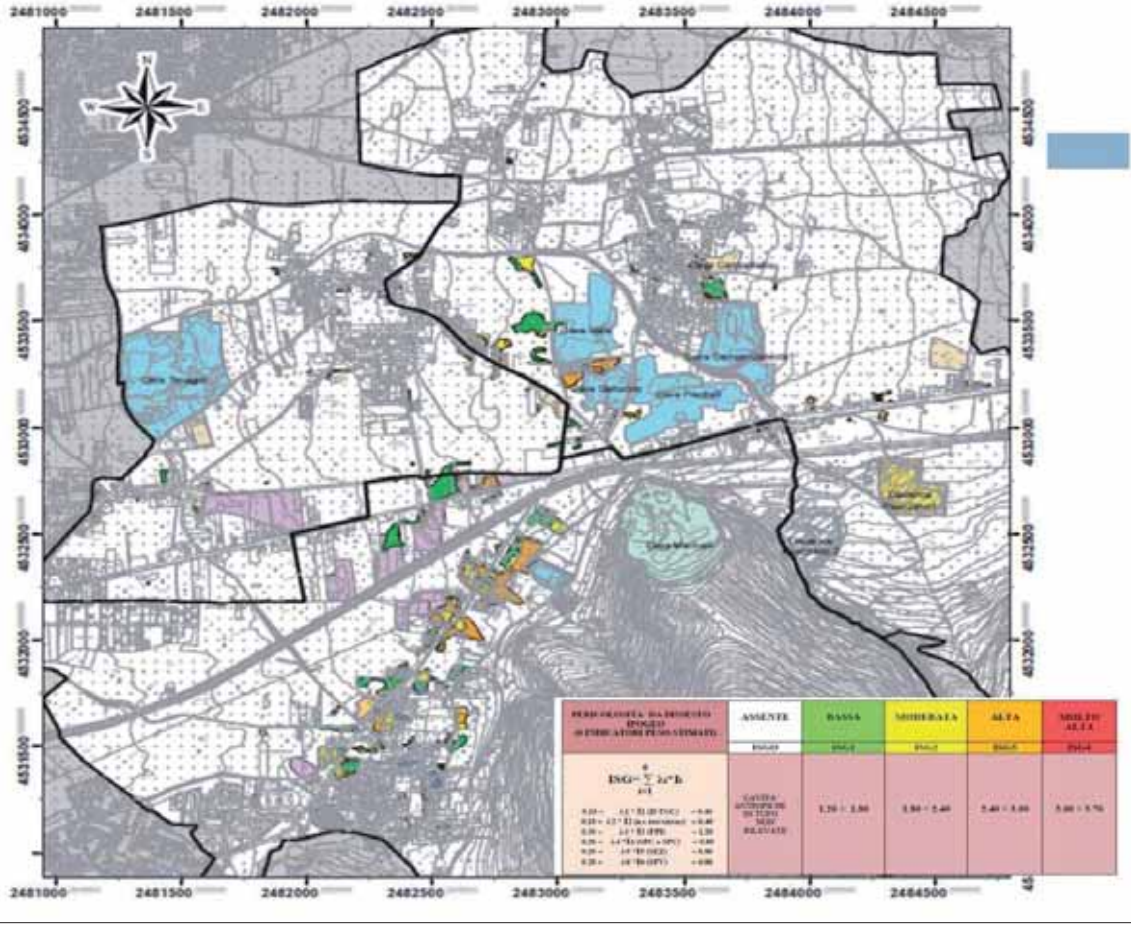
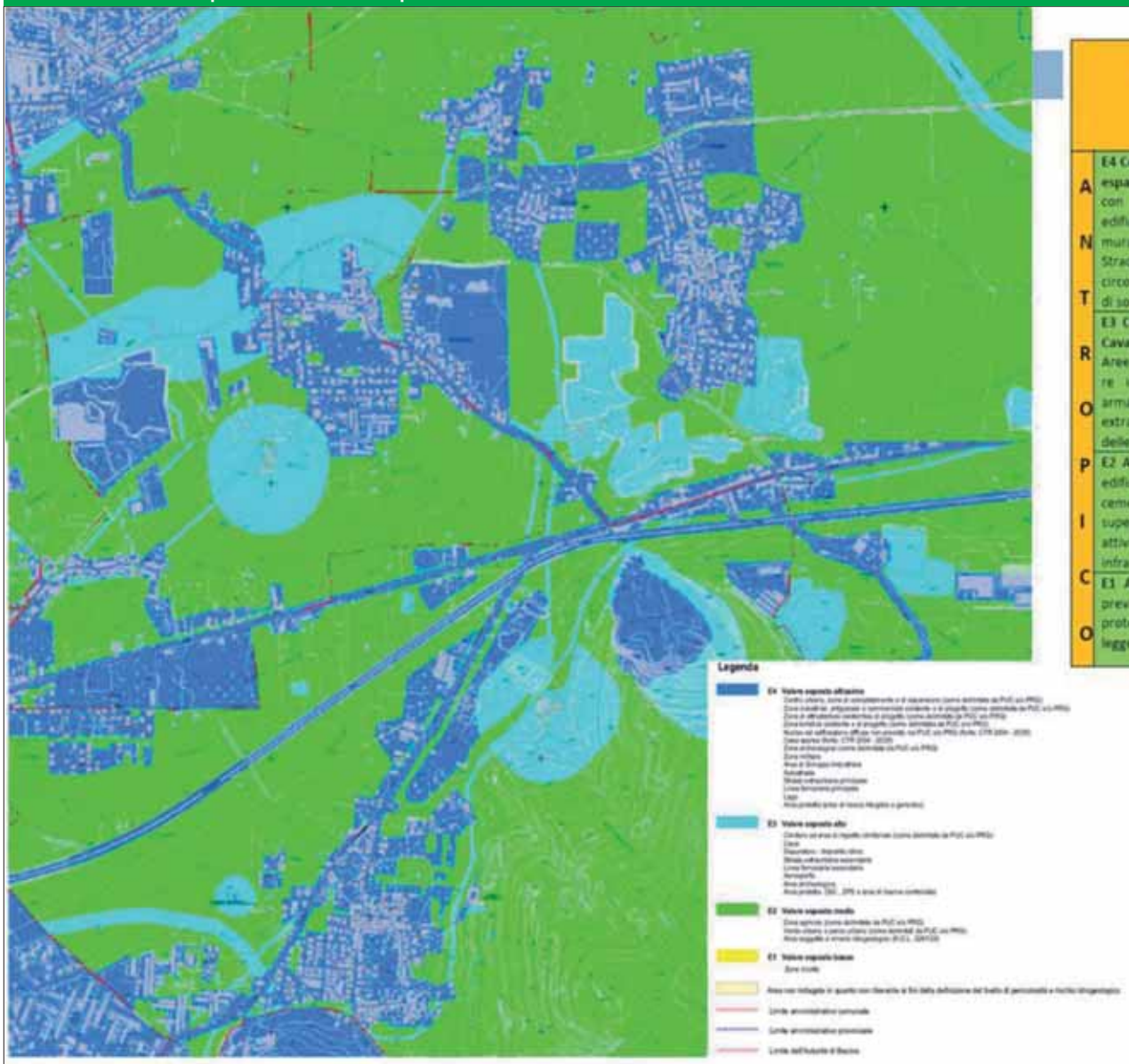


Figura 18b – Suscettibilità al dissesto sotterraneo (6 indicatori di pericolo)

Tabella 5 – Elementi Esposti alla Cavità Antropiche e Matrice di Interazione



	ELEMENTI DA TUTELARE (E)	LIVELLI DI DANNO ATTESI NEL SISTEMA INSEDIATIVO Danno effettivo = Danno potenziale	PESO λ	VALORE
ANTROPICO	**E4 Centri urbani, Zone di completamento ed espansione**, Nuclei ad edificazione diffusa, con Aree di sviluppo Industriale. Aree edificate prevalentemente con strutture in muratura, con fondazioni di tipo superficiale. Strade ad alta viabilità urbana ed extra-circoscrizionale e direttrici principali delle reti di sottoservizi	ALTISSIMO Perdite di vite umane, beni economici e valori ambientali	1.00	4
	E3 Cimitero ed Aree di rispetto cimiteriale, Cava, Area protetta o di riserva controllata Aree edificate prevalentemente con strutture in muratura e/o miste in cemento armato. Strade ad alta viabilità urbana ed extra-circoscrizionale e direttrici principali delle reti di sottoservizi.	ALTO Incolumità delle persone e funzionalità del sistema economico		3
	E2 Aree extraurbane, poco abitate, sede di edificazione sparsa con strutture intelaiate in cemento armato e munite di fondazioni superficiali, destinate sostanzialmente ad attività agricole ed a verde pubblico, infrastrutture stradali di tipo secondario.	MEDIO Limitati problemi per l'incolumità delle persone e per effetti derivanti al tessuto urbano socio-economico		2
	E1 Aree prevalentemente non edificate, a prevalente vocazione agricola, incolte o protette, ospitano case sparse, strutture leggere, ruderi	BASSO Assenza di problemi per l'incolumità delle persone e limitati gli effetti derivanti al tessuto socio-economico		1

LIVELLI DI DANNO ATTESI SUGLI ELEMENTI DEL SISTEMA INSEDIATIVO

ELEMENTI DI PROPENSIONE AL DISSESTO

R=ISGm*Dm	ISG1	ISG2	ISG3	ISG4
D1	R1	R1	R2	R2
D2	R1	R2	R2	R3
D3	R2	R2	R3	R4
D4	R2	R3	R4	R4

Tabella 6 – Prescrizioni per la pianificazione e prevenzione dal rischio

SUSCETTIBILITÀ AL DISSESTO IPOGEO $S = \sum_{i=1}^{n} \lambda i * Ii * E * V$	INTERVENTI PER IL GOVERNO DEL TERRITORIO		
	STRUTTURALI	NON STRUTTURALI	
		PREVENTIVI	PIANIFICATORI
S0- ASSENTE Aree di attenzione dove non sono state riscontrate presenze di dissesti in atto ma con possibilità di rinvenire propaggini di cavità o cavità occluse presenti soprattutto in zone confinanti con le aree già cavate, remote possibilità di modeste e locali cavità sepolte non ancora conosciute		Monitoraggio idrogeologico con la periodica ricognizione delle aree e censimento di eventuali disseti di superficie	Indagini geologiche, del tipo diretto ed indiretto, per studi di carattere sia preliminare che di dettaglio, finalizzati ad accertare l'assenza di cavità nel sottosuolo (D.M. 14-1-2008 e s.m.i.)
S1- BASSA Area di attenzione da ritenersi potenzialmente stabile con bassa suscettibilità ai fenomeni di instabilità da crollo per presenza di bocche di cavità a volta integra o instabilità da cedimenti per presenza di bocche di cavità dovei è avvenuta un' azione di contenimento e, ancora, per fini edilizi di un avvenuto irrigidi-mento del camino	Azioni di manutenzione periodica della rete sia fognaria che idrica, con il miglioramento dell'assetto della sede stradale, con piano di interventi prevalentemente concentrati in area urbana, monitoraggio idrogeologico e speleologico per il periodico controllo della staticità degli ambienti accessi-bili. Per le cavità-cantine ricadenti nei tre centri storici, sarà indispensabile effettuare frequenti operazioni di pulizia per consentire visite periodiche per il controllo delle condizioni statiche dei pozzi di luce e delle volte tufacee, la presenza di fenomeni di stillicidio, verifiche di stabilità	Monitoraggio Idrogeologico con la periodica rivisitazio-ne delle aree dopo eventi pluviometrici dalla bassa intensità	Gli interventi edificatori dovranno prevedere studi e indagini geologiche di dettaglio finaliz-zati ad investigare il volume del sottosuolo cavato nel rispetto del D.M. 14-01-08 e smi, anche con l'uso della video-ispezione, nei settori al confine con la zona dalle diverse insule di sistemi caveali che sono stati già indi-viduati, nelle vicinanze degli oc-chi di monte o di dissesti anti-chi, entro una fascia di 6 metri dal limite delle cavità o delle grotte-cantine nei centri storici.
S2-MODERATA Area di attenzione dove sono state riscontrate le maggiori presenze di dissesti puntuali e areali, in ambito extra-urbano imputabili a pozzi delle cavità privi di adeguato rivestimento o lasciati al degrado geostatico, in ambi-to urbano, alla obliterazione degli accessi, in aree di non recente edificazione, dove insistono complessi edilizi a carattere residenziale che hanno occluso le cavità con riempimenti e pali, nelle cavità-cantine con presenza di un modesto stillicidio, blocchi di tufo asportato dalle pareti o cadute di materiale incoerente	Consolidamento o/e irrigidimento degli occhi di monte, manutenzione delle volte e delle pareti di tutti gli ambienti accessibili, eliminazione delle infiltrazioni d'acqua, pulizia e periodica verifiche di stabilità, colmatura delle depressioni nelle aree cavate, consolida-mento dei terreni nelle aree estrattive soggette ad una maggiore subsidenza, manutenzione periodica della rete fognaria e idrica, con miglio-ramento del manto stradale, specialmente in area urbana.	Monitoraggio Idrogeologico dei dissesti da dinamica quiescente nelle aree più esposte con la rivisitazione periodica dei luoghi dopo eventi piovosi di media intensità	Per ogni intervento, sia di carattere edificatorio che di tipo infrastrutturale saranno necessarie indagini geologiche e studi di dettaglio nel rispetto del D.M. 14-01-2008 e smi, con la reda-zione di uno studio di compati-bilità del progetto con la riso-luzione, anche in prospettiva sismica, delle problematiche del caso
S3- ALTA Area di maggiore attenzione dove sono state riscontrate le più alte presenze di dissesti areali in ambito urbano e extra-urbano imputabili a collassi di pozzi di cavità, anche inseriti in subsidenze più vaste, privi di rivestimento e non debitamente protetti, o impropriamente adibiti allo sverso di rifiuti e reflui; sistemi caveali in ambito extra-urbano, con calotte a luoghi poco degradate e con pozzi di accesso individuati e de-dotti da indagini di dettaglio, soggetti a rapi-da apertura per il crollo delle lamie di chiusura; cavità-cantine con pozzi di luce scarsamente condizionati e protetti, presenza di discenderie mal tenute, occluse totalmente o in parte da macerie e da fanghi di alluvionamento.	Irrigidimento di singoli o più occhi di monte di cavità e cavità- cantine, consolidamento delle volte e delle pareti di tutti gli ambienti accessibili, ripristino della funzionalità delle discenderie, rimozione di detriti e terreni dagli ipogei abbandonati, manutenzione periodica dei sotto-servizi idrici e fognari, di natura pubblica e privata. Interventi statico-risanativi di fabbricati poggianti su cavità	Monitoraggio Meteorologico e Idrogeologico, in previ-sione di eventi piovosi di significativa intensità, con predisposizione ed orga-nizzazione di un piano di allerta	Per ogni intervento di carattere edificatorio che di tipo infrastrutturale saranno necessarie indagini geologiche e rilievi spleologici, nel rispetto del D.M. 14-01-2008 e smi ed anche con l'esten-sione dei benefici concessi delle Leggi Regionali nn. 28/75 e 20/76, finalizzati a stabilire la compatibilità e l'impatto del pro-getto con la stabilità delle aree
S4- MOLTO ALTA Area di alta attenzione dove sono state riscontrate e sono possibili ulteriori dissesti areali in ambito extra-urbano che siano impu-tabili -a collassi di ipogei per la presenza di infiltrazioni d'acqua in calotta e lungo pilastri di evidente snellezza o/e logorati da un carico non confinato, -a sistemi di cavità con calotte degradate, stillicidio persistente, pozzi di accesso non condizio-nati ed in stato di sgrottamento avan-zato; - a pozzi di cavità singoli o a gruppi, recintati ed in degrado geostatico in aree a rischio idraulico elevato, -a cavità-cantine inaccessibili, con le discenderie crollate o/e oc-cluse da ingenti rifiuti e macerie.	Consolidamento dei pilastri e delle calotte delle cavità, condizionamento ed irrigidimento dei pozzi di cavità e delle cavità-cantine in precario equilibrio geostatico, ripristino delle discenderie, con rimozione di detriti e terreni dagli ipogei da tempo abbandonati, periodica manutenzione dei sottoservizi idrici e fognari, di natura pubblica e privata. Risanamento del sottosuolo di aree con presenza di cavità	Monitoraggio Metereologi-co e Idrogeologico, in pre-visione dell' accadimento di eventi piovosi forti e con-centrati, predisposizione ed organizzazione di un piano di emergenza	Per ogni intervento di carattere edificatorio che di tipo infrastrutturale saranno necessarie indagini geologiche e geofisiche di dettaglio e speleologiche, nel rispetto del n D.M. 14-01-08 e smi e anche con l'estensione dei benefici delle Leggi Regio-nali n. 28/75 e n. 20/76, includendo analisi di stabilità a breve, medio e lungo ter-mine, opere di riduzione della pericolo, comparabili con l'entità e l'impatto del pro-getto, studi specifici tendenti a quantificare il rischio residuo.

od uno sprofondamento, le relazioni di dipendenza hanno uno stile gerarchico.

Nella stima di indicatori affini, si è attribuito un analogo peso delle condizioni rilevate, così come nelle aree logisticamente non accessibili, i pesi hanno tenuto conto dell'età dei sistemi ipogei. Nessun peso è stato attribuito all'attuale distribuzione dei dissesti geostatici, al fine di rendere l'analisi di rischio indipendente dal fenomeno pregresso ma usare il medesimo per la validazione della procedura. Su ogni punto-cava viene ricavato un indice di sensibilità geostatica ISG mediante l'applicazione della relazione di TEOLI *et al*., 2009:

$$ISG = \sum \lambda i * mi$$

con:
i = numero degli indicatori;
λi = pesi di ciascun parametro indicatore o sub-indice tal che $\sum \lambda i = 1$;
mi = valori attribuiti ai parametri delle *Tabb*. 2 e 3.

Al fine di riscontrare sostanziali differenze, la valutazione dell' ISG è stata attuata facendo interagire 4 e, in un secondo tempo, 6 degli indicatori stimati come illustrato in precedenza.

Il valore dell' ISG è stato spazializzato alle sagome delle "*grotte*" e alle "*insule ipogee*", la cui definizione ha previsto un attento studio dei cluster dominanti, degli interassi medi esistenti tra i punti-cava e dello sviluppo di cavità rilevate. Tutti i sistemi caveali sono stati vettorializzati sulla mappa in uno *shape file* poligonale dedicato.

La vettorializzazione è stata eseguita costruendo i poligoni secondo un'assegnata area di confine per ogni elemento puntuale o areale ricadente nel sistema.

L'informazione è stata estesa, a partire dai punti noti, a tutta l'area interessata, ricostruendo la variabilità persa con il campionamento mediante l'utilizzo di un interpolatore polinomiale con funzioni *splines* che, suddividendo l'intervallo di definizione in più sotto-intervalli e scegliendo per ciascuno di essi un polinomio di grado ridotto, impone che due polinomi si saldino senza singolarità. Si è operato sugli attributi dello *shape file* generato aggiungendo per ogni record informazioni sul tipo di cavità, la sua datazione e la sezione prevalente dello scavo. Gli indicatori di vulnerabilità territoriale hanno tenuto conto dell'urbanizzazione, delle tipologie edilizie presenti e della gerarchia della rete stradale e infrastrutturale.

La matrice di calcolo di interazione tra i livelli di pericolosità ipogea del territorio e la vulnerabilità del sistema insediativo è quella predisposta per il rischio idraulico/frana nel PSAI (*Tab.* 4). Le cartografie derivate distinguono cinque classi di pericolosità indotta (*Figg*. 17a e 17b) e di propensione al dissesto (*Figg*. 18a e 18b) secondo livelli crescenti rappresentati con la campitura in uso per il rischio geomorfologico.

Il principale indirizzo normativo del Piano per l'Assetto Idrogeologico (PSAI), in coerenza alla vigente legislazione statale (D.lgs n.152/2006 e s.m.i.) e regionale (L.R. 16/2004) vincola la pianificazione urbanistica al diretto recepimento dei contenuti definiti come "*strategie per un buon uso del territorio ai fini della mitigazione del rischio idrogeologico"* ossia la riduzione della *pericolosità*, con interventi sulle cause scatenanti dei fenomeni in atto o potenziali e *degli elementi a rischio*, con l'interdizione o limitazione dell'espansione urbanistica in zone pericolose e la riduzione della vulnerabilità del patrimonio esistente (*Tab.* 5).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio svolto ha permesso di pervenire ad una attendibile valutazione del rischio geomorfologico su una parte del territorio nolano interessato dalla presenza di un'antica attività di estrazione dell'Ignimbrite Campana. Gli aspetti principali evidenziati dall'integrazione dei dati territoriali possono essere così riassunti:

- le cavità antropiche sono all'origine di un'ampia casistica di dissesti connessi all' azione maldestra di recupero della roccia, attualmente aggravati da fattori geologici e antropici che gradualmente minacciano le condizioni di stabilità del sistema sotterraneo;
- la valutazione della suscettibilità areale, basata sulla stima medio-pesata di indicatori di pericolo aderenti al meccanismo di insorgenza delle sole voragini, indica che le zone maggiormente predisposte sono quelle a rischio idraulico R3 e R4 dove si localizzano sist emi di cavità con elementi interni e/o esterni in precario equilibrio geostatico;
- migliorando la caratterizzazione degli indicatori di pericolo, il valore dell'indice ISG modula le aree di attenzione potendo pervenire a perimetrazioni sempre più affinate delle situazioni di criticità. A tal riguardo, si è osservato che la distribuzione degli "*anthropogenic sinkholes*" negli areali stimati con un robusto numero di indicatori, a parità di valore esposto, si concentra per il 90% nelle classi S3 (moderata) e S3 (alta). Inoltre, l'analoga presenza di eventi in aree a suscettibilità bassa, prevalentemente concentrati lungo le arterie stradali, fa ritenere plausibile che l'individuazione di nuovi fattori possa rendere più efficace la metodologia di previsione;
- lo studio sistematico ha fatto debita chiarezza sull'incidenza di queste criticità nel territorio nolano, portando alla produzione di carte tematiche della realtà del sottosuolo, indispensabili alla corretta pianificazione di queste aree, di restauro ambientale e di gestione delle emergenze.

BIBLIOGRAFIA

Aprile F., Sbrana A., Toccaceli R.M. (2004), *Il ruolo dei depositi piroclastici nell'analisi cronostratigrafica dei terreni quaternari del sottosuolo della Piana Campana (Italia Meridionale),* Italian Journal of Quaternary Sciences, 17 (2/1), 2004, 547-554.

Aprile A., Ortolani F. (1985), *Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana,* Boll. Soc. Geol. Ital., 104, 195-206.

Attewell P. B., Woodman J. P. (1982), *Predicting the dynamics of ground settlement and its derivitives caused by tunnelling in soil,* Ground Engineering, 15, 13-20.

Avella L. (2006), *Cartografia Nolana, La Città di Nola ed il suo Agro nelle carte topografiche antiche e moderne, edite, inedite ed ipotetiche*, I.G.E.I., Napoli.

AA.VV. (2004), *Catasto delle cavità sotterranee nella Provincia di Napoli*, Access ed ArcView. SIT Provincia di Napoli.

Aversa S., Evangelista A. Ramondini M. (1991), *Snervamento e resistenza a rottura di un tufo a grana fine*, II Conv. dei Ricercatori del G.N. CSIG del CNR, Ravello 1, 3-22.

Barberi F., Innocenti F., Lirer L., Munno R., Pescatore T., Santacroce R. (1978), *The Campanian Ignimbrite: a major prehistoric eruption in the Neapolitan area* (Italy). Bull. Volcanol., 41(1), 1-22.

Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G.(1990), *U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130.000 years*, Nature, 346, 456-458.

Basso N., Ciotoli G., Finoia M. G., Guarino P. M., Miraglino P., Nisio S. (2013), *Gli sprofondamenti nella città di Napoli.* Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 73-104.

Bellucci F. (1992), *Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi vulcanici presenti nel sottosuolo del settore meridionale della Piana Campana*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi *Federico II*", Napoli.

Bellucci Sessa, E., Calcaterra, D., Del Giudice, G., Farina, L., Ramondini M., Vilardo G. (2006), *Verso un Sistema Informativo Geografico integrato per la valutazione della suscettibilità al dissesto del territorio di Napoli,* in Questioni di Ingegneria Geotecnica, Scritti in onore di Arturo Pellegrino. Edizioni Hevelius, Benevento, I, 209-231.

Bellucci Sessa E., Calcaterra D., Del Giudice G., Farina L., Ramondini, M., Vilardo G. (2005), *Una metodologia sistemica per lo studio del dissesto idrogeologico del Comune di Napoli*, Atti 9° Conferenza Nazionale ASITA, Vol. 1, 291-296.

Bocchino B. (2010), *Rilievi di sistemi caveali alle Contrade "Cesina" di Tufino (Na)e "Taverna" di Casamarciano (Na),* su gentile concessione dell'Autore.

Caccavale G. (2014), *Analisi Sistemica per una valutazione della suscettibilità al dissesto di territori dell'Agro Nolano con presenza di ca-*

vità e grotte cantine in tufo, Tesi di Dottorato, XXV Ciclo, C.I.R.AM. Centro Interdipartimentale di Ricerca ed Ambiente. Università degli Studi Federico II, Napoli

Caccavale G. (2004), *Indagini Geologiche, geofisiche, geotecniche per la realizzazione di un complesso residenziale nel territorio comunale di Casamarciano (Na) Località Starza,* Relazione Geologica.

Capolongo S. (2008), *Voragini in ambito urbano, Dinamiche Evolutive ed analisi di Stabilità nella gestione dell'emergenza,* Ministero dell'Interno, Dipartimento dei VV.FF., del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, 28 Maggio 2007- 29 Febbraio 2008.

Cappelletti P. Cerri G., Colella A., De Gennaro M., Langella L., Perrotta A., Scarpati C. (2003), *Post-eruptive processes in the Campanian Ignimbrite*, Mineralogy and Petrology, 79 (1-2), 79-97.

Celico F., Celico P., Guadagno F. M., Habetswallner F., Mele R. (1995), *Sull'evoluzione idrogeologica dell'area del Sebeto (Campania),* Geologia Applicata ed Idrogeologia, 30, 567-582.

Corazza A. (2004 a), *Il rischio dei fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile.* Atti 1° Seminario "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma 20-21 maggio 2004, 319-330.

Corazza A. (2004 b), *Censimento dei dissesti dovuti a cavità sotterranee in Italia. La scheda di rilevamento,* Atti del 1° Seminario "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma 20-21 maggio 2004, 307-318.

Corazza A., Mazza R., Bertuccioli P., Putrino P. (2002), *Il Progetto Cavità: Analisi del rischio dovuto a cavità sotterranee*. Atti dei Convegni Lincei, XIX Giornata dell'Ambiente "Il dissesto Idrogeologico, Inventario e prospettive", Roma 5 giugno 2001, 355-363.

De Gennaro M., Langella A., Cappelletti P., Colella C. (1999), *Hydrothermal conversion of trachytic glass to zeolite3. Monocationic model glasses.* Clays Clay Miner., 47 (3), 348-357.

Del Prete S., Parise M. (2007), *L'influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali*, Opera Ipogea, 2007, 2, 11-24

Del Prete S., Bocchino B. (1999), *Sul rinvenimento di una cava di tufo nel comune di Lusciano (Caserta)*, Opera Ipogea, 1999, 3, 51-58.

De Luzio G. (2004) *Rilievo geostrutturale di un sistema caveale nel territorio del Comune di Casamarciano (NA) alla Strada Provinciale n. 68,* su gentile concessione dell'Autore.

Di Girolamo P., Morra V. (1987) *The Campanian Ignimbrite. Petrographical, petrochemical and volcanological characters*, in Di Girolamo P. (ed) The volcanoclastic rocks of Campania (Southern Italy), Rend. Acc. Sc. Fis. Mat., Napoli, Special Issue, 177-199.

Di Vito M. A., Sulpizio R., Zanchetta G. (1998), *I depositi ghiaiosi della valle dei torrenti Clanio e Acqualonga (Campania centro-orientale): significato stratigrafico e ricostruzione paleoambientale.* Il Quaternario, It. Journ. of Quat. Sc., 11 (2), 273-286.

Evangelista A. (1991), *Cavità e dissesti nel sottosuolo dell'area napoletana,* Atti del Convegno Rischi naturali ed impatto antropico nell'area metropolitana napoletana, Napoli, Facoltà di Ingegneria 7-8 Giugno 1991, Acta Neapolitana, Guida Editori, 195-218.

Fairbridge R.W. (ed) (1968), *The Encyclopedia of Geomorphology*, Reinhold Book Corp., New York, 1295 pp.

Ferraro P. (2010), *Studio geologico, geomorfologico, geotecnico e sismico a corredo del PUC del Comune di Comiziano (Na*). Relazione tecnica ed allegati grafici.

Fiengo G. (1988), *I Regi Lagni e la bonifica della Campania Felix durante il viceregno spagnolo*, Biblioteca dell'Archivio Storico Italiano, Ed. Olschki, Firenze

Fiore M., Lanzini M. (2007), *Problematiche di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee,* in Geologi & Territorio, ORG Puglia, n. IV-2006/I-2007, 35-45.

Fisher R.v., Orsi G., Ort. M., Heiken G. (2003), *Mobility of a large volume pyroclastic flow emplacement of the Campanian Ignimbrite,* Italy, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 56(3), 205-220.

Gesualdo A., Minutolo V., Nunziante L. (2001), *Failure in Mohr-Coulomb soil cavities,* Canadian Geotechnical Journal, 38(6), 1314 -1320.

Guarino P.m. & Nisio S. (2012), *Anthropogenic sinkholes in urban areas. A case study from Naples (Italy),* Physics and Chemistry of earth. Elsevier. Special ISSUe, 49 (2012), 92-102ES.

Hartlen J., Vibergl. (1988), *General report: Evaluation of landslide hazard, in Proceedings of 5th International Symposium on Landslides* vol.2, Balkema, Lausanne, 1037-1057.

Iavarone A. (2010), *Rilievo planimetrico delle cavità e delle cantine conosciute del territorio comunale di Comiziano (Na), propedeutico alla redazione dell'adeguamento e aggiornamento dello studio geologico a corredo del redigendo PUC,* Relazione Tecnica, 16 giugno 2010.

Langella A., Bish D. L., Calcaterra D., Cappelletti P., Cerri G., Colella A., Graziano S. F., Papa L., Perrotti A., Scarpati C., De Gennaro M. (2013), *L'Ignimbrite Campana (IC),* in "Le Pietre Storiche della Campania, dall'oblio alla riscoperta", Luciano Editore, Napoli, 155-178.

Lombardi G., Perrone S., Viggiani C. (2002), *Le voragini nella città di Napoli: una calamità naturale?* Atti del XI Convegno Nazionale di Geotecnica: "Opere geotecniche in ambiente urbano", L'Aquila, 11-14 settembre 2002, Patron Editore, Bologna, 573-544.

Lucci R. (1991), *La costruzione dell'abitare, Lezioni di Architettura*, CUEN, 228 pp.

Mair R. J., Taylor R. N. And Bracegirdle A. (1993), *Subsurface settlement profiles above tunnels in clays*, Géotechnique, Vol. 43, No 2, 315-320.

Mascolo G., Petrillo G. (1983), *Il tufo come presenza del passato",* Tesi di Laurea presso la Facoltà di Architettura, Università degli Studi "Federico II", Napoli.

Mazza R., Paganelli D., Campolunghi P., Capelli G., Lanzini M., Sereni M., De Filippis L. (2001), *Rischio di crollo da cavità sotterranee nel settore orientale della città di Roma,* Atti del III Forum Italiano di Scienze della Terra GEOITALIA, Chieti, 5-8 settembre 2001 (estended abstract), 414-416.

Miele A., Piciocchi C. (1997), *Studio delle cavità artificiali nel territorio di Cicciano (Na),* in 3RD International Symposium on Underground Quarries, Napoli, Castel dell'Ovo, 10-14 luglio 1991, 144-145.

Migliore C. (2001), *Instabilità e discontinuità negli ammassi di Tufo Giallo Napoletano.* Tesi di Laurea presso la Facoltà di Scienze MM.FF.NN, Università "Federico II", Napoli.

MOBIL MAPPER 6 (2010), *Manuale di Utilizzo,* GPS Sokkia-Novatel-Triax, Elmeg SpA.

Nisio S. (2013), *Il database nazionale dei fenomeni di sinkhole, A*tti del Convegno "Studi ed Interventi per il risanamento delle cavità antropiche e naturali. Aspetti geologici, geotecnici e sismici, 9 Dicembre 2010, Altamura (Ba), Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 2/2013, 28-32.

Nisio S. (2013), *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani,* IX Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano, ISPRA.

Orsi G., De Vita S., Di Vito M.A. (1996), *The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy), constraints on its evolution and configuration*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 74 , 179 - 214.

Ort M. H., Orsi G., Pappalardo L., Fisher R. V. (2003), *Anisotropy of magnetic susceptibility studies of depositional processes in the Campanian Ignimbrite*, *Italy,* Bull. Vulcanol., 65, 55-72.

Pellegrino A. (1967), *Proprietà fisico-meccaniche dei terreni vulcanici del napoletano,* Atti VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari, ESI, Napoli, 113-145.

Pellegrino A. (1968), *Compressibilità e resistenza a rottura del tufo giallo napoletano,* Ass. Geotec., Ital., IX Conv. Geotec. 1(7), 1-37.

Piancastelli M. (2001), *Grandi vini della Terra di Lavoro*, Pubblitaf Edizioni, Napoli.

Posa D., De Iaco S. (2009), *Geostatistica, Teoria ed Applicazioni*, Giappicchelli Editore, Torino.

Rippa F., Vinale F. (1983), *Structure and mechanical behaviour of a volcanic tuff,* Proc. V International Congress of ISRM, Melburne.

Rankin W. J. (1988), *Ground movements resulting from urban tunnelling; predictions and effects*, Engineering Geology of Underground Movements, Geol. Soc. Eng. Geol. Spec. Publ. No. 5, 79-92.

Rosi M., Sbrana A. Editors (1987), *The Phlegrean Fields,* Quaderni della Ricerca Scientifica CNR, 114, 9, 175.

Sagaseta C. (1987), *Analysis of undrained soil deformation due to ground loss,* Géotechnique, 37, 3, 301-320

Shakleton N.J. (1987) *Oxygen isotopes, ice volume and sea level*, Quaternary Science Reviews, 6, 3-4, 183-190.

Spizuoco A. (2003), *Consulenza relativa allo studio di una cavità sotterranea nel sottosuolo di un'area destinata a lottizzazione nel Comune di Casamarciano (Na) alla Località "Taverna"*, San Vitaliano (Na), Relazione Tecnica.

Spizuoco A. (1996), *Cavità antropiche nel tufo della Piana Campana: problematiche geologiche e geomeccaniche,* Università degli Studi Federico II, Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, Dispensa Universitaria.

Teoli P., Capelli G., Mazza R. (2009), *Metodologie per la definizione della pericolosità da sinkhole nella Piana Pontina*, ISPRA. Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difesa del Suolo, Atti del 2° Workshop Internazionale "I Sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma 3-4 Dicembre 2009, 371- 386.

Verruijt A., Booker J.R. (1996), *Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane,* Géotechnique, 46 (4), 753-756.

Analisi contestuale di cavità di origine antropica nel Parco Archeologico delle Terme di Baia (Campania, Italia)

Contextual analysis of anthropic cavities in the Archaeological Park of Terme di Baia (Campania, Italy)

Marco Corvi
Gruppo Speleologico Gianni Ribaldone (Genova)
E-mail: marco.corvi@gmail.com

Norma Damiano
Gruppo Speleologico CAI Napoli (Napoli)
E-mail: normadamiano@libero.it

Paolo Maria Guarino
ISPRA, Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia
E-mail: paolomaria.guarino@isprambiente.it

Ivana Guidone
Catasto Cavità Artificiali, Federazione Speleologica Campana
E-mail: ivanaguidone@gmail.com

Parole chiave (*key words*): cavità artificiali (*artificial cavities*), cisterne romane (*roman cisterns*), concrezioni carbonatiche (*carbonate concretion*), bradisismo (*bradyseism*), termalismo (*hot springs*)

RIASSUNTO

Nel settore occidentale dei Campi Flegrei (Campania, Italia), lungo il versante occidentale dell'edificio vulcanico di Baia, sono stati realizzati, nell'intervallo compreso tra l'inizio del I secolo a.C. e il IV secolo d.C., estesi complessi residenziali e termali che costituiscono l'odierno Parco Archeologico delle Terme di Baia (Bacoli, NA).

Gli interventi edilizi che si sono susseguiti in cinque secoli, su di un'area di circa 40.000 mq, costituiscono un complesso monumentale unico nel suo genere. Oggetto di ammirazione già nell'antichità, le Terme di Baia sono sfruttate almeno fino al pieno Medioevo, per poi cadere nell'oblio fino al XVII secolo quando, grazie ai colti viaggiatori europei del *Grand Tour*, il complesso diventa, in un crescendo di popolarità, punto di riferimento fondamentale per lo studio dell'ingegneria edile romana.

Il fiorire e la decadenza dell'area appaiono strettamente connessi alle peculiarità e all'evoluzione geologica dell'area, che ricade all'interno del campo vulcanico dei Campi Flegrei, il cui ultimo evento eruttivo è avvenuto nel 1538. La presenza di fonti naturali di vapore e di sorgenti di acque mineralizzate è stata decisiva per la progettazione degli impianti residenziali e termali, la cui decadenza è stata determinata, oltre che dalle note vicende storiche, anche dagli eventi bradisismici che a partire dalla tarda antichità hanno interessato la fascia costiera attualmente sommersa, localizzata tra il Lago Lucrino e il Castello di Baia.

Nell'ambito delle attività di aggiornamento del catasto delle Cavità Artificiali della Federazione Speleologica Campana è stato realizzato il rilievo di alcune cavità sotterranee ricadenti all'interno dell'area del Parco Archeologico. Tra esse, la *Cavità del Quadriportico CA34CpNA* (settore della Sosandra) si presenta quale scavo d'indagine per lo sfruttamento di fonti termali e che ha intercettato in sotterraneo le fondazioni degli edifici antichi presenti.

La cavità *Cisterne sotto gli Hospitalia CA106CpNA*, nel settore della Villa dell'*Ambulatio*, è l'insieme delle cubature di due cisterne d'età romana, oggi comunicanti, per le quali si avanza una prima lettura cronologica; esse si caratterizzano, infatti, per interventi edilizi succedutesi in fasi archeologiche distinte che evidenziano come le due cavità siano state in un primo momento messe in comunicazione tra loro, per poi essere di nuovo chiuse in una fase d'uso successiva. Nella prima cisterna d'accesso si evidenziano interessanti concrezioni carbonatiche presenti per lo più nell'ambiente della canaletta di alimentazione, per le quali si formula una prima ipotesi interpretativa.

INTRODUZIONE

Il Parco Archeologico delle Terme di Baia si estende lungo il versante occidentale dell'edificio vulcanico di Baia, la cui eruzione, avvenuta nell'intervallo di tempo compreso tra 9525 e 9686 ys BP (Di Vito *et al*., 1999), attesta la ripresa dell'attività vulcanica flegrea dopo una fase di inattività durata circa 1000 anni e seguita, dopo un centinaio di anni, dalla eruzione del vulcano di Fondi di Baia, ubicato poche centinaia di metri più a sud. All'interno della successione vulcanica messa in posto con l'eruzione di Baia, un deposito di breccia vulcanica, spesso circa 3 m, segna alla base l'inizio della attività. Si passa, verso l'alto, ad una alternanza di depositi da caduta e da flusso, potente circa 12 m. Una terza unità, dello spessore di circa 6 m, chiude la successione, costituita da depositi da *surge* intercalati da fasi esplosive a minore energia (Pistolesi *et al*., 2017).

Nell'area del Parco Archeologico affiorano i prodotti relativi alla seconda unità stratigrafica, presenti anche nel sottosuolo e interessati dallo scavo delle cavità oggetto di studio.

Lungo il versante occidentale del vulcano di Baia sono stati realizzati, su più livelli, estesi complessi termali e residenziali unici nel loro genere. Tale sviluppo edilizio ricopre un arco temporale che va tra l'inizio del I secolo a.C. e la fine del V secolo, in cui si sono succedute fasi di ristrutturazione, riadattamento e progettazione *ex novo* connesse probabilmente alle diverse situazioni politico-sociali verificatesi nei sei secoli di sfruttamento dell'area. Al periodo più antico sono ascrivibili sicuramente le prime fasi edilizie delle Piccole Terme, con il piccolo *laconicum* a tholos sito nella parte alta del Settore di Venere, nonché gli impianti originari della Villa dell'*Ambulatio* riconosciute come probabili residenze private di alta committenza; poco dopo seguono il c.d. tempio di Mercurio, le Stanze di Venere e le raffinate Terme Ipogee d'età augustea (Medri, 2013). È possibile che le strutture termali più antiche furono progettate al servizio di ville private e solo in età imperiale, grazie a vari interventi di ampliamento, furono convertite ad uso pubblico; nelle fasi successive infatti, le zone più strettamente residenziali, come parte della Villa dell'*Ambulatio* vennero convertite in *hospitalia* per i frequentatori delle terme (Amalfitano, 1990).

Lo sfruttamento già in antico del termalismo baiano (Sgobbo, 1934) fu possibile non solo grazie alla presenza di sorgenti di acque termominerali ma anche di venute di vapor acqueo, di cui un buon esempio è sicuramente il "Cunicolo del *Great Antrum*" CA90CpNA connesso proprio alle Piccole Terme (Ferrarri *et al*., 2015 e bibliogr. corr.). Le ampie piscine individuate nelle terrazze inferiori invece, come il *calidarium* del c.d. Tempio di Mercurio, erano alimentate da acque termali affioranti nella parte bassa del versante e si differenziano dagli impianti alimentati dal vapore naturale anche per le dimensioni ridotte di questi ultimi. In connessione agli edifici del Parco si attesta la presenza della condotta dell'*Aqua Augusta* (Ferrari & Lamagna, 2016) che passa in sotterraneo nella cresta collinare, nonché di varie cisterne destinate ipoteticamente alla raccolta di acque meteoriche. L'u-



Figura 1 – Strutture termali sul fronte occidentale della collina del Parco Archeologico di Baia. Foto P. Knight

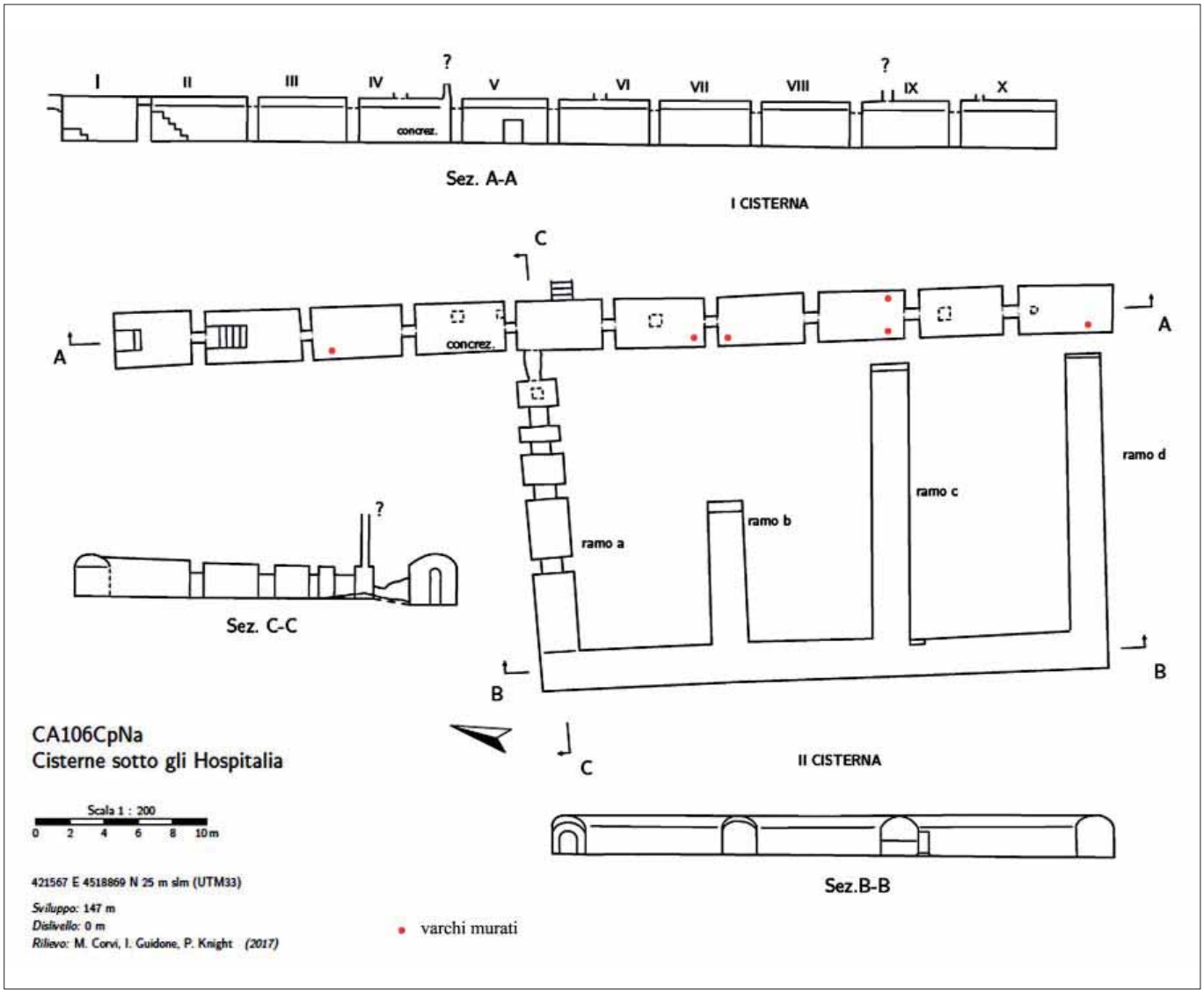


Figura 2 – Rilievo planimetrico e sezioni delle cavità "Cisterne sotto gli Hospitalia *CA106CpNA". Rilevatori M. Corvi, I. Guidone, P. Knight, 2017*



Figura 4 – Passaggio murato sulla parete Ovest del vano III, Cisterna I. Foto N. Damiano

so essenzialmente pubblico delle terme d'età romana durò fino al IV-V secolo d.C., tuttavia la frequentazione di alcune aree termali continuò fino al tardo Medioevo per le proprietà terapeutiche delle acque (Amalfitano, 1990; Medri, 2013). Tutt'oggi due sole sorgenti sono ancora attive ma non sfruttate: una presso il Tempio di Mercurio e l'altra, conosciuta come Acqua della Rogna, nell'angolo sudovest della terrazza bassa della Sosandra (Medri, 2013).

Nella zona delle Piccole Terme, tra il Settore di Venere e quello della Sosandra, oltre all'ingresso del suddetto Cunicolo del *Great Antrum* CA90CpNA (Ferrari *et al.*, 2015) si individuano, ad esempio, alcune interessanti cavità visibili sulla terrazza artificiale addossata al profilo collinare del Parco (*Fig.* 1).

Il primo speco (il n° 1, *Fig.* 1) è un passaggio largo poco più di un metro con copertura a doppio spiovente che attesterebbe un utilizzo idraulico della condotta; attualmente è chiusa da detriti. Il secondo speco (n° 2, *Fig.* 1) è l'accesso a due cisterne rettangolari, comunicanti tra loro, completamente rivestite di intonaco e, in una sola di queste, si evidenziano concrezioni carbonatiche a coralloide. Nel terzo ingresso (n° 3, *Fig.* 1) si identifica un tunnel che conduce ad un ambiente ipogeo in cui corre la condotta dell'*Aqua Augusta* (Ferrari & Lamagna, 2016); si identifica poi una quarta entrata a nord della terrazza (n° 4, *Fig.* 1) da cui parte un cunicolo con copertura a doppio spiovente da identificare come probabile condotta idraulica, essa è chiusa da detriti e polvere di pozzolana e infine una grande cisterna trasformata in masseria in epoca moderna (n° 5, *Fig.* 1).

In questo articolato contesto edilizio, caratterizzato dalla compresenza di impianti ascrivibili a fasi archeologiche diverse, gli ipogei artificiali risultano essere interessanti soluzioni edilizie sia per lo sfruttamento delle risorse termali sia per lo stoccaggio e il trasporto delle risorse idriche epigee.

CISTERNE SOTTO GLI *HOSPITALIA* CA106CPNA, VILLA DELL'*AMBULATIO*

Cisterna I

Nell'angolo nord della terrazza F delle c.d. "sale residenziali" (Miniero, 2006), nell'area della Villa dell'*Ambulatio*, vi è l'ingresso di un'articolata cavità a cui si accede tramite scaletta metallica moderna; l'ingresso, che non appare immediatamente coevo con il progetto originario dell'ipogeo, permette di accedere sul fianco di un lungo ambiente concamerato interrompendo bruscamente la continuità della parete orientale (*Fig.* 2). Questo primo lungo corridoio si presenta come un susseguirsi di dieci ambienti concamerati orientati NS, con soffitto a volta leggermente irregolare (*Fig.* 3).

I vani sono lunghi circa 5 m ciascuno, ad eccezione del secondo e del decimo da Nord (circa 5.5 m), e del primo a Nord che, oltre ad essere chiaramente più corto (4,4 m), appare fortemente rimaneggiato in epoche relativamente moderne. Lo sviluppo planimetrico di questa prima lunga cavità raggiunge i 58 m; la larghezza e l'altezza dei vani restano abbastanza costanti per tutto lo sviluppo e rispettivamente misurano circa 2,8 m e 2,6 m.

Il paramento murario portato a giorno in due punti crollati, appare in opera cementizia e rifinito di un liscio intonaco idraulico che ricopre tutta la superficie della cavità, soffitto a volta compreso.

Ad una prima osservazione, l'intonaco appare non molto dissimile da quello presente in altre cisterne d'età romana presenti nell'area dell'antica *Bauli* e della stessa *Baiae* (Guidone & Knight, 2017). Il canonico cordolo che sigilla gli spigoli delle cisterne romane (Adam, 1990) è presente in tutti gli ambienti, sia lungo gli angoli verticali delle pareti sia quelli orizzontali snodandosi per tutto il perimetro del pavimento.

Sul lato corto di settentrione, negli ambienti I e II, si identificano alcuni scalini foderati anch'essi di intonaco idraulico che si connettono con l'esterno ma non è possibile comprendere se siano stati risparmiati nel tufo durante lo scavo del materiale, oppure siano stati costruiti in muratura e poi intonacati. Si ipotizza che tali scale corrispondano all'ingresso originale pertinenti le cicliche ispezioni, confermando così l'ipotesi che l'ingresso moderno con scaletta metallica non sia affatto l'ingresso originale utilizzato in antico. Sul fianco Ovest degli ambienti III, V, VIII e X si riconoscono cinque ampi passaggi, murati già in antico, che conducevano all'interno del fronte collinare (*Fig.* 4); anche tra gli ambienti VI e VII, proprio a cavallo dei due vani, si riconosce la traccia di un passaggio murato.

La cavità si può identificare quale cisterna d'età romana e negli ambienti X, IX, VI e IV si riconoscono sulla volta del soffitto delle aperture a pianta quadrata, con lato di circa 60 cm; ad eccezione dell'ambiente X, il cui pozzetto è chiuso da brecce di tufo cementate tra loro, i pozzetti degli altri ambienti sono chiusi da tegoloni in terracotta che possiamo identificare verosimilmente in laterizi *bipedales* (59,2 cm

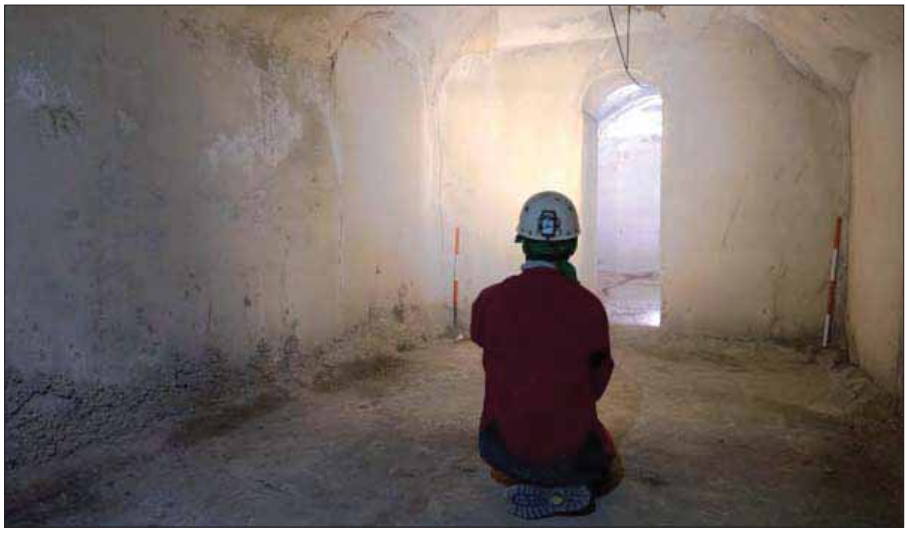


Figura 3 – Vano VIII della Cisterna I della "Cisterne sotto gli Hospitalia *CA106CpNA". Si notino le gallerie murate a destra e a sinistra della camera. Foto N. Damiano*

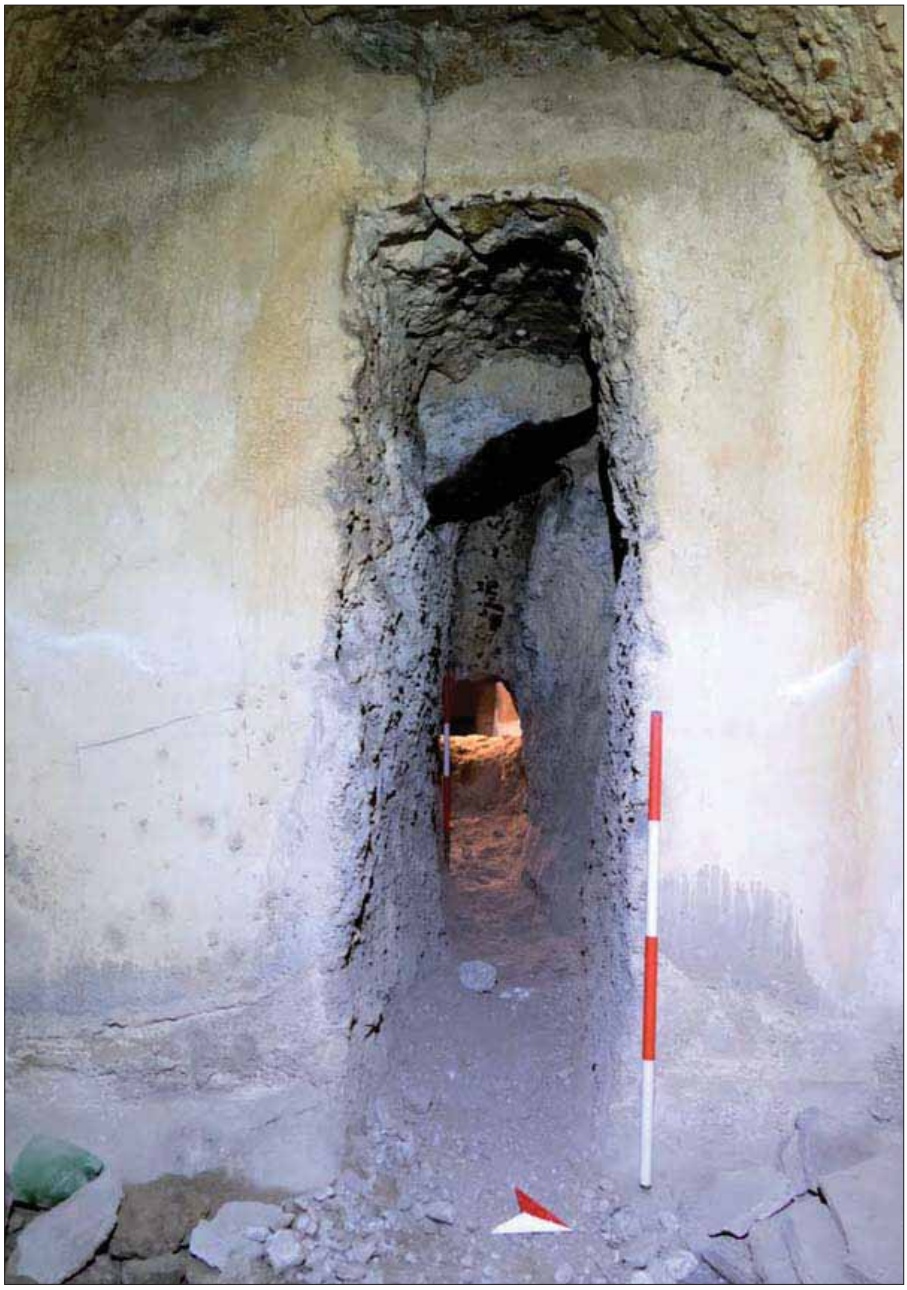


Figura 5 – Passaggio di comunicazione tra Cisterna I e Cisterna II. Foto N. Damiano



Figura 6 – Angolo Nordovest della Cisterna II. Sotto l'intonaco caduto appare il paramento murario in opera reticolata. Foto N. Damiano

di lato, Giuliani, 2006). Oltre a questi pozzetti quadrangolari, nell'ambiente IV attira l'attenzione una canaletta di alimentazione di 30 x 30 cm fortemente concrezionata.

Ritornando nell'ambiente V, sul lato Ovest, vi è lo stretto passaggio a imbuto che porta alla seconda ampia cavità (Cisterna II) la quale si sviluppa all'interno del fronte collinare proprio alle spalle della prima cisterna da cui si è entrati (*Fig.* 5).

Cisterna II

L'ambiente che si sviluppa alle spalle della prima cisterna d'accesso, precisamente sul fronte Ovest della stessa all'interno del fronte collinare, ha uno sviluppo planimetrico di circa 89 m, articolato in cinque gallerie di cui quattro parallele tra loro e ortogonali al corridoio principale; le sezioni trasversali di tutte misurano conformemente 2,0 x 2,0 m ca. Il passaggio dalla Cisterna I a quest'ambiente più interno, che chiamiamo Cisterna II, presenta una forma ad imbuto; la parte più esterna, infatti, si presenta come un passaggio allungato verso l'alto che subito chiude verso il basso grazie alla presenza, sulla copertura, di un mattone di tufo spiovente ed una lastra di terracotta obliqua verso l'interno.

Il passaggio si fa più basso e angusto fino a divenire uno stretto sfondamento irregolare. Appena passati all'interno si scavalca un cono di detriti provenienti verosimilmente da un camino sito appena dopo il primo archetto di ingresso; questo primo ramo d'ingresso (ramo "a", *Fig.* 1) infatti, è scandito dalla presenza di 4 archi che stringono di molto la larghezza stessa dell'ambiente, permettendo però la progressione in posizione eretta dopo qualche metro dall'ingresso.

Il soffitto è regolare per tutto lo sviluppo della cisterna: è una volta a botte mal conservata nelle gallerie "*c*" e "*d*"; gli angoli della pavimentazione così come quelli verticali tra le pareti, sono addolciti dalla presenza del cordolo in muratura, come nella Cisterna I. Alla fine della galleria "*a*" si nota un ampio crollo dell'intonaco che mette ben in evidenza un *opus reticolatum* dai grandi tufelli di circa 10 cm per lato, allettati in modo regolare da una spessa malta (*Fig.* 6).

Le gallerie "*d*", "*b*" e "*c*" si interrompono a Est in modo brusco in cui si riconosce su ciascuna un alto scalino, una sorta di alta spalletta profonda tra 0,50 m e 0,60 m (sul ramo "*d*" è poco meno di 0,50 m); osservando la planimetria complessiva si nota chiaramente che queste tre gallerie dovevano un tempo continuare verso Est sviluppandosi con ogni probabilità verso l'esterno del fronte collinare. Inoltre, si nota chiaramente che la traiettoria delle stesse conduce direttamente verso i passaggi murati presenti sulle pareti Ovest della Cisterna I, descritti sopra (indi-

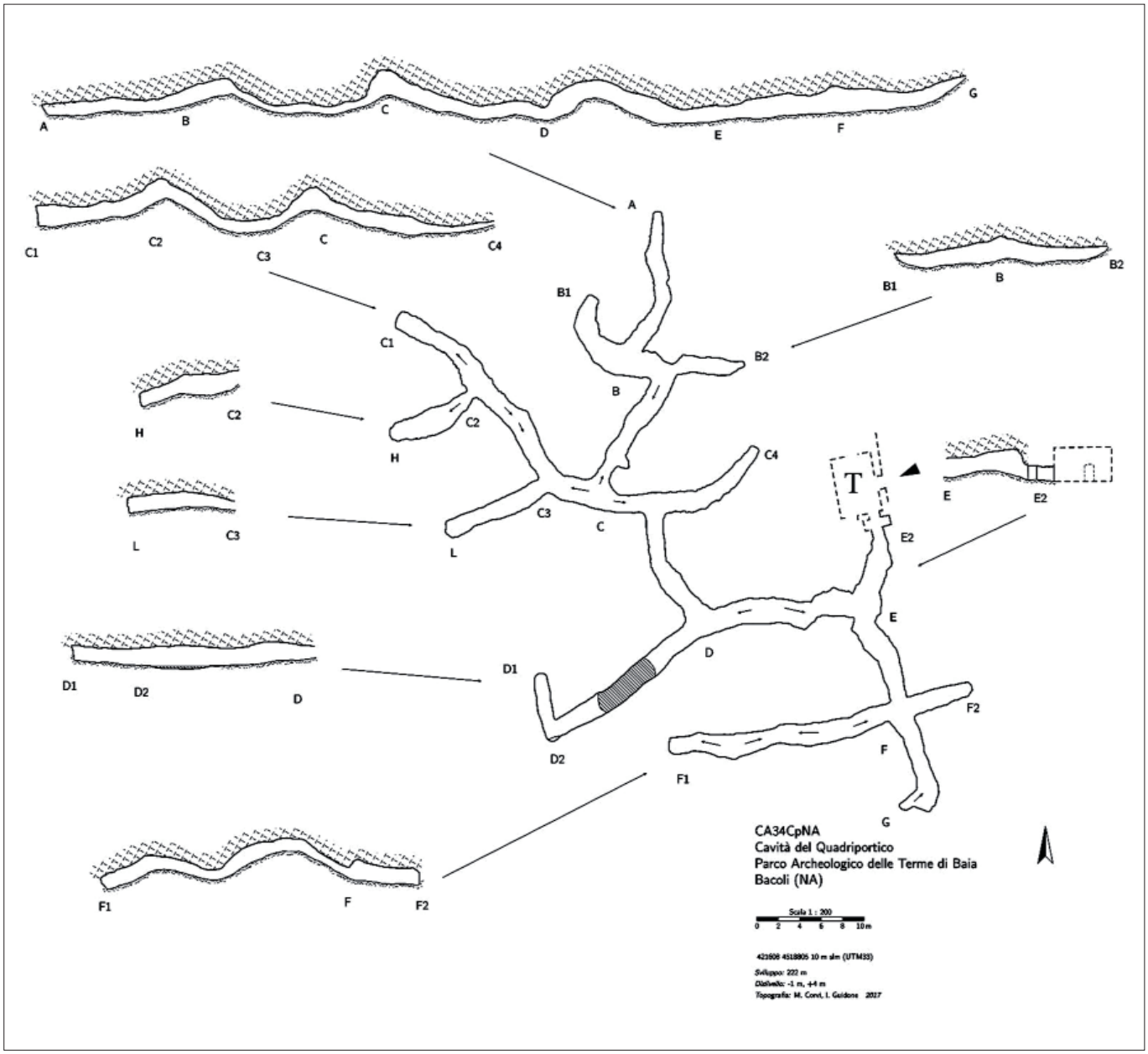


Figura 7 – Rilievo planimetrico e sezioni della Cavità del Quadriportico CA34CpNA. Rilevatori M. Corvi, I. Guidone 2017. Ramo "D": in scuro l'area ciclicamente allagata. T: saletta con vasche termali

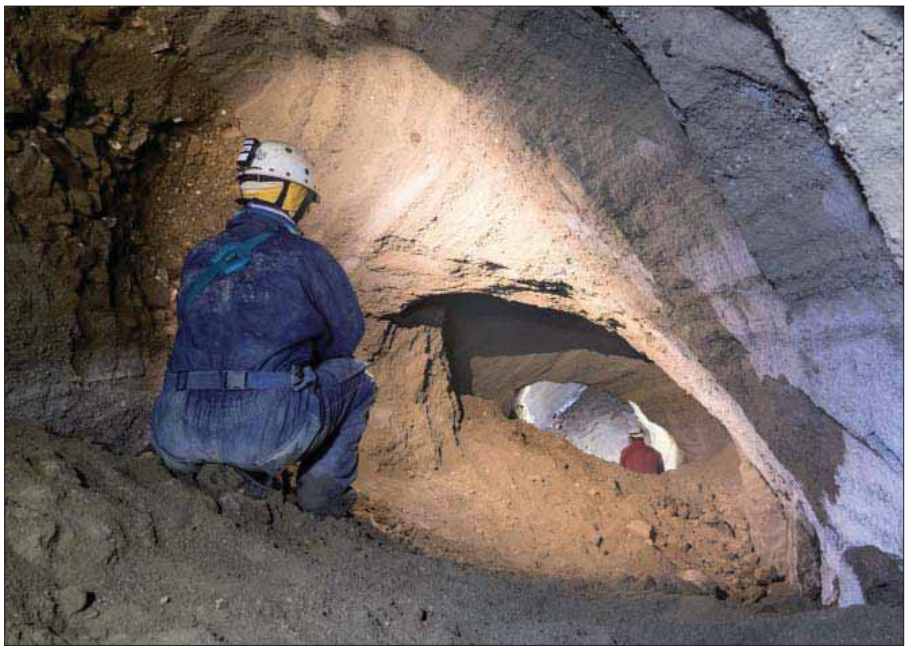


Figura 8 – Ramo "C" Cavità del Quadriportico CA34CpNA. Foto N. Damiano

cati in rosso in *Fig.* 1). Sull'angolo sudest del ramo "*c*" si nota la presenza di una spalletta angolare di cui si ignora al momento la funzionalità. L'intera cisterna presenta una sola canaletta di alimentazione individuata sulla volta appena dopo l'ingresso.

CONSIDERAZIONI SULLE CISTERNE SOTTO GLI HOSPITALIA CA106CPNA

Entrambi gli ambienti presentano caratteristiche precise che ci permettono di riconoscerli quali cisterne d'età romana. Esse comunicano tramite lo stretto passaggio a imbuto che unisce l'ambiente V della Cisterna I con il ramo "*a*" della Cisterna II. Probabilmente trattasi di un passaggio progettato in un momento di rifacimento dell'intero complesso idraulico. Nonostante al centro appaia sfondato si può ipotizzare che un tempo dovesse alloggiare in basso anche una canaletta idraulica che collegava i due ambienti.



Figura 9 – Ramo "E", si notino le fondazioni edificio superiore. Foto I. Guidone

Considerando che le gallerie "*d*", "*b*" e "*c*" della Cisterna II, si interrompono bruscamente proprio in linea con i varchi di gallerie murate riconosciute negli ambienti VI, VII/VIII e X della Cisterna I, è ipotizzabile che tali passaggi murati siano pertinenti proprio alle gallerie "*d*", "*b*" e "*c*" (*Fig.* 2). Rimane l'interrogativo del varco murato nell'ambiente III della Cisterna I il quale fa ipotizzare la presenza di un altro ipogeo simile alla Cisterna II ma al momento sconosciuto. Solo una strutturata indagine archeologica potrebbe far luce su questo elemento architettonico poco chiaro e che alza ulteriori quesiti.

La costruzione della Cisterna I, quindi, sarebbe da attribuire ad una fase archeologica successiva all'impianto della Cisterna II la quale, in una fase precedente, si sviluppava più verso Est ossia verso l'esterno del fronte collinare. Ciò potrebbe essere confermato dalla presenza di un'altra galleria murata visibile proprio sul fianco Est dell'ambiente VIII, proprio di fronte all'altro varco murato, quale traccia di proseguimento verso l'esterno (rilievo di *Fig.* 2). Per motivi sconosciuti, forse un cedimento del fronte collinare o forse solo la necessità di avere più cubature a disposizione per immagazzinare l'acqua, vennero chiuse le gallerie della Cisterna II e venne progettata una seconda cisterna (Cisterna I) che correva parallela al fronte collinare stesso.

Secondo stime approssimative degli autori, la Cisterna II per la quale è stata ipotizzata una fase edilizia antecedente la Cisterna I, ha un volume di circa 280 mc; per la Cisterna I invece è stato calcolato un volume di circa 310 mc. Considerando che i volumi "idrici" contenuti sono solitamente inferiori all'effettiva capacità dell'ipogeo (difficile in questa sede quantificarne l'effettivo scarto), rimane il dato oggettivo che la cisterna interna risulta un po' meno capiente di quella esterna. A prescindere dall'ipotesi se le due cisterne abbiano o meno lavorato in modo complementare, non c'è dubbio che in una certa fase di sfruttamento del sito si sia presentata la necessità di disporre di una maggiore quantità d'acqua.

Lo studio meriterebbe sicuramente un'indagine più approfondita che prendesse in considerazione il rapporto edilizio tra le strutture esterne e le cisterne sottostanti non tralasciando l'utilizzo dei pozzetti individuati nella Cisterna I che dovevano in qualche modo essere collegati all'esterno.

CAVITÀ DEL QUADRIPORTICO CA34CPNA, SETTORE DELLA SOSANDRA

Il Settore della Sosandra è uno dei complessi residenziali ascrivibili alle prime fasi edilizie del Parco (Amalfitano, 1990). A valle di questo settore si apre un ampio spazio quadrangolare interpretato inizialmente quale piscina scoperta (*natatio*) e circondata da porticati in muratura (Borriello &

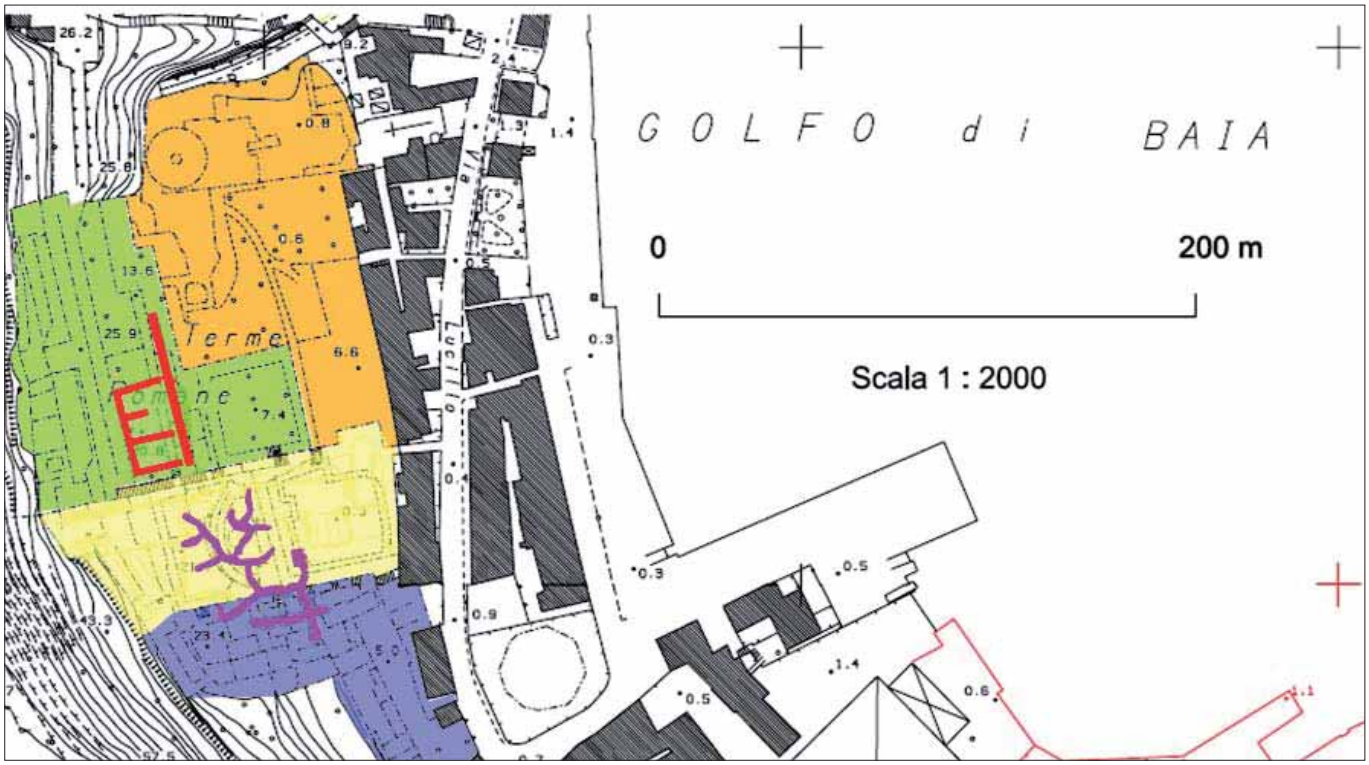


Figura 10 – Cartografia 1:2000 Comune di Bacoli, Fogli 6 e 8. Sovrapposizione planimetrica a cura di I. Guidone. Legenda: Cisterne sotto gli Hospitalia *CA106CpNA in rosso; Cavità del Quadriportico CA34CpNA. Settori del Parco Archeologico Terme di Baia (da Miniero, 2006): in giallo Settore della Sosandra; in verde Villa dell'*Ambulatio*, in arancione Settore di Mercurio, in azzurro Settore di Venere*



Figura 11 – Ramo "D" scavato in modo regolare con nicchie di varia grandezza. Foto N. Damiano

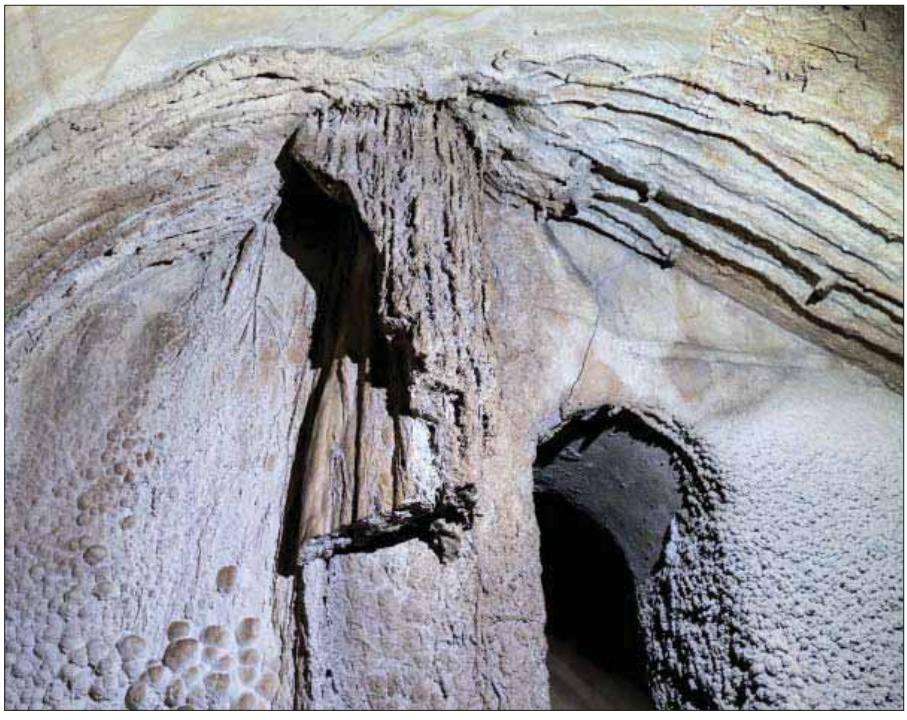


Figura 12 – Concrezione calcarea dalla canaletta di alimentazione nel vano IV Cisterna I. Foto N. Damiano

D'Ambrosio, 1979). L'ipotesi più accreditata è che tale piscina sia in realtà un ampio spazio aperto, mai riempito d'acqua, da confrontarsi piuttosto con la Palestra Grande di Pompei e che potrebbe essere ipoteticamente identificato con l'*ebeterion* voluto da Nerone per i marinai della flotta militare (Amalfitano, 1990). Non risulta comunque che siano state eseguite indagini archeologiche tali da poter chiarire l'effettiva destinazione d'uso della struttura quadrangolare, il cui fondo originario si troverebbe a circa 6 m più in basso dell'attuale (Amalfitano, 1990).

L'angolo sudovest di tale spazio aperto, in una fase archeologica posteriore ai fasti dell'età imperiale, è un ambiente in muratura (T in *Fig.* 7) le cui pareti sono state alzate anche con blocchi murari di reimpiego. All'interno di questo ambiente in parte allagato, si riconoscono delle vasche scavate nella pavimentazione e sul lato meridionale si aprono due bassi archi in laterizio dai quali si accede in un'articolata galleria scavata nei depositi piroclastici (*Fig.* 7).

Al suo interno non si riconoscono paramenti murari o altri interventi edilizi (*Fig.* 8). Le gallerie si caratterizzano invece per svilupparsi al di sotto delle fondazioni degli edifici d'età romana apparentemente senza alcuna progettualità. Nei rami "E" e "B" infatti, si notano le fondazioni delle strutture pertinenti la terrazza a emiciclo del Settore della Sosandra (*Figg.* 9, 10) messe "a giorno" da interventi di scavo di epoca chiaramente successiva alle costruzioni stesse. La cavità in oggetto quindi non sembra aver alcun rapporto progettuale con le strutture epigee.

La cavità è stata scavata in terreni costituiti da alternanze di livelli di pomici, scorie e litici di dimensioni centimetriche, contenenti bombe, fino a qualche decina di cm di diametro, e livelli di cineriti a granulometria medio-grossolana. È di difficile identificazione tipologica ma l'ipotesi più accreditata la riconosce quale esempio di attività di ricerca delle risorse idriche termali, ossia gallerie per la captazione dei vapori, realizzate presumibilmente in età medievale (Medri, 2013). Tali ipotesi è suffragata dalla presenza, nella struttura d'ingresso, di corti vasche infossate sfruttate proprio per ospitare, in posizione forse seduta, i fruitori del bagno termale.

Pur accettando l'ipotesi che le gallerie di questa cavità siano indagini d'età medievale pertinenti la ricerca della sorgente di calore, non si riesce a contestualizzare al momento la destinazione d'uso del secondo ramo a ovest dell'ingresso (ramo "D") il quale si distingue da tutti gli altri per la presenza di scavi regolari e ben progettati che esulano dal resto dell'impianto ipogeo (*Fig.* 11).

Qui si rilevano infatti una serie di nicchie di varia grandezza site ad altezze diverse che



Figura 13 – Terrazza Est Hospitalia. *Ambiente esterno con al centro una vasca e un pozzetto fortemente concrezionati molto prossimi al vano V della cisterna sottostante. Foto N. Damiano*

risultano di difficile identificazione soprattutto in relazione allo sfruttamento termale sopra esposto. Esplorata in periodi dell'anno diversi si è accertato che proprio nella parte iniziale del ramo "D" si forma una pozza d'acqua isolata di cui si ignora la provenienza.

Misure speditive di alcuni parametri fisico-chimici dell'aria sono state effettuate nel mese di novembre 2017, con attrezzatura da campo. La temperatura dell''aria, rilevata in sei diverse zone, oscillava dai 22 °C ai 23 °C, con uno scarto maggiore di 6 °C rispetto alla temperatura esterna.

Le concentrazioni di CO e H_2S (misurate con un rilevatore MSA Altair 4X) sono risultate nulle. Si tratta di un dato puramente indicativo. Allo scopo di confermare quanto già avanzato dagli studi archeologici, ossia che lo scavo della cavità sia stato dettato dalla necessità di captare i vapori termali, sarebbe opportuno effettuare un monitoraggio prolungato nel tempo, esteso ad ulteriori parametri chimico-fisici.



Figura 14 – Coralloidi del vano IV Cisterna I. Foto N. Damiano

LE CONCREZIONI CARBONATICHE

La formazione di speleotemi è generalmente collegata ad ambienti di grotte naturali, ma la sempre più diffusa frequentazione degli speleologi in cavità di origine antropica ha focalizzato l'attenzione degli studiosi anche verso le formazioni in ambienti artificiali. La presenza delle concrezioni carbonatiche all'interno delle cavità artificiali è chiaramente meno incisiva se rapportata alla realtà delle grotte carsiche, ma spesso è possibile trovare delle situazioni particolarmente favorevoli atte a formare delle concrezioni peculiari che, facendosi testimoni di fasi di abbandono e frequentazione, concorrono all'individuazione di una importante cronologia relativa della cavità.

Nelle Cisterne sotto gli Hospitalia CA106CpNA, all'interno dell'ambiente IV della Cisterna I sono state rinvenute una serie di concrezioni carbonatiche di particolare interesse sia per la loro presenza abbondante che per la variabilità di tipologie. Altra peculiarità è la concentrazione di speleotemi in quest'unico ambiente.

In corrispondenza della canaletta di alimentazione è presente una colonna con eccentriche e vele calcitiche che testimoniano un arrivo di acqua abbondante e continuo, con scorrimento laterale lungo la volta (*Fig.* 12).

Sulla parete, sul lato sinistro della colonna calcitica, si notano delle stalattiti forma-

tesi lungo un apparato radicale, denominate *rootsicles* (Forti, 2001); le radici rappresentano una via preferenziale per l'acqua che raggiungendo un ambiente favorevole depositano il carbonato di calcio. Sempre sulla stessa parete, più in basso, si evidenziano delle forme sferoidali formatesi per il rimbalzo della caduta violenta di acqua, le concrezioni da *splash* (Forti, 1984). Anch'esse testimoniano la venuta abbondante di acqua.

In superficie, presso gli ambienti della terrazza superiore, in corrispondenza della sala V, sono state individuate una vasca ed una canaletta fortemente concrezionate che inglobano resti vegetali (*Fig.* 13); si ipotizza una connessione tra questo pozzetto, ormai occluso, e la canaletta di alimentazione della cisterna sottostante o comunque una percolazione di acqua carica di carbonato anche dopo la crescita della vegetazione.

Si ipotizza, quindi, che dopo l'abbandono dell'intero impianto la Cisterna I sia stata interessata dalla crescita di vegetazione, in particolare da radici di piante esterne di cui rimangono chiare tracce nelle *rootsicles* sopra descritte.

La stessa sala è ricoperta lungo tutte le pareti, tranne il pavimento, da concrezioni coralloidi, presenti anche nelle altre sale, seppur in maniera molto ridotta, appena sopra il cordolo angolare, quasi a seguire un livello dell'acqua o lungo le fratture presenti nell'intonaco (*Fig.* 14).

Queste concrezioni si formano per risalita capillare lungo le pareti da un fondo allagato e successiva evaporazione (Perna, 1989). Probabilmente per un periodo la cisterna ha ricevuto un flusso abbondante di acqua che ha allagato il fondo della cisterna non permettendo la formazione di concrezioni al di sotto del livello d'acqua.

Testimonianze di tali concrezioni sono presenti anche in altre cavità idrauliche del Parco e attestano l'abbondante sfruttamento delle acque bicarbonate dell'*Aqua Augusta* che collegava le sorgenti del M.te Terminio (AV) all'area di Bacoli (NA) (Sgobbo, 1938; Amalfitano, 1990).

CONCLUSIONI

Lo studio s'inquadra nell'ambito dell'attività d'aggiornamento del Catasto delle Cavità Artificiali della Federazione Speleologica Campana. Gli elementi indispensabili ai catasti speleologici di cavita' artificiali, comunemente diffusi tra i gruppi speleologici (facenti capo sia alle sezioni del Club Alpino Italiano sia alla Società Speleologica Italiana) e tra le federazioni speleologiche regionali, sono: l'ubicazione geografica o cartografica dell'ingresso (o degli ingressi), il rilievo topografico, la documentazione fotografica, una descrizione dell'ipogeo nonché della realtà geologica e strutturale, infine si suggerisce sempre anche l'inquadramento tipologico e cronologico della cavità possibilmente attraverso riferimenti bibliografici e ricerche d'archivio. La documentazione speleologica, quindi, si realizza tramite un'esplorazione diretta delle cavità seguendo le tecniche speleologiche comunemente applicate nella progressione in grotta. Durante, o dopo, le osservazioni dirette, effettuate durante i sopralluoghi, si procede con una documentazione fotografica degli elementi distintivi della cavità ed il rilievo topografico dell'intero ipogeo. Tale documentazione è ovviamente stata realizzata per le cavità in oggetto ubicate nell'area centrale del Parco.

In questo articolato sito archeologico si rileva uno sfruttamento costante e mirato di risorse idriche fin dall'antichità; tali progetti d'ingegneria idraulica hanno interessato sia lo sfruttamento di acque meteoriche, raccolte in cisterne ipogee, sia quelle bicarbonate dell'Acquedotto Augusteo nonché, ancora in età medievale, lo sfruttamento di acque di falda arricchite localmente dalla risalita di fluidi endogeni.

La formazione di concrezioni rinvenute all'interno delle cisterne prese in esame, testimonia la costante presenza di tali risorse idriche; è proprio l'arrivo di un flusso abbondante di acqua di origine carsica come quella dell'acquedotto, convogliata in canalette, e di acqua piovana, infiltratasi nelle strutture dalle malte ricche di calcio (Forti, 1999), che si riconosce la formazione di diversi tipologie di speleotemi.

Inoltre, le cavità prese in esame, seppur con destinazione d'uso diverse e cronologicamente distanti, risultano paradigmatiche per gli eterogenei interventi edilizi susseguitesi nel tempo nel Parco Archeologico. La documentazione speleologica, effettuata tramite esplorazione diretta del sottosuolo, ha permesso di fornire nuovi dati archeologici: i rilievi e la sovrapposizione planimetrica degli stessi sottolineano il rapporto spaziale tra le cavità e gli edifici di superficie; si evidenzia la peculiarità del ramo "D" (*Fig.* 14) della Cavità del Quadriportico la cui destinazione d'uso si presenta apparentemente diversa dal resto dei rami ipogei e, infine, la presenza delle già citate concrezioni carbonatiche nelle Cisterne sotto gli Hospitalia, esse si presentano quali interessanti testimonianze anche in una fase successiva all'abbandono da parte dell'uomo.

Il lavoro effettuato presenta margini di approfondimento per lo studio dell'intero complesso termale, con la possibilità di rapportare in modo organico e complessivo le strutture ipogee alle evidenze di superficie. Si tratterrebbe di una lunga e complessa attività sostenuta da una proficua concorrenza di forze provenienti da soggetti istituzionali, accademici e associativi in cui, oltre ad attente esplorazioni speleologiche, è auspicabile anche un approccio multidisciplinare.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Ufficio di Soprintendenza Archeologica nelle persone di Pierfrancesco Talamo, Francesco Sirano e Filippo Demma per la fiducia mostrata nei confronti della ricerca speleologica e della Federazione Speleologica Campana. Ringraziamo lo speleologo Graziano Ferrari per essere stato tra i primi speleologi ad appassionarsi agli studi delle cavità antiche nell'area flegrea aprendo una via di ricerca avvincente. Inoltre, si ringrazia il prof. Paolo Forti dell'Istituto Italiano di Speleologia per i suggerimenti ricevuti.

BIBLIOGRAFIA

Adam J. P. (1990), *L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e tecniche*. Milano.

Amalfitano P., Camodeca G., Medri M. (a cura di) (1990), *I Campi Flegrei: Un itinerario archeologico*. Venezia, Marsilio Editore.

Borriello M.r., D'ambrosio A. (1979), *Baiae-Misenum*. In *Forma Italiae*, Regio I, vol. 14 Firenze.

Di Vito M.A., Isaia R., Orsi G., Southon J., de Vita S., D'Antonio M., Pappalardo L. & Piochi M. (1999), *Volcanism and deformation since 12,000 years at Campi Flegrei caldera (Italy)*. Journal of Volcanol. and Geotherm. Res., 91, p. 221-246.

Ferrari G., Guidone I., Lamagna R. (2015), *Il sistema di vapore delle Piccole Terme di Baia*, in Atti del XXII Congresso Nazionale di Speleologia Euro Speleo Forum 2015 "Condividere i dati", 30 maggio-2 giugno 2015, Pertosa-Auletta (SA), pp. 492-497.

Ferrari G. & Lamagna R. (2016), *L'Acquedotto Augusteo della Campania nei Campi Flegrei (Napoli).* Archeologia Sotterranea, Roma, pp. 24-33.

Forti P. (1984), *La genesi delle concrezioni semplici*, Speleologia 11, pp. 23-31.

Forti P. (1999), *Le concrezioni e le mineralizzazioni secondarie degli ipogei artificiali italiani*. Opera Ipogea, 3, p. 3 – 21.

Forti P. (2001), *Biogenic speleothems*, Int. J. Speleol. 30, pp. 39-56.

Giuliani C.F. (2006), *L'edilizia nell'antichità*. Carocci ed. Roma.

Guidone I., Knight P. (2017), *Indagini preliminari a Punta le Cento Camerelle, Bacoli (Napoli)*, in Atti del III Convegno Regionale di Speleologia "Campania Speleologica", 2-4 giugno 2017 Napoli, pp. 159-168.

Medri M. (2013), *In Baiano sinu: il vapor, le aquae e le Piccole Terme di Baia*, Antenor Quaderni 29, pp. 119-144.

Miniero P. (2006), *Baia, il castello, il museo, l'area archeologica*, Napoli Electa ed. .

Perna G. (1989), Genesi delle concrezioni coralloidi e dei cristalli. Speleologia 20, pp. 40-44.

Pistolesi M., Bertagnini A., Di Roberto A., Isaia R., Vona A., Cioni R. & Giordano G. (2017), *The Baia-Fondi di Baia eruption at Campi Flegrei: stratigraphy and dynamics of a multi-stage caldera reactivation event*. Bull. Volcanol., 79, DOI 10.1007/s00445-017-1149-1.

Sgobbo I. (1934), *Terme flegree e origine delle terme romane*, in Atti del I Conv. Naz. Studi Romani, Roma, pp. 186-194.

Sgobbo I. (1938), *Serino, l'acquedotto romano della Campania: Fontis Augustei Aquaeductus, Notizie degli Scavi di Antichità*, Roma, pp. 75-97.

Nuove metodologie di rilievo di ambienti ipogei tramite laser scanner: l'esempio di una cavità artificiale in provincia di Napoli

A new methodology for surveying undergroud quarry with laser scanner: an example in Province of Naples

Maria Danzi
Ingegnere, Geofotogrammetrica S.r.l., Napoli
E-mail: m.danzi@geofotogrammetrica.it

Umberto Del Vecchio
Geologo, libero professionista
E-mail: delvecchio@geoinformatica.it

Gianluca Minin
Geologo, libero professionista
E-mail: gianlucaminin@ingeosrl.it

Valentina Barone
Ingegnere, Geofotogrammetrica S.r.l., Napoli

Parole chiave (*key words*): laser scanner, cavità, sottosuolo

RIASSUNTO

L'area metropolitana di Napoli è caratterizzata da un sottosuolo ricco di cavità e cunicoli, nati dapprima come cave di tufo per la costruzione degli edifici storici, infatti, l'ampia diffusione del tufo su tutto il territorio regionale ne fa la pietra da costruzione più presente in tutti i contesti architettonici della Campania.

Oggetto del presente lavoro è un rilievo di dettaglio, effettuato tramite laser scanner mobile, di una cavità antropica che si sviluppa nel sottosuolo di Afragola, in provincia di Napoli. Il rilievo necessario per la conoscenza ed il censimento delle cavità presenti nel sottosuolo viene eseguito con strumentazioni di ultima generazione basate su tecniche di laser scanning. Questo tipo di rilievo risulta essere la metodologia migliore in quanto permette, in tempi brevissimi, di acquisire nuvole di punti costituite da milioni di dati. La nuvola di punti è il dato numerico che descrive la forma geometrica, nello spazio, degli ambienti rilevati. Dall'elaborazione dei dati raccolti è stato possibile ottenere, grazie all'utilizzo di software specifici, sia la classica rappresentazione con piante e sezioni e sia i modelli digitali tridimensionali.

Il rilievo delle cavità viene eseguito in stretta collaborazione con un geologo con esperienza ad operare in qualità di speleologo, che abbia le competenze sia per muoversi in situazioni di ambienti di difficile progressione sia per eseguire direttamente il rilievo laddove ci siano condizioni di disagio per le quali sono necessarie tecniche specificatamente speleologiche di progressione (discesa di pozzi, cunicoli allagati, etc.). Contestualmente al rilievo geometrico, vengono acquisiti da parte del geologo-speleologo anche dati geologici, strutturali, sullo stato del dissesto, al fine di ottenere un rilievo integrato e completo di tutti gli ambienti della cavità.

INTRODUZIONE

La città di Napoli è nota ovunque per la presenza nel suo sottosuolo di una molteplicità di cavità artificiali. La loro origine è dovuta principalmente all'estrazione del tufo (Tufo Giallo Napoletano), roccia vulcanica, su cui fonda quasi tutta la città, ottima pietra da costruzione, con un'ampia utilizzazione nell'edilizia cittadina, in quasi tutto il suo arco storico di vita. Il sottosuolo napoletano conta una eccezionale ricchezza per tipologia di cavità e stratificazioni storiche nel loro uso. Nella città partenopea c'è una varietà di tipologia che va dalle tombe del periodo eneolitico, agli acquedotti, alle cisterne, agli ipogei pagani e cristiani, ai camminamenti militari, alle cave, ai ricoveri bellici (MELISURGO, 1889; EVANGELISTA *et al*., 1980; MICCIO ET ALII, 1994; AAVV, 1967, AAVV, 1991).

La cavità ipogee rappresentano una peculiarità di questo contesto territoriale, ma anche molto spesso anche un'emergenza, associata all'instabilità degli ambienti della cavità che possono avere ripercussioni sul soprassuolo. Il comune di Napoli ha condotto da decenni uno studio sistematico, seppure non continuo nel tempo, su questo patrimonio ipogeo. Lo studio ha portato al censimento delle cavità conosciute e alla realizzazione di un Sistema Territoriale da parte dell'Ufficio Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del comune di Napoli. Tale patrimonio che raccoglie centinaia di cavità artificiali si basa su rilievi eseguiti con metodologie classiche, quali rilievi topografici.

Nasce, quindi, l'esigenza di eseguire indagini approfondite e di lavorare su un modello tridimensionale che consente, insieme alle indagini geologiche, di eseguire verifiche di stabilità. Il rilievo degli ambienti di cavità, dal punto di vista topografico e geometrico, è uno dei primi passi da percorrere per poterne avere una completa conoscenza: rappresenta, infatti, un passo propedeutico al censimento, studio e catalogazione delle cavità.

METODOLOGIA DI RILIEVO IN CAVITÀ

Recentemente si sono sviluppati metodologie di rilievo 3D che si basano sul metodo del laser scanner. Da strumenti costosi, pesanti e difficili da utilizzare per i rilievi ipogei si è passati a strumenti versatili, leggeri che possono realizzare rilievi affidabili anche in movimento. Il gruppo di lavoro esegue da tempo rilievi in cavità artificiali avvalendosi di tale innovativa strumentazione di ultima generazione che permette di acquisire in movimento nuvole di punti 3D. L'acquisizione è quindi facilitata da una strumentazione molto agevole da portare in sito e da manovrare, in quanto è costituita da un data set contenuto in uno zaino a spalla e da un corpo laser e piattaforma inerziale ubicati in cima ad un asta elastica lunga circa 50 cm, manovrabile impugnando un manico gommato.

La metodologia è stata studiata per eseguire rilievi in-door in quanto la strumentazione ha una distanza di acquisizione di circa 25/30 metri e raggiunge precisioni centimetriche.

Questa metodologia permette di eseguire l'acquisizione della nuvola di punti 3D anche in ambienti e condizioni, che la metodologia standard con stazione fissa non avrebbe permesso: infatti le condizioni di rilievo di cunicoli e di altri ambienti possono risultare non facili, in particolare in ambienti stretti, angusti o di difficile accesso.

La metodologia di rilievo fornisce la possibilità di collegare tra loro vari ambienti della medesima cavità, acquisiti in momenti diversi a causa della loro complessità, in quanto le scansioni vengono eseguite con zone di sovrapposizione al fine di utilizzare punti naturali per allinearle nella fase di post-processing. Una volta allineate tutte le nuvole di punti si ottiene il modello geometrico tridimensionale del sito nella sua interezza.

MOBILE LASER SCANNER 3D

Il laser scanner è uno strumento elettro-ottico che permette di rilevare la geometria di oggetti tridimensionali acquisendo nuvole di milioni di punti tramite la scansione con un distanziometro laser. I risultati sono eccezionali come qualità e dettaglio e permettono

una ottima base per la ricostruzione degli ambienti finalizzata alla navigazione virtuale, per esempio.

I laser scanner tradizionali, generalmente, presentano l'inconveniente di lavorare con stazione fissa su tre piede, che implica una difficile applicabilità in una cavità anche non complessa, espressa come molte stazioni di misura, invisibilità di alcuni posti, complessità dell'unione delle scansioni, etc.

Recentemente si è sviluppata la tecnologia SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping), nata nella robotica, che permette di rilevare in 3D e mappare l'ambiente circostante tramite l'utilizzo di sensori e contemporaneamente seguire lo spostamento. In questo lavoro è stato utilizzato un laser scanner per rilievi indoor in movimento, lo ZEB1, prodotto dalla GeoSlam, che è dotato di una testina laser rotante capace di catturare più di 40.000 pt/sec (*Fig.* 1).



Figura 1 – Particolare della testina laser rotante del laser scanner mobile ZEB1 della Geoslam

Questa tecnologia presenta dei notevoli vantaggi nel rilievo in cavità perché permette in un'unica acquisizione lo spostamento e la percorrenza in condizioni ambientali anche non facili fornendo un rilievo 3D completo e continuo in tempi molto ridotti (*Fig.* 2). Con l'attuale tecnologia, tuttavia, rispetto all'utilizzo della stazione fissa la risoluzione e il dettaglio sono notevolmente sacrificate con risoluzioni e precisioni centimetriche, così come la distanza di acquisizione, circa 25/30 metri.

CAVITÀ AD AFRAGOLA (NA)

Il caso di studio che viene proposto è rappresentato da un lavoro eseguito ad Afragola in provincia di Napoli, comune dell'entroterra napoletano, nel centro della Piana Campana. Come per la città di Napoli, anche nel territorio di Afragola il substrato litoide è costituito dalla formazione del Tufo Giallo Napoletano (TGN), presente generalmente sotto una coltre di depositi piroclastici successivi, prevalentemente



Figura 2 – Fase di acquisizione di ambienti di cavità artificiale con laser scanner mobile ZEB1



Figura 3 – Inquadramento territoriale dell'area rispetto alla città di Napoli, a nord evidenziato il Comune di Afragola

cineritici, che presentano spessore di circa 10 metri dal piano campagna. Pertanto il territorio cittadino di Afragola è ricco di cavità antropiche, utilizzate in passato per cavare materiale per la costruzione dell'edificato sovrastante. Le cavità che venivano a formarsi, venivano successivamente utilizzate come cisterne e, talvolta, come cantine. Con la scarsa manutenzione e l'abbandono delle abitazioni superiori si è persa la memoria di molte cavità che, nel tempo, però hanno provocato dissesti all'edificato dovuti a infiltrazioni di acqua o a dissesti dello stesso sottosuolo (VARRIALE, 2007; PROVINCIA DI NAPOLI 2002; DANZI *et al.*, 2016a).

Nello specifico è stato eseguito il rilievo di una cavità già conosciuta, ubicata all'interno di una proprietà privata, allo scopo di eseguire la verifica dello stato dei luoghi e all'individuazione di situazioni di dissesto. La cavità oggetto del lavoro è ubicata nel centro cittadino, e storicamente è stata utilizzata come cava per l'estrazione di materiale tufaceo da costruzione. Successivamente è stata adibita a cantina e quindi abbandonata negli anni più recenti (*Fig.* 3).

La cavità, interamente scavata nel Tufo Giallo Napoletano (TGN), si trova alla quota di circa -25 metri dal piano campagna, alla



Figura 4 – Ambienti interni della cavità: particolare della galleria principale con i resti di botti per il vino



Figura 5 – Ambienti interni della cavità: particolare di uno dei pozzi interni, nel quale sono visibili i depositi piroclastici presenti sopra il tufo giallo

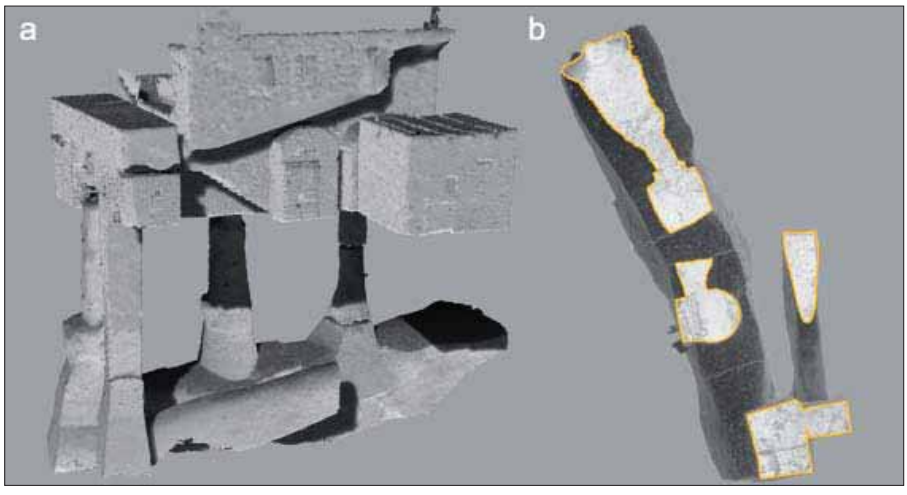


Figura 6 – Post_processing della point cloud: a) rappresentazione tridimensionale della cavità ; b) spaccato della mesh 3D

quota assoluta di 21 m slm, sotto una coltre di materiale piroclastico incoerente e rimaneggiato. L'accesso alla cavità avviene attraverso gli ambienti sotterranei coperti a cui si accede dal cortile interno della proprietà. Da questi ambienti è possibile scendere nella cavità tramite un pozzo attrezzato alla discesa con scala in ferro, suddiviso in due piccoli ambienti da solai di separazione. La scala conduce all'ambiente principale costituito da una camera lunga circa 30 metri e allineata in direzione SW-NE, il cui piano di calpestio si trova a circa 14 metri dal piano campagna. Su un lato oltre la scala di accesso è presente un grosso cumulo di detrito costituito da terreno sciolto che proviene dall'alto, probabilmente da un pozzo o da una cavità adiacente. La volta si presenta ad arco, con la tipica forma di scavo nel tufo, in maniera molto regolare fino all'angolo opposto, dove vi sono delle vecchie botti ormai in pessime condizioni. La volta della cavità è interrotta da una serie di quattro pozzi, compreso quello di accesso, di cui due chiusi da un solaio in sommità ed uno aperto e collegato con l'esterno. Immediatamente a sinistra dell'ultimo pozzo che collega con l'esterno, oltre un altro piccolo cumulo di materiale di risulta, parte una breve galleria più stretta, in leggera salita che si chiude contro una muratura. Le pareti in tufo scavato della cavità si presentano abbastanza regolari e sono presenti due piccole nicchie (*Figg.* 4 e 5).

RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEL RILIEVO

Il rilievo con lo scanner ZEB1 è stata fatta in tre diverse acquisizioni, le prime due lungo la scala di accesso nei due ambienti sovrapposti e divisi da solai e la terza e ultima per la restante parte di cavità dalla base del pozzo di accesso fino a coprire in un'unica volta tutti gli ambienti di cavità, volte dei pozzi comprese. Collegando le tre acquisizioni tra loro e collegando successivamente il modello della cavità con il modello del soprassuolo, acquisito sempre con la metodologia del mobile scanner, la cavità è stata successivamente riferita rispetto al sovrassuolo e quindi, successivamente, georiferita.

Per la rappresentazione grafica è necessario triangolare le nuvole di punti per elaborare le mesh, le superfici tridimensionali sulle quali si può andare a riportare il rilievo geologico, le osservazioni strutturali e la mappatura dei materiali al fine di elaborare carte tematiche finalizzato ad un rilievo integrato e completo di tutti gli ambienti della cavità (*Figg.* 6 e 7).

La successiva rappresentazione grafica della cavità viene fatta attraverso sia la classica rappresentazione con piante e sezioni, sia con modelli digitali tridimensionali (*Fig.* 8).

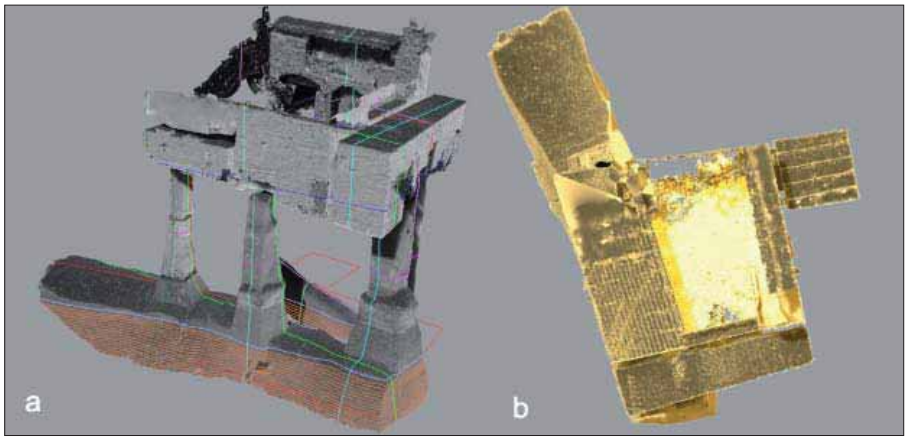


Figura 7 – Post_processing della point cloud: a) modello 3D con elaborazioni delle sezioni significative ; b) modello della mesh 3D: vista in pianta

La possibilità di georiferire il dato permette di confrontare tra loro sistemi di cavità non collegate, così come confrontarle con l'ambiente esterno, ottenendo una carta di sovrapposizione del sottosuolo con gli edifici superiori.

CONCLUSIONI

L'utilizzo del mobile scanner ha permesso di acquisire in tempi molto brevi e con estrema affidabilità l'ambiente di cavità, restituendoci un modello geometrico degli ambienti. Sono stati acquisiti i pozzi nella loro geometria, fino alla sommità chiusa o aperta, acquisendone la forma, le dimensioni e l'andamento anche senza averli mai raggiunti. Anche le altre geometrie della cavità come le nicchie, la volta, le sporgenze, i cumuli e così via sono stati acquisiti con notevole precisione geometrica anche se possedevano dimensioni decimetriche.

Il rilievo così eseguito supera ampiamente in affidabilità il rilievo tradizionale con stazione totale che si sarebbe potuto eseguire in cavità e fornisce un modello confrontabile ad una scansione acquisita con stazione fissa, fornendo però la versatilità del movimento, che permette di aggirare ostacoli diminuendo drasticamente il numero di acquisizioni ed eliminando le zone di ombra, il tutto in un arco di tempo irraggiungibile con altre metodologie, senza parlare della possibilità di percorrere zone di cavità che si presentano disagiate (zone allagate, strette, basse, anguste, etc.).

La presenza del geologo/speleologo durante l'acquisizione è risultata fondamentale per permettere, nella fase successiva di restituzione del rilievo, la ricostruzione degli ambienti, il riconoscimento partendo dalla geometria acquisita della natura e tipologia dell'oggetto geometrico rilevato (muratura, cumulo detritico, pozza d'acqua, frattura, nicchia e segno di scavo, etc.). Si ricorda, infatti, che lo strumento non fornisce informazioni sulla tipologia di materiale rilevato né informazioni di colore.

La potenzialità di questa metodologia consente di estendere la sua applicazione anche a casi più complessi (DANZI; 16b; DANZI; 17a; DANZI; 17b). Un esempio dei lavori svolti è il rilievo della Galleria Borbonica dove ci si è trovati in presenza di cavità appartenenti sia a diverse epoche storiche sia a quote diverse. La metodologia ha consentito di georiferire il sistema di cavità sotto il tessuto urbano al fine di studiare l'interazione tra sottosuolo e sovrassuolo.

In ambito archeologico questa tecnica di rilievo ha permesso non solo rilievi indoor, ma ha consentito il raggiungimento di ottimi risultati per la restituzione sia esterna che interna come nel caso del rilievo eseguito per la casa dei Casti Amanti a Pompei.

Come analizzato, quindi, la tecnologia GeoSLAM dello scanner ZEB1 si adatta ai casi più svariati, dai più semplici a quelli più articolati, consentendo di eseguire il rilievo in movimento in pochi minuti, molto più rapidamente rispetto all'esecuzione di rilievi tradizionali, e, tramite l'utilizzo di algoritmi, di ricavare la mappatura indoor e outdoor senza GPS, ottenendo una nuvola di punti interamente registrata e già pronta per l'impiego.

In tal modo diminuiscono costi e tempi, in particolare in riferimento anche alla diminuzione dei rischi a cui è esposto l'operatore, nel caso di ambienti poco fruibili, grazie alla eccezionale rapidità di acquisizione della strumentazione.

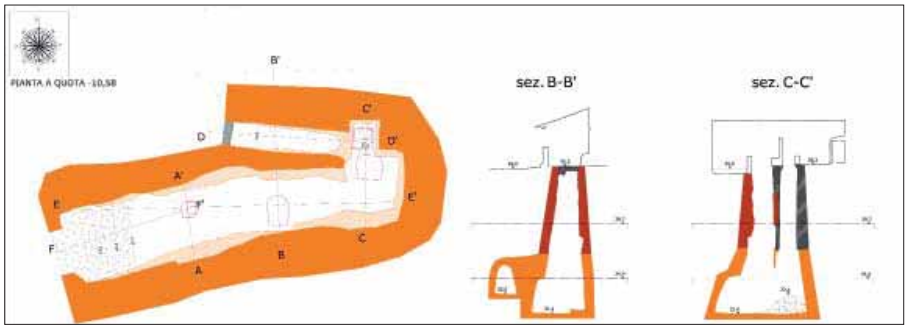


Figura 8 – Editing grafico: pianta e sezioni derivate dal modello 3D

BIBLIOGRAFIA:

AA.VV. (1967), *Il sottosuolo di Napoli*, Atti I commissione tecnica per lo studio del sottosuolo cittadino, A cura del Comune di Napoli, Giunta Comunale di Napoli, 1967, pp. 447.

AA.VV. (1991), Third International Symposium on Underground Quarries; Atti, Napoli 10-14 giungo 1991, pp. 310.

Danzi M., Del Vecchio U., Minin G., Pepe F. (2016a), *Il rilievo del sottosuolo: il caso di una cavità antropica ad Afragola con tecnologia mobile mapping indoor*. Archeomatica-Tecnologie per i Beni Culturali.

Danzi M., Pepe F., Strada R. (2016b), *Il rilievo finalizzato al recupero e al consolidamento delle architetture in calcestruzzo. Nuove tecnologie laser -scanning applicate ai Mulini Meridionali Marzoli di Torre del Greco (NA), Atti del C*onvegno "Concrete 2016 Architettura e Tecnica, Termoli, 22-23 settembre 2016, Luciano Editore, Napoli.

Danzi M., Scotto Di Santolo A., De Silva F. Ebrahimpour B., Evangelista L., Pepe F. (2017a), *L'importanza dell'uso integrato di indagini e modellazione numerica 3D nella conservazione e tutela di cavità storiche*. XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica AGI, Roma 20-22 giugno 2017, vol. 2, p. 753-761, ISBN: 978-88-97517-09-2.

Danzi M., Scotto Di Santolo A., Pepe F. (2017b), *Studio delle condizioni di stabilità di cavità storiche finalizzato alla conservazione e fruizione del sito attraverso l'uso integrato di indagini e modellazione numerica 3D Integrated use of surveys and 3D numerical modelling for the preservation and safety fruition of historical cavities*. In: (a cura di) Aldo Aveta, Bianca Gioia Marino, Raffaele Amore, *La Baia di Napoli. Strategie integrate per la conservazione e la fruizione del paesaggio culturale*. vol. 1, p. 50-54, Napoli. Artstudio Paparo s.r.l., ISBN: 978 88 99130 688.

Evangelista A., Lapegna U., Pellegrino A. (1980), Problemi geotecnici della Città di Napoliper la presenza di cavità nella formazione del tufo, Atti XIV Convegno di Geotecnica, Firenze.

Melisurgo G. (1889), *Napoli Sotterranea. Topografia della rete di canali di acqua profonda.*, Ristampa a cura delle Edizioni Scientifiche Italiane, 1997, pp. 123.

Miccio B., Potenza U. (1994), *Gli acquedotti di Napoli*, Azienda Municipalizzata Acquedotti di Napoli, Tipografia Gaeta, Napoli, pp.187.

Provincia di Napoli (2002), *"Progetto Cavità", censimento delle cavità sotterranee dei Comuni della Provincia di Napoli*, Città Matropolitana di Napoli, Dicembre 2002, CD ROM.

Varriale R. (2007), *Nota preliminare sulla distribuzione delle Cavità Artificiali e relative tipologie rilevate nell'ambito della Regione Campania*, Atti I Convegno Regionale di Speleologia "Campania Speleologica", 1-3 giugno 2007, Oliveto Citra (SA), pp. 117-125.

Relazioni tra caratteristiche petrografiche e parametri geotecnici nelle rocce tenere carbonatiche in Puglia

Petrographic features influencing basic geotechnical parameters of carbonate soft rocks from Apulia (southern Italy)

Vincenzo Festa
Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro"
Email: vincenzo.festa@uniba.it

Antonio Fiore
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale – Sede Puglia
E-mail: Antonello.fiore@adb.puglia.it

Maria Nilla Miccoli
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale – Sede Puglia
E-mail: maria.miccoli@adb.puglia.it

Luigi Spalluto
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale – Sede Puglia
E-mail: luigi.spalluto@adb.puglia.it

Parole chiave (*key words*): rocce tenere carbonatiche (*carbonate soft rocks*), petrografia (*petrography*), parametri geotecnici (*geotechinical parameters*), analisi statistica (*statistical analysis*), Puglia (*Apulia*)

RIASSUNTO

In questo lavoro sono illustrati i risultati di un approccio multidisciplinare, petrografico e geotecnico, finalizzato alla comprensione dei principali fattori che regolano le peculiari proprietà petrofisiche e meccaniche delle rocce tenere carbonatiche del Neogene-Quaternario affioranti in Puglia. Tali rocce possono essere attribuite alle seguenti formazioni: Pietra leccese (Burdigaliano superiore – Messiniano inferiore), Calcarenite di Gravina (Pliocene medio – Pleistocene inferiore) e Supersintema salentino (Pleistocene medio-superiore). 69 campioni di roccia prelevati da queste formazioni sono stati selezionati in diverse località della Puglia e caratterizzati a seconda delle loro proprietà petrografiche, fisiche e meccaniche. I dati petrografici hanno consentito di raggruppare i campioni nelle seguenti classi: i) *wackestone*; ii) *mud-dominated packstone*; iii) *grain-dominated packstone*; iv) *grainstone*; v) *floatstone*; vi) *rudstone*. I valori di resistenza a compressione uniassiale (UCS) hanno inoltre permesso di classificare la maggior parte dei campioni nei settori a resistenza molto bassa e bassa tipici di rocce deboli e a elevata deformabilità. Un'attenzione particolare è stata riservata alle relazioni tra caratteristiche petrografiche e parametri fisici e meccanici delle rocce tenere per mezzo di test statistici basati sull'analisi univariata della varianza (Anova) e sull'analisi delle componenti principali (PCA). L'analisi statistica ha dimostrato che i valori geotecnici sono strettamente dipendenti dalle formazioni geologiche. In particolare, i campioni di Pietra leccese presentano valori medi di UCS, modulo di Young (Et) e peso di volume secco significativamente più elevati dei campioni della Calcarenite di Gravina. Di contro, questi ultimi hanno valori medi di porosità, coefficiente di imbibizione e coefficiente di permeabilità più elevati di quelli della Pietra leccese. Inoltre, l'analisi statistica è stata applicata per verificare se i valori geotecnici differiscono a seconda delle classi petrografiche della Calcarenite di Gravina e per verificare la covarianza tra i parametri geotecnici di quest'ultima. Sono emersi i seguenti risultati: i) i campioni appartenenti alle classi *floatstone* e *rudstone* hanno valori medi di UCS e di peso di volume secco significativamente più alti delle altre classi; di contro, hanno valori medi più bassi di porosità totale; ii) i campioni classificati come *mud-dominated packstone* hanno valori significativamente più bassi di UCS, peso di volume secco, Et e coefficiente di permeabilità e valori medi più alti di porosità e coefficiente di imbibizione delle altre classi; iii) i campioni clasto-sostenuti e privi di matrice delle classi *grainstone* e *rudstone* hanno valori significativamente più elevati di coefficiente di permeabilità delle classi fango-sostenute; iv) la presenza di litoclasti calcarei e di differenti coppie di cementi nei pori delle rocce sono due dei principali fattori di controllo che regolano la resistenza della roccia e possono anche spiegare la variabilità intraformazionale dei dati geotecnici. La porosità totale non ha una chiara correlazione con la permeabilità. Pertanto, il contributo dei pori isolati alla porosità totale è rilevante nelle rocce tenere pugliesi com'è anche dimostrato dai valori relativamente bassi di permeabilità comparati ai valori relativamente elevati di porosità totale. Una caratterizzazione multidisciplinare delle rocce tenere basata sull'analisi petrografica e sulla determinazione geotecnica delle proprietà fisiche e meccaniche è fortemente raccomandata, poiché questo approccio può fornire utili informazioni per capire il peculiare comportamento delle rocce tenere carbonatiche e per guidare i successivi approfondimenti geotecnici.

PREMESSA

Alcune recenti pubblicazioni hanno evidenziato come le caratteristiche petrofisiche e geotecniche delle rocce tenere pugliesi del Neogene-Quaternario sarebbero relazionabili in vario modo alle loro peculiari caratteristiche petrografiche (Andriani e Walsh, 1998; 2002).

Al fine di approfondire questa ipotesi, l'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di investigare sia qualitativamente che quantitativamente le relazioni intercorrenti tra caratteristiche petrografiche e geotecniche delle rocce carbonatiche tenere pugliesi, come hanno evidenziato altri studi condotti negli ultimi vent'anni su rocce simili (e.g., Hoffman e Niesel, 1996; Moretti e Acquafredda, 1998; Andriani e Walsh, 1998; 2002; 2010; Cherubini *et al.*, 2007; Sabatakakis *et al.*, 2008; Ciantia e Castellanza, 2016 ; Zimbardo, 2016; Lollino e Andriani, 2017). I risultati ottenuti possono altresì costituire un ricco database petrografico/geotecnico per studi futuri in tutte quelle discipline in cui tali rocce possono svolgere un ruolo significativo. A tal proposito, si fa presente come queste rocce siano state usate diffusamente come materiale per le costruzioni e come pietre ornamentali mostrando sovente comportamenti indesiderabili quali la disgregazione, l'alterazione, ecc. (Andriani e Walsh, 2002; 2007; 2010; Eramo *et al.*, 2008; Calia *et al.*, 2014; 2015; Germinario *et al.*, 2015; Ciantia e Castellanza, 2016). In aggiunta, tali rocce, essendo facilmente lavorabili e modellabili, sono state storicamente scavate per la realizzazione di numerosi ipogei quali cave, frantoi e insediamenti civili in tutto il territorio pugliese, alcuni dei quali di considerevole importanza storica e archeologica (e.g., Dell'Aquila e Carofiglio, 1985; Dell'Aquila *et al.*, 2013). Altri temi in cui tali rocce rivestono un'elevata importanza sono l'analisi di stabilità dei versanti (e.g., Sansò *et al.*, 2016) e i fenomeni di sprofondamento (e.g., Festa *et al.*, 2012; 2015; Fiore e Parise, 2012; Luisi *et al.*, 2015). Questi ultimi rappresentano una delle principali pericolosità idrogeologiche in tutta la regione (Di Santo *et al.*, 2016); infatti, ad oggi, sono state rilevate oltre mille cavi-

tà artificiali in Puglia (http://www.catasto.fspuglia.it/df/dati.php), spesso localizzate al di sotto di aree densamente popolate. In conseguenza di ciò, negli ultimi anni, un numero crescente di eventi di sprofondamento legati al collasso di queste cavità antropiche è avvenuto in tutto il territorio regionale (e.g., Delle Rose *et al.*, 2004; Barnaba *et al.*, 2010; Fiore e Parise, 2012; Spilotro *et al.*, 2014; Parise, 2015a; 2015b; Pellicani *et al.*, 2017). L'elevata densità di cavità al di sotto di aree popolate rende necessario, per proteggere vite umane e importanti infrastrutture, per pianificare e gestire un corretto uso del suolo, la comprensione dei fenomeni di collasso e dell'evoluzione delle cavità in termini di comportamento tensio-deformativo delle rocce che le ospitano (e.g., Luisi *et al.*, 2015; Lollino e Andriani, 2017).

Poiché la variabilità delle rocce carbonatiche neogenico-quaternarie nel territorio pugliese può avere un'influenza cruciale sull'evoluzione degli sprofondamenti e, più in generale, sul comportamento delle cavità nel tempo, un primo step fondamentale per una migliore conoscenza di questi fenomeni è approfondire lo studio del complesso comportamento meccanico di tali rocce in relazione alle peculiari caratteristiche petrografiche.

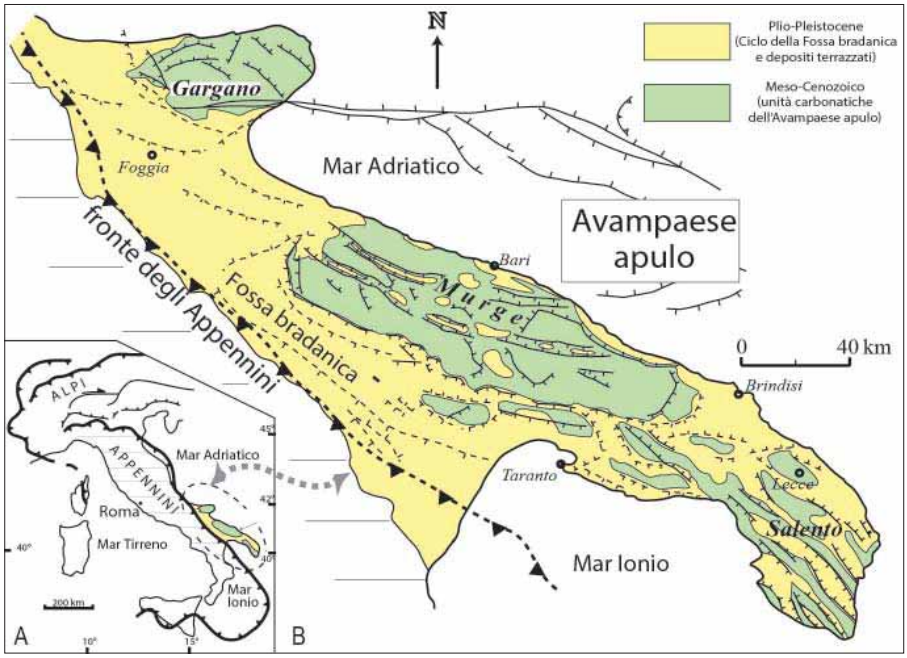


Figura 1 – A) Ubicazione dell'Avampaese apulo in una sintetica mappa strutturale dell'Italia; B) carta geologica semplificata della Regione Puglia (modificata da Pieri et al.*, 1997)*

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La Puglia è una regione autoctona, parte dell'esteso e poco deformato avampaese emerso dell'Appennino meridionale (Avampaese apulo *sensu* Selli, 1962; D'Argenio *et al.*, 1973; Ricchetti *et al.*, 1988) (*Figg.* 1). La successione sedimentaria affiorante è fatta da circa 6 km di calcari mesozoici di piattaforma parzialmente coperti da depositi neogenici e quaternari (Bonardi *et al.*, 1988; Ciaranfi *et al.*, 1988). L'Avampaese apulo corrisponde a un'antiforme estesa ONO-ESE segmentata, da ampie zone di deformazione fragile, in tre blocchi posti ad altezze differenti (Gargano, Murge e Salento) (Ricchetti *et al.*, 1988; Doglioni *et al.*, 1994; Gambini e Tozzi, 1996). Estesi depositi del Neogene e del Quaternario affiorano ai margini dei tre blocchi sollevati colmando le depressioni tettoniche (e.g., Iannone and Pieri, 1983; Ciaranfi *et al.*, 1988; Pieri *et al.*, 1997; Tropeano *et al.*, 1997; Ricchetti, 2017). Dalla base al tetto, esse appartengono a differenti unità sedimentarie (*Fig.* 2): i) unità carbonatiche Oligo-Mioceniche di piattaforma aperta affioranti ai margini del Gargano e del Salento; ii) unità carbonatiche del Pliocene medio-Pleistocene inferiore di mare basso (base del ciclo della Fossa bradanica) affiorante ai margini del Gargano, delle Murge e del Salento (Pieri *et al.*, 1996; Tropeano *et al.*, 2002); iii) unità carbonatiche e miste terrazzate del Pleistocene medio-superiore affioranti ai margini delle Murge e del Salento (depositi marini terrazzati regressivi formatisi durante il sollevamento regionale del Quaternario).

L'unità dell'Oligo-Miocene è costituita da biocalcareniti e biocalciruditi delle seguenti formazioni: Calcareniti di Porto Badisco (Oligocene superiore), Formazione di Lecce (Oligocene superiore-Miocene inferiore), Pietra leccese (Burdigaliano superiore-Messiniano inferiore) e Calcareniti di Andrano (Miocene superiore) (e.g., Bosellini *et al.*, 1999; Bossio *et al.*, 2006). L'unità del Pliocene medio-Pleistocene inferiore è costituita dalla sola formazione della Calcarenite di Gravina. L'unità del Pleistocene medio-superiore è costituita da depositi regressivi che hanno caratteristiche litologiche simili a quelli della Calcareni-

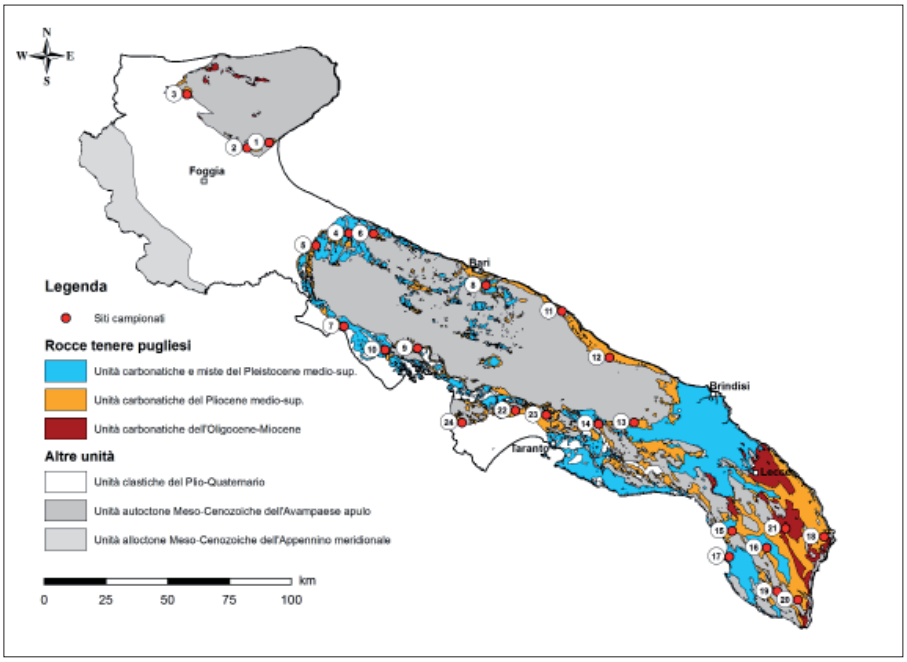


Figura 2 – Carta geologica delle rocce tenere pugliesi (modificata da Lepore et al.*, 2014). Ubicazione dei campioni: 1) APR1, APR 2, APR 3 APR 4 (cava di Apricena); 2) SGR (cava di San Giovanni Rotondo); 3) MFR1 e MFR 2 (cava di Manfredonia): 4) BRL1 e BRL2 (cava ipogea di San Procopio , Barletta); 5) TRN1 e TRN2 (cava di Trani); 6) S01C1Ca, S01C2Ca, S01C3Ca, S01C3Ca, S01C4Ca, S02C1Ca, S01C2Ca (carote prelevate da un sondaggio nei pressi di Canosa di Puglia), CAN1 e CAN2 (cava ipogea di Canosa di Puglia); 7) S02bC1, S04C1 (carote prelevate da un sondaggio a Bari), SCB, SCT (versante presso la chiesa rupestre di Santa Candida, Bari), VG1 e VG2 (frantoio ipogeo di Villa Giustiniani, Bari); 8) BAR (cava nei pressi di Bari); 9) MON1 e MON2 (cava nei pressi di Monopoli); 10) SPN (cava nei pressi di Spinazzola); 11) FAS (cava nei pressi di Fasano); 12) GRA 1, GRA 2, GRA 3 e GRA 4 (cava di Gravina in Puglia); 13) ALT 1 e ALT 2 (cava ipogea di Altamura); 14) MOT1 e MOT2 (cava di Mottola); 15) GIN (cava di Ginosa); 16) MAS (cava di Massafra); 17) GRO (cava di Grottaglie); 18) FRA (cava di Francavilla Fontana); 19) NAR1 e NAR2 (cava di Nardò); 20) S01C1Me, S01C2Me, S02C1Me, S01C2Me, S02C3Me, S02C4Me (carote prelevate da un sondaggio a Melpignano), MEL_C1 e MEL_C2 (frantoio ipogeo di Melpignano); 21) UGG1, UGG2 e UGG3 (cava di Uggiano la Chiesa); 22) S01C1Cu, S01C2Cu, S01C3Cu, S02C1Cu, S02C2Cu, S02C3Cu (carote prelevate da un sondaggio a Cutrofiano), CUT1 e CUT2 (cava di Cutrofiano; 23) GAL1, GAL2 e GAL3 (cava di Gallipoli); 24) TAU (cava di Taurisano); 25) ALE (cava di Alessano)*

te di Gravina. Essi consistono in sabbie miste e calcareniti riferibili alla formazione dei Depositi Marini Terrazzati (Ciaranfi *et al.*, 1988). Più di recente, tale formazione affiorante nel Salento è stata inserita nel Supersintema salentino (Ricchetti, 2017).

METODOLOGIA

I campioni di roccia studiati sono stati ottenuti da campioni prelevati *in situ* da cave, cavità ipogee e affioramenti naturali (ASTM D420-98). Altri campioni sono stati prelevati da carote indisturbate (ASTM D2113-14) perforate nei comuni di Canosa di Puglia, Melpignano e Cutrofiano (*Fig.* 2), tre paesi frequentemente interessati da fenomeni di collasso di cavità antropiche ipogee.

Per ogni sito è stato ricostruito un log stratigrafico di sintesi con l'ausilio di una lente d'ingrandimento 10X e un totale di 69 campioni orientati sono stati prelevati dai litotipi più rappresentativi in tutta la regione. A causa dell'alta variabilità dei litotipi che costituiscono la Calcarenite di Gravina, da questa unità sono stati prelevati 58 campioni, mentre 8 campioni sono dalla Pietra leccese e 3 dal Supersintema salentino (*Fig.* 2). Ogni campione è stato lavorato in laboratorio al fine di ottenere delle sezioni sottili per lo studio petrografico e dei provini cilindrici standard per i test sulle proprietà meccaniche.

Le sezioni sottili sono state realizzate perpendicolarmente alle superfici di strato e sono state osservate al microscopio ottico polarizzatore. Le osservazioni petrografiche hanno permesso di descrivere in maniera sia qualitativa che semi-quantitativa, gli allochimici, la matrice e i cementi. I campioni sono stati raggruppati in classi petrografiche seguendo la classificazione modificata di Dunham (1962) delle rocce carbonatiche.

I test di laboratorio sono stati focalizzati sulle proprietà fisiche e meccaniche dei campioni. A causa della bassa resistenza di queste rocce, la preparazione dei provini per i test fisici e meccanici è stata difficoltosa. Il problema principale è dovuto alla presenza di discontinuità nella roccia (superfici di strato, fratture o microrotture formatesi durante le attività di estrazione dei provini). Provini cilindrici di 54 mm di diametro e 100 mm di altezza sono stati estratti per mezzo di un campionatore dalle carote e dai conci, con l'asse del cilindro perpendicolare alle superfici di strato. Tutti i test effettuati sono stati certificati da un laboratorio geotecnico qualificato e realizzati seguendo la procedura standard per la caratterizzazione del materiale roccioso. Questo ha permesso di conformare i test agli standard tecnici specifici richiesti al fine di fornire dati fisici e meccanici statisticamente rappresentativi. I test sono stati realizzati per ottenere i seguenti parametri fisici e meccanici: i) peso di volume secco (kN/m^3), ossia la massa dell'unità di volume del campione di roccia secco (ASTM D7263-09); ii) densità relativa (adimensionale) che descrive il rapporto di densità della fase granulare rispetto alla densità dell'acqua (ASTM D854-14); iii) coefficiente d'imbibizione (%) che rappresenta la capacità della roccia di assorbire l'acqua attraverso il volume dei pori accessibili dall'esterno (porosità aperta) (ASTM D2216-10); iv) il coefficiente di permeabilità (m/s) ottenuto con un test a carico costante, cioè il tasso di flusso dell'acqua attraverso una sezione sotto un gradiente idraulico unitario (ASTM D2434-06 e ASTM D5084-03); v) resistenza a compressione uniassiale (UCS) (MPa) e il modulo di elasticità tangente (Et) (ASTM D 2938-95, ASTM D 3148-02). Il valore di porosità totale è stato, invece, calcolato indirettamente dai dati di laboratorio applicando la nota formula (Brady e Weil, 1996):

$$n = \left(1 - \frac{\gamma_d}{G\gamma_w}\right)$$

dove γ_d è il peso di volume secco, G è la densità relativa e γ_w è il peso di volume dell'acqua.

Al fine di avere una rappresentazione statistica dei dati fisici e meccanici, il software XLSTAT per Microsoft® Excel è stato utilizzato. L'analisi statistica ha riguardato l'analisi univariata della varianza (Anova), in maniera da testare la significatività nella differenza delle medie dei parametri geotecnici, e l'analisi delle componenti principali (PCA) per testarne la covarianza.

PETROGRAFIA

I campioni prelevati dalla Pietra leccese possono essere classificati dal punto di vista petrografico come: i) *wackestone* bioclastici (*Fig.* 3A; B) e ii) *mud-dominated packstone* (*Fig.* 3C; D). I bioclasti sono gli unici allochimici e rappresentano il 20-25% degli elementi tessiturali nel *wackestone* e il 40-50% nel *mud-dominated packstone*. In entrambi i litotipi, i bioclasti sono costituiti da frammenti di gusci di organismi marini, quali foraminiferi planctonici, echinodermi, bivalvi e, in minor quantità, da foraminiferi bentonici, briozoi e gasteropodi. Sedimenti glauconitici e fosfatici possono parzialmente riempire i pori (soprattutto intraparticellari) conferendo un tipico colore verdastro o bruno alla roccia. Il fango carbonatico è abbondante e forma una massa criptocristallina, che può essere localmente rimpiazzata da microsparite a seguito di processi di ricristallizzazione (neomorfismo aggradante). La porosità totale è fornita dai pori intragranulari (camere interne dei foraminiferi) e, subordinatamente, da una dissoluzione non selettiva, riguardante sia la matrice che i granuli, che produce vuoti irregolari dispersi nella roccia (*vugs*). La presenza di pori tra i cristalli di calcite è dovuta agli effetti della cementazione irregolare di tutti i vuoti, sia primari che secondari, e dalla ricristallizzazione (processi neomorfici). Gran parte della porosità non è efficace poiché i pori formano interstizi non comunicanti. La calcite spatica forma un bordo isopaco attorno ai granuli e riempie i pori in maniera irregolare; consiste di piccoli cristalli di calcite granulare formanti talvolta dei cementi a menisco nei pressi dei contatti tra i granuli.

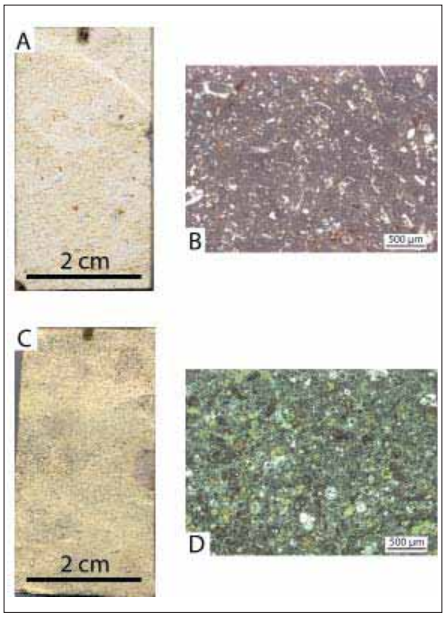


Figura 3 – Classi petrografiche della Pietra leccese. A) fetta di roccia lucidata di wackestone *(campione S01C1Me); B) sezione sottile (luce polarizzata) di* wackestone *costituito da bioclasti (soprattutto foraminiferi planctonici e bivalvi) in matrice fangosa (campione S01C1Me); C) fetta di roccia lucidata di* packstone *dominato dalla matrice fangosa (campione S01C2Me); D) sezione sottile (luce polarizzata) di* mud-dominated packstone *(campione S01C2Me) costituito da abbondanti foraminiferi planctonici. Il sedimento glauconitico riempie parzialmente i pori della roccia*

Le rocce carbonatiche appartenenti alla Calcarenite di Gravina sono rappresentate dalle sei classi petrografiche seguenti: i) *wackestone* bioclastici bioturbati (*Fig.* 4A; B); ii) *mud-dominated packstone* bioclastici bioturbati (*Fig.* 4C; D); iii) *packstone* bioclastici (*Fig.* 4E; F); iv) *grainstone* bioclastici e bio-litoclastici (*Fig.* 4G; H); v) *floatstone* bioclastici (*Fig.* 4I; J); vi) *rudstone* bioclastici e bio-litoclastici (*Fig.* 4K; L).

Le classi petrografiche del *wackestone* e del *mud-dominated packstone* presentano molte analogie con le classi omologhe descritte per la Pietra leccese. Sedimenti fosfatici e glauconitici non sono stati riconosciuti nella Calcarenite di Gravina e rari litoclasti calcarei sono stati rinvenuti dispersi nella matrice. I bioclasti sono gli unici allochimici e formano il 20-25% dei componenti tessiturali nei *wackestone* e il 40-50% nei *mud-dominated packstone*. Consistono di foraminiferi planctonici, bentonici, bivalvi, echinodermi, briozoi, serpulidi e alghe rosse. Analogamente ai campioni della Pietra leccese, la matrice è

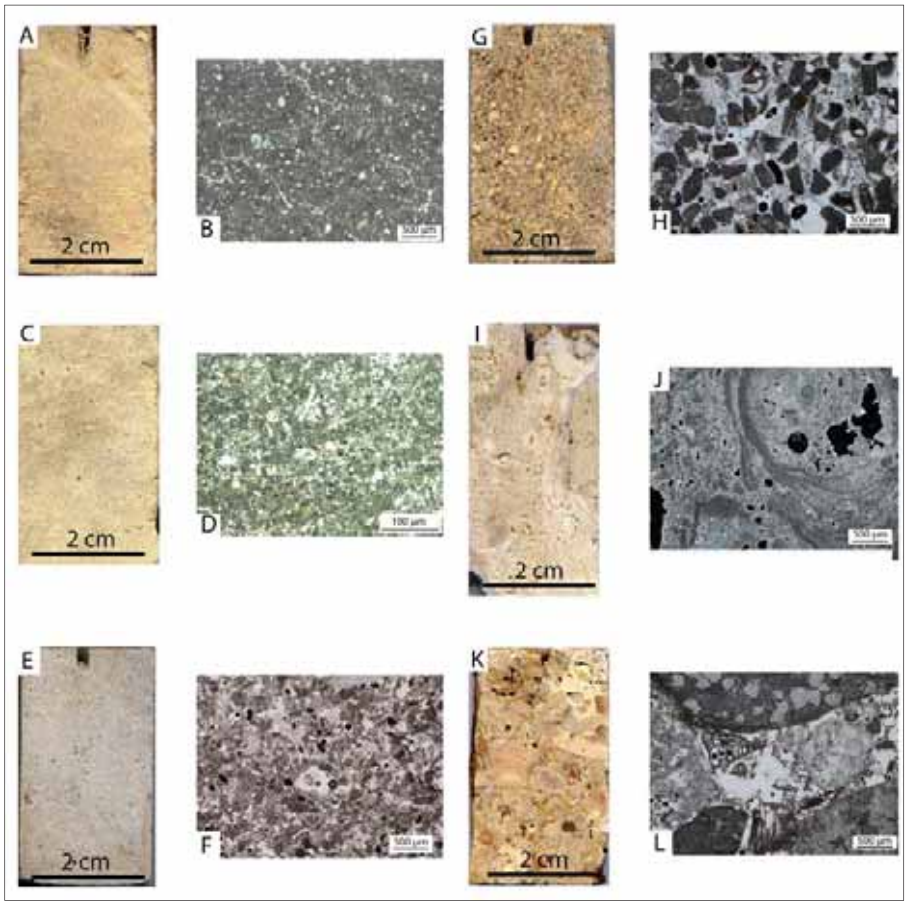


Figura 4 – Classi petrografiche della Calcarenite di Gravina. A) fetta di roccia lucidata di wackestone *bioclastico (campione S02C2Ca); B) sezione sottile (luce polarizzata) di* wackestone *bioclastico costituito da foraminiferi bentonici, planctonici e da bivalvi; C) fetta di roccia lucidata di* mud-dominated packstone *(campione S01C2Ca); D) sezione sottile (luce polarizzata) di* mud-dominated packstone *(campione S01C2Ca) costituito da abbondanti bioclasti in matrice fangosa; E) fetta di roccia lucidata di* packstone *(campione SCB); F) sezione sottile (luce polarizzata) di* packstone *(campione SCB) costituita da frammenti di alghe rosse, echinodermi, foraminiferi bentonici e serpulidi. Si noti come il cemento spatico è più abbondante della matrice rispetto al* mud-dominated packstone*; G) fetta di roccia lucidata di* grainstone *(campione ALE); H) sezione sottile (luce polarizzata) di* grainstone *(campione ALE) costituita da alghe rosse e altri bioclasti. I) fetta di roccia lucidata di* floatstone *(campione SGR); J) sezione sottile (luce polarizzata) di* floatstone *(campione SGR) costituita da frammenti di bivalvi in una matrice bioclastica sabbiosa; K) fetta di roccia lucidata di* rudstone *(campione MOT1); L) sezione sottile (luce polarizzata) di* rudstone *(campione MOT1) costituita da litoclasti e bioclasti in una matrice bioclastica*

abbondante e forma una massa molto densa parzialmente ricristallizzata in microsparite. La porosità primaria è fornita soprattutto dai pori intragranulari (camere interne dei gusci), dalla dissoluzione selettiva dei gusci aragonitici e dalla dissoluzione non-selettiva (vuoti irregolari). Di conseguenza, la maggior parte della porosità non è efficace poiché i pori formano interstizi non comunicanti. La calcite spatica riempie irregolarmente e consiste di cristalli subedrali o anedrali di calcite granulare, talvolta la calcite granulare forma cementi a menisco al contatto tra i granuli. *Packstone* e *grainstone* bioclastici e biolitoclastici sono le classi petrografiche più rappresentative della Calcarenite di Gravina. I bioclasti e i litoclasti sono sempre più del 50% dei componenti tessiturali in entrambe le classi petrografiche. In genere sono subangolari e poco selezionate nei *packstone*; invece, sono subarrotondati e da poco a molto selezionati nei *grainstone*. I litoclasti sono costituiti da frammenti di calcari Meso-Cenozoici, mentre i bioclasti sono costituiti da alghe rosse, foraminiferi bentonici, briozoi, echinodermi, serpulidi e rari foraminiferi planctonici. La matrice fangosa è presente solo nei *packstone* ma è sempre inferiore al 30% dei componenti tessiturali. In entrambe le classi, la porosità totale è costituta da pori intergranulari e intragranulari parzialmente o completamente riempiti da sparite. I pori legati alla dissoluzione selettiva dei granuli (*moulds*) e a quella non selettiva, riguardanti tutti i componenti della roccia (*vugs*), sono subordinati. La sparite consiste soprattutto di cristalli isopachi di calcite granulare e di cementi del tipo *drusy* e *blocky* all'interno degli spazi intergranulari e intragranulari. Cementi granulari a menisco, al contatto dei granuli, frange isopache di cristalli a palizzata con terminazioni a punta di piramide sono anche caratteristiche comuni. *Floatstone* e *rudstone* bioclastici e bio-litoclastici sono le classi pe-

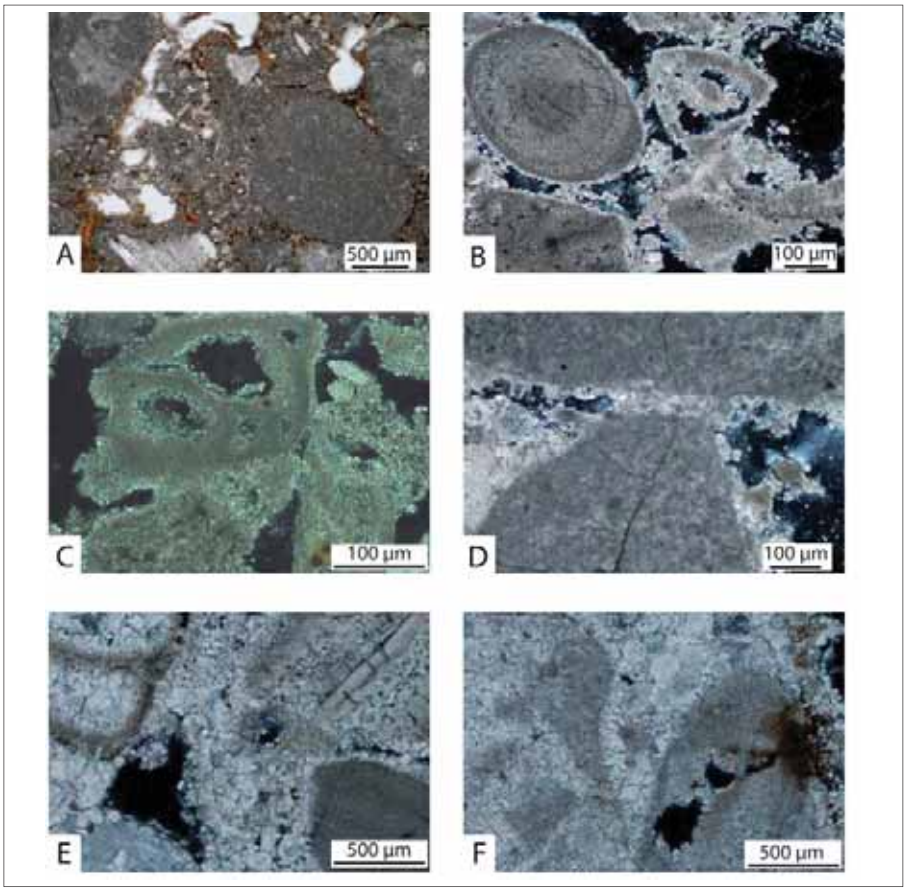


Figura 5: A) sezione sottile (luce polarizzata) costituita da abbondanti litoclasti calcarei in matrice micritica (campione MON1); B) sezione sottile (polarizzatori incrociati) di cemento isopaco circumgranulare. Piccoli cristalli equidimensionali di calcite granulare riempiono irregolarmente i pori (campione BRL2); C) sezione sottile (polarizzatori incrociati) costituita da piccoli cristalli di calcite granulare e da una coppia di cristalli di cementi a palizzata con terminazioni piramidali (campione S01C1Ca); D) sezione sottile (polarizzatori incrociati) presentano cementi granulari a menisco precipitati al contatto tra i granuli (campione APR1); E) sezione sottile (polarizzatori incrociati) costituita da cristalli grossolani di calcite blocky *senza una orientazione preferenziale (campione ALE). Si noti come i cristalli riempiono quasi completamente i pori isolando delle piccole cavità intercristalline; F) sezione sottile (polarizzatori incrociati) di cemento a mosaico di drusa che riempie quasi completamente i pori (campione FRA). Si noti come i cristalli crescono in dimensione verso il centro dei pori*

trografiche più grossolane della Calcarenite di Gravina. Nei *floatstone*, la frazione bioclastica consiste di frammenti di bivalvi, alghe rosse e altri bioclasti immersi in una matrice sabbiosa o fangosa. Litoclasti calcarei del substrato calcareo Meso-Cenozoico sono dispersi nella matrice (*Fig.* 5A). I granuli aventi dimensioni >2 mm sono almeno il 20/30% dei componenti tessiturali. La matrice raggruppa tutti i granuli <2 mm e, pertanto, può essere sia sabbiosa che fangosa. La classe petrografica *rudstone* è costituita da una tessitura grano-sostenuta con bioclasti e litoclasti in una matrice sabbiosa. La frazione bioclastica è fatta da frammenti disarticolati di bivalvi, alghe rosse, echinodermi; la frazione litoclastica è costituita da clasti calcarei sub-angolari o sub-arrotondati. I granuli sono sempre più del 50% dei componenti tessiturali. La frazione fangosa è completamente assente nella matrice sabbiosa. In entrambe le classi, la porosità totale è dovuta alla presenza di pori intraparticellari e interparticellari; sono anche presenti dei pori legati alla dissoluzione non selettiva (*vugs*) di granuli e matrice. La calcite spatica è costituita dalle seguenti tipologie: bordi isopachi di cementi circumgranulari (*Fig.* 5B); cementi granulari che riempiono gli spazi intergranulari (*Fig.* 5B; C); cristalli allungati di calcite a palizzata (*Fig.* 5D); cristalli *blocky* senza nessuna orientazione preferenziale (*Fig.* 5E); cristalli del tipo *drusy* che crescono in dimensione verso il centro della cavità (*Fig.* 5F).

Le rocce carbonatiche dei depositi appartenenti al Supersintema Salentino sono stati riferiti a una sola classe petrografica: *grainstone* bioclastici e litoclastici (*Fig.* 6A; B). I granuli sono sempre >50% degli elementi tessiturali. La frazione bioclastica consiste di frammenti di bivalvi, echinodermi, alghe rosse, foraminiferi bentonici, serpulidi e briozoi. La frazione litoclastica è fatta da clasti calcarei subarrotondati del substrato Meso-Cenozoico. La porosità è quasi completamente costituita da pori intergranulari e intragranulari, solo parzialmente riempiti da calcite spatica. La calcite è costituita da mosaici di cementi del tipo *drusy/blocky* e subordinatamente da calcite granulare. Il cemento granulare a menisco al contatto tra i granuli è anche diffuso.

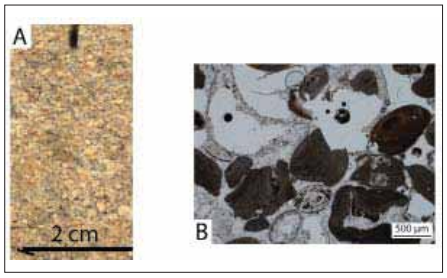


Figura 6 – Classe petrografica del Supersintema salentino. A) fetta di roccia lucidata di grainstone *(campione GAL2); B) sezione sottile (luce polarizzata) di* grainstone *(campione GAL2) costituita da alghe rosse, foraminiferi bentonici e altri bioclasti*

Riassumendo, le rocce carbonatiche appartenenti alle unità della Pietra leccese, della Calcarenite di Gravina e del Supersintema salentino consistono di calcareniti e calciruditi costituite da minerali carbonatici (>90%) come la calcite e la calcite basso magnesiaca. Queste rocce possono essere complessivamente classificate in sei classi petrografiche (*Tab.* 1): *rudstone*, *floatstone*, *grainstone*, *packstone*, *mud-dominated packstone, wackestone*. Tutte le classi petrografiche condividono le seguenti caratteristiche: i) i sedimenti sono prevalentemente bioclastici e depositati in ambienti marini superficiali; ii) frammenti litici sub-angolari o sub-arrotondati possono essere una caratteristica comune. Questi frammenti sono il prodotto della rielaborazione da parte del moto ondoso e delle correnti lungo una superficie di abrasione marina impostata sul substrato carbonatico Meso-Cenozoico precedentemente emerso e alterato in ambiente subaereo; iii) la matrice micritica è prevalentemente allomicrite e deriva dalla disintegrazione dei bioclasti, quali le alghe calcaree e gli organismi epibionti che vivono sulle praterie algali (*e.g.* tappeti di Posidonia) e dei gusci degli invertebrati. La bioerosione e la micritizzazione sono i processi più efficaci nella produzione di fango carbonatico; iv) il contributo alla porosità totale dei pori primari intergranulari e intragranulari è rilevante. Differentemente, il contributo della porosità secondaria è subordinata; quindi, la maggior parte dei pori sono il risultato dal peculiare *fabric* della roccia e possono essere classificati come pori isolati (*sensu* Lucia, 1995). Di conseguenza, la presenza di una porosità isolata accresce la porosità totale, ma non aumenta significativamente la permeabilità; v) le coppie di cementi *granular/meniscus* e *drusy/blocky* sono quelle dominanti (*Tab.* 1). Il grado di cementazione è generalmente basso e la precipitazione dei cementi nei pori avviene soprattutto in condizioni ambientali freatiche. Più in dettaglio, secondo le caratteristiche diagenetiche osservate e la peculiare storia geologica di tali rocce carbonatiche, la maggior parte della litificazione è avvenuta in condizioni quasi superficiali (ambiente Eogenetico *sensu* Choquette e Pray, 1970), durante il seppellimento del sedimento nella zona in cui i processi diagenetici risentono della migrazione dei fluidi dalla superficie.

PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE DELLE ROCCE TENERE PUGLIESI

Descrizione geotecnica e classificazione delle rocce tenere carbonatiche pugliesi

Nella meccanica delle rocce e in geotecnica il passaggio tra roccia e suolo è segnato dal valore assunto dal parametro della resistenza alla compressione uniassiale (da qui

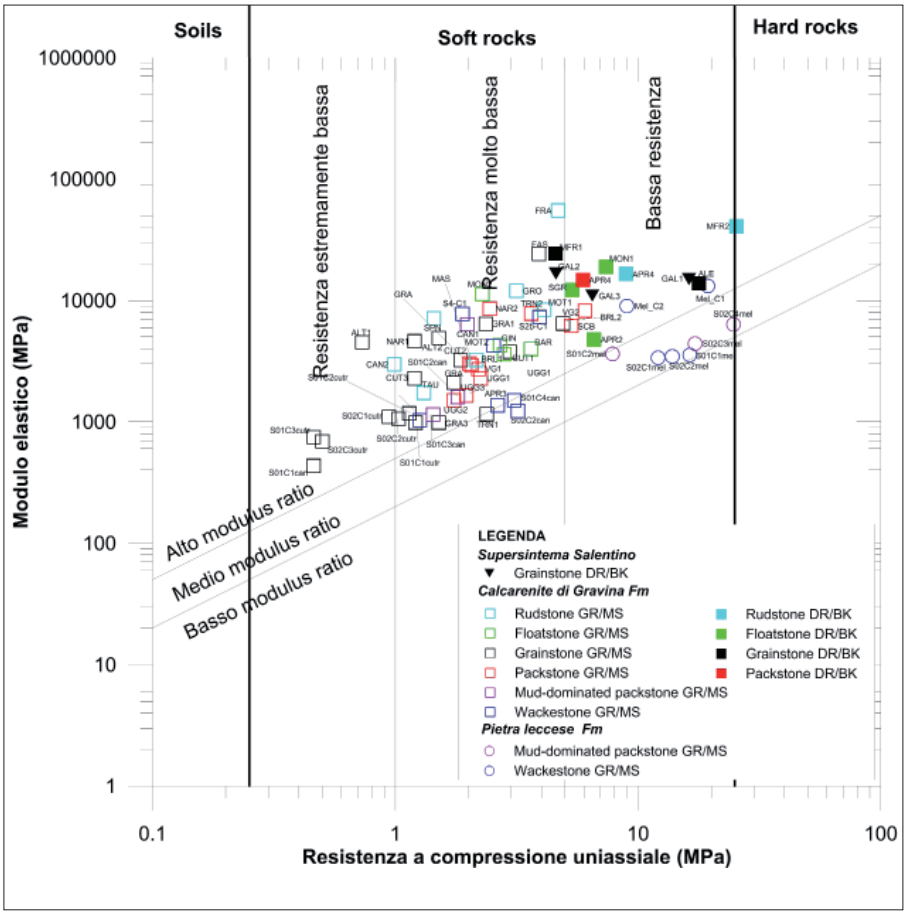


Figura 7 – Classificazione delle rocce tenere pugliesi basata su Deere and Miller, 1966 (modificata) e ISRM, 1978. Le coppie di cementi dominanti (GR/MS = granular/meniscus*; DR/BK =* drusy/blocky*) sono indicate per ogni classe petrografica*

Tabella 1 – Caratteristiche petrografiche delle rocce teneri pugliesi. Abbreviazioni delle unità geologiche: PL (Pietra leccese); GRA (Calcarenite di Gravina); SS (Salentino Supersynthem). Abbreviazioni della dimensione dei granuli: f. (fine), m. (media), c. (grososlana). Abbreviazioni del tipo di cemento: GR (granulare); DR (*drusy*); BK (*blocky*); MS (*meniscus*); BL (*bladed* o a palizzata). Abbreviazioni del tipo di porosità: VUG (pori da dissoluzione non selettiva); BP (pori interparticellari); WP (pori intraparticellari); MO (pori da dissoluzione dei gusci); FR (frattura)

Unità geologica	Numero del sito	Campioni	Allochimici e altri granuli		Matrice	Cemento	Porosità	Classe petrografica
		Codice	Tipologia	Dimensione dei granuli	Dimensione dei granuli	Tipologia	Tipologia	Dunham modificata
GRA	1	MFR1	bio-litoclasti	c. sabbia	//	DR, GR	VUG	grainstone
GRA	1	MFR2	bio-litoclasti	ghiaia/f. ghiaia	m./c. sabbia, fango	DR, GR	WP, VUG	rudstone
GRA	2	SGR	bioclasti	ghiaia/ghiaia	m. sabbia/ fango	DR, GR	VUG	floatstone
GRA	3	APR 1	bio-litoclasti	ghiaia/f. ghiaia	m./c. sabbia	BK,MS	BP, WP, VUG	rudstone
GRA	3	APR2	bioclasti	m. sabbia	fango	DR, GR	BP, WP, VUG	floatstone
GRA	3	APR 3	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	BP, WP, VUG	wackestone
GRA	3	APR 4	bioclasti	f. sabbia	fango	DR, GR	BP, WP	packstone
GRA	4	BRL 1	bioclasti	ghiaia/f. ghiaia	m./c. sabbia, fango	GR, MS	BP, WP, VUG	rudstone
GRA	4	BRL 2	bioclasti	m./c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP, VUG	grainstone,
GRA	5	CAN 1	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP	fango-dom. packstone
GRA	5	CAN 2	bioclasti	ghiaia/f. ghiaia	m. sabbia	GR,MS	BP, WP	rudstone,
GRA	6	TRN1	bioclasti	m./c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone,
GRA	6	TRN2	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR, MS	BP, WP, VUG	packstone
GRA	7	SPN	bioclasti	f./m. ghiaia	m./c. sabbia	GR, DR	BP, WP	rudstone
GRA	8	BAR	bioclasti	f./m. sabbia	fango	GR, DR	BP, WP, VUG	floatstone
GRA	8	VG1	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP, VUG	packstone,
GRA	8	VG2	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP	packstone,
GRA	8	S2b-C1	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP, VUG	wackestone,
GRA	8	SCT	bioclasti	f. sabbia	f. /m. sabbia, fango	GR, MS	BP, WP, VUG	floatstone
GRA	8	SCB	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP, VUG	packstone,
GRA	8	S4-C1	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP, VUG	wackestone,
GRA	9	ALT 1	bioclasti	c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP, VUG	grainstone,
GRA	9	ALT 2	bioclasti	c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP, VUG	grainstone
GRA	10	GRA 1	bioclasti	m./c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP, VUG	grainstone
GRA	10	GRA 2	bioclasti	f./m. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP, VUG	packstone
GRA	10	GRA 3	bioclasti	f./m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	10	GRA 4	bioclasti	f. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	11	MON 1	bio-litoclasti	f./m. ghiaia	f./m. sabbia, fango	DR, GR	WP, VUG	floatstone
GRA	11	MON 2	bioclasti	ghiaia/f. ghiaia	f./m. sabbia, fango	GR, DR	WP, VUG	floatstone
GRA	12	FAS	bio-litoclasti	m./c. sabbia	//	GR, DR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	13	FRA	bio-litoclasti	ghiaia/ghiaia	m./c. sabbia	GR, BK	BP, WP	rudstone
GRA	14	GRO	bio-litoclasti	ghiaia/f. ghiaia	m./c. sabbia	GR	BP, WP	rudstone
GRA	15	NAR 1	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP, VUG	grainstone,
GRA	15	NAR 2	bioclasti	m. sabbia	fango	GR, MS	BP, WP, VUG	packstone,
GRA	16	CUT 1	bioclasti	m./c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP, VUG	grainstone,
GRA	16	CUT 2	bioclasti	m./c. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	16	CUT 3	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
SS	17	GAL 1	bio-litoclasti	c. sabbia	//	DR, MS	BP, WP	grainstone
SS	17	GAL 2	bioclasti	c. sabbia	//	DR, MS	BP, WP	grainstone
SS	17	GAL 3	bioclasti	c. sabbia	//	DR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	18	UGG 1	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP, VUG	fango-dom. packstone
GRA	18	UGG 2	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP, VUG	fango dom. packstone
GRA	18	UGG 3	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP, VUG	fango dom. packstone
GRA	19	TAU	bioclasti	f./m. ghiaia	m. sabbia	GR	BP, WP, MO	rudstone
GRA	20	ALE	bioclasti	m. sabbia	//	BK, DR	BP, WP	grainstone
PL	21	Mel_C1	bioclasti	f./m. sabbia	fango	GR, DR	WP, VUG	wackestone
PL	21	Mel_C2	bioclasti	f./m. sabbia	fango	GR, DR	WP, VUG	wackestone
GRA	22	MOT 1	bio-litoclasti	f./m. ghiaia	f./m. sabbia, fango	GR, DR	WP, VUG	rudstone
GRA	22	MOT 2	bioclasti	m. sabbia	fango	GR, DR	WP, VUG	wackestone
GRA	23	MAS	bioclasti	m./c. sabbia	fango	GR, DR	BP, WP, VUG	packstone
GRA	24	GIN	bioclasti	ghiaia/f. ghiaia	m./c. sabbia, fango	GR	BP, WP, VUG	floatstone
GRA	5	S01 C1ca	bioclasti	m. sabbia	//	GR, BL	BP, WP, VUG	grainstone
GRA	5	S01 C2ca	bioclasti	f./m. sabbia	fango	GR	BP, WP	fango-dom. packstone
GRA	5	S01 C3ca	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP	fango-dom. packstone
GRA	5	S01 C4ca	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP, FR	wackestone
GRA	5	S02 C1ca	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP, FR	wackestone
GRA	5	S02 C2ca	bioclasti	f. sabbia	fango	GR	BP, WP	wackestone
GRA	16	S01 C1cu	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	16	S01 C2cu	bioclasti	f. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	16	S01 C3cu	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	16	S02 C1cu	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	16	S02 C2cu	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
GRA	16	S02 C3cu	bioclasti	m. sabbia	//	GR, MS	BP, WP	grainstone
PL	21	S01 C1me	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	WP, MO	wackestone
PL	20	S01 C2me	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	WP, MO	fango-dom. packstone
PL	21	S02 C1me	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	WP, MO	wackestone
PL	21	S02 C2me	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	WP, MO, VUG	wackestone
PL	21	S02 C3me	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	WP, MO, VUG	fango-dom. packstone
PL	21	S02 C4me	bioclasti	f. sabbia	fango	GR, DR	WP, MO, VUG	fango-dom. packstone

in poi UCS) e non in termini di litologia, *fabric* o stato di alterazione. Molte classificazioni basate sull'uso della UCS sono state pubblicate per le rocce tenere (e.g., Deere e Miller, 1966; Geological Society Engineering Group Working Party, 1970; Broch e Frankin, 1972; Bieniawsky, 1973; ISRM, 1978; Dobereiner e De Freitas, 1986). Molti di loro concordano nel fissare a 25 MPa la transizione tra rocce tenere e lapidee (ISRM, 1978; Hoek, 2001). Tuttavia, il limite inferiore che separa le rocce tenere dai suoli non è ben definito. Per esempio, Bieniawski (1973) identifica una soglia di 0.4 MPa, mentre ISRM (1978) identifica il limite inferiore delle rocce tenere a 0.25 MPa. Inoltre, secondo ISRM (1978) possono essere distinte nelle rocce tenere le seguenti tre classi basate sulla UCS: 1) "resistenza estremamente bassa" (UCS < 1 MPa); 2) "resistenza molto bassa" (1 < UCS < 5 MPa); 3) "resistenza bassa" (5 MPa < UCS < 25 MPa).

I 69 campioni analizzati per lo studio hanno valori molto variabili di UCS; di questi, 68 ricadono tra 0.25 e 25 MPa (*Fig.* 7); di conseguenza, a causa del loro comportamento meccanico e in accordo con l'ISRM (1978), le rocce appartenenti alla Pietra leccese, alla Calcarenite di Gravina e al Supersintema salentino, possono essere classificate complessivamente come rocce tenere (*Fig.* 7).

Sulla base dei valori di UCS e come dimostrato nel diagramma in *Fig.* 7, emerge come i campioni caratterizzati dai valori di resistenza maggiori siano quelli della Pietra leccese e del Supersintema salentino, insieme ad alcuni campioni della Calcarenite di Gravina. I valori di UCS delle classi petrografiche rappresentative della Pietra leccese, *wackestone* e *mud-supported packstone*, sono caratterizzate da un cemento di tipo granulare e ricadono nel campo di "bassa resistenza", fino a lambire il limite tra rocce tenere e lapidee. Nello stesso campo di UCS ricadono anche i campioni del Supersintema salentino, in cui la coppia di cementi *drusy/ blocky* domina (ad eccezione di un campione, i cui valori di UCS ricadono nel campo di "resistenza molto bassa", comunque vicino al limite con il campo di "bassa resistenza"). Queste tre classi petrografiche mostrano valori di UCS più bassi quando sono rappresentative della Calcarenite di Gravina. A dimostrazione di ciò, si fa notare come i valori di UCS delle classi *wackestone* e *mud-dominated packstone* della Calcarenite di Gravina, entrambi aventi cementi del tipo *granular/meniscus*, ricadono nel campo di "resistenza estremamente bassa". I campioni classificati come *grainstone*, caratterizzati da cementi del tipo *granular/meniscus*, presentano un ampio spettro di resistenza che varia da "resistenza estremamente bassa" a "resistenza molto bassa". I due campioni di *grainstone,* aventi cemento del tipo *drusy/ blocky,* hanno valori di UCS relativamente più alti ricadendo uno a ridosso del limite tra "resistenza molto bassa" e "resistenza bassa", l'altro nel campo di "resistenza bassa". La classe petrografica *grainstone* della Calcarenite di Gravina caratterizza unicamente il campo di "resistenza estremamente bassa" nel diagramma di *Fig.* 7. I valori di UCS delle classi *rudstone*, *floatstone* e *packstone,* caratterizzate da cementi *granular/meniscus,* ricadono nel campo di "resistenza molto bassa", eccetto per quei pochi campioni aventi cemento *drusy/ blocky* che ricadono nel campo di "resistenza bassa" (ad eccezione di un campione di *rudstone* che è l'unico ricadente nel campo delle rocce lapidee). Inoltre, i loro valori di UCS sono generalmente più bassi, o talvolta comparabili con quelli caratterizzanti i campioni della Pietra leccese e del Supersintema salentino (*Fig.* 7).

Osservando il diagramma di *Fig.* 7, il modulo elastico o modulo di Young (Et) ha un ampio range di valori da 435 a 54907 MPa. La grande variabilità è data dai campioni di Calcarenite di Gravina. In tal senso, si può affermare che la deformabilità dipende principalmente dal tipo di roccia e dalle condizioni di pressione sotto le quali si è formata (Xu *et al*., 2016). Inoltre, UCS e Et sono strettamente correlati positivamente l'un l'altro (*Fig.* 7). Poiché è il contatto tra i granuli a formare la tessitura che influenza la resistenza e l'elasticità nelle rocce (Plumb *et al*., 1992), si può dedurre che l'ampio *range* di valori di Et registrato sulle rocce tenere pugliesi è la conseguenza di variazioni di caratteristiche tessiturali.

Secondo Deere e Miller (1966), nel diagramma che plotta i valori di UCS con il modulo di Young possono essere distinte tre classi con rapporto di modulo basso, medio e alto, che corrispondono, rispettivamente, a comportamenti a alta, media e bassa deformabilità. Nel diagramma di *Fig.* 7, si può osservare come i campioni di *grainstone* del Supersintema salentino presentino alto rapporto di modulo. Anche i valori di resistenza dei campioni della Calcarenite di Gravina, appartenenti a tutte le classi petrografiche, ricadono nel campo avente rapporto di modulo elevato (con l'eccezione di 4 campioni appartenenti alle classi *wackestone* e *grainstone* aventi deformabilità media). Differentemente, i valori di resistenza delle classi petrografiche rappresentative della Pietra leccese, *packstone* dominato dalla matrice fangosa e *wackestone*, ricadono quasi tutti nel campo avente rapporto di modulo intermedio.

Sebbene i parametri di resistenza siano comunemente usati per caratterizzare le rocce tenere nella meccanica delle rocce, alcune caratteristiche fisiche di base necessitano di essere determinate per una più esaustiva caratterizzazione del comportamento geomeccanico di tali rocce. Com'è noto, le rocce tenere non hanno solo valori di bassa resistenza, ma anche un ampio *range* di porosità, permeabilità, alta deformabilità, disgregabilità e rapida alterazione (e.g. Kanji, 2014). Per tale motivo, seguendo la procedura standard, le proprietà fisiche aggiuntive, come la densità relativa, la porosità totale, il coefficiente di imbibizione e il coefficiente di permeabilità, sono state determinate sui 69 campioni. La *Tab.* 2 sintetizza i valori di queste proprietà fisiche.

Come era prevedibile, a causa dell'uniforme composizione mineralogica, la densità relativa di tutti i campioni ha valori attorno a 2.70 (e.g. Andriani e Walsh, 1998). I valori sperimentali del peso di volume secco variano tra 12.8 e 21.2 kN/m^3. Questo può essere spiegato considerando la composizione peculiare dei granuli e l'addensamento degli stessi. Granuli bioclastici poco addensati sono generalmente più leggeri dei granuli più addensati e/o litoclastici.

I valori di porosità totale delle rocce tenere pugliesi sono stati determinati indirettamente dai dati di laboratorio e variano tra 19.80 e 51.20%. Questo *range* molto ampio dipende dalla tessitura della roccia, ma, soprattutto, la porosità riflette il grado di cementazione. In particolare, le rocce tenere, aventi un fabric aperto e caratterizzate da una diffusa porosità primaria sia intergranulare che intragranulare irregolarmente riempita dai cementi granulari o a menisco, presentano valori di porosità più elevati delle rocce tenere aventi un *fabric* chiuso caratterizzato da pori quasi completamente riempiti da mosaici *drusy* o *blocky* di calcite.

Il *range* dei valori sperimentali del coefficiente d'imbibizione è tra 9.5 e 43.9%. Ciò dipende dalla porosità efficace. Più in dettaglio, i campioni che hanno i pori completamente riempiti dai cementi hanno valori bassi del coefficiente d'imbibizione (tipicamente < 15%); mentre, i campioni aventi un *fabric* aperto con pori non completamente riempiti presentano valori più alti (> 15%). Ne consegue che i campioni aventi i valori più alti del coefficiente d'imbibizione, come la gran parte dei *grainstone*, sono i meno resistenti all'acqua e i più soggetti ai processi di alterazione e di diminuzione della resistenza nel tempo (e.g. Bednarik *et al*., 2014).

Per quanto riguarda la permeabilità, i valori sperimentali delle prove a carico costante mostrano un range di valori tra 1.31*10^{-9} m/s e 2.07*10^{-5} m/s. Più in dettaglio, i valori più elevati (tra 10^{-6} e 10^{-5} m/s) sono stati registrati in alcuni campioni *grainstone* di Calcarenite di Gravina e del Supersintema Salento. Questi campioni mostrano pori irregolari riempiti da sparite e con numerosi pori interconnessi, che implicano una porosità efficace. Diversamente, i valori più bassi (tra 10^{-9} e 10^{-8} m/s) corrispondono ai campioni fango sostenuti di Pietra leccese e ai campio-

Tabella 2 – Parametri fisici e meccanici delle rocce tenere pugliesi

							Prova di permeabilità a carico costante	Prova di resistenza a compressione uniassiale	
Unità geologica	Numero del sito	Codice	Peso di volume secco (kN/m³)	Gravità specifica (adimensionale)	Porosità totale (%)	Coefficiente di imbibizione (%)	Coefficiente di permeabilità (m/s)	Resistenza a compressione uniassiale (MPa)	Modulo elastico tangente (MPa)
GRA	1	MFR1	19.1	2.71	28.01	15.5	3.05E-08	4.57	24298
GRA	1	MFR2	19.2	2.71	27.63	14.2	1.31E-09	25.42	40731
GRA	2	SGR	18.8	2.72	29.40	16.8	1.05E-05	5.35	12189
GRA	3	APR 1	19.7	2.69	25.19	9.5	1.03E-05	8.93	16607
GRA	3	APR2	17.1	2.69	35.07	24.4	6.58E-08	6.58	4753
GRA	3	APR 3	15.7	2.68	40.16	23.3	1.45E-06	2.64	1368
GRA	3	APR 4	17.8	2.68	32.16	18.8	8.98E-07	5.93	14720
GRA	4	BRL 1	15.5	2.69	41.14	27.2	1.42E-06	2.16	3239
GRA	4	BRL 2	16.9	2.7	36.06	21.4	1.49E-06	4.91	6463
GRA	5	CAN 1	12.8	2.67	51.03	43.9	1.07E-06	1.98	6355
GRA	5	CAN 2	15.5	2.68	40.92	28.6	8.90E-06	0.99	2972
GRA	6	TRN1	15.7	2.71	40.82	26.1	7.75E-06	2.38	1156
GRA	6	TRN2	16.1	2.69	38.86	26.6	3.43E-06	3.63	7783
GRA	7	SPN	15.5	2.69	41.14	28.8	7.95E-06	1.44	7130
GRA	8	BAR	15.5	2.68	40.92	22.1	2.10E-07	3.62	3983
GRA	8	VG1	15	2.7	43.25	30.1	8.77E-07	2.2	2720
GRA	8	VG2	16.2	2.69	38.49	25.7	-	6.05	8214
GRA	8	S2b-C1	17	2.71	35.92	29.4	6.12E-07	3.93	7296
GRA	8	SCT	17.2	2.7	34.93	24.6	8.85E-07	2.81	3607
GRA	8	SCB	16.5	2.7	37.58	31.6	-	5.31	6178
GRA	8	S4-C1	15.5	2.71	41.58	40.7	1.89E-05	1.89	7770
GRA	9	ALT 1	14.4	2.72	45.92	32.9	8.68E-07	0.73	4511
GRA	9	ALT 2	12.9	2.7	51.20	42	1.18E-06	1.51	4885
GRA	10	GRA 1	14.6	2.7	44.77	36.3	9.66E-06	2.36	6429
GRA	10	GRA 2	14.8	2.71	44.22	32.8	4.94E-06	2.02	3000
GRA	10	GRA 3	15	2.72	43.67	31	1.94E-05	1.51	984
GRA	10	GRA 4	15.2	2.7	42.50	23.1	5.08E-06	1.74	2093
GRA	11	MON 1	21.2	2.7	19.80	11.6	1.73E-06	7.38	18982
GRA	11	MON 2	15.7	2.7	40.60	22.7	6.01E-06	2.28	11294
GRA	12	FAS	19.8	2.7	25.09	21.1	1.16E-06	3.91	24222
GRA	13	FRA	17	2.71	35.92	19.1	2.05E-05	4.69	54907
GRA	14	GRO	17.1	2.7	35.31	20.7	8.82E-06	3.16	12035
GRA	15	NAR 1	13.8	2.71	47.99	28.6	4.45E-06	1.2	4619
GRA	15	NAR 2	13.9	2.7	47.41	26.3	1.04E-05	2.45	8560
GRA	16	CUT 1	14	2.73	47.62	32.7	1.40E-05	2.96	3769
GRA	16	CUT 2	14.9	2.74	44.45	32.2	2.01E-05	1.86	3211
GRA	16	CUT 3	13.9	2.73	47.99	35.5	2.07E-05	1.2	2282
SS	17	GAL 1	18.8	2.72	29.40	16.2	1.22E-06	16.19	15002
SS	17	GAL 2	16.9	2.72	36.53	21.6	1.99E-05	4.59	16718
SS	17	GAL 3	15.9	2.73	40.51	27.7	2.04E-05	6.48	10985
GRA	18	UGG 1	13.6	2.69	48.36	33.3	1.57E-07	2.25	2273
GRA	18	UGG 2	13.1	2.72	50.81	37.2	6.36E-07	1.74	1503
GRA	18	UGG 3	13.1	2.69	50.26	38.3	1.36E-07	1.96	1647
GRA	19	TAU	13.3	2.72	50.05	24.2	-	1.31	1726
GRA	20	ALE	20.5	2.72	23.02	13.9	3.84E-06	17.81	13824
PL	21	Mel_C1	19.8	2.69	24.82	14.4	1.92E-08	19.34	13181
PL	21	Mel_ C2	19	2.71	28.39	19.8	1.09E-07	9.01	8999
GRA	22	MOT 1	19.1	2.7	27.74	15.4	8.51E-06	4.1	8353
GRA	22	MOT 2	14.2	2.67	45.68	24.2	3.88E-06	2.54	4247
GRA	23	MAS	14.5	2.71	45.35	29.8	4.09E-06	2.06	2909
GRA	24	GIN	15.6	2.69	40.76	24.1	6.54E-06	2.7	4271
GRA	5	S01 C1ca	13.4	2.67	48.74	36.2	7.92E-07	0.46	435
GRA	5	S01 C2ca	13.3	2.69	49.50	32	6.72E-07	1.81	1605
GRA	5	S01 C3ca	15.3	2.67	41.47	34.8	5.50E-07	1.43	1148
GRA	5	S01 C4ca	14.5	2.68	44.73	29.5	3.06E-07	3.09	1502
GRA	5	S02 C1ca	14.2	2.65	45.27	31.1	8.05E-07	1.26	1028
GRA	5	S02 C2ca	13.9	2.67	46.82	29.2	2.77E-07	3.20	1231
GRA	16	S01 C1cu	13.9	2.72	47.80	32.7	6.65E-06	1.21	984
GRA	16	S01 C2cu	13.9	2.69	47.22	32.3	2.09E-06	1.14	1176
GRA	16	S01 C3cu	13.1	2.7	50.44	40.3	3.34E-06	0.46	749
GRA	16	S02 C1cu	14.5	2.69	44.94	42.5	2.90E-06	0.94	1100
GRA	16	S02 C2cut	13.7	2.68	47.78	29.7	5.28E-07	1.03	1060
GRA	16	S02 C3cu	13.4	2.7	49.31	38.1	5.30E-07	0.5	688
PL	21	S01 C1me	19.3	2.69	26.71	14.8	2.55E-08	16.31	3559
PL	20	S01 C2me	17.5	2.72	34.28	21.8	5.72E-08	7.85	3625
PL	21	S02 C1me	19	2.68	27.58	19.2	5.52E-09	12.09	3362
PL	21	S02 C2me	20.1	2.68	23.39	14.6	3.72E-09	13.83	3467
PL	21	S02 C3me	18	2.72	32.40	22.3	2.24E-08	17.15	4415
PL	21	S02 C4me	18.8	2.72	29.40	16.8	4.57E-09	24.68	6357

ni *grainstone* e *packstone* della Calcarenite di Gravina che hanno i pori quasi completamente riempiti da sparite. Di conseguenza, i pori non riempiti sono isolati implicando una porosità efficace molto bassa. Nel complesso, i valori registrati per le rocce tenere pugliesi rivelano una permeabilità da bassa a moderata, ricadente nel tipico range delle areniti semi-consolidate (Heath, 1983).

Analisi statistica

Il test statistico dell'analisi univariata della varianza (Anova) è uno strumento che permette di testare l'ipotesi che due o più medie di popolazioni siano uguali (e.g. Davis, 2002). Nel caso in esame, è stato utilizzato per comparare le medie dei valori geotecnici di due o più tipi di gruppi in maniera da fare delle deduzioni, con un livello di confidenza del 95%, sulle popolazioni medie. La scelta del test Anova più appropriato (parametrico o non parametrico) è stata fatta dopo un controllo preliminare delle seguenti assunzioni: i) le osservazioni sono campioni random e indipendenti dalle popolazioni (assunzione di indipendenza); ii) la distribuzione delle popolazioni, da cui i campioni sono selezionati, è normale (assunzione di normalità); iii) le varianze delle distribuzioni nelle popolazioni sono uguali (assunzione di omogeneità della varianza). La corrispondenza della prima assunzione è garantita dalle procedure standard applicate per la campionatura delle rocce carbonatiche, le altre due sono state sempre verificate, prima di ogni test Anova, applicando il test di normalità Shapiro-Wilk e con il test Levene di omogeneità della varianza. I seguenti quattro scenari sono emersi per il dataset studiato: i) se i dati avevano una distribuzione normale e le varianze erano omogenee il Fischer F-test parametrico è stato verificato; ii) se i dati non avevano una distribuzione normale ma le varianze erano omogenee, un test Kruskal-Wallis non parametrico è stato effettuato; iii) se i dati avevano una distribuzione normale ma le varianze non erano omogenee, il Welch's t-test delle varianze ineguali è stato applicato; iv) se i dati non avevano una distribuzione normale e se le varianze non erano omogenee, i dati sono stati prima manipolati attraverso una trasformazione Box-Cox e, successivamente, è stato applicato il Welch's t-test.

L'analisi statistica non è stata applicata ai valori di densità relativa perché mostrano una variazione molto limitata in tutti i campioni (circa 2,7) a causa della composizione mineralogica omogenea dei campioni.

Inizialmente, l'analisi statistica è stata applicata per verificare se le medie dei valori geotecnici differiscono a seconda delle formazioni geologiche di appartenenza dei campioni. Tuttavia, la disparità di campioni disponibili per ogni formazione (58 per la Calcarenite di Gravina, 8 per la Pietra leccese e 3 per il Supesintema Salentino) ha imposto delle scelte preliminari. Poiché il Supersintema Salentino è rappresentato solo da 3 campioni, è stato escluso dall'analisi statistica. Inoltre, poiché i campioni della Pietra leccese appartengono solo a due classi petrografiche (*wackestone* e *mud-dominated packstone*), un sub-campionamento è stato effettuato nei valori geotecnici ottenuti per la Calcarenite di Gravina in maniera da includere nell'analisi statistica solo quelli appartenenti alle stesse classi petrografiche della Pietra leccese. Questa scelta ha permesso di comparare solo i valori geotecnici ottenuti da campioni aventi simili caratteristiche petrografiche (granulometria, abbondanza in matrice, tipi di cementi ecc.). Pertanto, il numero di campioni per l'analisi statistica è scesa a 21: 13 per la Calcarenite di Gravina, 8 per la Pietra leccese. L'ipotesi nulla testata è stata che i valori geotecnici per ogni parametro non differissero a seconda della formazione geologica di appartenenza; l'ipotesi alternativa è stata che le differenze nelle medie dei parametri geotecnici fossero significative. I risultati sono riassunti in *Tab.* 3. I test hanno evidenziato come l'ipotesi nulla possa essere rigettata per tutti i parametri geotecnici (*p-value* sempre inferiori a 0,05 in tutti i test). Pertanto, i test Anova hanno evidenziato la stretta dipendenza dei valori dei parametri geotecnici misurati in laboratorio dalle formazioni geologiche malgrado tutti e 21 i campioni appartengano alle stesse classi petrografiche. Più in dettaglio, i campioni della Pietra leccese hanno medie significativamente più alte di UCS, Et, peso di volume secco dei campioni della Calcarenite di Gravina. Di contro, questi ultimi hanno valori significativamente più alti di porosità, coefficiente di imbibizione e del coefficiente di permeabilità.

I test Anova sono stati, inoltre, applicati ai 58 campioni della Calcarenite di Gravina in maniera da verificare se i valori geotecnici differissero a seconda delle classi petrografiche. L'ipotesi nulla testata è stata che i valori geotecnici per ogni parametro non variassero a seconda delle classi petrografiche; l'ipotesi alternativa è stata che le variazioni fossero significative. I risultati dell'analisi statistica sono riassunti in *Tab.* 4. I test Anova hanno

Tabella 3 – Sommario dei test statistici effettuati per verificare se i differenti metodi di campionamento potessero influenzare in maniera significativa i risultati dei test geotecnici di laboratorio. * trasformazione Box-Cox

UCS (Mpa)						
Formazioni geologiche	**Numero di dati**	**Media**	**Std. dev.**	**Shapiro-Wilk test (p-value)**	**Levene's test (p-value)**	**Welch's t-test (p-value)**
C. Gravina	13	2.286	0.766	0.463	0.007	<0.0001
P. leccese	8	15.033	5.551	0.910		
Peso specifico di volume (kN/m³)						
Formazioni geologiche	**Numero di dati**	**Media**	**Std. dev.**	**Shapiro-Wilk test (p-value)**	**Levene's test (p-value)**	**Welch's t-test (p-value)**
C. Gravina	13	14.323	1.242	0.340	0.306	<0.0001
P. leccese	8	18.938	0.862	0.777		
Et (Mpa)						
Formazioni geologiche	**Numero di dati**	**Media**	**Std. dev.**	**Shapiro-Wilk test (p-value)**	**Levene's test (p-value)**	**Welch's t-test (p-value)**
C. Gravina	13	2997.923	2515.306	0.001	0.639	0.025
P. leccese	8	5870.625	3546.442	0.013		
Porosità (%)						
Formazioni geologiche	**Numero di dati**	**Media**	**Std. dev.**	**Shapiro-Wilk test (p-value)**	**Levene's test (p-value)**	**Welch's t-test (p-value)**
C. Gravina	13	44.202	6.795	0.059	0.189	<0.0001
P. leccese	8	28.371	3.645	0.906		
Coefficiente di imbibizione (%)						
Formazioni geologiche	**Numero di dati**	**Media**	**Std. dev.**	**Shapiro-Wilk test (p-value)**	**Levene's test (p-value)**	**Welch's t-test (p-value)**
C. Gravina	13	32.838	6.073	0.928	0.142	<0.0001
P. leccese	8	17.963	17.963	0.197		
Coefficiente di permeabilità (m/s)						
Formazioni geologiche	**Numero di dati**	**Media**	**Std. dev.**	**Shapiro-Wilk test (p-value)**	**Levene's test (p-value)**	**Welch's t-test (p-value)**
C. Gravina	13	2.265E-06	5.092E-06	<0.0001	0.307	1,660E-04
P. leccese	8	3.089E-08	3.607E-08	0.016		

Tabella 4 – Sommario dei test statistici effettuati per verificare se le medie dei parametri geotecnici siano dipendenti o meno dalle formazioni geologiche a cui i campioni testati appartengono (si veda la Tabella 1 for per le abbreviazioni delle formazioni)

UCS (Mpa)

Classi petrografiche	n. dati	media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value	Kruskal-Wallis test (p-value)	Post-hoc test
Rudstone	9	5.800	7.757	3,630E-04			A
Floatstone	7	4.389	2.043	0.255			A
Grainstone	21	2.590	3.718	<0.0001	0.619	0.008	AB
Packstone	8	3.706	1.790	0.041			AB
Mud-dom. packstone	6	1.862	0.275	0.934			B
Wackestone	7	2.650	0.881	0.968			AB

Peso specifico di volume (kN/m³)

Classi petrografiche	n. dati	media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value	Kruskal-Wallis test (p-value)	Post-hoc test
Rudstone	9	16.878	2.146	0.419	0.437	0.004	A
Floatstone	7	15.500	2.090	0.137			A
Grainstone	21	15.076	2.189	3,830E-04			AB
Packstone	8	15.600	1.274	0.795			AB
Mud-dom. packstone	6	13.533	0.905	0.026			B
Wackestone	7	13.900	1.117	0.239			AB

Et (Mpa)

Classi petrografiche	n. dati	media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value	Kruskal-Wallis test (p-value)	Post-hoc test
Rudstone	9	16411.11	18753	0.010	0.126	0.012	A
Floatstone	7	8439.857	5881.204	0.067			A
Grainstone	21	5187.524	7049.998	<0.0001			A
Packstone	8	6760.500	4060.091	0.171			A
Mud-dom. packstone	6	2421.833	1960.941	0.002			B
Wackestone	7	3491.714	2971.998	0.028			A

Porosità (%)

Classi petrografiche	n. dati	media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value	Kruskal-Wallis test (p-value)	Post-hoc test
Rudstone	9	36.116	8.139	0.484			A
Floatstone	7	34.497	7.748	0.101			A
Grainstone	21	43.111	8.203	2,739E-04	0.449	0.004	AB
Packstone	8	40.915	5.016	0.714			AB
Mud-dom. packstone	6	48.572	3.612	0.013			B
Wackestone	7	42.880	3.874	0.312			AB

Coefficiente di imbibizione (%)

Classi petrografiche	n. dati	media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value	Kruskal-Wallis test (p-value)	Post-hoc test
Rudstone	9	20.856	6.898	0.519			A
Floatstone	7	20.900	4.902	0.034			A
Grainstone	21	30.671	8.039	0.323	0.386	<0.0001	B
Packstone	8	27.713	4.436	0.339			AB
Mud-dom. packstone	6	36.583	4.286	0.620			B
Wackestone	7	29.629	5.694	0.170			AB

Coefficiente di permeabilità (m/s)

Classi petrografiche	n. dati	media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value	Kruskal-Wallis test (p-value)	Post-hoc test
Rudstone	8	8.300E-06	6.209E-06	0.182		0.197	A
Floatstone	7	3.706E-06	4.017E-06	0.162			AB
Grainstone	21	6.026E-06	6.823E-06	3.369E-04	0.315		A
Packstone	6	4.106E-06	3.507E-06	0.228			AB
Mud-dom. packstone	6	5.368E-07	3.514E-07	0.448			B
Wackestone	7	3.747E-06	6.798E-06	2.155E-04			AB

dimostrato che l'ipotesi nulla può essere rigettata (*p-value* sempre inferiore a 0,05) per tutti i parametri geotecnici. Pertanto, esiste un collegamento evidente tra i parametri geotecnici e le classi petrografiche. Inoltre, poiché le classi petrografiche sono più di due gruppi, dei test post-hoc a due code (procedura Fischer LSD per i test Anova parametrici e procedura Steel-Dwass-Critchlow-Fligner per i test Anova non parametrici) sono stati effettuati in modo da indagare quali gruppi hanno influito maggiormente sulla significatività dei test Anova.

Questo approccio ha permesso di specificare meglio quali tipi di differenze emergono tra le classi petrografiche. Questi test aggiuntivi hanno fatto emergere differenze significative per i valori di UCS, porosità e peso di volume secco. Per questi parametri, i seguenti gruppi sono stati riconosciuti: gruppo A, comprendente *floatstone* e *rudstone*; gruppo B, comprendente *mud-dominated packstone*; gruppo AB, avente caratteristiche intermedie, comprendente *grainstone*, *packstone* e *wackestone*. Il confronto a coppie tra i valori medi di Et ha evidenziato differenze significative tra i seguenti due gruppi: gruppo A, comprendente *rudstone*, *floatstone*, *grainstone*, *packstone* e *wackestone*; gruppo B, comprendente soltanto *mud-dominated packstone*. Il confronto delle medie dei valori del coefficiente di imbibizione ha rivelato differenze significative tra i seguenti tre gruppi: gruppo A, comprendente *rudstone* e *floatstone*; gruppo B, comprendente *grainstone* e *mud-dominated packstone*; gruppo AB, avente caratteristiche intermedie, comprendente *packstone* e *wackestone*. Infine, il confronto a coppie delle medie dei valori del coefficiente di permeabilità ha rivelato differenze significative tra i seguenti tre gruppi: gruppo A, comprendente *rudstone* e *grainstone*; gruppo B, comprendente *mud-dominated packstone*; gruppo AB, avente caratteristiche intermedie, e comprendente *floatstone*, *packstone* e *wackestone*.

Il raggruppamento delle classi petrografiche a valle dei test post-hoc ha permesso di fare le seguenti considerazioni: i) le classi petrografiche più grossolane (*floatstone* e *rudstone*) formano un gruppo separato perché hanno medie dei valori di UCS e peso di volume secco significativamente più elevati di quelli delle classi più fini; ii) la classe *mud-dominated packstone* forma un gruppo separato perché hanno valori medi di UCS, peso di volume secco, Et e coefficiente di permeabilità più bassi di tutte le altre classi. Per contro, possiede i valori medi più elevati di porosità; iii) le classi petrografiche granulo-sostenute e prive di matrice fangosa (*grainstone* e *rudstone*) hanno valori medi del coefficiente di permeabilità significativamente più elevati di tutte le altre classi petrografiche.

I risultati dell'analisi petrografica e i dati plottati in *Fig.* 7 hanno suggerito le seguenti ipotesi: i) i valori di resistenza delle rocce possono differire a seconda del tipo e dell'abbondanza di litoclasti calcarei nella struttura granulare costituita in prevalenza da allochimici (bioclasti); ii) i valori di resistenza delle rocce possono variare a seconda del tipo e dell'abbondanza del cemento nei pori (si veda la distribuzione delle coppie di cementi DR/BK e GR/MS in *Fig.* 7).

Al fine di verificare queste ipotesi, i test Anova sono stati indirizzati a investigare più in dettaglio la possibile influenza di queste due caratteristiche petrografiche sul comportamento meccanico delle rocce tenere carbonatiche. L'analisi petrografica ha dimostrato che i litoclasti sono presenti solo nelle classi *grainstone*, *floatstone* e *rudstone*. Pertanto, un sub-campionamento è stato realizzato in maniera da selezionare solo i campioni della Calcarenite di Gravina appartenenti a queste tre classi.

I seguenti due gruppi sono stati riconosciuti: 28 campioni contenenti solo bioclasti e 9 campioni contenenti sia bioclasti che litoclasti. I risultati dell'analisi statistica sono riassunti in *Tab.* 5. L'ipotesi nulla testata è stata che i valori di UCS appartenessero alla stessa popolazione e non variassero significativamente a seconda del maggiore o minore contenuto in litoclasti; l'ipotesi alternativa è stata che i valori medi di UCS variassero in maniera significativa con il contenuto in litoclasti. I risultati dei test Anova hanno permesso di rigettare l'ipotesi nulla e di accettare quella alternativa (*p-value* inferiori a 0,05). Pertanto, l'ipotesi formulata con l'analisi petrografica è corretta perché i valori di UCS dipendono dalla quantità di litoclasti presente nella struttura granulare.

Un simile approccio è stato seguito raggruppando i campioni della Calcarenite di Gravina secondo le coppie dominanti di cementi. Più in dettaglio, i campioni sono stati separati nei seguenti gruppi: 41 campioni caratterizzati da coppie di cementi del tipo GR/MS e 17 campioni caratterizzati da coppie di cementi del tipo DR/BK. I risultati dell'analisi statistica sono stati riassunti in *Tab.* 6. L'ipotesi nulla testata è stata che i valori di UCS appartenessero tutti alla stessa popolazione; l'ipotesi alternativa è stata che differissero in maniera significativa a seconda delle differenti coppie di cementi dominanti. I risultati del test Anova hanno permesso di rigettare l'ipotesi nulla (*p-value* inferiore a 0,05) e di accettare l'ipotesi alternativa. Pertanto, la presenza di coppie di cementi del tipo GR/MS è risultata in valori medi di UCS più bassi, mentre la presenza di coppie di cementi del tipo DR/BK è corrisposta a valori medi di UCS significativamente più alti.

Al fine di valutare la covarianza tra i parametri geotecnici, è stata effettuata un'analisi delle componenti principali (PCA), basata sul coefficiente di correlazione di Pearson. I risultati di questa procedura statistica sono riassunti in *Tab.* 7. Gli autovalori, o fattori, sono il risultato della combinazione lineare delle variabili iniziali e riflettono la qualità della proiezione dei sei parametri geotecnici in un numero inferiori di dimensioni.

Nel caso in esame, il primo fattore (F1) rappresenta più del 64% della variabilità totale. Questo significa che se i parametri geotecnici fossero plottati solo su un asse, più del 64% della variabilità totale potrebbe essere osservata. Inoltre, la proiezione dei primi due fattori (F1 e F2) in un cerchio di correlazione, *i.e.*, la proiezione delle variabili iniziali nello spazio dei fattori, corrisponde all'82% della varianza totale e rappresenta una proiezione di buona qualità dell'iniziale tabella multidimensionale. Quando due variabili sono lontane dal centro del cerchio di correlazione e sono tra loro vicine, esse sono positi-

Tabella 5 – Sommanrio dell'analisi statistica realizzata per verificare se i valori geotecnici di laboratorio differiscono a seconda delle classi petrografiche

UCS (Mpa)

Tipi di granuli	Numero di dati	Media	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value)	Kruskal Wallis test (p-value)
lithoclasts and bioclasts	9	7.160	7.152	<0.0001	0.205	0.001
bioclasts	28	2.603	3.340	3,166E-04		

Tabella 6 – Sommario dell'analisi statisticaa effettuata per verificare la dipendenza dei valori di UCS a seconda del tipo di granuli presenti nella struttura granulare della roccia

UCS (Mpa)

Coppie di cementi dominanti	Numero di dati	Medie	Std. dev.	Shapiro-Wilk test (p-value)	Levene's test (p-value)	Welch's t-test (p-value)
DR, BK	17	1.160*	0.419*	0.994*	0.004	0.05
GR, MS	41	0.663*	0.682*	0.831*		

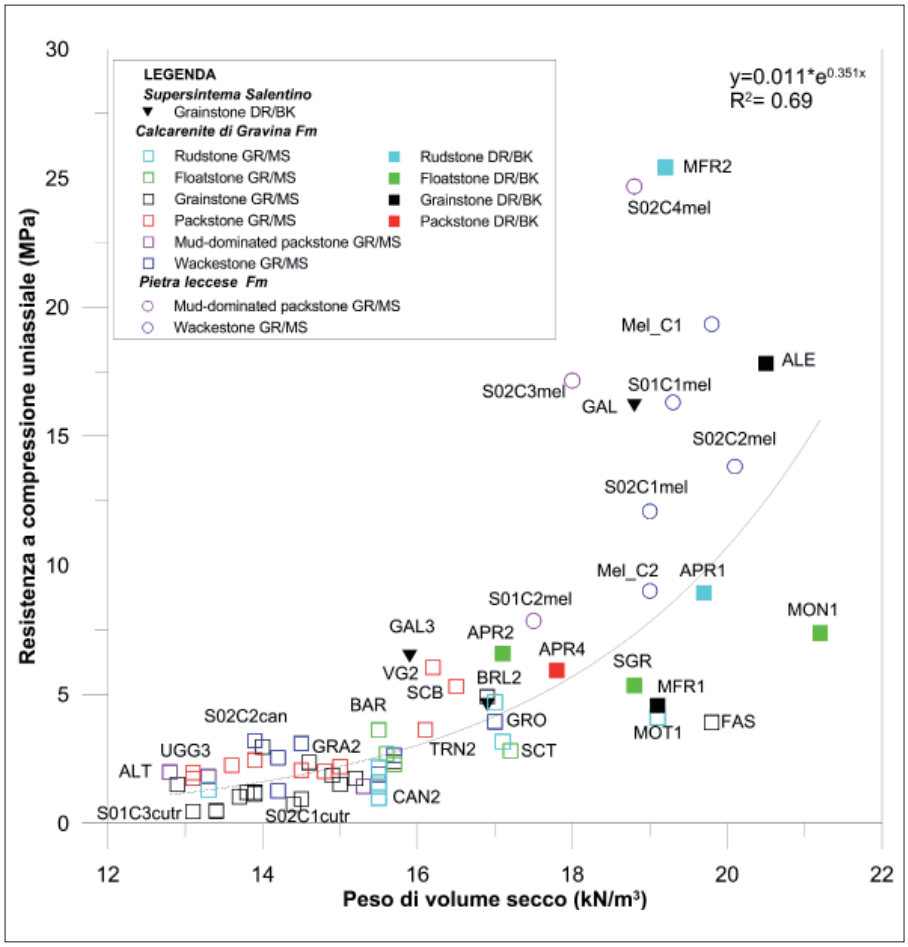


Figura 8 – Peso di volume secco e vs UCS. Le coppie di cementi dominanti (GR/MS = granular/meniscus*; DR/BK =* drusy/blocky*) sono indicati per ogni classe petrografica*

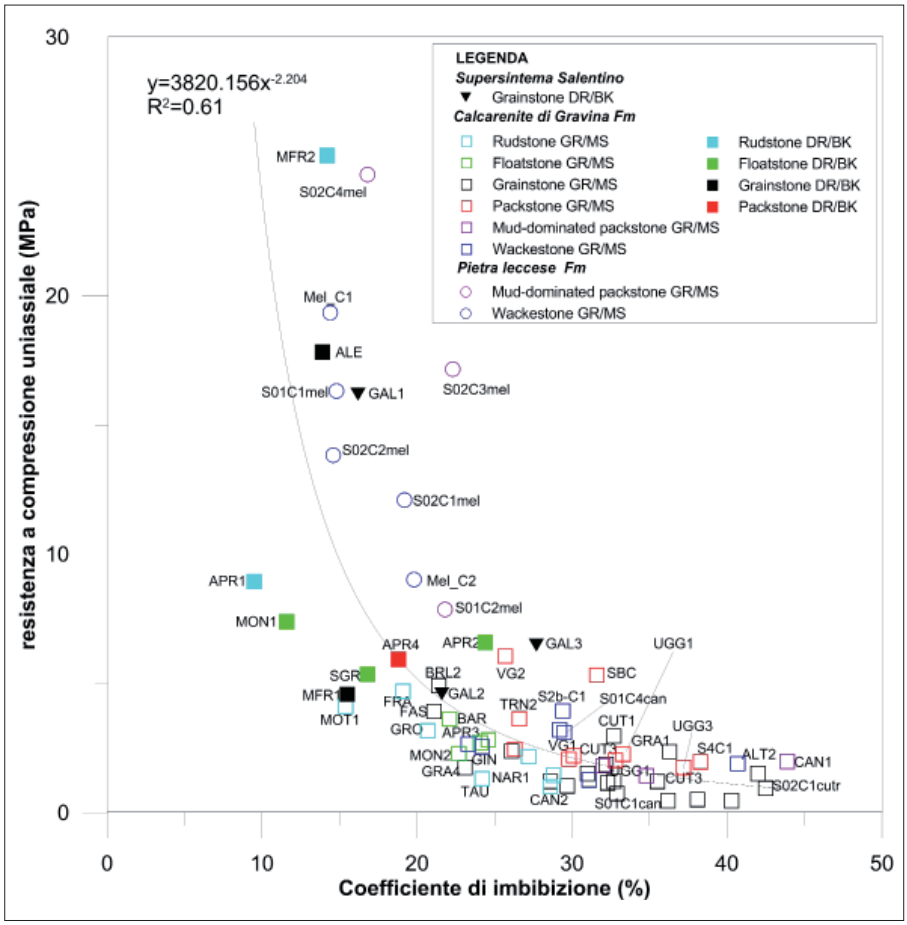


Figura 9 – Linea di regressione tra il coefficiente di imbibizione e la resistenza a compressione monoassiale delle rocce tenere analizzate. Le coppie di cementi dominanti (GR/MS = granular/meniscus*; DR/BK =* drusy/blocky*) sono indicati per ogni classe petrografica*

vamente correlate, come accade ad esempio tra i valori di UCS e del peso di volume secco nel quadrante inferiore destro del cerchio di correlazione, e tra porosità e coefficiente di imbibizione nel quadrante superiore destro. Quando due variabili sono lontane dal centro e cadono nei quadranti opposti del cerchio di correlazione, esse sono negativamente correlate come accade ad esempio tra UCS e coefficienti di imbibizione. Quando invece due variabili sono lontane dal centro e tra loro ortogonali, esse non sono tra loro correlate, come accade ad esempio tra porosità e coefficiente di permeabilità.

La tabella del coseno al quadrato delle variabili è utile per l'interpretazione del significato degli assi. In questo caso, F1 è collegato con UCS, peso di volume secco, Et, porosità e coefficiente di imbibizione; F2 è collegato solo con il coefficiente di permeabilità. Il biplot ci consente di guardare alle osservazioni su una mappa bidimensionale e di individuare dei trend.

Più in dettaglio, il biplot mostra come le classi *floatstone* e *rudstone* sono collocate sul lato destro del grafico e sono orientate lungo l'asse F1. Questo conferma i risultati del test Anova poiché queste variabili sono raggruppate insieme (*Tab.* 4) e hanno i valori più elevati di peso di volume secco e UCS. Le classi *mud-dominated packstone* e *wackestone* ricadono prevalentemente nel lato sinistro del grafico e sono ancora orientati lungo l'asse F1. Questo significa che queste due variabili hanno valori più alti di porosità e coefficiente di imbibizione ma, di contro, hanno valori più bassi del coefficiente di permeabilità, di UCS e del peso di volume secco. Le classi packstone e grainstone hanno una variabilità più grande di tutte le altre e sono distribuite sia sul lato sinistro che destro del biplot. Di conseguenza, è difficile trovare un trend specifico per queste classi, eccetto per alcuni campioni di *grainstone* che sono distribuiti lungo il lato sinistro del biplot all'incirca paralleli all'asse F2. Questi campioni hanno valori del coefficiente di permeabilità relativamente più alti, ma valori più bassi di UCS e di peso di volume secco.

I risultati della PCA sono stati, infine, modellati effettuando un'analisi della regressione su coppie di dati geotecnici Il grafico di *Fig.* 8, che plotta il peso di volume secco contro i valori di UCS, ha una dispersione limitata dei dati rispetto alla linea di tendenza con un coefficiente di correlazione di 0.69.

Più in dettaglio, questo grafico mostra come i campioni della Pietra leccese (cerchi vuoti in *Fig.* 8) hanno valori più alti di UCS dei campioni di Calcarenite di Gravina e del Supersintema salentino confermando i risultati dei test Anova (*Tab.* 3). Soltanto due campioni di Calcarenite di Gravina presentano valori

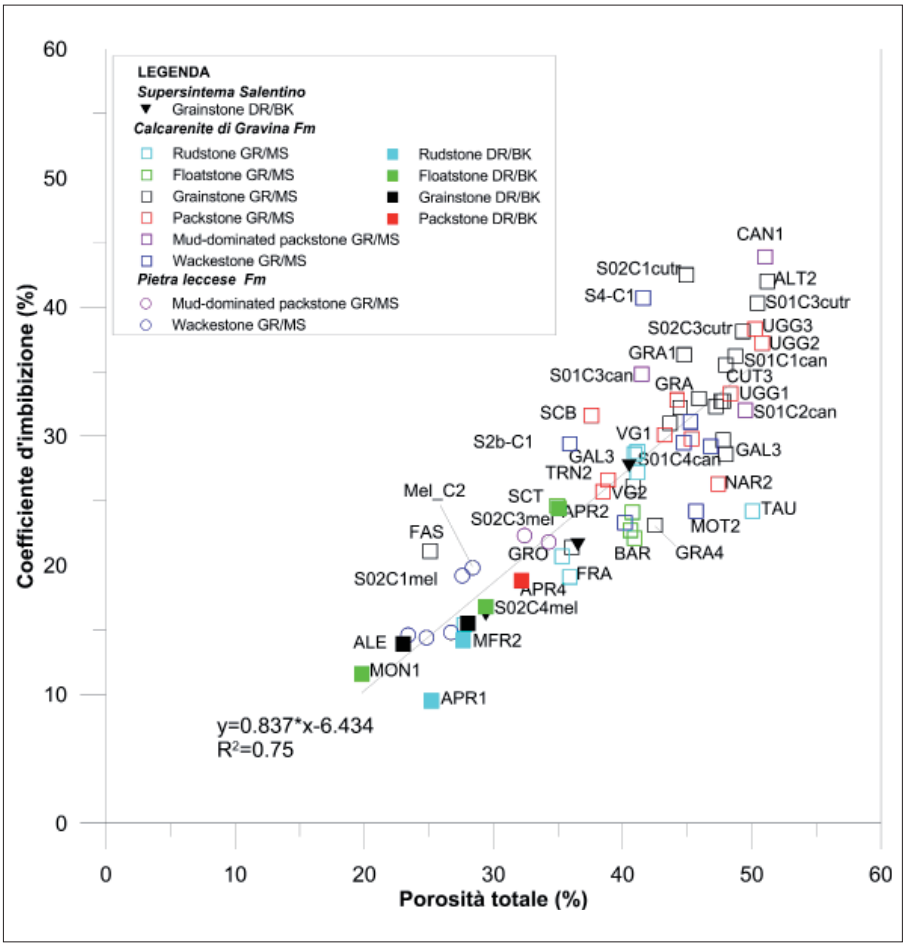


Figura 10 – Trend *lineare tra porosità totale e coefficiente d'imbibizione. Le coppie di cementi dominanti (GR/MS* = granular/meniscus*; DR/BK* = drusy/blocky*) sono indicati per ogni classe petrografica*

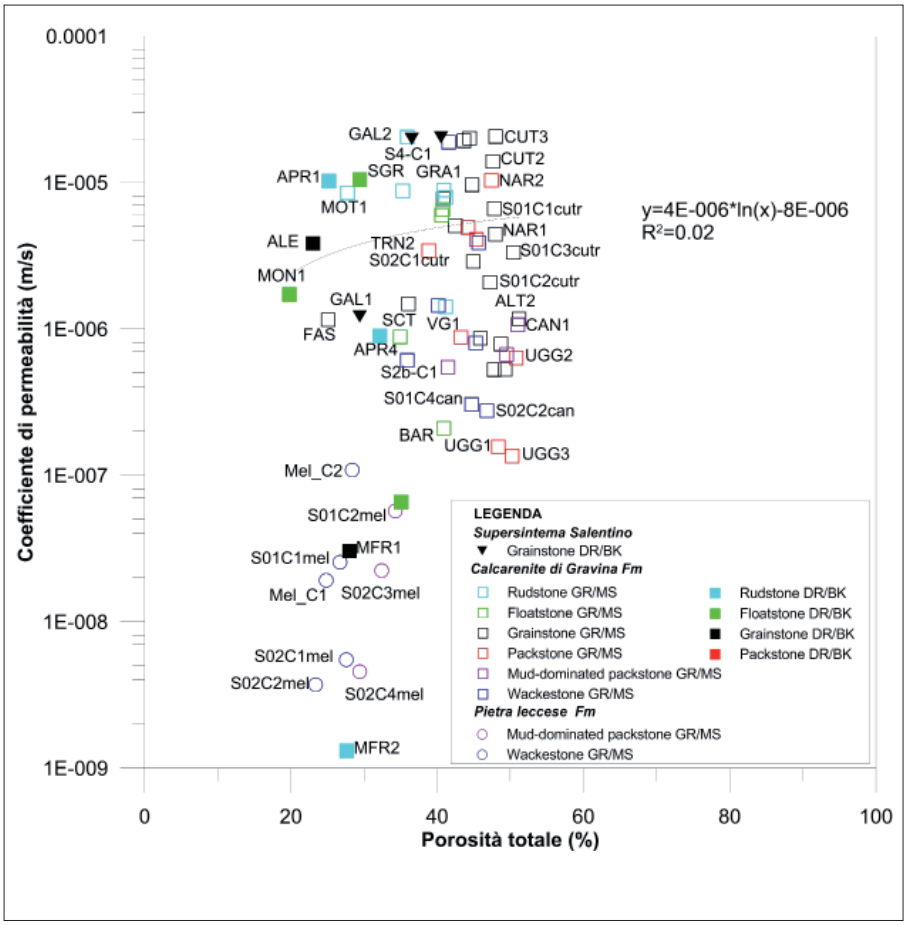


Figura 11 – Dati di porosità totale e coefficiente di permeabilità delle rocce tenere. Il grafico evidenzia come non ci sia una chiara relazione tra i due parametri. Le coppie di cementi dominanti (GR/MS = granular/meniscus*; DR/BK* = drusy/blocky*) sono indicati per ogni classe petrografica*

anomali di UCS (MFR 2 e ALE). Inoltre, guardando ai campioni della Calcarenite di Gravina, emerge che i campioni aventi coppia di cementi dominanti del tipo DR/BK (quadrati riempiti in *Fig.* 8) presentano valori significativamente più alti di UCS e peso di volume secco dei campioni caratterizzati dalla coppia di cementi GR/MS (quadrati vuoti in *Fig.* 8).

In aggiunta all'influenza del peso di volume secco contro i valori di UCS, la dipendenza di UCS dai valori del coefficiente di imbibizione sono dimostrati dal grafico di *Fig.* 9. I dati geotecnici mostrano una relazione inversa fra questi due parametri come confermato dal coefficiente di correlazione di 0.61.

Il coefficiente di imbibizione è un parametro influenzato dalla porosità totale come dimostrato dal coefficiente di correlazione di 0.75 tra la porosità totale e il coefficiente di imbibizione in *Fig.* 10. Questi dati possono essere spiegati analizzando tipo e quantità di calcite spatica nei pori delle rocce. Inoltre, i risultati dei test Anova (*Tab.* 3) sono confermati poiché la Pietra leccese mostra valori di coefficiente di imbibizione e porosità inferiori di quelli della Calcarenite di Gravina. Una differenza intraformazionale nei valori di questi due parametri emerge comparando i campioni di Calcarenite di Gravina. Infatti, i campioni, aventi coppie dominanti di cementi DR/BK, presentano valori più bassi di porosità e coefficiente di imbibizione di quelli aventi cementi del tipo GR/MS.

I valori plottati in *Fig.* 11 non mostrano relazioni con la porosità totale, come mostrato dal coefficiente di correlazione estremamente basso (R^2= 0.02) e i dati plottati in *Fig.* 12 evidenziano come il coefficiente di permeabilità non si correla con i valori di UCS (R^2= 0.26).

DISCUSSIONE

L'analisi petrografica delle rocce tenere pugliesi rivela l'esistenza di sei differenti classi petrografiche, che non sono egualmente distribuite nelle tre unità mappate in *Fig.* 2; infatti, solo la Calcarenite di Gravina presenta tutte le classi petrografiche, mentre i campioni prelevati dalla Pietra leccese e dal Supersintema salentino corrispondono, rispettivamente, a *wackestone* e *mud dominated packstone* e a *grainstone*. Per tale ragione, il *range* dei valori ottenuti dai test fisici e meccanici sono più ampi per la Calcarenite di Gravina che per le altre due unità. Ciò è principalmente dovuto alle esposizioni più ampie e continue della Calcarenite di Gravina in Puglia rispetto alle altre due unità e al contesto geologico e geodinamico in cui tale rocce tenere si sono deposte durante il Plio-Pleistocene.

La Calcarenite di Gravina è composta da molti litotipi che variano da calcareniti molto tenere e finemente laminate a calciruditi ben

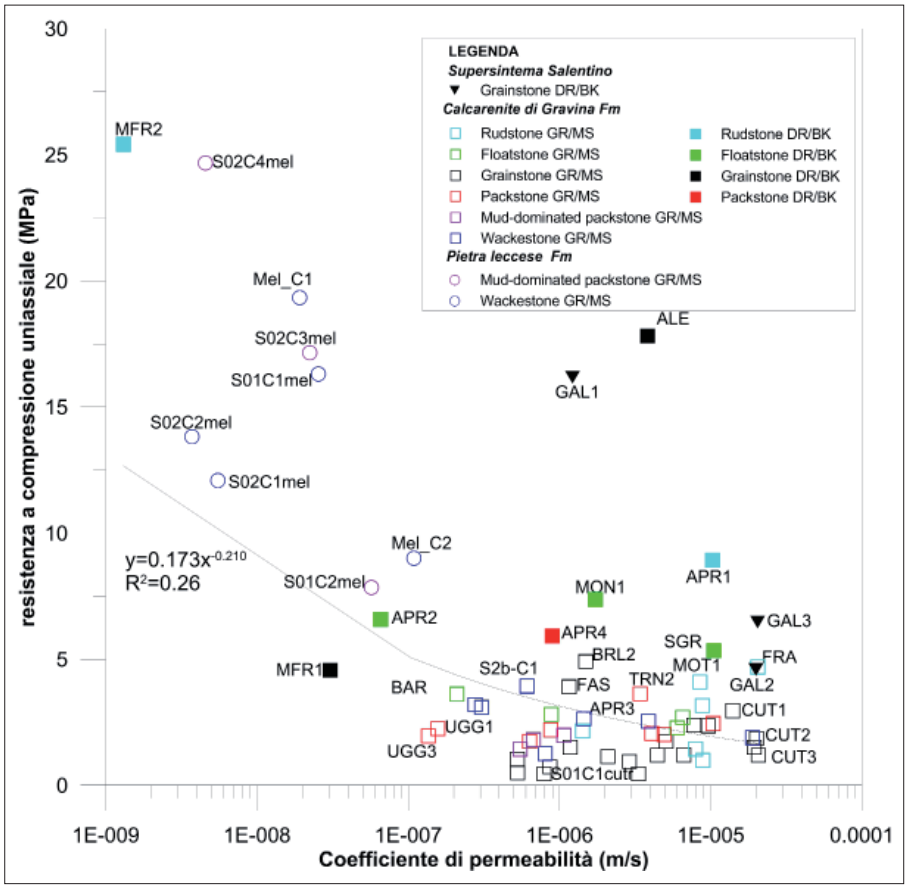


Figura 12 – Dati del coefficiente di permeabilità e della resistenza a compressione uniassiale. Il grafico non mostra nessuna relazione tra i due parametri. Le coppie di cementi dominanti (GR/MS = granular/meniscus*; DR/BK* = drusy/blocky*) sono indicati per ogni classe petrografica*

cementate e massive (Tropeano e Sabato, 2000; Tropeano *et al*., 2002; Spalluto *et al*., 2010; Pieri *et al*., 2011). Alla scala dell'affioramento, i litotipi osservati presentano, sia verticalmente che lateralmente, una complessa organizzazione che riflette l'evoluzione dei sistemi deposizioni carbonatici di clima temperato in ambienti sedimentari sviluppati su morfologie ereditate del substrato carbonatico Meso-Cenozoico intensamente fratturato e carsificato (Tropeano e Sabato, 2000; Pomar e Tropeano, 2001; Tropeano *et al*., 2002).

I risultati del test Anova nella *Tab.* 3 e dei dati plottati nelle *Fig.* 8, 9 e 10 hanno mostrato come i campioni della Pietra leccese appartenenti alle classi petrografiche *wackestone* e *mud-dominated packstone* hanno valori di UCS significativamente più alti dei campioni della Calcarenite di Gravina appartenenti alle stesse classi. Pertanto, appartenere ad una stessa classe petrografica non è un criterio per attribuire ai campioni di differenti unità geologiche lo stesso comportamento fisico e meccanico. I campioni di Pietra leccese hanno subito un seppellimento più profondo dei campioni equivalenti di Calcarenite di Gravina e, di conseguenza, i campioni miocenici della Pietra leccese sono stati sottoposti a un carico litostatico più elevato che ha causato un aumento della densità della roccia, così come dimostrato dai valori del peso di volume secco significativamente più elevati di quelli della Calcarenite di Gravina. In accordo con le conclusioni di Andriani e Walsh (2010), ciò ha determinato che i campioni di Pietra leccese hanno valori di porosità totale, di coefficiente di imbibizione, di permeabilità e valori di resistenza superiori (valori di UCS sempre >5 MPa) di quelli della Calcarenite di Gravina.

Un ragionamento differente è stato seguito per spiegare la variabilità osservata nei valori di UCS nella stessa unità geologica, poiché, in questo caso, è assunto che tutti i campioni abbiano subito condizioni di seppellimento simili. I risultati dei test Anova (*Tab.* 4) e dell'analisi PCA (*Tab.* 7) per la Calcarenite di Gravina hanno suggerito una connessione tra i parametri geotecnici e le classi petrografiche e i test statistici post-hoc hanno rivelato alcuni interessanti raggruppamenti di classi petrografiche (e.g. *floatstone* e *rudstone* hanno valori significativamente più alti di UCS e di peso di volume secco di altre classi). Tuttavia, questi test non giustificano la grande variabilità dei valori geotecnici all'interno delle classi petrografiche, come nei *grainstone*. Osservando i valori UCS, si può pensare che il comportamento meccanico delle rocce tenere carbonatiche potrebbe essere relazionato alla presenza di litoclasti nella struttura granulare e di coppie di cementi dominanti nei pori. I risultati dei test Anova (Tabelle 5 e 6) evidenziano come le due caratteristiche petrografiche influenzino fortemente il comportamento meccanico delle rocce tenere carbonatiche. Questa considerazione è confermata anche dalla curva di regressione in *Fig.* 8, dove è possibile vedere la resistenza delle varie classi petrografiche della Calcarenite di Gravina fortemente dipendente dal tipo di cemento presente nei pori. In particolare, le rocce tenere, i cui pori sono riempiti da mosaici di cementi del tipo DR/BK, hanno valori di UCS più elevati (si veda, per esempio, i valori di UCS dei campioni MFR2 e ALE nella *Tab.* 2) di quelli riempiti in maniera irregolare dai cementi del tipo GR/MS. Questi risultati concordano con studi simili che affermano come la resistenza delle rocce tenere carbonatiche sia controllata dal tipo e dalla quantità di calcite come cemento (Andriani e Walsh, 2010) che condiziona i legami interparticellari (Ciantia e Castellanza, 2016; Zimbardo, 2016).

Ulteriori informazioni sul comportamento fisico delle rocce carbonatiche tenere sono fornite dalle curve di regressione in *Fig.* 8, 9, 10 e 11. Confrontando i parametri petrografici con quelli geotecnici, si nota che i campioni con porosità primaria intergranulare e intragranulare ben sviluppata e con pori irregolari riempiti da cemento GR/MS hanno valori più alti del coefficiente di imbibizione e di porosità totale. Diversamente, i campioni con pori completamente riempiti da cemento DR/BK mostrano valori più bassi. Si può affermare che le rocce tenere ben cementate, aventi cemento DR/BK ben sviluppato, hanno una minore sensibilità all'acqua e, quindi, sono più resistenti ai processi di *weathering* (Andriani e Walsh, 2007).

Nel complesso, i campioni appartenenti alla classe dei *grainstone* e *rudstone* presentano una permeabilità più elevata dei campioni appartenenti alle altre classi petrografiche poiché possiedono un ridotto grado di addensamento dei granuli e poiché i pori sono irregolarmente riempiti dal cemento (Andriani and Walsh, 2002; 2007; 2010), ma una regola specifica non può essere chiaramente stabilità. Questa mancanza di correlazione può essere spiegata con l'analisi petrografica, che suggerisce un forte contributo dei pori isolati alla porosità totale (*sensu* Lucia, 1995). I pori isolati accrescono la porosità totale, ma non aumentano, in maniera significativa, la permeabilità (Lucia, 1995). In questo modo, l'esistenza, allo stesso tempo, di valori relativamente bassi di permeabilità e di alti valori di porosità totale evidenzia una bassa porosità efficace legata alla presenza di pori continui e interconnessi. Tuttavia, in accordo con Andriani e Walsh (2007; 2010), alcuni campioni *grainstone*, ricadenti nel quadrante in alto a sinistra del biplot in *Tab.* 7, hanno una porosità aperta con vuoti intercomunicanti. Come

Tabella 7 – Sommario dell'analisi statistica effettuata per verificare se i valori geotecnici variassero a seconda delle coppie dominanti di cementi (si veda la Tabella 1 per le abbreviazioni). * trasformazione Box-Cox

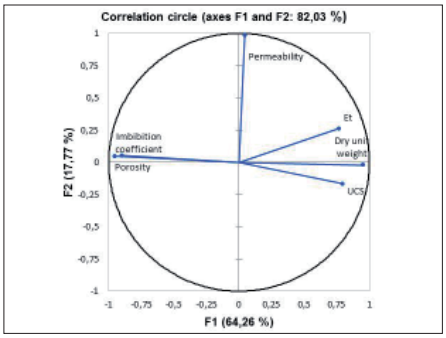
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Autovalori	3,856	1,066	0,565	0,326	0,186	0,001
Variabilità (%)	64,261	17,774	9,412	5,434	3,107	0,011
Cumulativa %	64,261	82,035	91,447	96,882	99,989	100,000

Tabella 8 – Sommario dell'analisi statistica delle componenti principali (PCA). Gli autovalori (o fattori) rappresentano una combinazione lineare dei parametri geotecnici in un numero inferiore di dimensioni. Il cerchio di correlazione rappresenta la proiezione della variabile iniziale nello spazio dei fattori. La tabella del coseno al quadrato delle variabili presenta il collegamento tra i parametri geotecnici e gli assi corrispondenti. Più grande è il coseno al quadrato più elevata è la correlazione con l'asse corrispondente. Il biplot mostra una rappresentazione simultanea delle variabili (parametri geotecnici) e delle osservazioni (classi petrografiche) nello spazio.

Autovettori	F1	F2
UCS	0,405	-0,162
Peso specifico di volume	0,486	-0,022
Et	0,391	0,253
Porosità	-0,486	0,044
Coefficiente di imbibizione	-0,458	0,050
Coefficiente di permeabilità	0,023	0,951

Correlazione tra variabili e fattori	F1	F2
UCS	0,795	-0,168
Peso specifico di volume	0,955	-0,023
Et	0,768	0,262
Porosità	-0,954	0,046
Coefficiente di imbibizione	-0,899	0,051
Coefficiente di permeabilità	0,045	0,982

Coseno al quadrato delle variabili	F1	F2
UCS	0,633	0,028
Peso specifico di volume	0,912	0,001
Et	0,590	0,068
Porosità	0,910	0,002
Coefficiente di imbibizione	0,809	0,003
Coefficiente di permeabilità	0,002	0,965



risultato, questi pochi campioni mostrano una permeabilità più elevata di altre varietà aventi un minor grado di addensamento dei granuli e un numero maggiore di pori interconnessi nella roccia.

CONCLUSIONI

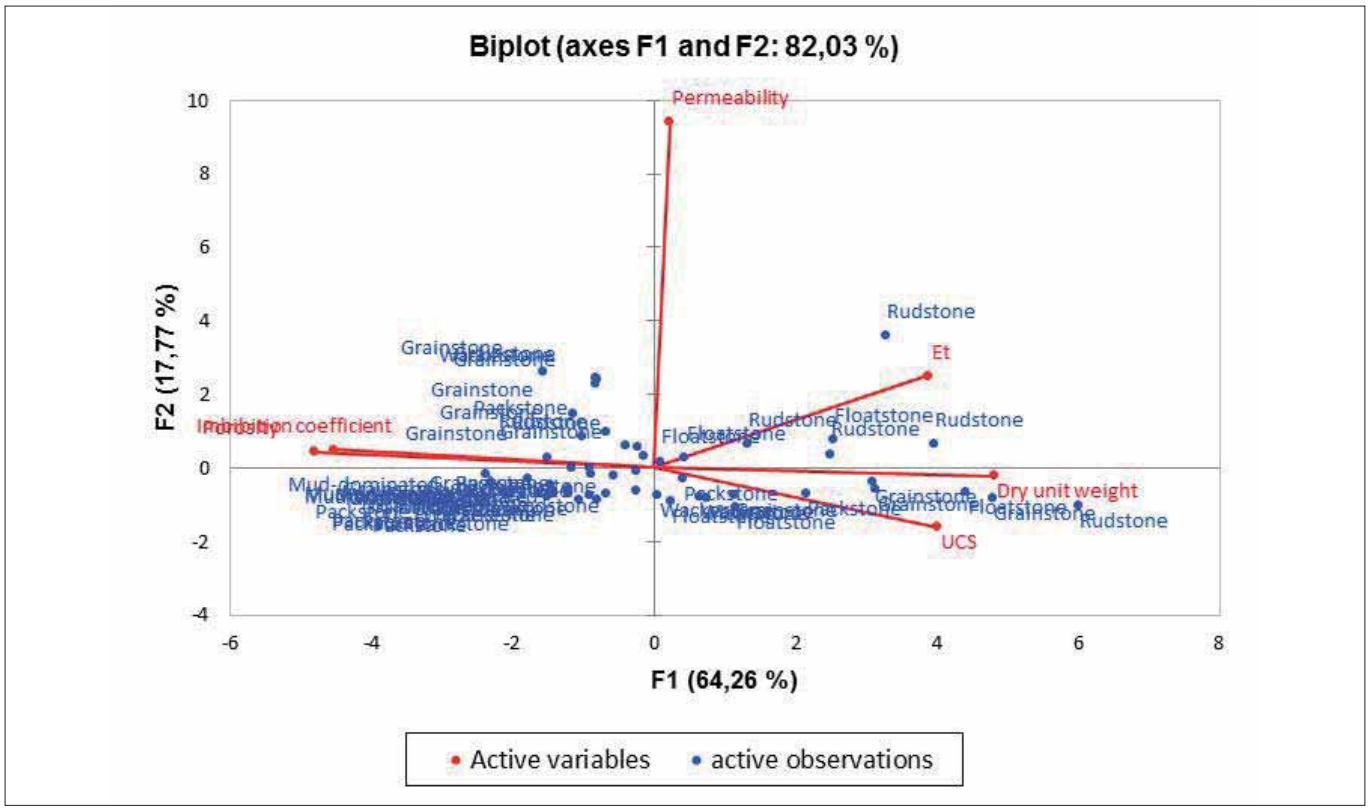
Le rocce tenere pugliesi possono essere raggruppate in sei classi petrografiche appartenenti a varietà sia fango che granulo sostenute aventi *fabric* e caratteristiche diagenetiche complesse.

L'addensamento dei granuli, il contenuto in matrice, la dimensione e la distribuzione dei pori, la tipologia e l'abbondanza di cemento nei pori contribuiscono a definire il peculiare comportamento meccanico e la resistenza ai processi di alterazione delle rocce tenere carbonatiche.

Nel complesso, la classificazione delle rocce tenere pugliesi basata sul valore della resistenza a compressione uniassiale rivela un comportamento molto debole poiché gran parte dei campioni ricade nel campo della "resistenza molto bassa".

Tuttavia, il rapporto tra caratteristiche petrografiche e geotecniche delle rocce tenere pugliesi non può essere pienamente compreso senza conoscere la storia geologica di queste rocce.

A tal riguardo, i campioni miocenici della Pietra leccese, che hanno subito una storia geologica più lunga e una maggiore profondità di seppellimento dei campioni della Calcarenite di Gravina e del Supersintema salentino, registrano valori di UCS più elevati delle altre due unità sebbene possano essere



raggruppate nelle stesse classi petrografiche (*wackestone* e *mud-dominated packstone*).

Malgrado la complessità del *fabric* e delle caratteristiche diagenetiche delle rocce tenere carbonatiche impedisca di definire regole certe per collegare il comportamento fisico e meccanico alle classi petrografiche, alcune chiare connessioni possono essere stabilite per i campioni di Calcarenite di Gravina.

Le seguenti conclusioni possono essere rimarcate:

i) le classi *floatstone* e *rudstone* formano un gruppo separato poiché essi hanno valori più elevati di UCS e di peso di volume secco e valori di porosità più bassi di quelli con granulometria più fine;
ii) *packstone* fango sostenuto forma un gruppo separato poiché presenta valori inferiori di UCS, peso di volume secco, Et, permeabilità e valori di porosità più alti delle altre classi petrografiche;
iii) *rudstone* e *grainstone* granulo-sostenuti e privi di matrice hanno valori più alti di permeabilità delle classi ricche in matrice;
iv) la presenza di litoclasti nella tessitura granulare bioclastica, che aumenta la densità della roccia, e l'identificazione nei pori di coppie di cementi, che influenzano il grado di litificazione, sono due dei principali elementi che controllano la resistenza delle rocce tenere pugliesi. In più, il cemento può anche spiegare la variabilità intraformazionale osservata nei dati geotecnici.

Le rocce tenere bioclastiche sono in genere descritte come materiali porosi aventi valori di permeabilità relativamente elevati per la presenza di macropori intergranulari tra loro interconnessi che accrescono la porosità efficace. Questo collegamento non può essere stabilito per le rocce tenere pugliesi, come dimostrato dai dati petrografici, che suggeriscono un contributo significativo della porosità isolata alla porosità totale.

Questo studio rivela come un approccio integrato multidisciplinare petrografico e geotecnico fornisca importanti informazioni per la conoscenza dei principali fattori che regolano il comportamento meccanico delle rocce tenere carbonatiche. Le analisi petrografiche preliminari permettono di determinare il tipo e l'abbondanza di cemento sparitico nei pori della roccia che influenza le proprietà fisiche e meccaniche della roccia e, quindi, può aiutare a predire, con buona approssimazione, il comportamento fisico e meccanico delle rocce tenere carbonatiche. Questo tipo di informazioni non sostituiscono le analisi geotecniche, ma possono essere utilizzate per suggerire il più adeguato piano delle indagini e delle prove geotecniche finalizzate allo studio della stabilità dei versanti e delle cavità instabili. A tal fine, una più completa comprensione delle relazioni esistenti tra parametri geotecnici e caratteristiche petrografiche può suggerire l'approccio ingegneristico da seguire per prevenire il deterioramento delle caratteristiche di resistenza nel tempo degli ammassi rocciosi sotto l'influenza dei processi di *weathering* e per evitare il collasso dei versanti e delle cavità instabili.

BIBLIOGRAFIA

Andriani, G.F., Walsh, N. (1998), *Caratteri tessiturali e resistenza al taglio diretto di calcareniti tenere e porose*. GEAM Torino. 93, 35-42.

Andriani, G.F., Walsh, N. (2002) *Physical properties and textural parameters of calcarenitic rocks: qualitative and quantitative evaluations*. Eng. Geol. 67, 5-15.

Andriani, G.F., Walsh, N. (2007), *The effects of wetting and drying, and marine salt crystallization on calcarenite rocks used as building material in historic monuments*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 271, 179-188.

Andriani, G.F., Walsh, N. (2010), *Petrophysical and mechanical properties of soft and porous building rocks used in Apulian monuments (south Italy)*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 333, 129-141.

ASTM D420-98 (2003), *Standard Guide to Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes* (Withdrawn 2012), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998, www.astm.org

ASTM D854-14. (2014), *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM D2113-14 (2014), *Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Exploration,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM D2216-10 (2010) *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org

ASTM D2434-68 (2006), *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils* (Constant Head) (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, www.astm.org

ASTM D2938-95 (2002), *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens* (Withdrawn 2005), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995, www.astm.org

ASTM D3148-02 (2002) *Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression* (Withdrawn 2005), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, www.astm.org

ASTM D5084-03 (2003), *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, www.astm.org

ASTM D7263-09 (2009), *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org

Barnaba F., Caggiano T., Castorani A., Delle Rose M., Di Santo A.R., Dragone V., Fiore A., Limoni P.P., Parise M., Santaloia F. (2010), *Sprofondamenti connessi a cavità antropiche nella regione Puglia*, Proc. 2nd Int. Workshop "Catastrophic sinkholes in the natural and anthropogenic environment", Rome, December 3-4, 2009, pp. 653-672.

Bednarik M., Moshammer B., Heinrich M., Holzer R., Laho M., Rabeder J., Uhlir C., Unterwurzacher M. (2014), *Engineering geological properties of Leitha Limestone from historical quarries in Burgenland and Styria, Austria*. Eng. Geol. 176, 66-78.

Bieniawski Z.T. (1973), *Engineering classification of jointed rock masses*, Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs. 15, 335-344.

Bonardi G., D'argenio B., Perrone V. (1988), *Carta geologica dell'Appennino meridionale*. Scala 1:250.000, CNR/Cartografi a SELCA, Roma/Firenze.

Bosellini A., Bosellini F. R. Colalongo M. L., Parente M., Russo A., Vescogni A. (1999), *Stratigraphic architecture of the Salento coast from Capo d'Otranto to S. Maria di Lèuca (Apulia, Southern Italy)*, Riv. It. Paleont. Strat., 105 (3), 597-416.

Bossio A,, Foresi L.m., Margiotta S., Mazzei R., Salvatorini G., Donia F. (2006), *Stratigrafia neogenico-quaternaria del settore nord-orientale della provincia di Lecce (con rilevamento geologico alla scala 1:25.000)*, Geol. Rom. 39, 63-87.

Brady N.C., Weil, R.R. (1996), *The nature and properties of soil*. Prentice- Hall, International, Inc. London.

Broch E., Franklin A. (1972), *The Point Load Strength Test*, Int. Journal Rock Mech. Min. Sci. 9 (6), 669-697.

Calia A. Lettier M., Mecchi A.m., Quarta G. (2015), The role of the petrophysical characteristics on the durability and conservation of some porous calcarenites from Southern Italy, Geol. Soc. London, Spec. Publ. 416(1), 183-201.

Calia A., Tabasso M.L., Mecchi A.M., Quarta, G.(2014), *The study of stone for conservation purposes: Lecce stone (southern Italy),* Geol. Soc. London, Spec. Publ. 391(1), 139-156.

Cherubini C., Reina A., Bruno D. (2007), *Le rocce tenere del Salento: proposta di classificazione con l'uso delle caratteristiche tecniche e meccaniche*, Geologi e Territorio. 2, 37-47.

Choquette P.W., Pray L.C. (1970), *Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*, AAPG Bull. 54 (2), 207-250.

Ciaranfi N., Pieri P., Ricchetti G. (1988), *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centromeridionale)*, Mem. Soc. Geol. Ital. 41,449-460.

Ciantia M.O., Castellanza R. (2016), *Modelling weathering effects on the mechanical behaviour of rocks,* Eur. J. Civ. Eng. 20(9), 1054-1082.

D'Argenio B., Pescatore T., Scandone P. (1973), *Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania e Lucania)* In: "moderne vedute sulla geologia dell'Appennino", Accademia Nazionale dei Lincei Quaderni. 183, 49-72.

Davis J.C. (2002) *Statistics and data analysis in geology*, Wiley, New York.

Deere D.U., Miller R.P. (1966), *Engineering classification and index properties of rock*, Tech. Report Air Force Weapons Lab., New Mexico, pp. 65-116.

Dell'Aquila C., Carofiglio F. (1985), *Bari Extra Moenia – Insediamenti rupestri ed ipoge*i. II Schede, Quaderni monografici del Comune di Bari a cura dell'Assessorato alla cultura; n. 3; Mario Adda Editore, Bari; 86-99.

Dell'Aquila C., Greco A., Chiaffarata S. (2013), *Insediamenti ipogei e rupestri di Bari, 50 anni di studi e ricerche. Italia –Turchia*. Il vivere in grotta lungo le vie della Puglia e della Cappadocia. Mostra – Castello di Palagianello.1-3 maggio 2013.

Delle Rose M., Federico A., Parise M. (2004), *Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 747-755.

Dobereiner L., De Freitas M.H. (1986), *Geotechnical properties of weak sandstones*, Géotechnique. 36, 79-94.

Di Santo A., Fazio N.L., Fiore A., Lollino P., Luisi M., Miccoli M.N., Pagliarulo R., Parise M., Perrotti M., Pisano L., Spalluto L., Vennari C., Vessia G. (2016), *Sinkhole susceptibility in carbonate rocks of the Apulian karst (southern Italy),* Geophysical Research Abstracts, 18, Egu2016-4786, 2016.

Doglioni C., Mongelli F., Pieri P. (1994), *The Puglia uplift (SE Italy) An anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere*, Tectonics. 13, 1309-1321.

Dunham R. J. (1962), *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*, In: Ham, W. E. (ed.), Classification of carbonate rocks: AAPG Memoir 1, pp. 108-121.

Eramo G., Spalluto L., Laviano R. (2008), *Paving stones of the Via Traiana in Egnazia* (Brindisi, 2 nd A.D.): Provenance of stones, Rend. Online Soc. Geol. It. 3, 357-358.

Federazione Speleologica Pugliese (2017), *Catasto delle Grotte e delle Cavità Artificiali della Puglia,* http://www.catasto.fspuglia.it/df/dati.php (accessed 26 January 2017).

Festa V., Fiore A., Miccoli M.N., Parise M., Spalluto L. (2015), *Tectonics versus karst relationships in the Salento peninsula (Apulia, southern Italy): Implications for a comprehensive land-use planning,* In: Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape, pp. 493-496.

Festa V., Fiore A., Parise M., Siniscalchi A. (2012), *Sinkhole evolution in the Apulian karst of southern Italy: a case study, with some considerations on sinkhole hazard,* Journal of Cave and Karst Studies, 74, 137-147.

Fiore A., Parise M. (2012) *Sprofondamenti connessi a cavità di origine antropica in Puglia,* Geologia dell'Ambiente. 2, 41-45.

Gambini R., Tozzi M. (1996), *Tertiary geodynamic evolution of the Southern Adria microplate*, Terra Nova, 8, 593-602.

Geological Society Engineering Group Working Party (1970), *Report on the logging of rock cores for engineering purposes.* Q. J. Eng. Geol. 3, 1-24.

Germinario L., Andriani G.f., Laviano R. (2015), *Decay of calcareous building stone under the combined action of thermoclastism and cryoclastism*: A laboratory simulation. Construcion and Building Materials. 75, 385-394.

Heath R.C. (1983), *Basic ground-water hydrology*, USCS Water-Supply Paper 2220.

Hoek E. (2001), *Rock mass properties for underground mines*, in: Hustrulid, W.A., and Bullock, R.L. (Eds.), Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

Hoffman D., Niesel K. (1996), *Relationship between pore structure and other physico-technical characteristics of stone*. Proceedings 8th Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, Germany, pp. 461– 472.

Iannone, A., Pieri, P., (1983), *Rapporti fra i prodotti residuali del carsismo e la sedimentazione quaternaria nell'area delle Murge*. Riv. It. Pal. Strat. 88 (2), 319-330.

International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on standardization of laboratory and field tests (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 15(6), 319-368.

Kanji M.A (2014), *Critical issues in soft rocks*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (3), 186-195.

Lepore D., Spalluto L., Fiore A., Luisi M., Miccoli M.N. (2014), *Distribuzione delle cavità antropiche nel territorio pugliese in relazione alle caratteristiche litostratigrafiche delle calcareniti neogeniche*, Proc. 3rd Int. Workshop "Voragini in Italia". ISPRA, Rome, 8 May 2014.

Lollino P., Andriani G.F. (2017), *Role of Brittle Behaviour of Soft Calcarenites Under Low Confinement:* Laboratory Observations and Numerical Investigation, Rock Mech. Rock Eng. 50 (7), 1863-1882.

Lucia F.J. (1995), *Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization,* AAPG Bull. 79 (9), 1275-1300.

Luisi M., Di Santo A., Fiore A., Lepore D., Lollino P., Miccoli M.N., Parise M., Spalluto L. (2015), *3D finite element method (FEM) for stability assessment of anthropogenic cavities in the Apulia region: the case study of the underground quarry of San Procopio (Barletta, northern Murge),* Mem. Descr. Carta Geol. It. 99, 327-336.

Moretti M., Acquafredda P. (1998), *Applicazione dell'analisi d'immagine alla valutazione delle componenti tessiturali di alcune calcareniti plio-pleistoceniche*, Giornale di Geologia. 60, 304-306.

Parise M. (2015a), *Problematiche di dissesto idrogeologico connesse a cavità di origine naturale e antropica in Puglia*, Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia. XCIX (2015), 411-418.

Parise, M. (2015b), *A procedure for evaluating the susceptibility to natural and anthropogenic sinkholes*, Georisk. 9 (4), 272-285.

Pellicani R., Spilotro G., Guitiérrez F. (2017), *Susceptibility mapping of instability related to shallow mining cavities in a built-up environment,* Eng. Geol. 217, 81-88.

Pieri P., Festa V., Moretti M, Tropeano M. (1997), *Quaternary tectonic activity of the Murge area (Apulian foreland, southern Italy)*, Annali di Geofisica. 40,1395–1404.

Pieri P., Sabato L., Tropeano M. (1996), *Significato geodinamico dei caratteri deposizionali e strutturali della Fossa bradanica nel Pleistocene*, Mem. Soc. Geol. It. 51, 501-515.

Pieri P., Sabato L., Spalluto L., Tropeano M. (2011), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000*. Foglio 438 "Bari".

Plumb R.A., Herron S.L., Olsen M.P. (1992), *Identification of Clay Supported and Framework Supported Domains from Geochemical and Geophysical Well Log Data*, SPE Paper No. 24726 presented at the 1992 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, DC, Oct. 4-7.

Pomar L., Tropeano M. (2001), *The Calcarenite di Gravina Formation in Matera (southern Italy): new insights for coarse-grained, large-scale, cross-bedded bodies encased in offshore deposits,* AAPG Bull. 85, 661-689.

Ricchetti G., Ciaranfi N., Luperto Sinni E., Mongelli F., Pieri P. (1988), *Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'Avampaese Apulo*, Mem. Soc. Geol. It. 41, 57-82.

Ricchetti G. (2017), Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000. Foglio 536 "Ugento".

Sabatakakis N., Koukis G., Tsiambaos G., Papanakli S. (2008), *Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks*, Eng. Geol. 97, 80–90.

Sansò P., Gianfreda F., Leucci G., Mastronuzzi G. (2016), *Cliff evolution and late Holocene relative sea level change along the Otranto coast (Salento peninsula, southern Apulia, Italy),* GeoResJ. 9-12, 42-53.

Selli R. (1962), *Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia meridionale*, Mem. Soc. Geol. Ital. 3, 737–789.

Spalluto L., Pieri P., Sabato L., Tropeano M. (2010), *Nuovi dati stratigrafici e cartografici delle unità quaternarie del Foglio 438 "Bari" (Puglia - Italia meridionale)*, "Il Quaternario", 23 (1), 3-14.

Spilotro G., Pellicani R., Qeraxhiu L., Pizzo V. (2014), *La rete delle cave sotterranee di Altamura: fenomenologie di dissesto e mappatura della suscettibilità*, Geologia dell'Ambiente, 1/2014, 12-19. (1), 3-14.

Tropeano M., Pieri P., Moretti M., Festa V., Calcagnile G., Del Gaudio V., Pierri P. (1997), *Quaternary tectonics and seismotectonic features of the Murge area (Apulian foreland, SE Italy*), Alpine and Mediterranean Quaternary, 10, 543-548.

Tropeano M., Sabato L. (2000), *Response of Plio-Pleistocene mixed bioclastic-lithoclastic temperate-water carbonate systems to forced regressions: the Calcarenite di Gravina Formation, Puglia SE Italy,* In: Hunt, D., Gawthorpe, R.L. (Eds), Sedimentary Responses to Forced Regressions, Geol. Soc. of London, Spec. Publ. 172, 217-243.

Tropeano M., Sabato L., Pieri P. (2002), *Filling and cannibalization of a foredeep: the Bradanic Trough (Southern Italy)*, In: Jones, S.J., Frostick, L.E. (Eds) Sediment Flux to Basins: Causes, Controls and Consequences. Geol. Soc. of London, Spec. Publ. 191, 55-79.

Xu H., Zhou W., Xie R., Da L., Xiao C., Shan Y., Zhang H. (2016), *Characterization of Rock Mechanical Properties Using Lab Tests and Numerical Interpretation Model of Well Logs, Mathematical Problems* in Engineering, http://dx.doi.org/10.1155/2016/5967159.

Zimbardo M. (2016), *Mechanical behaviour of Palermo and Marsala calcarenites (Sicily),* Italy. Eng. Geol., 210, 57-69.

❑

Considerazioni sulla stabilità morfologica della cavità rocciosa che ospita l'eremo (IX sec) dedicato a San Michele Arcangelo – Monti Aurunci (Lazio Meridionale)

Considerations on the morphological stability of the rocky cave that hosts hermitage (IX Century) dedicated to San Michele Arcangelo – Monti Aurunci (Southern Lazio)

Paolo Miele
Libero professionista
E-mail: paolo.g.miele@gmail.com

Parole chiave (*key words*): Monti Aurunci (*Aurunci Mountains*), Livello ad Orbitolina (*Orbitolina level*), Eremo di S. Michele (*St. Michele Hermitage*), Stabilità morfologica (*Morphological stability*), ipogeo roccioso (*rocky hypogeum*)

RIASSUNTO

Nel Parco Naturale dei Monti Aurunci (Lazio Meridionale), in prossimità del versante meridionale di M. Altino e ad una quota di 1180 m s.l.m., è presente in corrispondenza di un'alta parete rocciosa, una profonda cavità di circa 850 m^3 scavata nella successione carbonatica cretacica. La cavità, realizzata verso la fine del 1800 e chiusa da una facciata in stile neogotico, ospita ora il caratteristico santuario di S. Michele Arcangelo. La storia di questo santuario tuttavia risale all'alto medioevo quando il culto era praticato in una chiesa posta, sempre nel medesimo sito, ma in ambiente epigeo. Tale chiesa andò in disgrazia a causa di gravi problematiche di carattere geomorfologico per risolvere le quali fu, appunto, traslata di alcuni metri nell'ipogeo appositamente realizzato. In questo lavoro sono state studiate le dinamiche geomorfologiche che hanno influito sulla scelta di abbandonare l'edificio sacro medioevale e di ricostruirlo in ipogeo. Il luogo oggi richiama periodicamente un notevole numero di fedeli e la valutazione della stabilità geomorfologica dell'ambiente ipogeo e dell'antistante sagrato, risulta opportuna sia per la conservazione del sito storico sia a garanzia dell'incolumità delle persone.

INTRODUZIONE

Nel Parco Naturale dei Monti Aurunci (Lazio Meridionale), in corrispondenza della parete rocciosa che costituisce il versante meridionale di M. Altino, è presente una antica struttura ipogea scavata nel calcare. L'ipogeo ospita il caratteristico santuario di S. Michele Arcangelo, meta di pellegrinaggio da parte di numerosi fedeli che, due volte l'anno, percorrono in processione l'erto sentiero che raggiunge il luogo sacro dal vicino paese di Maranola. Secondo quanto riportato nel Codex Diplomaticus Cajetanus - II, 830 (Riciniello, 1987) il luogo sacro era già presente alla data del 1 settembre 830 che è la prima data certa riferita alla sua esistenza. Sappiamo anche che nell'arco del periodo alto-medioevale fu un sito di notevole importanza il cui rettorato era affidato ad un abate (doc LXXII). Tuttavia, in seguito, il luogo dovette probabilmente cadere in disgrazia versando in condizioni di abbandono per molto tempo fino a quando, dopo la visita pastorale dell'arcivescovo Francesco Niola nel 1893, fu dato ordine di eseguirne la ristrutturazione. L'arcivescovo decise di ubicare la nuova costruzione in ambiente ipogeo, "*in modo tale da evitare i danni riportati dalla precedente chiesa, causati dalle acque di dilavamento, dalla caduta di rocce e porzioni di ghiaccio*". Fu dunque eseguito lo scavo dell'ipogeo, chiuso dalla facciata in pietra in stile neogotico, attualmente ancora presente e discretamente conservata. I lavori si conclusero il 5 agosto 1895.

È possibile dunque desumere che la chiesa medioevale fosse afflitta da seri problemi di instabilità geomorfologica, relativi alla parete rocciosa retrostante ed ai tetti da essa sporgenti, che cagionassero danni tali da condurre all'abbandono del luogo. A questo punto sarebbe lecito chiedersi quali fossero state le motivazioni della scelta originaria di ubicare il santuario proprio in quella posizione e soprattutto quali motivazioni avessero spinto l'arcivescovo Niola, pur consapevole delle gravi problematiche di carattere geomorfologico legate a quel sito, a deciderne la ricostruzione in loco anziché decretare la completa ricollocazione della chiesa in un posto più sicuro. Per quanto riguarda la scelta originaria del sito, purtroppo, è possibile fare solo delle congetture. Esistono alcune leggende e racconti popolari in merito, tuttavia è possibile esprimere la mera ipotesi che tale scelta sia stata fatta in base alla contingenza tra motivi mistico - strategici (legati alla particolare posizione del sito isolata, ma al contempo dominante rispetto al Golfo di Gaeta ed alle città costiere in un periodo in cui le stesse erano afflitte dalle incursioni saracene) e motivi legati a condizioni ambientali apparentemente favorevoli quali la presenza di una ricca sorgente, la disponibilità di una cengia sufficientemente ampia da ospitare una chiesa e al contempo incassata nella parete e dunque nascosta alla vista dei nemici. In quel periodo infatti in tutto il basso Lazio erano presenti insediamenti più o meno stabili di truppe saracene che, facendo base nella vicina Piana del Garigliano, effettuavano frequenti scorrerie lungo la costa laziale risalendo fino alla stessa Roma (Tucciarone, 1991; Fedele, 1899; Gabrielli & Scerrato, 1985). Per quanto riguarda invece il secondo punto, quello relativo alla scelta di ricostruire caparbiamente la chiesa nel medesimo sito, più di mille anni dopo, rendendola peraltro raggiungibile da un gran numero di fedeli attraverso l'apertura di una strada appositamente realizzata, non possiamo che ipotizzare motivazioni legate non solo alla devozione popolare, ma anche a probabili scelte di tipo politico - strategico, in un periodo storico piuttosto "caldo" della storia del nostro Paese, il periodo post unitario, in un clima di cambiamento degli equilibri politici tra il neonato regno d'Italia ormai unificato e lo stato della chiesa il cui potere temporale risultava ormai fortemente in calo. Tutto ciò, peraltro, in una terra di confine ancora affetta dal fe-

nomeno sociale del brigantaggio. L'autorità ecclesiastica ripose dunque la propria fiducia nel progettista dell'opera, l'Ing. Silvio Forte, incaricato di ricostruire la chiesa in ambiente ipogeo, traslando il sedime di pochi metri rispetto all'ubicazione originaria. È comunque certo che, in qualche misura, chi ha operato le scelte di carattere strategico e politico che hanno riguardato quel sito, ha dovuto inevitabilmente tener conto delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche del luogo. L'analisi di tali caratteristiche in relazione alla storia dell'opera stessa, costituisce l'oggetto di questo lavoro ed è finalizzata alla comprensione della misura in cui certe scelte di carattere urbanistico possono essere state influenzate nel passato dall'assetto geologico del territorio.

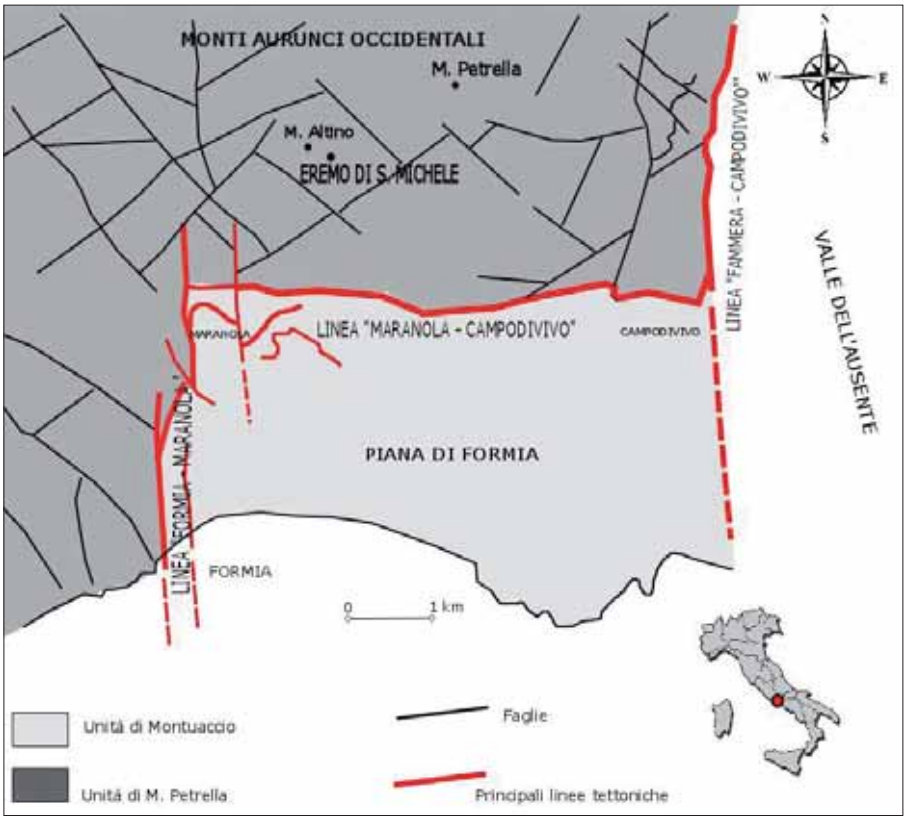


Figura 1 – Schema strutturale (modificato da Naso & Tallini, 1993) dell'area a cavallo tra la piana di Formia, i Monti Aurunci Occidentali e la Valle dell'Ausente

INQUADRAMENTO GENERALE

Il sito in esame si colloca in corrispondenza di una potente successione cretacica in facies di piattaforma carbonatica, dislocata a seguito delle fasi legate alla strutturazione della catena dei Volsci. In particolare il settore di nostro interesse è collocato nel settore dei Monti Aurunci occidentali, separato sin dal Senoniano dal suo corrispondente orientale. Tale settore risulta peraltro ben definito verso sud dal contatto con la Piana di Formia, lungo la linea tettonica Maranola – Campodivivo (fig.1).

Tale linea, orientata in direzione E – O, dopo aver rappresentato nel Miocene superiore il fronte del thrusting verso NE di questa porzione della catena dei Volsci, lungo il quale si accavallava la scaglia tettonica di "Montuaccio" su quella di "M. Petrella" (Naso & Tallini, 1993), nel Messiniano subisce una inversione della propria cinematica. La commutazione da fronte di accavallamento a basso angolo a faglia diretta con rigetto finale maggiore di 1000 m progressivamente produce, tra la fine del Messiniano, per tutto il Pliocene e fino al Quaternario, versanti di faglia piuttosto acclivi che delimitano a monte la neonata piana di Formia (Naso & Tallini, 1993). A tale movimento di ribassamento della piana, risulta coerente la cinematica della faglia "M. Fammera – Campodivivo" (Cerisola & Montone, 1992), e la linea "Formia – Maranola", orientate invece secondo una direttrice N – S e che definiscono fisiograficamente questo gruppo montuoso rispettivamente nelle sue propaggini orientali e occidentali (Montone & Tallini,1994). Il settore a tergo di tali versanti, caratterizzato da elementi tettonici orientati in direzione NE – SO e NO – SE, risulta invece meno articolato dal punto di vista morfologico ed è rappresentato da un sistema di pianori intensamente carsificati. La successione litologica coinvolta è rappresentata da calcari e calcari dolomitici cenomaniano – neocomiani, nettamente suddivisi in strati e/o bancate di spessore variabile tra 0.3 – 0.6 m ed 1.0 m – 2.0 m. Questa risulta interrotta, nella sua apparente monotonia, da uno strato di potenza generalmente compresa tra 1.5 m e 2.5 m e costituito da marne ed argille marnose di colore grigio – verdastro, spesso di aspetto conglomeratico, talvolta ricco di Orbitolina sp. e datato Aptiano. La giacitura della stratificazione presenta una direzione orientata NE

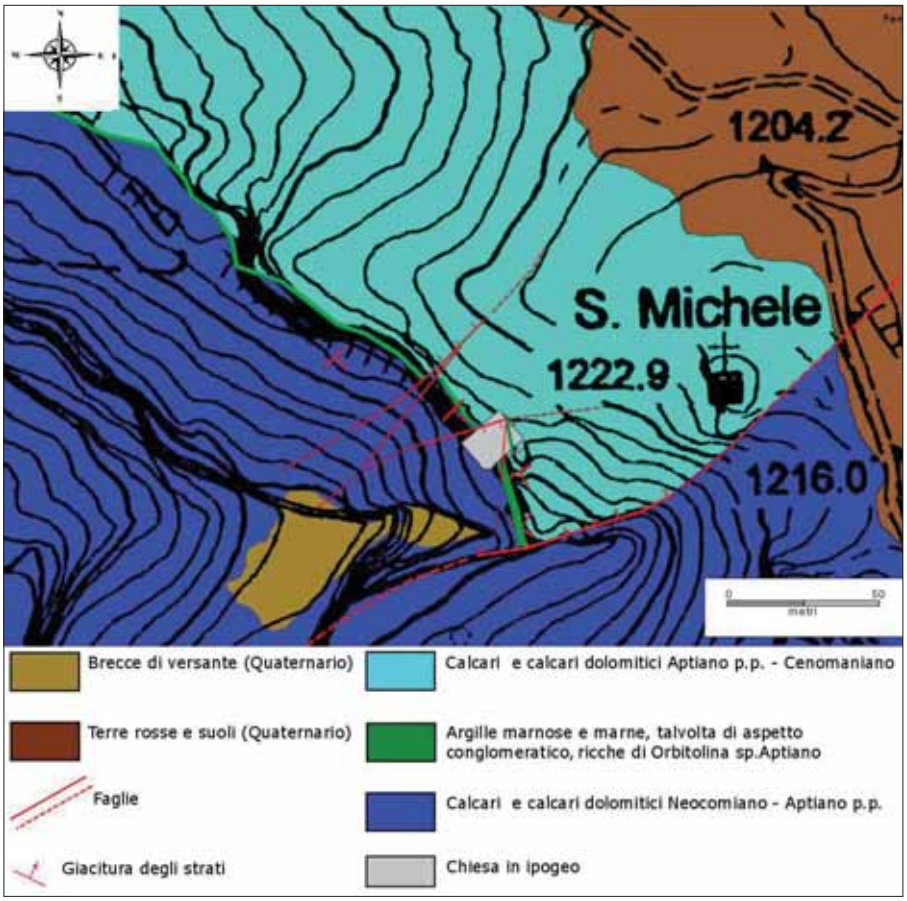


Figura 2 – Carta geologica dell'area in esame

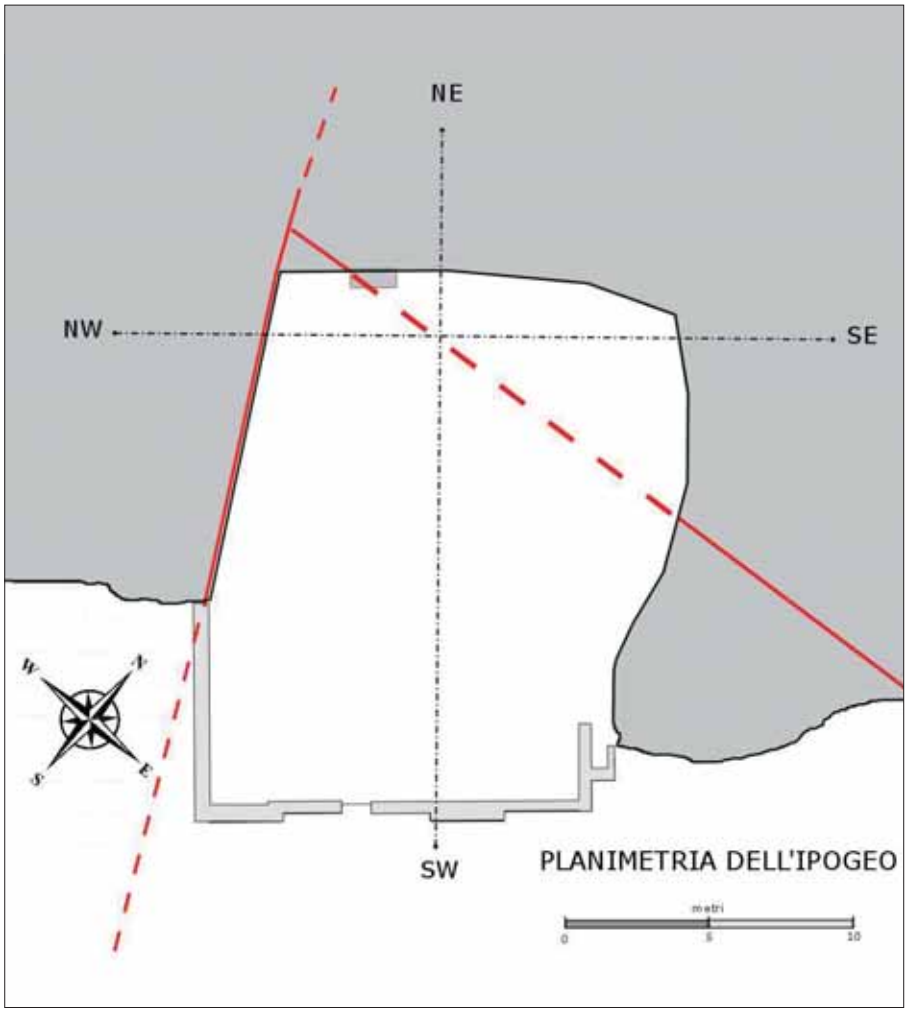


Figura 3 – Planimetria dell'ipogeo con la traccia delle sezioni geologiche. Alla pianta sono stati sovrapposti gli elementi tettonici principali (in rosso)

– SO con immersione a basso angolo verso SE. Risultano inoltre presenti alcuni elementi tettonici che sono stati in grado di controllare la morfologia del massiccio. Una faglia con giacitura N70°E 75°NW, affiorante a SE del sito, lo ha ribassato con un rigetto di alcune decine di metri rispetto al settore della vetta del M. Redentore, come dimostrato dalle dislocazioni subite dal "livello ad Orbitolina" stesso. Altri elementi strutturali inoltre, orientati con direzione NE – SO ovvero N- S ed immersione ad alto angolo (o sub verticali) e cinematismo da inverso a transpressivo, avrebbero dissecato il sito determinando ispessimenti localizzati di tale livello marnoso. Come si vedrà più avanti tali ispessimenti provocati da cause tettoniche favoriranno lo scavo dell'ipogeo in oggetto influenzando la scelta dell'ubicazione dello stesso (*Figg.* da 2 a 6).

Il sito studiato, è ubicato in corrispondenza di un'ampia cengia sporgente dal versante sud orientale della spalla Est del massiccio del M. Altino (1365 m s.l.m.). Tale propaggine, nota con la toponomastica informale di "M. Redentore" (1253 m s.l.m.), risulta morfologicamente caratterizzato dalla sua tipica forma "a cupola" conferita dal contesto tettonico locale e dall'erosione. Mentre il versante settentrionale e nord-orientale sfumano dopo poche decine di metri di dislivello in un vasto altipiano carsico, i versanti rivolti verso i quadranti meridionali sono molto ripidi e spesso caratterizzati da pareti verticali in roccia, eventualmente interrotte solo da cenge, che si sviluppano per centinaia di metri di dislivello. Le pendenze di tali versanti e l'elevato dislivello sotteso tra gli altipiani carsici a tergo ed il piede del pendio, sono naturalmente legati a cause tettoniche riconducibili direttamente alla strutturazione della piana di Formia lungo la linea Maranola – Campodivivo della quale si è già parlato. Ad una quota di circa 1180 m s.l.m. dunque, al piede di una parete verticale di circa 64 m, è presente la cengia, ampia circa 13 m, sulla quale è individuabile l'eremo in oggetto (*Figg.*7 e 8). Nel punto in cui questo è collocato, la parete risulta concava sia per quanto riguarda il profilo trasversale sia per quanto è osservabile in pianta. La concavità del profilo della parete è legata prevalentemente a processi di erosione differenziale. Il tratto di parete che sovrasta la cengia inoltre è caratterizzato dalla presenza di un sistema di tetti, aggettanti anche per diversi metri.

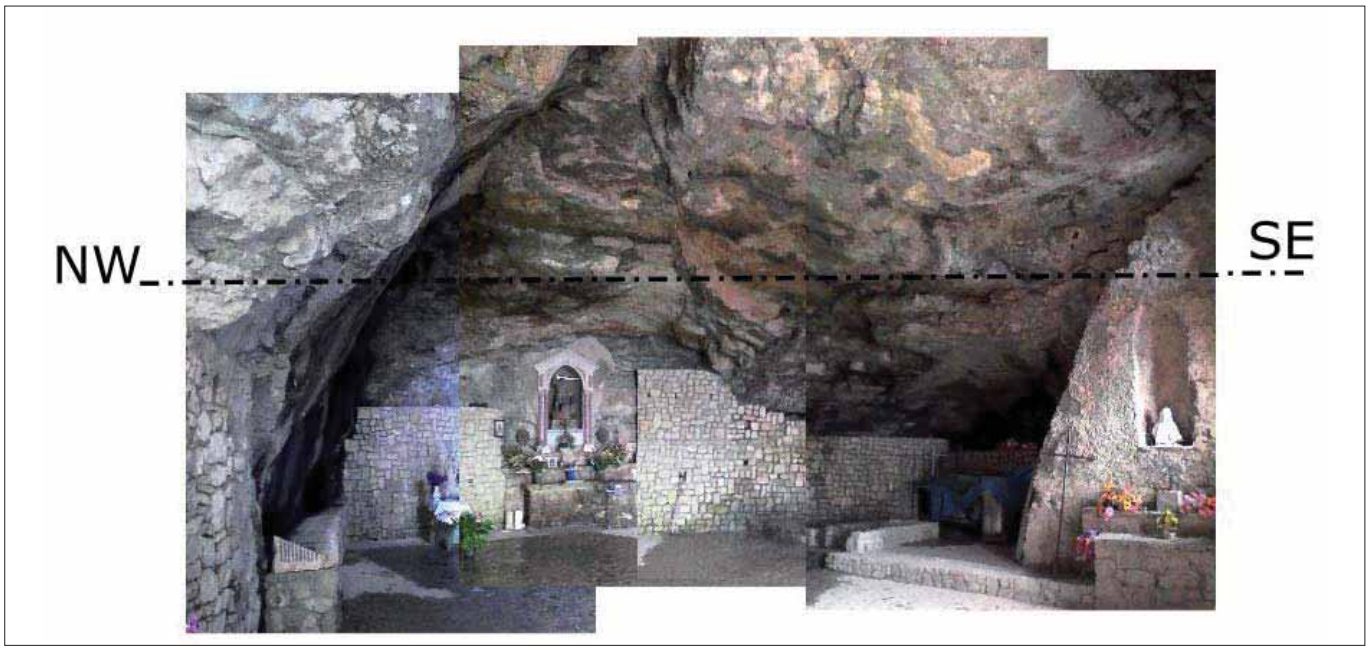


Figura 4 – Immagine fotografica dell'interno dell'ipogeo. L'immagine corrisponde alla sezione NO – SE

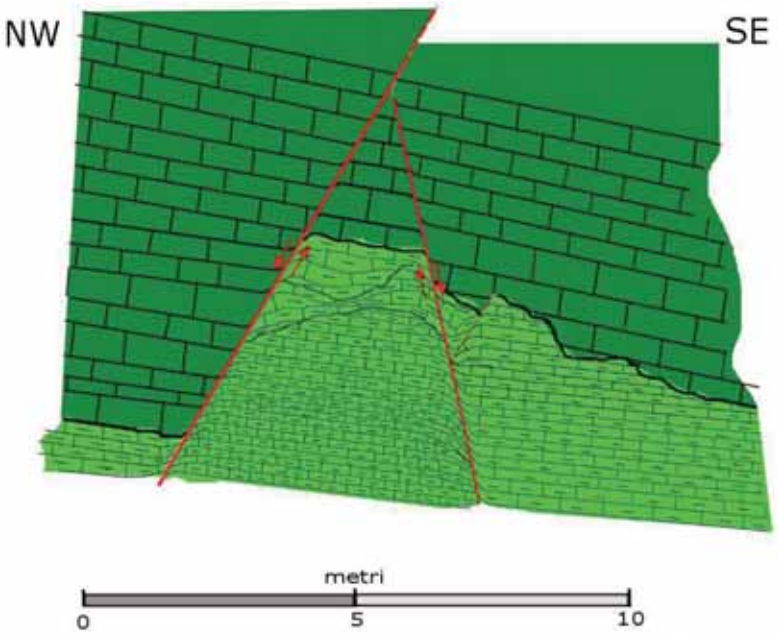


Figura 5 – Sezione geologica NO – SE. 1:Calcari e sub. Calcari dolomitici nettamente stratificati in strati/bancate da 0.4 – 0.8 m con Diceratidae e rare Nerineidae. Attribuiti all'intervallo Aptiano – Neocomiano. La roccia può presentarsi localmente cataclasata in prossimità delle discontinuità mesostrutturali. 2: Calcari marnosi e marne, talvolta passanti ad argille marnose, di colore dal giallastro al verdastro, al marrone-ocra. Presentano generalmente un aspetto "caotico"(talvolta legato ai processi tettonici) da conglomeratico a laminare e lateralmente discontinuo. Lo spessore in affioramento (dunque parziale) risulta di circa 2 – 4 m. Presenza, a tratti abbondante, di Orbitolina sp. L'unità è attribuita all' Aptiano. 3: Faglie. Le frecce indicano il cinematismo. La parte tratteggiata corrisponde a tratti di faglia ipotizzati ma non rilevati

1- Calcari e subord. calcari dolomitici nettamente stratificati in strati/bancate da 0.4 - 0.8 m con Diceratidae e rare Nerineidae. Attribuiti all'intervallo Aptiano - Neocomiano. La roccia può presentarsi localmente cataclasata in prossimità delle discontinuità mesostrutturali.

2- Calcari marnosi e marne, talvolta passanti ad argille marnose, di colore dal verdastro al grigiastro, al marrone - ocra. Presentano generalmente un aspetto "caotico" (talvolta legato ai processi tettonici) da conglomeratico a laminare e lateralmente discontinuo. Lo spessore in affioramento (dunque parziale) risulta di circa 2 - 4 m. Presenza, a tratti abbondante, di Orbitolina sp. L'unità è attribuibile all'Aptiano.

3 - Faglie. Le frecce indicano il cinematismo. La parte tratteggiata corrisponde a tratti di faglia ipotizzati ma non rilevati.

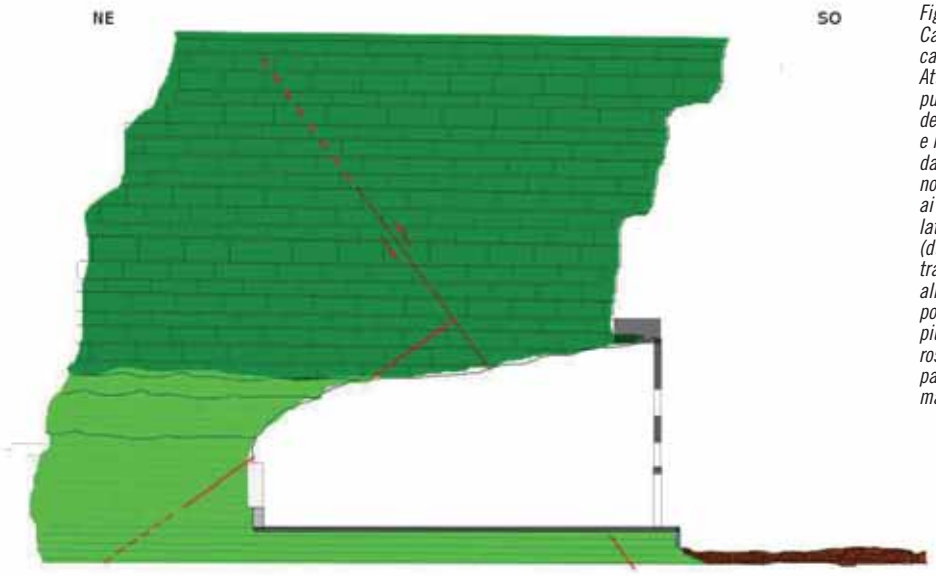


Figura 6 – Sezione geologica NE – SO. 1:Calcari e sub. Calcari dolomitici nettamente stratificati in strati/bancate da 0.4 – 0.8 m con Diceratidae e rare Nerineidae. Attribuiti all'intervallo Aptiano – Neocomiano. La roccia può presentarsi localmente cataclasata in prossimità delle discontinuità mesostrutturali. 2: Calcari marnosi e marne, talvolta passanti ad argille marnose, di colore dal giallastro al verdastro, al marrone-ocra. Presentano generalmente un aspetto "caotico"(talvolta legato ai processi tettonici) da conglomeratico a laminare e lateralmente discontinuo. Lo spessore in affioramento (dunque parziale) risulta di circa 2 – 4 m. Presenza, a tratti abbondante, di Orbitolina sp. L'unità è attribuita all' Aptiano. 3: Coperture recenti (parzialmente di riporto) costituite prevalentemente da clasti carbonatici piuttosto eterometrici e non evoluti in matrice fine (terre rosse). 4: Faglie. Le frecce indicano il cinematismo. La parte tratteggiata corrisponde a tratti di faglia ipotizzati ma non rilevati

1- Calcari e subord. calcari dolomitici nettamente stratificati in strati/bancate da 0.4 - 0.8 m con Diceratidae e rare Nerineidae. Attribuiti all'intervallo Aptiano - Neocomiano. La roccia può presentarsi localmente cataclasata in prossimità delle discontinuità mesostrutturali.

2- Calcari marnosi e marne, talvolta passanti ad argille marnose, di colore dal verdastro al grigiastro, al marrone - ocra. Presentano generalmente un aspetto "caotico" (talvolta legato ai processi tettonici) da conglomeratico a laminare e lateralmente discontinuo. Lo spessore in affioramento (dunque parziale) risulta di circa 2 - 4 m. Presenza, a tratti abbondante, di Orbitolina sp. L'unità è attribuibile all'Aptiano.

3- Coperture recenti (parzialmente di riporto) costituite prevalentemente da clasti carbonatici piuttosto eterometrici e non evoluti in matrice fine (terre rosse).

4- Faglie. Le frecce indicano il cinematismo. La parte tratteggiata corrisponde a tratti di faglia ipotizzati ma non rilevati.



Figura 7 – Immagine fotografica dell'eremo e dei tetti rocciosi incombenti sul sito



Figura 8 – Immagine fotografica dell'eremo, nel contesto generale della parete rocciosa nella quale è stato scavato l'ipogeo

METODOLOGIA DI LAVORO

Come abbiamo visto la storia del luogo del quale ci stiamo occupando è stata direttamente influenzata da una non ben definita instabilità geomorfologica. Per tale motivo è stata effettuata una valutazione analitica dei rapporti tra la morfologia del sito e le condizioni geologico – strutturali al contorno. Tale valutazione è stata dunque svolta tanto per l'ipogeo quanto per l'area ad esso prospiciente, sottoposta ad un sistema di tetti rocciosi sporgenti. Tale area che rappresenta il sito di allocazione originario della chiesa, attualmente ne costituisce il sagrato ed ospita periodicamente centinaia di fedeli durante le tradizionali manifestazioni religiose. La prima fase di questa ricerca è stata finalizzata a stabilire quale tipologia di dissesto potesse eventualmente affliggere il sito all'epoca della sua realizzazione e per tutto il periodo di esercizio. Tale informazione risulta infatti fondamentale nella definizione del metodo più appropriato per svolgere le considerazioni successive.

Una volta escluso, a seguito delle attività di rilevamento geomorfologico in campagna ed attraverso la disamina di immagini ortofotografiche, che un movimento di massa con superficie di distacco profonda, si sia verificato in epoca storica ed abbia effettivamente potuto rappresentare la causa dell'abbandono del luogo sacro, e partendo inoltre dalle testimonianze documentali disponibili, riferite a quanto asseriva alla fine del XVII secolo l'Arcivescovo Niola che identificava nelle "….*acque di dilavamento, …. caduta di rocce e porzioni di ghiaccio…",* la causa del degrado della chiesa medioevale, è stata condotta in campagna, a riscontro di quanto riportato dal Niola, la ricerca dei corpi di frana e delle nicchie di distacco attribuibili ad eventi di crollo – ribaltamento occorsi nel passato. Tale ricerca ha effettivamente consentito il riscontro con quanto riportato nelle cronache. In particolare, la morfologia delle falde di accumulo del materiale lapideo, la morfologia la morfometria e lo stato di evoluzione dei blocchi che ne fanno parte, risultano compatibili con un processo di accumulo progressivo, avvenuto a seguito di piccoli distacchi verificatisi praticamente senza soluzione di continuità fino ai giorni nostri. Inoltre è stato rilevato che le volte dei tetti incombenti sulla cengia che funge da sagrato presentano nicchie delimitate da giunti netti (fratture che intercettano i giunti di strato), di morfologia e dimensioni compatibili con blocchi presenti sul piano di calpestio, che compongono le falde di detrito stesse, giacenti sul pendio immediatamente a valle. Non sono presenti speleotemi di alcun tipo nonostante l'abbondante percolazione dai giunti di fatturazione che attraversano la volta rocciosa. Se l'assenza di speleotemi all'interno dell'ipogeo è in qualche misura giustificata dalla sua recente escavazione, tale tesi non è invece valida per i tetti incombenti sul sagrato, per i quali si possono ipotizzare processi morfogenetici piuttosto rapidi. In altre parole, a seguito delle prime considerazioni, è plausibile che meccanismi di distacco progressivo di singoli blocchi rocciosi, di volumetria dell'ordine del decimetro cubo fino al metro cubo, si siano ripresentati periodicamente per tutto l'intervallo temporale considerato. Per quanto riguarda l'ipogeo, invece, sulla volta non sono presenti giunti esposti di neo formazione (quindi nicchie di distacco recenti) e la morfologia generale della stessa risulta piuttosto dissimile alla morfologia tendente all'arco ogivale, tipica della volta di cavità che impegnano ammassi rocciosi stratificati ed evolvono verso l'alto per crolli successivi (Goodman, 1976). A seguito di tali considerazioni, abbiamo così deciso di ricostruire un modello morfoevolutivo del sito, facendo riferimento ad alcuni metodi di verifica di stabilità degli ipogei che impegnano i corpi rocciosi stratificati, e che contemplano il calcolo speditivo di stabilità relativo a quella tipologia di dissesto che sembrerebbe aver interessato il sito durante i suoi trascorsi storici. Tali metodologie, funzionali dunque a verificare sostanzialmente scivolamento, ribaltamento e distacco di blocchi rocciosi da una volta e/o da una parete rocciosa, vengono di seguito brevemente descritti.

a) Possibilità di ribaltamento e/o scivolamento di blocchi rocciosi dal ciglio della parete incombente sul sito.

La possibilità di ribaltamento è stata verificata secondo il modello del collasso per toppling (Goodman, Asce, & Bray, 1976; Goodman, Shi,1985; Majdi, Amini, 2011). Questo modello di rottura coinvolge ammassi rocciosi nei quali la presenza di giunti, primari e/o secondari, consentono la definizione di conci rocciosi che, in determinate condizioni,possono ribaltarsi verso valle. In estrema sintesi dato un blocco roccioso soggetto alla forza peso, si verifica il ribaltamento se y/Dx > cot α, dove y è l'altezza del blocco, Dx la sua larghezza ed α l'angolo di inclinazione della superficie di appoggio. Allo stesso modo sarà possibile uno scivolamento lungo una superficie piana (ad esempio un giunto di strato) con inclinazione α qualora tan $\alpha > \mu$, dove μ è l'angolo d'attrito. Nel grafico riportato in *Fig.* 9 (Hoek & Bray, 1974; Ashby, 1971; Goodman, Asce, & Bray, 1976), vengono schematizzati in un abaco i rapporti tra questi tre parametri, fissato un certo angolo d'attrito, al fine di collocare le condizioni del corpo roccioso all'interno del campo di stabilità ovvero di instabilità per toppling e/o per scivolamento.

Qualora invece l'intersezione delle famiglie di giunti di discontinuità strutturale formino un cuneo roccioso tetraedrico, è possibile che la superficie di "sliding" anziché essere di tipo planare sia di tipo carenieforme, rappresentata cioè da due piani che si intersecano lungo una retta più o meno inclinata. Se tale retta risulta immergente a franapoggio con un angolo (*plunge*) minore rispetto a quello del pendio e al contempo questo risulti maggiore rispetto all'angolo di attrito lungo le superfici di giunto che delimitano il cuneo, allora risulta possibile che tale blocco inizi a scivolare verso valle. Il coefficiente di sicurezza sarà calcolabile in base alla seguente equazione (Hoek & Bray, 1981; Tanzini, 2001 b):

$$F = [3/(\gamma H)] * (c_a X + c_b Y) + A \tan f_a + B \tan f_b \quad \text{[equazione 1]}$$

Dove:
γ è il peso di volume dell'ammasso roccioso
H è l'altezza del blocco roccioso
f_a e c_a, f_b e c_b sono l'angolo d'attrito e la coesione rispettivamente lungo i giunti a e b che delimitano il cuneo
A, B, X ed Y sono invece dei fattori calcolati sulle proiezioni stereografiche.

b) Possibilità di collasso per schiacciamento, ribaltamento e flessione orizzontale da una volta stratificata.

Il metodo di verifica adottato per questo lavoro, applicabile alla volta di cavità in corpi rocciosi stratificati con giacitura sub orizzontale, assimila semplicisticamente gli strati rocciosi in volta ad una trave continua dal comportamento elastico. La trave tende dunque a rompersi a flessione sotto carico. Il modello di collasso più semplice ascrivibile a tale approccio, si applica in realtà a corpi rocciosi pressoché indisturbati. Nel caso specifico, a causa del grado di fatturazione dell'ammasso roccioso, faremo riferimento a due modelli di rottura che rappresentano delle varianti di questo. Per quanto riguarda la valutazione della stabilità della volta dell'ipogeo, abbiamo adottato il modello di rottura della "trave a conci". Secondo tale modello, la trave continua di riferimento di cui sopra risulterebbe suddivisa in conci discreti, delimitati da giunti di frattura. Nella volta fratturata tuttavia verrebbe a crearsi un arco di compressione che, se di adeguato spessore, è in grado di conferire autoportanza alla stessa trasmettendo i carichi verticali sulle pareti di spalla (Diederichs & Kaiser, 1999 a,b; Brady & Brown, 2005; Tsesarsky, 2012; Lollino & Parise, 2014). Lo spessore dell'arco di compressione è pari ad Nh, dove 0.5<N<0.75 in cui si ha 0.75 per condizioni di equilibrio stabile e 0.5 per condizioni critiche. Il raggiungimento dell'equilibrio limite si ha quando il momento flettente generato nella trave è eguagliato da un momento resistente (Diederichs & Kaiser, 1999 a). A superamento dell'equilibrio limite il processo ipotizzabile è il ribaltamento per flessione orizzontale ovvero fenomeni di schiacciamento, con conseguente collasso dei conci che compongono la volta. In modo più specifico è possibile calcolare un coefficiente di sicurezza relativo alla rottura per schiacciamento, con la seguente relazione:

$$Fs = s_c / f_{max} \quad \text{[equazione 2]}$$

Dove:
s_c: resistenza a compressione dell'ammasso roccioso
f_{max}: tensione di compressione massima agente sulla "trave".

Il secondo fattore è ottenuto attraverso la seguente equazione:

$$f_{max} = \gamma \cos \alpha \, L^2 / 4NZ \quad \text{[equazione 3]}$$

Dove:
γ: peso di volume dell'ammasso roccioso
α: l'immersione degli strati rocciosi
L: la lunghezza del concio di trave
N: il coefficiente adimensionale di cui sopra
Z:la lunghezza del braccio del momento

Qualora volessimo invece verificare il coefficiente di sicurezza relativo al collasso per ribaltamento orizzontale, avremmo la seguente relazione:

$$Fs = [(f_{max} N h Z)/2]/[(\gamma h L^2)/8] \quad \text{[equazione 4]}$$

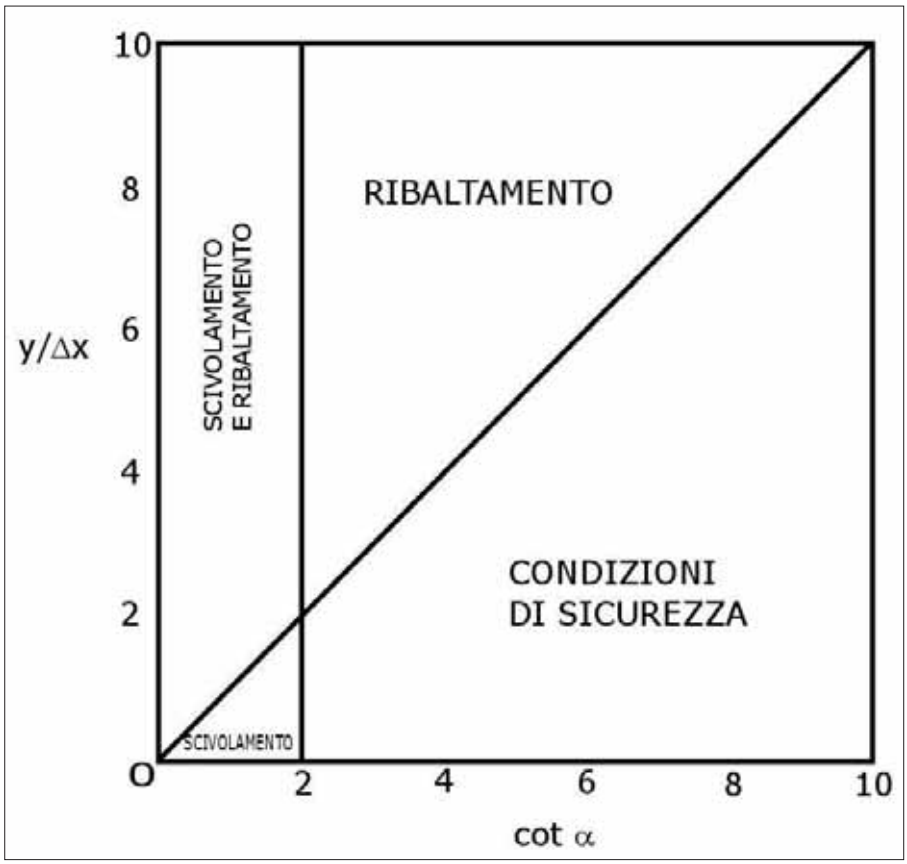


Figura 9 – Il grafico (da Goodman Asce, & Bray, 1976) riporta le combinazioni di valori y/Dx e cot α, per i quali è possibile ricadere, per un determinato valore dell'angolo d'attrito, in condizioni di dissesto per scivolamento e/o ribaltamento di un blocco roccioso

Un ulteriore modello di rottura, che deriva anch'esso dal modello della trave continua, è quello della trave a sbalzo, che abbiamo adottato per la verifica di stabilità dei tetti rocciosi. In questo lo strato di roccia, ridotto ad un concio di spessore h e lunghezza L, misurata come distanza compresa tra spalla e testata, è vincolato ad una sola estremità (la spalla appunto). Il coefficiente di sicurezza sarà dato dunque dal rapporto tra resistenza massima e sollecitazione di taglio agenti nel punto in cui il concio risulta vincolato all'ammasso roccioso (spalla).

Lo sforzo di taglio massimo che agisce sul concio, è dato dalla seguente equazione:

$s_{tmax} = 3gzL^2/h^2$ [equazione 5]

Esso sarà evidentemente funzione diretta della tensione verticale litostatica e della lunghezza del concio stesso, mentre sarà funzione inversa del suo spessore.

La massima resistenza al taglio che coinvolge la roccia in condizioni di rottura (ricordiamo che la rottura avviene in corrispondenza del punto di vincolo con l'ammasso roccioso) è stata calcolata attraverso la ben nota relazione di Mohr – Coulomb. Nel momento in cui resistenza e sforzo di taglio si eguagliano, si incorre nelle condizioni di equilibrio limite e quindi della rottura. Nel calcolo degli sforzi di taglio agenti, le variabili in gioco (consideriamo infatti costante la pressione litostatica) sono rappresentate dalla lunghezza del concio aggettante ed il suo spessore. A parità di lunghezza L potremo definire uno spessore critico, al di sotto del quale, tenuti costanti tutti gli altri parametri considerati, lo strato si rompe. Lo spessore critico è calcolato con la seguente equazione:

$h_{crit} = L\,[(3gz)/s_{tlim}]^{0.5}$ [equazione 6]

Dove:
γ: peso di volume della roccia
z: spessore della roccia sopra la volta
L: lunghezza del concio a sbalzo

Allo scopo di rendere possibile la corretta interpretazione di un eventuale meccanismo di collasso in volta, sono stati acquisiti dati in campagna attraverso il rilevamento strutturale del corpo roccioso su alcune stazioni significative. La successiva elaborazione dei dati è stata svolta avvalendoci della metodologia afferente al criterio di rottura di Hoek-Brown (Hoek & Brown,1980; Hoek, Bray,1981; Hoek, 1983; Tanzini, 2001 a; Tanzini, 2001 b; Hoek, Carranza – Torres, Corkum, 2002; Kim, Kaiser, 2009; Andriani, 2015 a) che ha consentito di caratterizzare i corpi rocciosi ottenendo i parametri geotecnici necessari alle elaborazioni numeriche.

VERIFICA DELLA PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA DEL SEDIME DELLA CHIESA MEDIOEVALE

Come già detto tale verifica viene effettuata allo scopo di valutare la pericolosità geomorfologica relativa al settore antistante l'ingresso all'ipogeo, che rappresentava il sedime dell'edificio alto-medioevale ed oggi costituisce di fatto il sagrato della chiesa ipogea. Tale verifica è stata svolta sia rispetto al modello della "trave a sbalzo", ipotizzando la possibilità di distacco di blocchi dai tetti rocciosi aggettanti sull'area, sia rispetto alla movimentazione di materiale dal ciglio della parete sovrastante il sito, secondo meccanismi di ribaltamento e/o di scivolamento di blocchi e cunei rocciosi.

a) Rispetto alla verifica della pericolosità riferita al distacco di materiale dai tetti rocciosi incombenti - modello della "trave a sbalzo". Per il rilevamento dei dati geostrutturali è stata individuata una stazione di rilevamento (stazione n.1) corrispondente ad un settore di parete rocciosa posto al di sopra della facciata della chiesa, per il quale si ha:

Tabella 1 – Sintesi dei dati strutturali riferiti al criterio di rottura di Hoek-Brown rilevati per la stazione di rilevamento n. 1

GSI	75
Mi	8
D	0
Mb	3.276
s	0.0622
a	0.5009
C'	13.59 MPa
ϕ'	35.6°
σ_c	43.53 MPa

A seguito delle verifiche effettuale, è stato possibile calcolare il valore del coefficiente di sicurezza F associato allo schiacciamento e/o al ribaltamento dei conci rocciosi:

$F = s_{tr}/s_{tmax}$

dove s_{tmax} rappresenta lo sforzo di taglio, e s_{tr} è la resistenza al taglio.

Abbiamo ritenuto particolarmente utile plottare l'inviluppo dei punti associati ad F = 1 (linea dell'equilibrio limite), nel grafico L/h_{crit}. In altre parole il grafico rappresenta le coppie di combinazioni all'equilibrio limite tra L (lunghezza sporgente del tetto roccioso dalla testata alla spalla) e lo spessore critico di tale concio roccioso (h_{crit}), dove quest'ultimo parametro è calcolato con l'equazione 6:

Il grafico che viene presentato nella figura 10 rappresenta l'inviluppo relativo ai tetti più alti (quindi Z = 20 m), mentre quello successivo, di figura 11 si riferisce ai tetti più bassi (Z = 64 m).

Il grafico si legge tenendo conto che l'area posta al di sotto della curva è associata a valori F>1 e viceversa l'area al di sopra della retta è associata a F<1. A questo punto possiamo confrontare i grafici con i parametri morfologici rilevati in campagna, con $0.4 < h < 0.6$ come classe di spessore più rappresentata sul sito,e $1.0\ m < L < 1.5\ m$ come classe di lunghezza associata a frequenza maggiore. In questo caso osserviamo che i tetti inclusi in queste classi dimensionali risultano per lo più al di sopra delle condizioni di equilibrio limite e sembrerebbero dunque aver raggiunto una morfologia di equilibrio. Sono tuttavia presenti tetti di dimensioni molto maggiori, con L compreso tra 4 m e 5 m. Per questi si calcola un valore h_{crit} compreso tra 1.27 m e 1.59 m rispettivamente, sotto il quale il tetto risulterebbe instabile. La misurazione degli spessori effettivi delle bancate in corrispondenza di questi ultimi tetti in effetti restituisce valori di h prossimi a quelli critici ($h \approx h_{crit}$). Riscontrata dunque una generale e sostanziale stabilità di questi tetti rocciosi, riteniamo che essa rappresenti una condizione temporanea, una fase di un modello morfoevolutivo che chiama in gioco l'effetto del crioclastismo agente nei giunti di discontinuità strutturale. Nonostante il basso grado di disturbo dell'ammasso roccioso nelle stazioni di rilevamento considerate, sussistono comunque sistemi secondari di fratture che, nelle condizioni attuali dell'ammasso roccioso, non risultano dotate di continuità e persistenza tale da rompere i ponti di roccia e pertanto la porzione aggettante dello strato roccioso, che costituisce il tetto, può giovarsi di una resistenza al taglio data da tutto lo spessore dello strato o perlomeno da una sua porzione h' tale che $h' > h_{crit}$. Tuttavia il sito, abbondantemente percorso dalla percolazione, durante il periodo invernale è regolarmente sottoposto a temperature in grado di far gelare l'acqua percolante nei giunti. Tale fenomeno risulterà in grado di provocare la condizione in cui $h' \leq h_{crit}$. In questo caso la resistenza al taglio si riduce al punto tale da far sì che si verifichi il distacco del blocco roccioso. Inoltre, se consideriamo che il valore h_{crit} è funzione diretta di L (quindi tanto maggiore è L tanto maggiore dovrà essere lo spessore minimo dello strato), la quantità di cicli di gelo-fusione, e quindi il numero di anni necessari ad ottenere il distacco del tetto roccioso (o di una sua porzione), dipenderà da quanto il giunto di frattura risulterà distante dalla spalla della "trave a sbalzo". La spaziatura dei giunti dunque, in questo caso, giocherà un ruolo fondamentale. Secondo il meccanismo morfoevolutivo riconosciuto possiamo ipotizzare una ciclicità

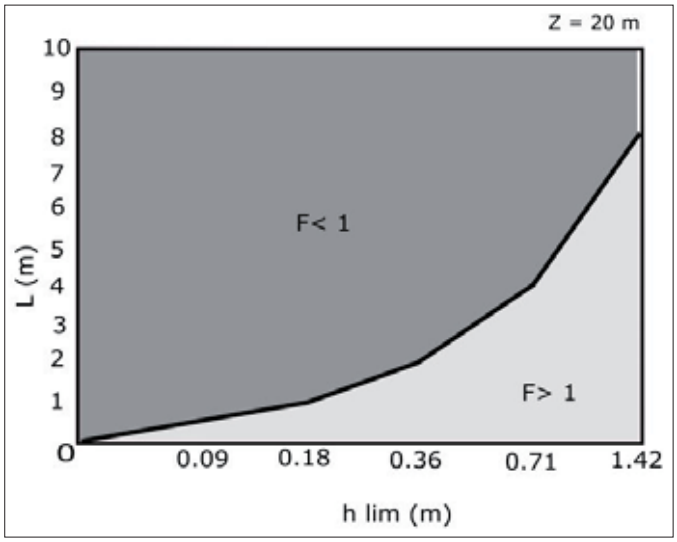


Figura 10 – Inviluppo all'equilibrio limite delle combinazioni L - h_{crit} calcolato per i tetti posti ad altezza maggiore dal p.c. (Z = 20 m). L'area posta sotto la curva è associata a F > 1. Viceversa quella sopra la curva ricade in condizioni in cui F<1

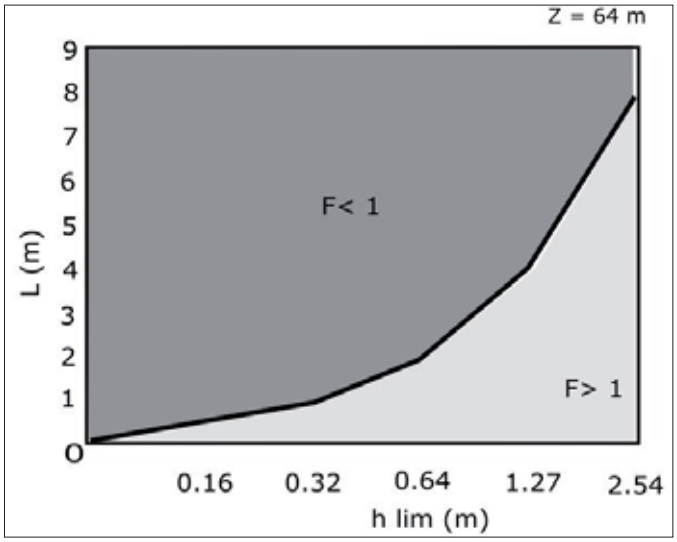


Figura 11 – Inviluppo all'equilibrio limite delle combinazioni L - h_{crit} calcolato per i tetti posti ad altezza minore dal p.c. (Z = 64 m). Come nel caso precedente, l'area posta sotto la curva è associata a F > 1. Viceversa quella sopra la curva ricade in condizioni in cui F<1

negli eventi di crollo che prevede: a) una fase di indebolimento progressivo della resistenza al taglio della roccia, legata all'azione del ghiaccio che agisce all'interno di giunti di frattura. A questa, che dura un certo numero di cicli gelo-fusione, segue b) una fase in cui viene raggiunto l'equilibrio limite a causa del fatto che vengono a definirsi conci rocciosi in cui il rapporto L/h_{crit} è tale da determinare il distacco. Infine, c) la volta rappresentata dai tetti aggettanti risulta di nuovo temporaneamente stabile.

b) Rispetto alla verifica della pericolosità riferita a distacchi con ribaltamento/scivolamento dal ciglio della parete rocciosa, sulla verticale del sito.

Una delle verifiche che abbiamo ritenuto opportuno svolgere è quella al "toppling" di blocchi rocciosi delimitati dai giunti di strato e da famiglie di fratture ad essi trasversali, posti sul ciglio superiore della parete di roccia incombente sul sito in esame. Per tale motivo le verifiche risultano in questo caso riferite ai dati raccolti in stazioni di rilevamento strutturale poste proprio in prossimità di tale ciglio. La successione calcarea in questa stazione risulta composta da strati dotati di direzione N60°E, immergenti a SE di circa 10° e potenti circa 0.4 – 0.6 m. Sono state rilevate alcune famiglie di fratture che, con spaziatura variabile da 0.3 m a 1.5 m risultano in grado di isolare conci rocciosi che, se posti nelle immediate prossimità del ciglio della scarpata, posta sulla verticale del sito in esame, potrebbero ribaltarsi e rotolare ("blocktoppling" / "blockflexure-toppling") verso il basso. La possibilità di un movimento che preveda lo scivolamento lungo i piani di strato ("slide") è invece scongiurata dalla immersione non favorevole dei giunti di strato stessi.

La caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, effettuata presso il ciglio della suddetta scarpata (stazione n.2), e quindi relativa ad un tratto di successione che può essere ritenuto significativo ai fini di questa verifica, consente di stabilire:

Tabella 2 – Sintesi dei dati strutturali riferiti al criterio di rottura di Hoek-Brown rilevati per la stazione di rilevamento n. 2	
GSI	65
mi	8
D	0
mb	2.292
s	0.02047
a	0.5020
C'	10.7 MPa
ϕ'	33°
σ_c	24.85 MPa

Secondo quanto noto (Ashby, 1971; Hoek & Bray, 1974; Goodman & Bray, 1976) e come già detto, Il processo del "toppling" è possibile quando $y/Dx > \cot\alpha$. L'effetto della spinta del sistema di conci posti a monte di quello verificato in questo specifico caso viene considerato trascurabile sulla base delle pendenze del versante alle spalle del ciglio stesso.

Sulla base di questo principio è stato costruito il grafico in figura 12, nel quale è riportata la retta dell'equilibrio limite, l'inviluppo cioè dei punti DX vs Y tali che F = 1. L'area posta sotto la retta è quella in cui Fs > 1, mentre quella sopra la retta contiene combinazioni Y/Dx tali che si possa verificare il ribaltamento dei blocchi.

Sulla base di quanto rilevato in campagna, le classi di Y più rappresentate risultano essere 0.4 m< Y < 0.6 m. Per tale range di spessore la spaziatura della famiglia di giunti di frattura con uno strike prossimo a quello della stratificazione, dovrà essere maggiore a 0.24 m ÷ 0.35 m rispettivamente. In effetti tale condizione, da quanto rilevato in campagna, si verifica solo localmente presso il ciglio della scarpata.

VERIFICA DI STABILITA' DELLA VOLTA DELL'IPOGEO

In questo caso il modello di verifica di pericolosità adottato, in considerazione del grado di fatturazione dell'ammasso roccioso, è quello corrispondente alla "trave a conci". Il rilevamento geo-strutturale dell'ammasso roccioso è stato svolto su alcune stazioni ubicate in corrispondenza della volta e delle pareti di spalla della volta stessa dell'ipogeo (stazioni 3,4 e 5). Da quanto è emerso risultano caratteristiche decisamente più scadenti rispetto a quanto rilevato nelle altre stazioni, sia per la maggiore vicinanza ad elementi mesostrutturali, sia per la prossimità al passaggio con litologie dotate di diversa reologia (le marne del "livello ad Orbitolina"). A questo sito sono attribuiti i seguenti parametri:

Tabella 3 – Sintesi dei dati strutturali riferiti al criterio di rottura di Hoek-Brown rilevati per le stazioni di rilevamento n. 3, 4, 5	
GSI	45
mi	8
D	0.8
mb	0.303
s	0.00024
a	0.5081
C'	1.9 MPa
ϕ'	18°
σ_c	1.09 MPa

Questo sito risulta direttamente adiacente ad una faglia orientata N75°E 80°SE, che delimita alla quale risultano coniugate alcune famiglie di fratture rispettivamente orientate N200, N60 - 80E e N-S che, naturalmente, tagliano trasversalmente la giacitura della stratificazione, orientata N60E 10°SE.

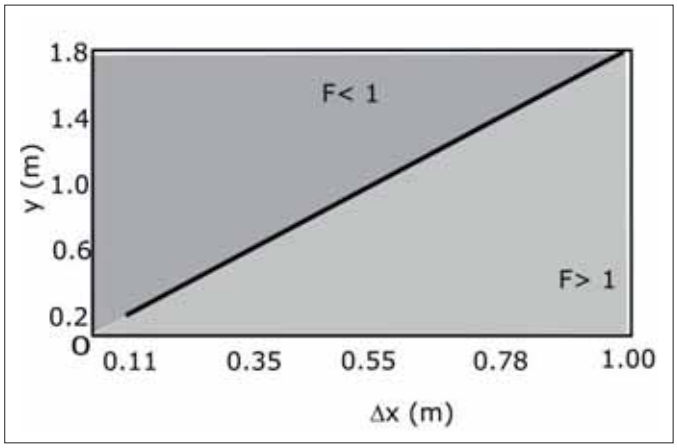


Figura 12 – La retta rappresentata nel grafico, riporta l'inviluppo all'equilibrio limite delle combinazioni Y/Dx. Sotto la retta dunque le combinazioni dei due parametri sono associate ad una condizione di sicurezza. Al contrario il campo posto sopra la retta è associato a F<1

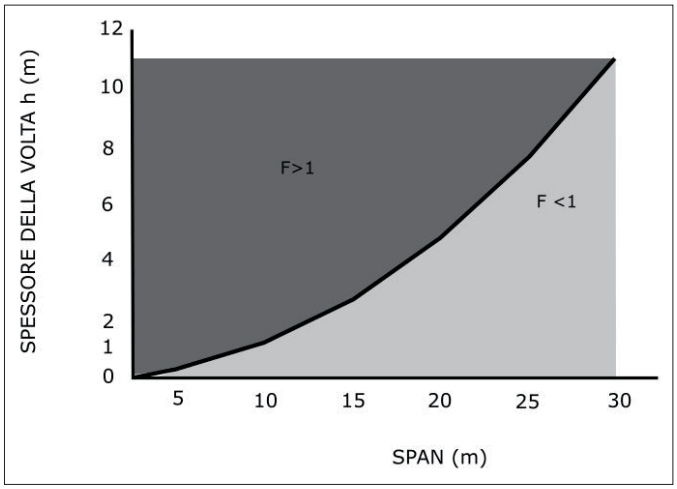


Figura 13 – Linea dell'equilibrio limite calcolata per le combinazioni h/L

Secondo il modello scelto per la verifica, dunque, vogliamo ipotizzare la possibilità che possano verificarsi processi di crushing (rottura per schiacciamento). Nel verificare la possibilità di occorrenza di tali fenomeni, abbiamo calcolato il valore del coefficiente di sicurezza con le equazioni 2 e 3 delle quali si è già discusso e nelle quali s_c è ottenuto a seguito della caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, mentre f_{max} è un fattore calcolato in funzione delle caratteristiche morfometriche dell'ipogeo e del peso di volume dell'ammasso roccioso incombente. In base ai calcoli, si evince che il coefficiente di sicurezza, dato un certo valore (che consideriamo costante) del peso di volume e della resistenza a compressione, risulta direttamente proporzionale allo spessore (h) dell'ammasso roccioso incombente sulla volta e, in misura minore, alla inclinazione degli strati ed inversamente proporzionale alla luce (L) dell'ipogeo (span). In questo modo è stata calcolata la linea inviluppo dei punti del grafico h/L in cui si ha Fs = 1 (*Fig.* 13).

Questo grafico mette in evidenza che per le condizioni rilevate sul sito, con uno span compreso tra 15 m e 20 m, si perviene a valori sotto l'equilibrio limite solo per spessori della volta inferiori a circa 7m – 12 m. Nella realtà lo spessore del corpo roccioso incombente sulla volta è stato quantificato in circa 64 m al quale corrisponde un coefficiente di sicurezza molto elevato.

Del resto è noto che in un corpo roccioso assimilabile a quello studiato, tale fenomeno non si verifica qualora il rapporto tra span e spessore della volta sia maggiore di 10 (Andriani, 2015 b). Abbiamo provato a quantificare la luce massima dell'ipogeo all' equilibrio limite ed il risultato è riportato sotto forma grafica nella figura n. 14.

Dal grafico si evince che l'equilibrio limite sarebbe stato raggiunto, in teoria, qualora lo scavo fosse proseguito fino ad ottenere una luce di circa 72 m contro i circa 20 m dello span attuale.

CONCLUSIONI

È stato effettuato uno studio sulle caratteristiche geologiche e su quei processi geomorfologici che possono aver influenzato alcune scelte di carattere ingegneristico, legate alla realizzazione, all'abbandono ed infine alla ristrutturazione dell'eremo di S. Michele Arcangelo, sui Monti Aurunci. Non sono note le motivazioni che, nell'alto medioevo, hanno condotto i primi religiosi, probabilmente eremiti, considerando la collocazione storica dell'opera, nella scelta di questa particolare ubicazione. È probabile che motivazioni di carattere strategico e religioso abbiano ricoperto un ruolo fondamentale. Sta di fatto che la particolare morfologia del sito, che prevede la presenza di un'ampia cengia nel mezzo di una poco accessibile parete rocciosa, sia stata un elemento utile ai fini della difendibilità del sito, in un periodo storico in cui imperversavano lungo la vicina costa del Golfo di Gaeta le scorrerie saracene. È inoltre ipotizzabile che anche la disponibilità d'acqua sorgiva, generalmente piuttosto rara nell'area carsica, legata alla presenza di un affioramento del livello ad Orbitolina, abbia contribuito positivamente alla scelta del sito in cui ubicare l'eremo. Le fonti storiche reperibili purtroppo, oltre che suggerire una crescente importanza dell'eremo perlomeno fino al 900 d.c., non dicono molto sulle cause del suo abbandono se non che la struttura fosse soggetta a danneggiamenti legati alla caduta di materiale lapideo dall'alto. È stata dunque svolta una verifica della pericolosità morfologica del sito legata proprio a tali processi. Per primo è stata presa in considerazione l'area di sedime della chiesa originaria, quella alto-medioevale, della quale purtroppo non resta più alcuna traccia. Tale area, che di fatto costituisce il sagrato della chiesa ipogea attuale, si presenta sottoposta ad un sistema di tetti rocciosi incombenti. È stata dunque valutata sia la possibilità di distacco di blocchi da tali tetti, sia la possibilità di ribaltamento e scivolamento di blocchi rocciosi dal ciglio della parete rocciosa alla quale il sito è sottoposto. Mentre il livello di pericolo-

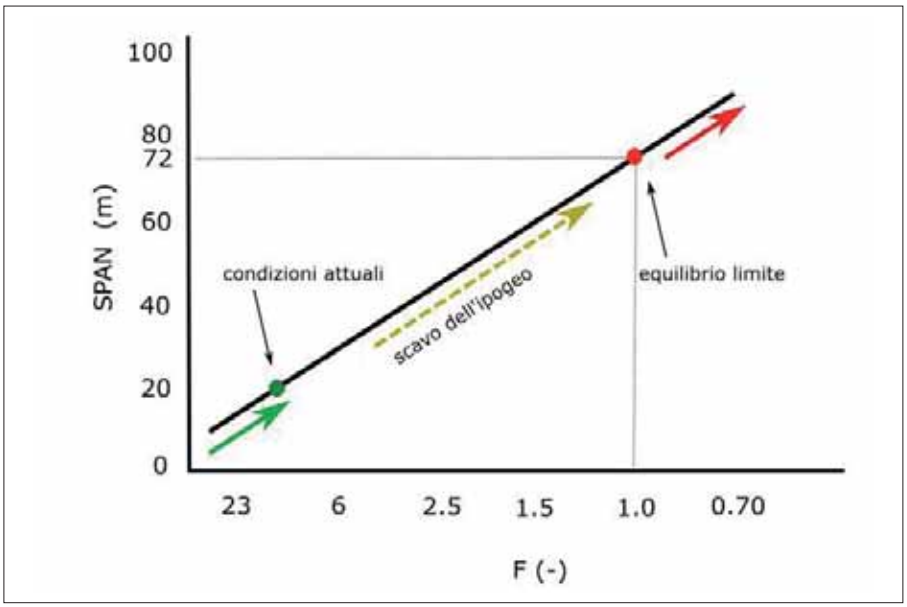


Figura 14 – Nel grafico sono riportati i valori del coefficiente di sicurezza F contro la lunghezza della luce dell'ipogeo. Il punto verde sulla retta corrisponde alle attuali condizioni, in cui F >> 1. Il punto rosso indica invece il raggiungimento della condizione F = 1

sità relativo a quest'ultimo processo risulta essere sostanzialmente secondario, si riconosce nella possibilità di crollo dei tetti rocciosi l'elemento di pericolosità geomorfologica principale. Nonostante le attuali condizioni di temporaneo e sostanziale equilibrio morfologico, è stato dunque proposto un modello che prevede, con il progredire dei cicli stagionali gelo-fusione delle acque di percolazione presenti nei giunti di frattura ed in quelli di strato, l'aumento progressivo del rapporto L/h fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite, portando lo strato roccioso a rompersi secondo un modello di rottura assimilabile a quello di una trave a sbalzo. Sostanzialmente dunque risulta plausibile l'ipotesi della caduta in disgrazia del sito e del suo successivo abbandono, in quanto affetto al ciclico danneggiamento delle strutture da parte di blocchi staccatisi dai tetti rocciosi incombenti direttamente sul sito. Verso la fine del 1900, la decisione di ripristinare il luogo sacro non può prescindere dalla necessità di individuare una soluzione alla vulnerabilità geomorfologica del sito. Per tale motivo si decise di realizzare l'ipogeo che attualmente ospita la chiesa. La cavità venne realizzata approfittando della presenza del "livello ad Orbitolina", che per motivi strutturali proprio in questo sito raggiunge uno spessore maggiore, e che consente uno scavo relativamente agevole e rapido. L'ipogeo, con una luce di circa 18 – 20 m ed un'altezza massima di circa 9.0 m presenta una volumetria complessiva di circa 850 m^3. È stata studiata la correlazione tra le dimensioni e la morfologia dell'ipogeo, con le condizioni geologiche locali e, da quanto emerso, risulta che la cavità è stata interamente realizzata asportando lo strato marnoso senza tentare di intervenire sulle bancate calcaree. La morfologia del luogo risulta pertanto strettamente conforme a quella dello strato marnoso stesso ed è interessante notare come non si sia tentata, ad eccezione della realizzazione di una parete (non portante) in muratura sul fondo della cavità, alcuna regolarizzazione della geometria delle pareti e della volta. La possibilità che all'epoca si abbia rinunciato a scavare ulteriormente per motivi di stabilità della cavità rocciosa, è stata verificata attraverso un'analisi di stabilità della volta, riferita al modello di rottura della "trave a conci". Da tale verifica è emersa la sostanziale stabilità della stessa rispetto a fenomeni di "crushing". Inoltre, è stato calcolato che, in considerazione dell'elevato spessore del corpo roccioso incombente in volta, lo scavo avrebbe potuto proseguire producendo un ambiente dotato di uno span molto maggiore e dunque in grado di ospitare un numero molto più elevato di fedeli. Il restauro avrebbe rappresentato un investimento economico all'epoca, affrontato dalla curia di Gaeta, che aveva messo in bilancio anche l'apertura di una strada d'accesso al sito (attualmente esistente). L'ipogeo avrebbe potuto estendersi con una luce almeno tripla rispetto a quella effettivamente realizzata, mantenendo il coefficiente di sicurezza entro valori ragionevolmente elevati. In conclusione, in mancanza di fonti storiche documentali e basandoci sostanzialmente solo su considerazioni di carattere geologico e geotecnico, possiamo ipotizzare la possibilità che l'opera ottocentesca sia stata in realtà e per qualche motivo, prematuramente e frettolosamente conclusa. Tale ipotesi risulta coerente con osservazioni di diversa natura, quali ad esempio il fatto che l'opera non sia stata in alcun modo rifinita o tantomeno adornata. Le pareti interne e la volta stessa ad esempio non sono né rivestite né regolarizzate in alcun modo mentre dalla volta l'abbondante percolazione non risulta in alcun modo regimentata. In buona sostanza le caratteristiche dell'ipogeo sembrerebbero davvero poco funzionali al culto e tutti gli elementi considerati porterebbero a ritenere l'opera stessa come incompiuta. Le motivazioni dell'abbandono possono essere state legate alle cause più disparate, di carattere squisitamente economico, politico o sociale, oppure semplicemente al perdurare delle condizioni di instabilità morfologica che, seppur non riguardando più il luogo di culto in s.s. ora delocalizzato in ipogeo e pertanto sicuro, continuava (e continua tutt'oggi) a presentare nella sua area antistante, il sagrato, un elevato livello di pericolosità legato alla instabilità delle bancate di strato aggettanti sul piazzale.

BIBLIOGRAFIA

Andriani G.F. (2015 a), *Uso proprio e improprio dei criteri di resistenza degli ammassi rocciosi*, Geologi e Territorio n.1/2015 pp. 17-22.

Andriani G.F. (2015 b), *Sulla valutazione della stabilità di cavità sotterranee in ammassi rocciosi stratificati*, Geologi e Territorio n.1/2015 pp. 23-32.

Ashby J. (1971), *Sliding and toppling modes of failure in model and jointed rock slopes*. MSC Thesis, Imperial college, Royal School of mines, London.

Brady B.H.G., Brown E.T. (2005), *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3 ed. Kluwer Acad Pub., pp. 628.

Cerisola R. & Montone P. (1992), *Analisi strutturale di un settore della catena dei Monti Ausoni – Aurunci (Lazio, Italia Centrale)*, Boll. Soc. Geol. It., 111 pp. 449-457.

Diederichs M.S., Kaiser P.K. (1999 a), *Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36(1). Pp. 97-117.

Diederichs M.S., Kaiser P.K. (1999 b), *Tensile strenght and abutment relaxion as failure control mechanisms in underground excavations*. Int. J.Rock. Mech. Min. Sci., 36(1), pp. 69-96.

Fedele P. (1899), "La battaglia del Garigliano dell'anno 915", in *Archivio della Società Romana di Storia Patria*, XXII.

Gabrieli F. & Scerrato U. (1985), *Gli Arabi in Italia*, II° ediz. Milano.

Goodman R.E. (1976), *Methods of geological engeenering in discontinuos rocks*. West Publishing Co., St Paul Minn. Pp.472.

Goodman R.E., Asce M., J.W. Bray (1976), *Toppling of rock slopes*. In *Proc. Specialty conference on rock engeneering for foundations and slopes. Boulder*, Colo., American Society of Civil Engeneers, New York, vol.2,pp.201 – 234.

Goodman R.E., Shi G. (1985), *Block theory and its application to rock engeenering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07362.

Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002), Hoek – Brown failure criterion 2002 edition, in: Proc. Of the 5th North American Rock Mechanics Symp. And 7th Tunneling Ass.of Canada Conf., NARMS – TAC 2002, July 7-10, Univ. of Toronto, pp. 267-271.

Hoek E., Bray J. (1974), *Rock slope engineering*, IMM London.

Hoek E., & Brown E.T. (1980), *Empirical strenght criterion for rock masses*, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 106 (GT9), pp 1013 – 1035.

Hoek E., Bray J.W. (1981), *Rock slope engineering*, 3rd Ed., Institution of Mining and Metallurgy, London, UK, pp.402.

Hoek E. (1983), *Strenght of jointed rock masses*. 23rd Rankine Lecture, Géotechnique,33(3), pp.187-223.

Kim B.H., Kaiser P.K. (2009), *Rock strenght characterization for excvavations in brittle failing rock*, Rockeng09: Proceedings of the 3rd Canus Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009.

Lollino P. & Parise M. (2014), *La valutazione della stabilità di cavità sotterranee: approcci semplificati e metodi avanzati di calcolo*. Geologia dell'ambiente, Suppl. al n. 2, pp. 74-81.

Majdi A., Amini M. (2011), *Flexural toppling failure in rock slopes: from theory to applications*. I.J.M.G.E., University of Tehran, Vol. 45, N. 1, pp. 21-32.

Montone P. & Tallini M. (1994), *Analisi strutturale della faglia Fammera – Campodivivo (Lazio Meridionale)*, Boll. Soc. Geol. It. 113, pp. 421 – 433.

Naso G. & Tallini M. (1993), *Tettonica compressiva e distensiva nei monti Aurunci occidentali (Appennino centrale): prime considerazioni*, Geologica Romana, 29 pp. 455-462.

Richard E., Goodman , Asce M. & Bray J.W. (1976), *Toppling of rock slopes, proceedings of the speciality conference on rock engeneering for fundations and slopes ASCE/Boulder*, Colorado, August 15-18-1976.

Riciniello S. (1987), *Codex Diplomaticus Cajetanus*, *Vol II* , ed. La Poligrafica.

Tanzini M. (2001 a), *Criterio di rottura di Hoek – Brown per ammassi rocciosi fratturati*. In "Fenomeni franosi ed opere di stabilizzazione"I Ed. 2001Dario Flaccovio Editore. Pp.148 – 160.

Tanzini M. (2001 b), *Analisi di stabilità dei pendii rocciosi*. In "Fenomeni franosi ed opere di stabilizzazione"I Ed. 2001 Dario Flaccovio Editore. Pp. 235-252.

Tsesarsky M. (2012), *Tsesarsky Deformation mechanisms and stability analysis of undermined sedimentary rocks in the shallow subsurface*. Eng. Geol., 133, pp. 16-29.

Tucciarone R. (1991), *I Saraceni nel Ducato di Gaeta e nell'Italia centro-meridionale*, Gaeta.

Criteri di verifica dei pilastri di cave di pozzolana abbandonate

Pillar stability analysis in dismissed pozzolana mines

Marco Mizzoni
Ingegnere, Libero Professionista, Roma
E-mail: marcomizzoni@hotmail.it

Gianluigi Giannella
Geologo, Libero Professionista, Roma
E-mail: g.giannella@libero.it

Filippo Virgili
Ingegnere, Libero Professionista, Roma
E-mail: filippo.virgili@gmail.com

Eutizio Vittori
Geologo, ISPRA, Roma
E-mail: eutizio.vittori@isprambiente.it

Parole chiave (*key words*): Cave di pozzolana (*Pozzolana mines*), pilastro (*pillar*), elementi finiti (*finite element*), coefficiente di sicurezza (*safety factor*)

RIASSUNTO

Le cave in sotterraneo abbandonate nelle pozzolane presentano diversi meccanismi di collasso, tra i quali la rottura dei pilastri, che spesso venivano, al termine del periodo di maggior sfruttamento, ridotti al limite delle sezioni ritenute accettabili per i criteri di coltivazione dell'epoca, generalmente su base empirica.

Le conseguenze del cedimento di un pilastro possono essere rilevanti ed innescare un crollo delle volte adiacenti con risentimenti rilevanti anche in superficie e sulle costruzioni eventualmente presenti.

La verifica di stabilità dei pilastri di cave in materiali piroclastici coltivate con la tecnica a camere e pilastri pone diverse difficoltà operative. Per la verifica dei pilastri tradizionalmente il coefficiente di sicurezza viene definito come il rapporto tra la tensione media agente, stimata con approcci di definizione dell'area tributaria, e la resistenza del pilastro valutata con formule semi empiriche che tengono conto del rapporto tra area della sezione ed altezza del pilastro. In letteratura infatti viene riconosciuto un ruolo importante all'effetto di confinamento esercitato dai livelli di terreno superiori ed inferiori. Queste metodologie sono state sviluppate essenzialmente sulla base dell'esperienza e per l'applicazione, almeno nel caso delle rocce tenere, in miniere di carbone, che vengono generalmente coltivate con disposizioni molto regolari di camere e pilastri. Al contrario, nelle cave di pozzolana romane, le sezioni dei pilastri sono spesso irregolari e l'approccio dell'area tributaria può risultare inadeguato. L'uso di modelli ad elementi finiti per la valutazione delle tensioni agenti può aiutare a superare alcune tali difficoltà. Occorre comunque definire una procedura di verifica che tenga conto degli effetti di confinamento e delle caratteristiche di resistenza del materiale.

Un approccio agli elementi finiti è stato proposto da Screpanti (Federico e Screpanti, 2002) con l'impiego di un modello costitutivo di tipo Cam-Clay modificato e su tale base sono state sviluppate delle formule per la verifica di stabilità dei pilastri di sezione rettangolare o circolare, impiegando metodi di analisi non-lineare per descrivere il comportamento dei pilastri (Rastiello *et al.*, 2014).

In questo lavoro si vuole invece valutare l'applicabilità di una procedura di analisi lineare su modelli agli elementi finiti sviluppati a partire da un modello digitale della geometria delle cavità, che, pur rinunciando ad una descrizione più dettagliata del comportamento del materiale, consente di tener conto della effettiva geometria del pilastro, con la relativa influenza sulle condizioni di confinamento del materiale che lo costituisce. Le condizioni di stabilità del pilastro vengono valutate con riferimento al criterio di Mohr-Coulomb, selezionato per la maggior facilità di impiego e di determinazione dei parametri di resistenza.

Nel lavoro è stato verificato come questo approccio sia coerente con i fenomeni di delaminazione delle parti esterne del pilastro osservati nei casi reali di pilastri sovraccaricati e di formazione di un nucleo interno confinato che fornisce la parte preponderante della resistenza del pilastro.

PREMESSA

La verifica dei pilastri di cave o miniere realizzate in rocce tenere è stata in passato affrontata essenzialmente con criteri di tipo empirico o semiempirico che permettessero di tenere conto della geometria del pilastro e dello stato tensionale derivante prima dalla condizione litostatica e successivamente dalle operazioni di scavo per la coltivazione.

Specialmente nel caso di materiali in cui il criterio di rottura ha una prevalente componente attritiva ed in cui la coesione o la resistenza a compressione monoassiale sono relativamente basse, la capacità portante dei pilastri dipende per una parte rilevante dalla tensione orizzontale preesistente in sito e dal confinamento esercitato dal tetto e dalla base della cavità.

È infatti evidente che materiali di bassa resistenza a compressione uniassiale, in assenza di un effetto di confinamento, non sarebbero in grado di resistere al carico verticale che viene esercitato sui pilastri dal terreno di copertura.

Il ruolo delle tensioni di confinamento nello sviluppo della resistenza a compressione è ben illustrato in Abel (1988), in cui viene sviluppato un modello di rottura del pilastro basato sul concetto di equilibrio limite.

Nelle formulazioni più tradizionali, su base essenzialmente osservazionale od empirica (Martinetti e Ribacchi, 1965), questo effetto viene sinteticamente descritto da relazioni che forniscono la resistenza di un pilastro in funzione della resistenza a compressione del materiale su piccoli campioni e dei rapporti tra i lati della sezione di base e l'altezza.

Le relazioni tengono conto solitamente della resistenza più elevata dei campioni a piccola scala utilizzati per le prove in laboratorio rispetto a porzioni di materiale alla scala dei pilastri reali. Questo fenomeno è dovuto principalmente alla presenza di difetti e disomogeneità.

L'effetto principale che supporta l'evidenza sperimentale di una resistenza complessiva del pilastro molto superiore a quella del materiale in condizioni di compressione uniassiale è comunque il confinamento esercitato dalle superfici alla base ed in sommità del pilastro (Abel, 1988).

Le esperienze ed i riferimenti bibliografici presenti in letteratura sui pilastri di miniere in rocce tenere sono inoltre in gran parte riferiti a miniere di carbone o sale, mentre solo in minima parte interessano le rocce piroclastiche presenti in larga misura nell'area romana (Mazza *et al.*, 2008; Martinetti e Ribacchi, 1965; Screpanti, 2010). Questo per l'evidente disparità di diffusione ed interesse economico delle corrispondenti attività estrattive.

In particolare le relazioni che tengono conto dell'effetto della scala del campione sono sviluppate sulla base di prove di laboratorio di campioni di diverse dimensioni per le varie litologie ed, in letteratura sono largamente prevalenti correlazione tra resistenza e dimensioni del campione sviluppate per miniere di carbone.

I risultati disponibili su rocce piroclastiche sono quindi ridottissimi ed esistono poche formule specifiche per questi materiali (Rastiello *et al.*, 2014).

Di recente (Screpanti, 2010) sono state sviluppate delle relazioni per stimare la resistenza di pilastri in rocce piroclastiche basate su analisi parametriche di modelli ad elementi finiti che impiegano modelli costitutivi di tipo Cam-Clay, scelti per la possibilità di rappresentare adeguatamente il comportamento di rocce piroclastiche.

Queste relazioni, essendo state sviluppate sulla base di analisi ad elementi finiti che riproducono lo stato tensionale iniziale e le operazioni di scavo, tengono conto degli effetti di confinamento citati come descritti dalla geometria dei modelli usati per calibrarle, caratterizzati da una geometria regolare a pianta rettangolare.

Sebbene l'uso delle analisi FEM e di legami costitutivi idonei sia un significativo passo avanti nella definizione del criterio di resistenza dei pilastri, specialmente nelle cave di pozzolana dell'area romana, sono frequenti geometrie molto irregolari. A casa di queste irregolarità nella geometria la miglior descrizione del comportamento del materiale e dello stato di tensione iniziale riduce solo in parte le incertezze insite nella stima della resistenza.

Dal punto di vista della valutazione di sicurezza complessiva di un pilastro, resta il problema della determinazione del carico agente sul pilastro stesso, che, quando la geometria del sistema caveale è complessa, può essere condotta con metodi basati sull'area di influenza o, in maniera equivalente con la costruzione di poligoni di Delaunay. Si tratta di metodi che, applicati a geometrie regolari forniscono risultati ben approssimati ed affidabili, ma che, laddove la geometria delle camere sia molto complessa o la distribuzione delle sezioni dei pilastri irregolare, possono condurre a stime lontane dalla realtà.

D'altronde l'analisi completa con modelli FEM del problema della stabilità dei pilastri di un sistema di cave presenta serie difficoltà se si vuole tener conto adeguatamente sia degli effetti della geometria che della non-linearità della risposta del materiale.

Un modello ad elementi finiti di buona definizione geometrica di una porzione significativa di un sistema caveale richiede generalmente alcune decine o centinaia di migliaia di nodi ed elementi oltre a risorse e tempi di calcolo importanti per l'analisi non lineare.

I principali fattori d'incertezza nell'analisi sono:

- Geometria del sistema
- Determinazione dei carichi sul pilastro
- Determinazione dello stato tensionale nell'ammasso roccioso, eventualmente tenendo conto della sequenza di scavo
- Caratteristiche meccaniche del materiale
- Legame costitutivo/criteri di resistenza

L'impiego di un modello agli elementi finiti lineare ma basato su una descrizione ben approssimata della geometria della cavità consente di trattare con buona approssimazione i primi due aspetti. Il terzo può essere affrontato con diversi approcci.

Uno di essi consiste nel simulare il terreno come un mezzo elastico lineare (eventualmente ortotropo) e imporre condizioni al contorno di spostamenti orizzontali nulli sulle facce laterali del modello. Queste condizioni rappresentano con buona approssimazione ciò che si verifica in un volume indefinito di materiale omogeneo.

Mediante l'applicazione dei carichi gravitazionali nel volume di terreno si sviluppano, per l'espansione laterale impedita, tensioni orizzontali che possono approssimare lo stato iniziale, la cui definizione sperimentale in situ è peraltro sempre problematica. Variando il coefficiente di Poisson si possono quindi ottenere condizioni iniziali prossime a quelle cercate tali da rappresentare approssimativamente le condizioni di confinamento.

Un altro approccio consiste nell'applicazione diretta di una distribuzione di carichi sulle facce laterali tale da indurre lo stato tensionale voluto.

Ulteriore alternativa è quella di assegnare lo stato tensionale iniziale sulla base di una distribuzione di tensioni determinata ipotizzando la storia del deposito e quindi simulare le operazioni di scavo per rimozione degli elementi, sequenza di simulazione non sempre disponibile nei codici di calcolo più comuni.

Volendo sintetizzare quindi possiamo articolare la procedura di verifica nella valutazione del carico agente, nella stima della resistenza del pilastro ed infine nella stima del coefficiente di sicurezza. La resistenza del pilastro può essere definita sia in termini globali, se si determina un carico limite globale del pilastro, sia in termini locali, se si vuole confrontare lo stato di tensione nei diversi punti della sezione con la resistenza del materiale.

Supponendo di aver seguito il primo degli approcci illustrati, che è generalmente fattibile con qualunque programma di calcolo, una volta determinato lo stato tensionale nel pilastro, la verifica consiste nel confrontarlo con il criterio di rottura prescelto, che, con buona approssimazione, può essere quello di Mohr-Coulomb.

Se il criterio è rispettato in tutti i punti del pilastro, la resistenza è garantita ed occorre eventualmente determinare un coefficiente di sicurezza. È opportuno ricordare che, nel quadro dell'analisi limite, una soluzione elastica del problema che rispetta ovunque il criterio di rottura è staticamente ammissibile e quindi il moltiplicatore del carico stimato con questa distribuzione di tensione è minore di quello reale.

Se il criterio non è rispettato ovunque occorre procedere ad una redistribuzione delle sollecitazioni e definire il carico limite del pilastro rispetto al quale determinare un coefficiente di sicurezza.

Qualunque sia il modo in cui viene definito lo stato limite del sistema, il coefficiente di sicurezza può essere eventualmente determinato con una procedura tipo "strength reduction factor", ovvero riducendo, generalmente con un unico fattore, sia la resistenza per attrito (tg φ) che la coesione (c), fino ad ottenere il collasso della struttura.

Si noti che in questo tipo di problemi, un approccio basato sull'incremento dei carichi generalmente non è significativo. Il carico è infatti solitamente costituito, per la quasi totalità, dal peso proprio del terreno che contribuisce in ugual misura alla componente isotropa e a quella deviatorica. A meno di casi in cui la coesione è particolarmente elevata, la resistenza del terreno aumenta con il carico gravitazionale all'incirca nella stessa misura delle tensioni.

STIMA DEL COEFFICIENTE DI SICUREZZA "LOCALE"

Un approccio di prima approssimazione, certamente in favore di sicurezza, consiste nei passi seguenti:

- Effettuare l'analisi elastica lineare del modello
- Confrontare lo stato tensione con un criterio di rottura applicabile al terreno
- Definire una misura della distanza dello stato di tensione elastico dall'inviluppo di rottura

Oltre al criterio dello "strength reduction factor" si possono usare diversi approcci per misurare la distanza dello stato di tensione dall'inviluppo di rottura.

Il primo confronta le distanze dall'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb del centro del cerchio di Mohr con il raggio del cerchio stesso (*Fig.* 1). In sostanza, dal momento che il raggio del cerchio di Mohr è la componente

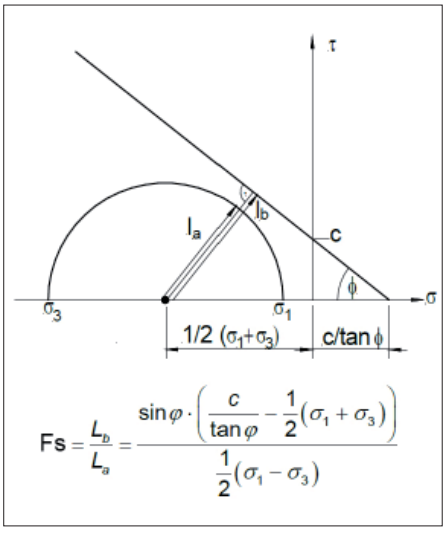


Figura 1 – Coefficiente di sicurezza basato sull'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb (approccio 1)

deviatorica della tensione, questo approccio si presta meglio se il percorso delle tensioni fino a rottura è caratterizzato da un aumento della tensione deviatorica mentre quella idrostatica si mantiene costante.

Il secondo approccio (*Fig.* 2) confronta il raggio del cerchio di Mohr nello stato di tensione determinato dall'analisi con quello del cerchio che raggiunge l'inviluppo di rottura facendo aumentare la tensione principale massima (di compressione). È possibile calcolare la tensione verticale massima in un punto del pilastro data la tensione principale minima.

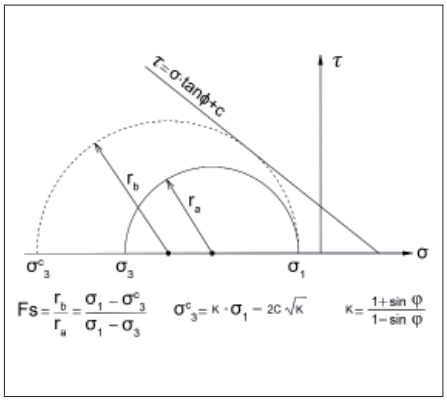


Figura 2 – Coefficiente di sicurezza basato sull'inviluppo di rottura di Mohr-Coulomb (approccio 2)

Questa definizione si presta anche, con opportuni adattamenti, all'impiego di criteri di rottura non lineari come quello di Hoek-Brown.

Si può quindi definire una resistenza massima del materiale del pilastro variabile da punto a punto della sezione ed integrare queste tensioni sulla sezione per ottenere il carico ultimo del pilastro.

VERIFICA PUNTUALE DEL CRITERIO DI MOHR-COULOMB

Con riferimento alle convenzioni standard di scienza delle costruzioni con tensioni di trazione positive, siano $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ le tensioni principali con $\sigma 1$ tensione principale massima (*Fig.* 3).

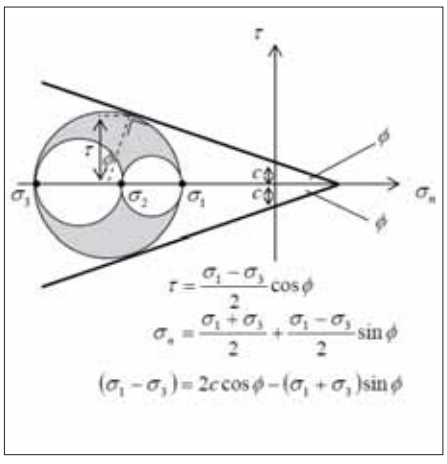


Figura 3 – Criterio di rottura di Mohr-Coulomb

Se:

$(\sigma_1 - \sigma_3) < 2c + \cos\varphi - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi$

la verifica è soddisfatta. La tensione di compressione limite in ogni punto del pilastro si ottiene dalla:

$\sigma_{3,lim} = K_p\,\sigma_1 - 2c\sqrt{K_p}$

In cui Kp è il coefficiente di spinta passiva:

$K_p = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$

Si può definire un fattore di sicurezza puntuale come:

$FS = \sigma_{3,lim}/\sigma_3$

Lo sforzo normale limite che la sezione può sopportare è:

$N_{lim} = \int \sigma_{3,lim}\, dA$

Se $(\sigma_1 - \sigma_3) < 2c + \cos(\varphi) - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin(\varphi)$ la verifica è soddisfatta.

"For drained analyses, in the case of DA1. C1 an increase in the vertical load increases the resistance on the shear plane since the shearing resistance is a function of the normal stress due to the soil weight that is causing the instability, so that the margin of safety is unchanged. Thus DA1.C1 does not usually govern. Hence in drained analyses, DA1.C2 governs and the DA1 partial factors are:"

DA1.C2 $\gamma G = 1{,}0$ $\gamma Q = 1{,}3$ $\gamma\varphi = 1{,}25$

In definitiva l'approccio di verifica può essere sintetizzato in:

parametri di resistenza del materiale affetti da $\gamma\varphi = 1.25$, $\gamma c = 1.25$

combinazione dei carichi $\gamma g\ G + \gamma Q = 1.0\ G + 1.3\ Q$

PROCEDURA PROPOSTA

Per verificare la validità dell'approccio è stato inizialmente studiato un modello di test a geometria semplice, che rappresenta un pilastro di un sistema a camere e pilastri su una maglia 8x8 m (*Fig.* 4).

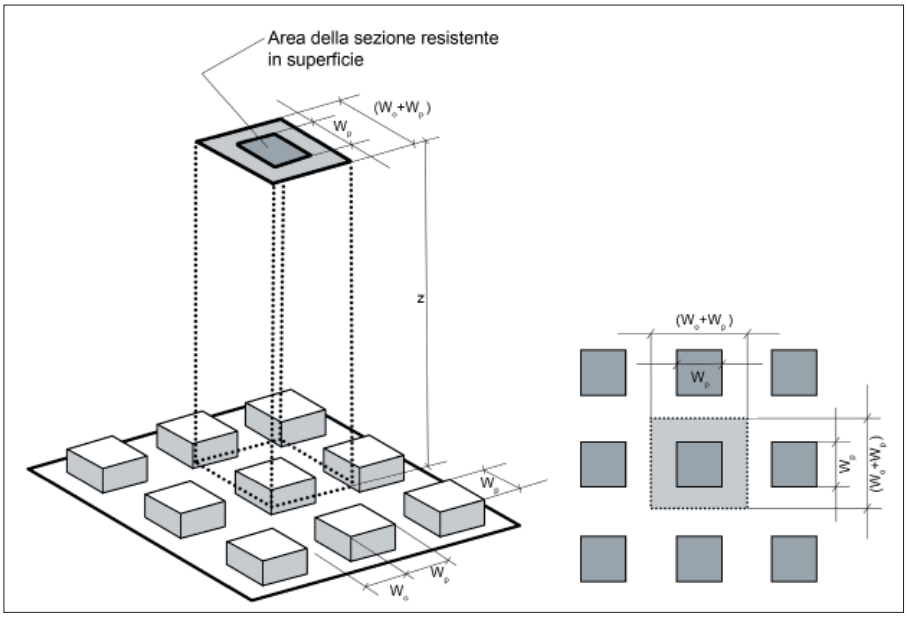


Figura 4 – Schema di un sistema a camere e pilastri

Se la sezione è doppiamente simmetrica l'eccentricità della risultante è nulla.

DEFINIZIONE DELL'APPROCCIO DI VERIFICA SECONDO NTC 2008 ED EUROCODICE 7

L'argomento non è trattato esplicitamente né in NTC2008 né in EC7.

Alcuni principi di fondo in materiali con resistenza prevalentemente attritiva sia l'azione che la resistenza dipendono prevalentemente dal peso specifico del terreno, che fornisce sia il carico verticale sul pilastro che le tensioni di confinamento. Appare quindi corretto tener conto del "single source principle", enunciato come segue:

lo spessore di terreno al di sopra del tetto della cavità è di 12 m, peso specifico 1.6*9.81 = 15.7 kN/mc

Il pilastro è alto 2 m con sezione 4*4 m, la tensione media nella sezione a metà altezza del pilastro risulta 770 kPa (compreso il peso del semipilastro)

Le caratteristiche meccaniche assunte per il materiale dell'intero modello sono:

c'= 100 kPa
φ= 40°, che sono rappresentative di una buona pozzolana Romana
E= 1.0 GPa ν= 0.35

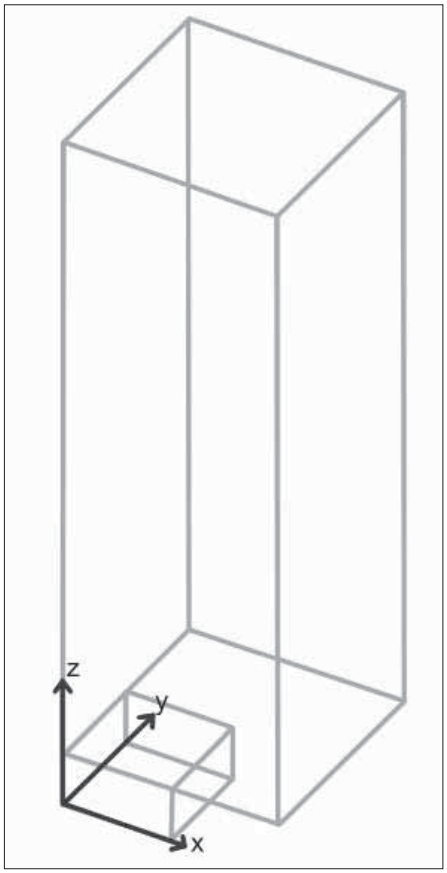


Figura 5 – Schema del modello adottato

Il modello (*Fig.* 5) rappresenta ¼ della parte superiore di un sistema a camere e pilastri con rapporto di estrazione definito come:

R= (At-Ap) / Ap=(16-4) / 16 = 0.75

dove At è l'area tributaria del pilastro e Ap l'area del pilastro

La tensione media con il metodo dell'area tributaria vale, trascurando il peso del semipilastro superiore):

$\sigma = \gamma H /(1-R) = 15.7 *12 / 0.25 = 753.6$ kPa

Viene rappresentata solo la metà superiore del pilastro (*Figg.* 6-7-8), dal momento che la sezione critica per le verifiche di resistenza è quella di mezzeria, dove è minimo il confinamento. Inoltre il modello è ridotto ad 1/4 del volume rappresentativo grazie alle condizioni di doppia simmetria.

Le condizioni di vincolo sulle facce laterali del modello sono dettate dalle simmetrie presenti e quindi gli spostamenti orizzontali sono bloccati.

La tensione orizzontale in sito è quella risultante dall'applicazione del carico gravitazionale su un modello elastico quindi essenzialmente dipendente dal coefficiente di Poisson.

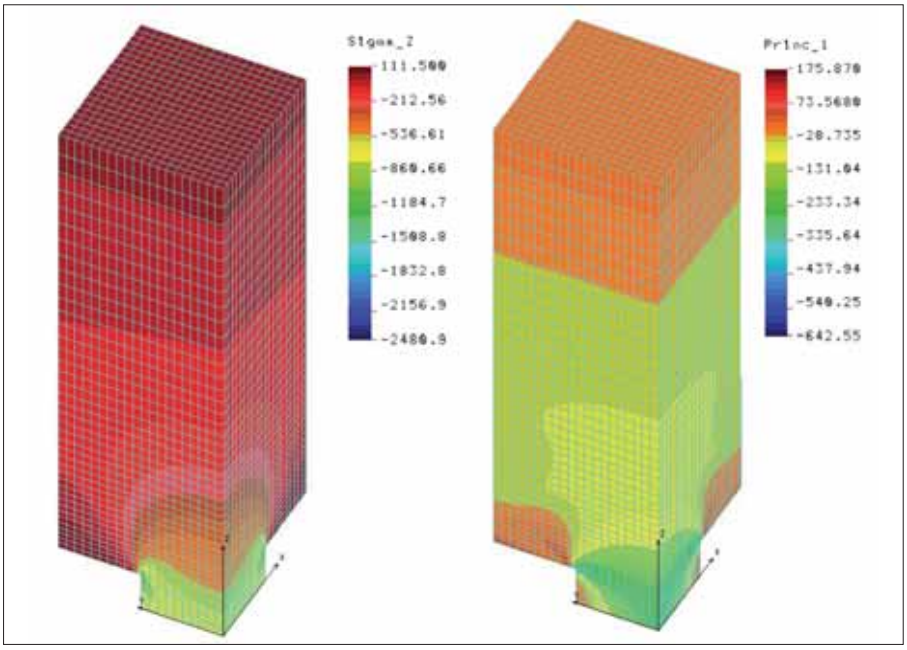


Figura 6 – Tensioni σ_z (verticale). Tensioni $\sigma 1$ (principale massima) (kN/m^2)

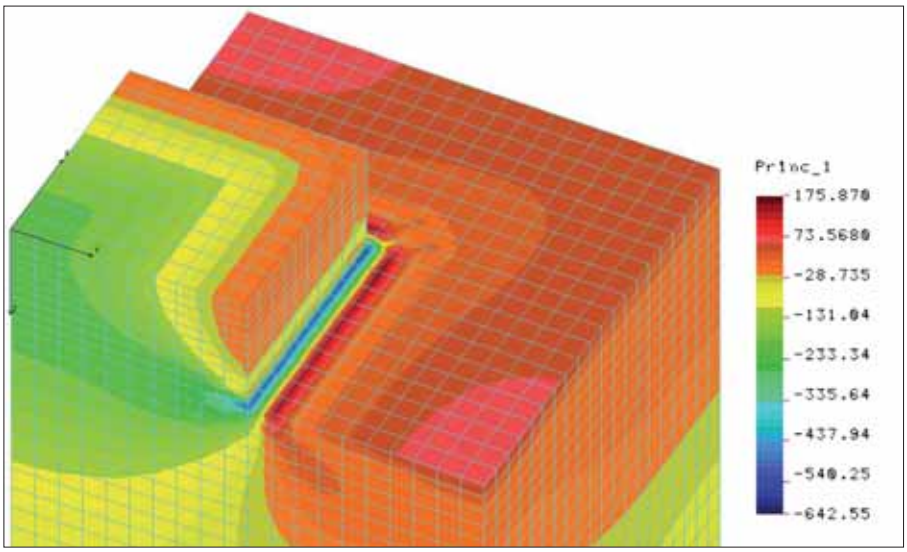


Figura 7 – Tensioni σ_1 nel modello (kN/m^2) - dettaglio pilastro

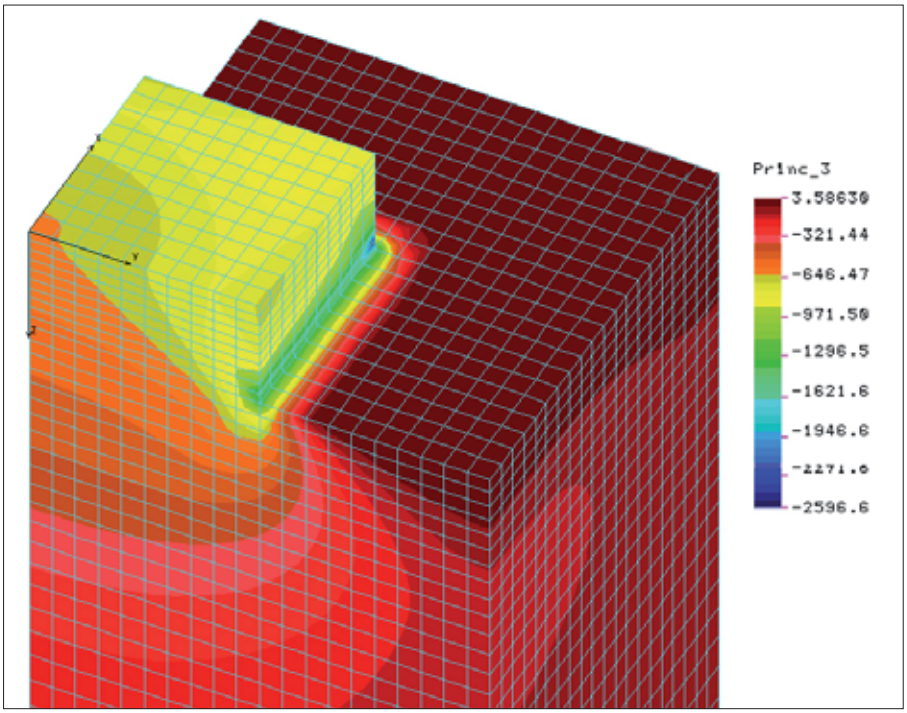


Figura 8 – Tensioni σ_3 nel modello (kN/m^2) - dettaglio pilastro

Nelle figure che seguono sono riportati gli andamenti delle tensioni verticali (*Fig.* 9) ed orizzontali (*Fig.* 10) calcolate dal modello lungo le verticali corrispondenti all'asse del pilastro ed all'asse delle camere. In blu sono riportate le tensioni litostatiche corrispondenti, in particolare quelle orizzontali sono valutate assumendo che le tensioni orizzontali siano:

$\sigma_h = K_0 \sigma_z$

in cui $K_0 = 1\text{-sin } \varphi$ è stato calcolato per $\varphi = 40°$, quindi $K_0 = 0.357$.

Le tensioni verticali calcolate con il modello convergono a quelle litostatiche verso la superficie e l'effetto della cavità si risente apprezzabilmente fino a circa 7-8 metri dal tetto della cavità stessa, che è posto a z=1.0 nel sistema di riferimento impiegato.

Le tensioni orizzontali di compressione calcolate con il modello sono invece generalmente maggiori (in valore assoluto) di quelle ottenibili con l'applicazione del coefficiente di spinta in quiete. Questo aspetto è controllato dalla scelta del coefficiente di Poisson. Disponendo di informazioni ottenute da indagini in situ sull'effettiva entità delle tensioni orizzontali è quindi possibile calibrare il coefficiente di Poisson in modo da riprodurre al meglio, attraverso il modello numerico, le tensioni orizzontali in sito.

Sulla base delle tensioni principali determinate con l'analisi lineare nel modello è possibile calcolare punto per punto la tensione limite di compressione applicando:

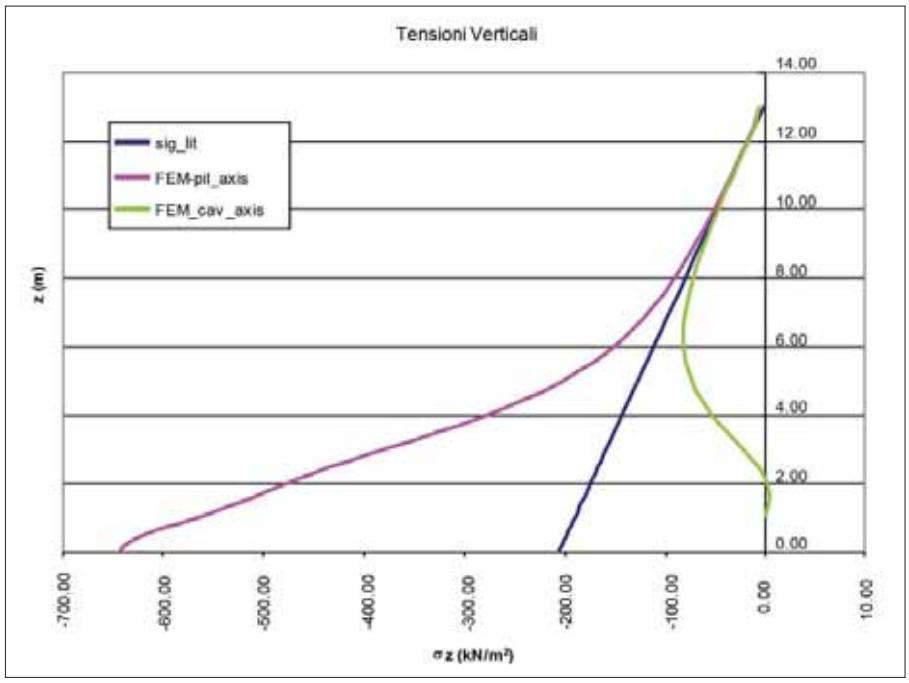


Figura 9 – Tensioni verticali (kN/m²)

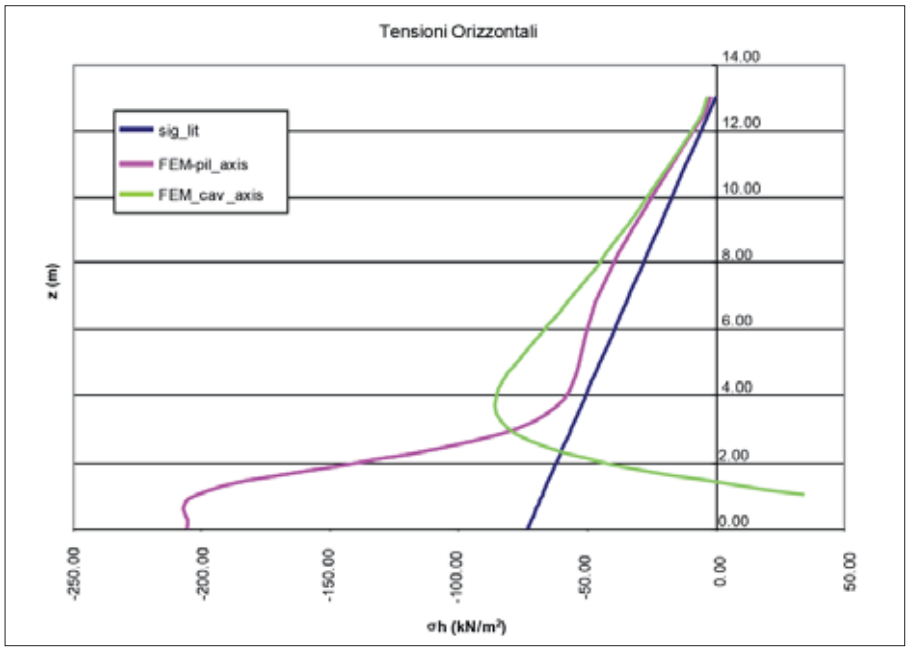


Figura 10 – Tensioni orizzontali (kN/m²)

$\sigma_{3,lim} = K_p \sigma_1 - 2_c\sqrt{K_p}$

e quindi il coefficiente di sicurezza valutato come:

$FS = \sigma_3 / \sigma_{3,lim}$

L'andamento del fattore di sicurezza (*Fig.* 11) evidenzia come le zone perimetrali del pilastro siano significativamente sollecitate oltre la tensione limite, mentre il nucleo presenta ancora ampi margini di sicurezza.

Per stimare il carico limite dell'intero pilastro occorre quindi integrare le tensioni di compressione limite sulla sezione. Tuttavia utilizzando una mesh regolare, come nel caso in esame, riduce l'operazione al calcolo della media delle tensioni limite da moltiplicare per l'area della sezione, con una modesta approssimazione sui bordi.

Il valore medio del rapporto tra tensione limite e tensione agente vale in questo caso 1.07, che corrisponderebbe ad un modesto margine di sicurezza.

L'analisi è stata poi ripetuta per un pilastro posto nelle stesse condizioni ma con altezze delle gallerie pari a 4 m invece che a 2.

In questo caso in tutti i nodi della sezione intermedia del pilastro vengono raggiunte le condizioni di rottura e il valore medio del rapporto tra tensione limite e tensione agente risulta pari a circa 0.7, indicativo del superamento della resistenza del pilastro.

A parità di caratteristiche meccaniche del materiale e di rapporti tra le dimensioni in pianta di gallerie e pilastri, il risultato in termini di stabilità del pilastro risulta quindi fortemente condizionato dalla snellezza e dalle condizioni di confinamento. La procedura proposta consente di tener conto in maniera razionale di questi aspetti, evitando il ricorso a formule per lo più ottenute attraverso correlazioni con analisi numeriche.

Verificato che il modello di geometria regolare porta a conclusioni coerenti con i risultati di altri lavori e con i modelli di rottura riportati ad esempio in Abel (1988), si è applicata la procedura ad un modello più realistico di un sistema di cavità sotterranee con geometria molto irregolare, analizzato con un modello agli elementi finiti (*Fig.* 12).

Come si evince dall'immagine il modello interessa un'area molto vasta intorno al pilastro.

Si può notare, nonostante la geometria complessa (*Fig.* 13), che l'effetto del nucleo confinato presenta coefficienti di sicurezza elevati all'interno della sezione e valori inferiori all'unità solo sul bordo (*Fig.* 14).

CONCLUSIONI

È stata illustrata una procedura che consente di effettuare la verifica di stabilità di pilastri di cave in sotterraneo con un approc-

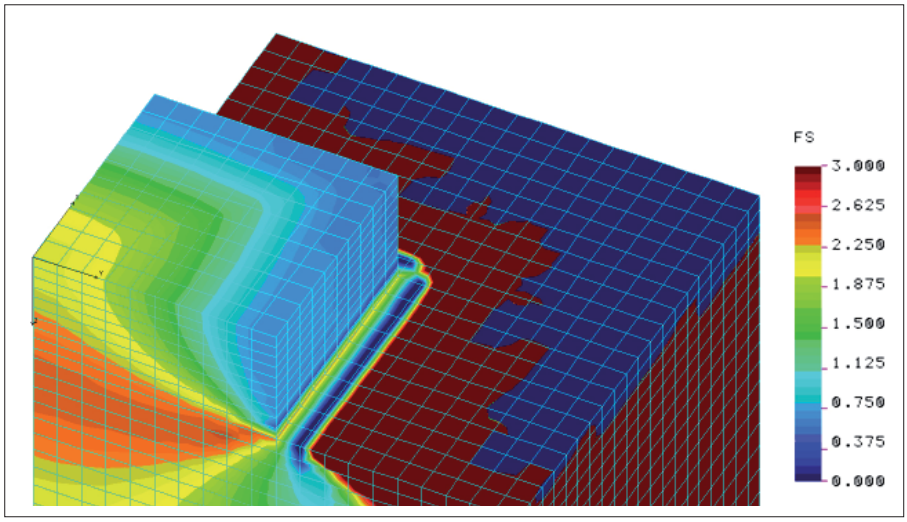


Figura 11 – Coefficiente di sicurezza del pilastro

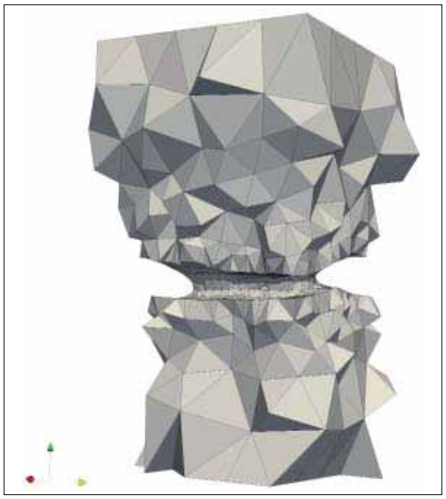


Figura 13 – Modello FEM del pilastro estratto dal modello generale

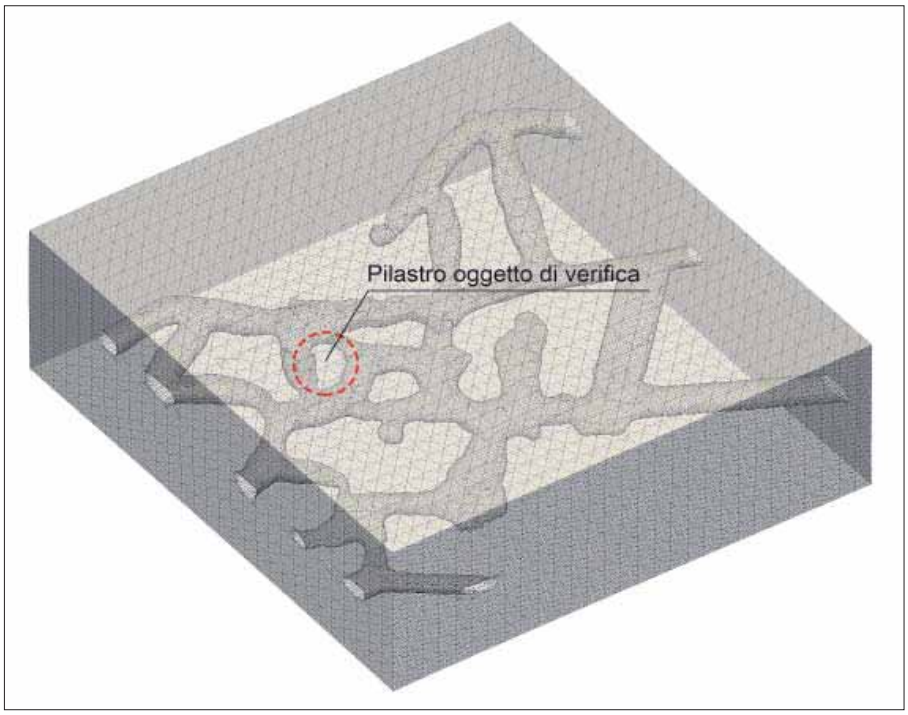


Figura 12 – Modello FEM di una cava di pozzolana di geometria irregolare

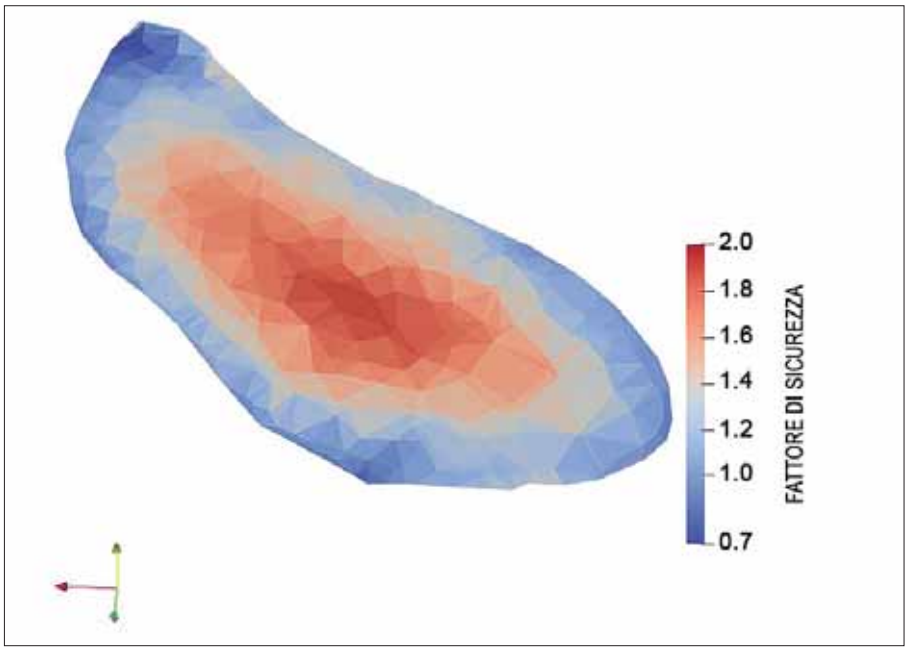


Figura 14 – Coefficiente di sicurezza puntuale nel pilastro di geometria irregolare

cio agli elementi finiti. La procedura si basa sull'impiego di un modello agli elementi finiti della cavità e dei pilastri e consente quindi di tenere correttamente conto della complessa geometria delle gallerie. L'analisi dello stato di sollecitazione viene effettuata con un modello elastico lineare e la determinazione delle condizioni di sicurezza è stata fatta con riferimento ad un criterio di rotttura alla Mohr-Coulomb, anche se è facilmente estendibile ad altri criteri di rottura.

La procedura è stata applicata ad un esempio con dimensioni e parametri dei materiali caratteristici delle cave di pozzolana di Roma. È stato verificato che essa consente di tener conto efficacemente dello stato tensionale in sito ed in particolare delle condizioni di confinamento dei pilastri dipendenti dalla geometria della coltivazione.

BIBLIOGRAFIA

Abel J. F. JR. (1988), *Soft rock pillars*, International Journal of Mining and Geological Engineering, 6(3), 215-248.

Federico F., & Screpanti S. (2002), *Analisi della stabilità di cavità sotterranee in rocce piroclastiche del sottosuolo di Roma*, XXI Conv. Naz. Geotecnica, L'Aquila.

Martinetti S. & Ribacchi R. (1965), *Osservazioni sul comportamento statico dei pilastri in una cava in sotterraneo di materiali piroclastici*, Simposio sui Problemi Geominerari Sardi, Cagliari.

Mazza R., Capelli G., Lanzini M. (2008), *Il rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma*, La Geologia di Roma. Dal Centro Storico alla periferia, APAT - Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, Volume 80, Parte II, 149-170, Ed. Funiciello R., Praturlon. G., Giordano G.

Rastiello G., Federico F., Screpanti D. (2014), *New Soft Rock Pillar Strength Formula Derived Through Parametric FEA Using a Critical State Plasticity Model*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(5), 1-15.

Screpanti S. (2010), *Analisi di stabilità di cavità scavate a modesta profondità in rocce piroclastiche*, Tesi di Dottorato dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Roma.

Analisi geostrutturale su nuvola di punti acquisita con laser scanner 3d: applicazione alla Grotta di Cocceio, Bacoli (Campania, Italia)

Geological-structural analysis from laser scanner 3d point cloud: the case study of Cocceio Cave, Bacoli (Campania, Italy)

Marco Pagano
IdroGeo Srl, Vico Equense (NA), Italia

Biagio Palma
IdroGeo Srl, Vico Equense (NA), Italia

Mario Parise
Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi Aldo Moro, Bari, Italia

Anna Ruocco
IdroGeo Srl, Vico Equense (NA), Italia

Parole chiave (*key words*): laser scanner terrestre (*terrestrial laser scanner – TLS*); analisi geostrutturale (*geostructural analysis*); nuvola di punti (*point cloud*); cavità artificiale (*artificial cavity*)

RIASSUNTO

La Grotta di Cocceio (Bacoli, Italia), realizzata intorno al 37 a.C., fu scavata nel tufo per tutta la sua lunghezza ed è connessa a pozzi verticali scavati nella collina da cui prendeva luce ed aria. Essa durante la Seconda Guerra mondiale fu utilizzata come deposito di munizioni e subì dei forti danni a seguito dell'esplosione di alcuni ordigni che generarono una "calotta di esplosione" fortemente predisposta alla caduta massi.

Al fine di caratterizzare l'ammasso roccioso in volta e, quindi, progettare adeguati interventi di consolidamento, è stata eseguita una analisi geostrutturale utilizzando una innovativa tecnica di analisi che prevede l'uso del Terrestrial Laser Scanning (TLS). Pertanto, a partire dalla nuvola di punti acquisita con laser scanner Riegl VZ400 della IdroGeo Srl di Vico Equense, si è proceduto alla caratterizzazione geometrica di tutte le discontinuità presenti in calotta. Le discontinuità in tal modo saggiate sono state, successivamente, validate attraverso analisi geomeccanica sulle discontinuità eseguite con le tradizionali raccomandazioni dell'ISRM (1978).

Tale procedura ha consentito di pervenire ad una caratterizzazione geostrutturale dell'ammasso tufaceo estremamente accurata garantendo, al contempo, misure areali e non puntuali, alti standard di sicurezza ai tecnici che di solito sostano per lungo tempo al disotto di fronti instabili e costi più contenuti.

INTRODUZIONE

La conoscenza dell'assetto geometrico-strutturale degli ammassi rocciosi è indispensabile per verificare la stabilità degli stessi e progettare le relative opere di consolidamento. Spesso, però, le tecniche di "rilievo tradizionale" sono estremamente costose e, talora, di difficile realizzazione a causa delle difficoltà di accesso al sito, dell'eccessiva pericolosità dei fronti rocciosi, o semplicemente per l'elevata estensione degli affioramenti.

Per risolvere tali problematiche ed al fine di caratterizzare dal punto di vista geostrutturale e geomeccanico le discontinuità degli ammassi rocciosi, negli ultimi anni si sono sviluppate metodologie di rilievo innovative come quelle che prevedono l'uso del *Terrestrial Laser Scanning* (TLS).

Il rilievo TLS fornisce un prodotto, composto da milioni di punti georiferiti, totalmente misurabile e gestibile nello spazio, potendo, in tal modo, costituire una dettagliata base dati di supporto all'analisi morfologica e geostrutturale.

Lo studio mediante l'impiego del TLS di un fronte roccioso, parzialmente inaccessibile o in contesti ambientali complessi, permette di indagare i versanti nella loro completa estensione, offrendo vantaggi sia legati alla sicurezza degli operatori che ai tempi di rilievo.

Tale innovativa metodologia di analisi è stata utilizzata per ricostruire l'assetto geostrutturale e geomeccanico della volta della Grotta di Cocceio (Bacoli, Campania), al fine di fornire un valido supporto alla progettazione degli interventi di consolidamento.

LA GROTTA DI COCCEIO

La Grotta di Cocceio fu progettata e realizzata intorno al 37 a.C. (Beloch, 1989) da Lucio Cocceio su commissione di Marco Vipsanio Agrippa. Essa fu realizzata dai romani per scopi militari, con lo scopo di collegare Cuma (fortificazione e punto di vedetta sul litorale domizio-flegreo) con il Portus Iulius (importante infrastruttura militare insistente, attraverso una serie di canali, anche sui bacini del lago d'Averno e del lago Lucrino) nel golfo di Pozzuoli.

La grotta si estende complessivamente per un chilometro circa (950 m), ha sezione trapezoidale ed andamento rettilineo leggermente in salita verso Cuma. Essa prendeva luce ed aria da sei pozzi scavati nella collina (il più lungo dei quali era profondo oltre trenta metri) ed era sufficientemente larga da permettere il passaggio di due carri.

Durante la Seconda Guerra mondiale fu utilizzata dalla Regia Marina come deposito di munizioni ed esplosivi che furono poi fatti brillare dai tedeschi in ritirata. A seguito del-



Figura 1 – Inquadramento geografico

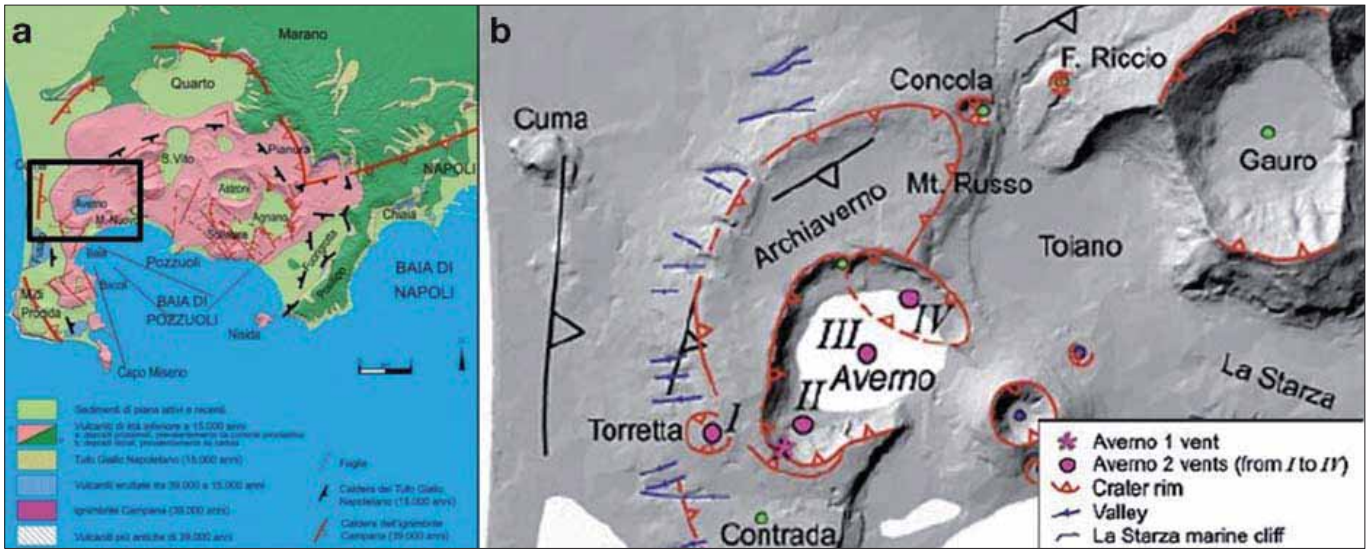


Figura 2 – Carta strutturale schematica della caldera dei Campi Flegrei (a; Orsi et al. *1996); Carta strutturale schematica dell'area di Averno (b; Di Vito* et al.*, 2011)*

la esplosione, la Grotta subì dei danni sulla volta di uno dei pozzi di areazione ("calotta di esplosione"), con il crollo parziale del soffitto e delle pareti.

Nel dopoguerra, essa è stata sottoposta a diversi interventi di bonifica senza essere mai consolidata.

Nel 2010 un'ordinanza comunale ha disposto lo sgombero esecutivo degli edifici costruiti sopra la galleria, a causa di una serie di crolli avvenuti all'interno della stessa.

Negli anni successivi, la Grotta fu destinataria di progetti tesi alla riqualificazione ed alla conseguente fruizione, anche turistica, mediante il *Progetto POR 2000-2006 Pit Campi Flegrei – Recupero Grotta di Cocceio*. Nell'ambito del POR 2000-2006 e dopo una serie di interruzioni per crolli, ostruzioni, etc., nel maggio 2017 hanno avuto inizio i lavori di restauro e consolidamento della Grotta.

ASSETTO GEO-STRUTTURALE E VULCANO-STRATIGRAFICO

La Grotta di Cocceio insiste nel settore occidentale della Caldera dei Campi Flegrei, nel comune di Bacoli (*Fig.* 1).

I Campi Flegrei costituiscono un grande campo vulcanico (*Fig.* 2), la cui origine è connessa agli eventi tettonici distensivi legati all'apertura del bacino Tirrenico, in cui sono stati attivi, negli ultimi 39.000 anni, più di 70 centri eruttivi. L'attuale assetto morfologico è il risultato di due collassi calderici di vaste proporzioni legati alle eruzioni dell'Ignimbrite Campana (39.000 anni fa) e del Tufo Giallo Napoletano (15.000 anni fa).

La Grotta di Cocceio è ubicata subito ad Ovest del Lago d'Averno, uno specchio d'acqua che giace all'interno del cratere vulcanico dell'Archiaverno.

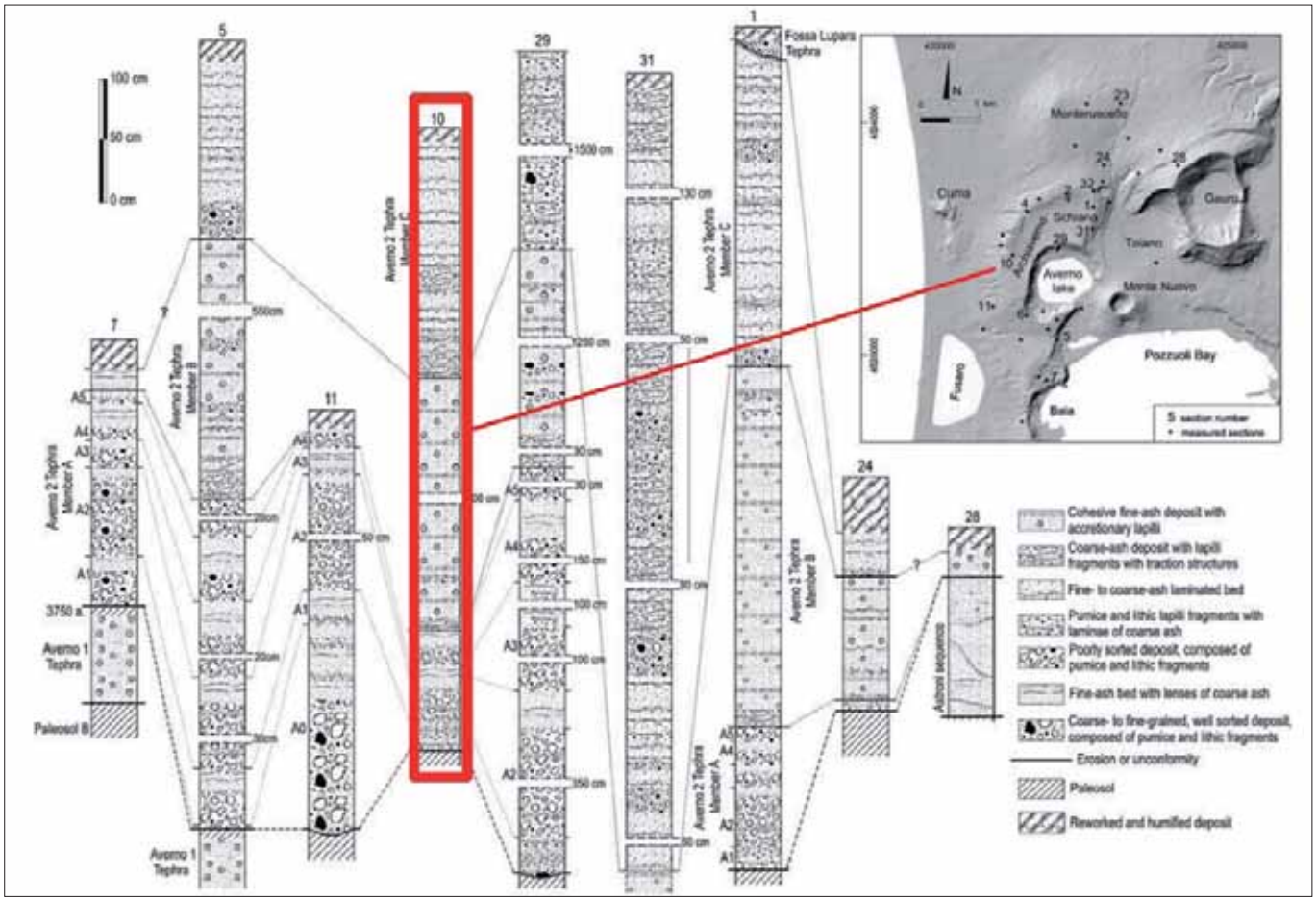


Figura 3 – Sequenza stratigrafica (Di Vito et al. *2011)*



Figura 4 – Laser scanner RIEGL VZ400 e sue principali caratteristiche

La sequenza stratigrafica generale (*Fig.* 3) dell'area è costituita dal *Tufo Giallo dell'Archiaverno,* ed è ricoperta da prodotti incoerenti dell'Averno (Di Vito *et al.* 2011).

La Grotta di Cocceio è stata interamente scavata nella Formazione dell'Archiaverno, la cui messa in posto risale a 10.700 anni b.p. (datazioni ^{14}C; Lirer *et al.*, 2011). Si tratta di una sequenza di ceneri da massive a pseudostratificate, contenenti abbondanti lapilli accrezionali e litici, con subordinati sottili livelli di pomici da caduta. I depositi da *surge* sono distribuiti su un'area di circa 34 km^2, mentre quelli da caduta si rinvengono solo su una ristretta area verso Nord (Di Vito *et al.*, 2011).

Successivamente alla messa in posto, tali materiali sono stati interessati da processi di zeolitizzazione che hanno portato alla formazione di facies litoide caratterizzata da intensa fratturazione.

RILIEVO LASER SCANNER 3D

Il rilievo laser scanner 3D, eseguito dalla IDROGEO SRL, ha riguardato una porzione della calotta della Grotta di Cocceio e del piano campagna posto sulla verticale della stessa.

Il rilievo laser scanner tridimensionale (TLS) è un metodo innovativo per la ricostruzione e il controllo geometrico di costoni rocciosi ed ambienti ipogei. La metodologia consente di rilevare le superfici con una maglia di acquisizione sub-centimetrica. Il risultato è un «fermo immagine» della scena alla data dell'acquisizione, rappresentato da milioni di punti georiferiti, facilmente navigabile e condivisibile attraverso il servizio di *cloud-computing*.

L'attività di cantiere ha comportato una prima fondamentale fase di progettazione del rilievo che è consistita nella scelta del numero e del posizionamento dei target (*control points*) da installare in funzione delle scansioni da eseguire, definendo la posizione delle stesse scansioni anche in funzione della orientazione dei principali piani di discontinuità.

Il rilievo, eseguito con Laser Scanner RIEGL VZ400 (*Fig.* 4), ha consentito di acquisire una nuvola di punti georiferita costituita da 349 milioni di punti, ognuno dei quali dotato delle seguenti informazioni: geografica (X, Y, Z), cromatica (RGB) e di riflettanza (i).

Il rilievo è consistito in un totale di dieci *scan position,* nove delle quali sono state posizionate all'interno della Grotta, mentre una è stata ubicata all'esterno ed integrata con rilievo fotogrammetrico da *SAPR* (*Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto*) con velivolo modello Italdron 4HSE.

Per ciascuna postazione di rilievo, sono state compiute scansioni plurime variando la risoluzione delle acquisizioni: in primo luogo, è stata eseguita una scansione panoramica a maglia larga al fine di ottenere un file facilmente gestibile ed un controllo immediato del campo di rilievo, e successivamente sono state compiute diverse scansioni a maglia progressivamente più fitta. Nella fase di impostazione delle scansioni di dettaglio, sono stati settati anche i dati relativi alla fotografia, relativamente al tempo di esposizione e all'apertura del diaframma, in modo da avere le immagini da collegare alla nuvola di punti, opportunamente calibrate, in base alle variabili condizioni di luce e alla vicinanza dell'oggetto di indagine.

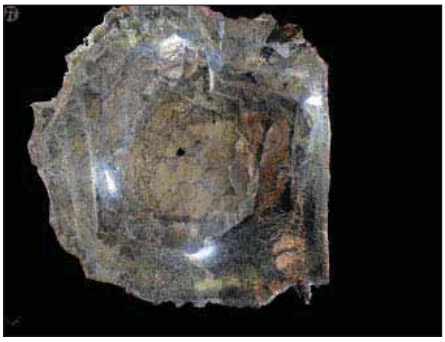


Figura 5 – Nuvola di Punti - Modello numerico reale dell'intera calotta

Al termine di ogni scansione, prima di cambiare la *scan position*, è stata eseguita la scansione di dettaglio dei target, che ha permesso allo scanner di individuare e registrare i riflettori installati.

I dati acquisiti con laser scanner sono elaborati con software di post-processing dedicati, al fine di unire le scansioni effettuate dalle differenti *scan position*, pulire il modello da elementi spuri per passare definitivamente all'elaborazione bidimensionale e tridimensionale.

Innanzitutto, si procede alla colorazione delle nuvole di punti, assegnando ad ogni punto X, Y, Z, anche le coordinate R, G, B, derivanti dalle immagini scattate durante la fase di acquisizione. Tale procedura avviene mediante tecniche di allineamento sia manuale che automatico tra le foto e le scansioni acquisite.

Si procede quindi all'unione e alla rototraslazione delle varie nuvole di punti acquisite. Tale operazione è di primaria importanza, ed al fine di ottenere errori trascurabili è indispensabile unire le nuvole di punti attraverso target ad alta riflettanza, georiferiti con l'ausilio di GPS e stazione totale di alta precisione. Al termine di tali operazioni, si verifica l'errore di misura esistente in seguito all'unione tra le scansioni; se questo non è accettabile, vengono eseguite tecniche di allineamento "forzate" definite *Multi-Station-Adjustement* (MSA) di cui il software RiscanPro (Riegl) è dotato.

Successivamente, si è proceduto all'ottimizzazione della nuvola di punti eliminando gli elementi spuri, i punti sovrapposti e ridondanti, gli oggetti non significativi (cavi elettrici, impalcatura, etc). Il risultato, a questo punto dell'elabo-



Figura 6 – Nuvola di Punti - Modello numerico reale dell'interno della calotta

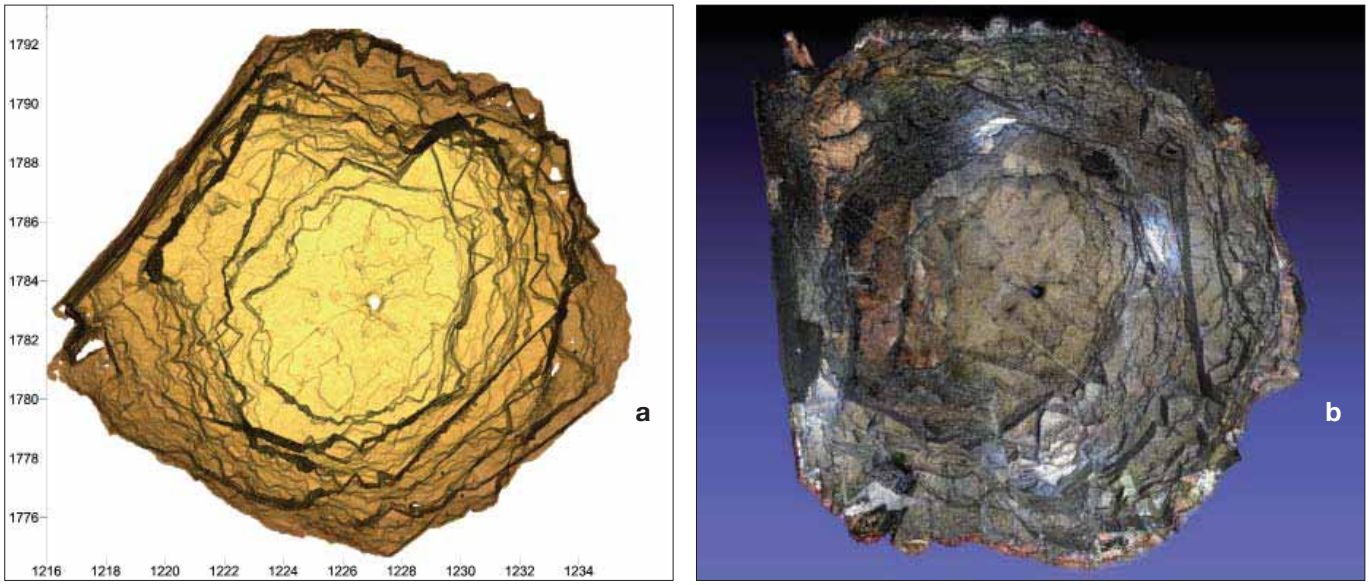


Figura 7 – Modello 3D (7a) e Modello 3D texturizzato (7b)

razione, è un modello tridimensionale costituito da una nuvola di punti molto dettagliata, capace di rappresentare, con estrema accuratezza, la geometria della grotta (*Figg.* 5 e 6).

Al fine di conferire maggiore gestibilità per le fasi successive di implementazione, viene eseguita una decimazione spaziale nell'intorno dei punti, in modo da alleggerire il dato e renderlo esportabile in altri software e altri formati. La fase finale del processamento delle nuvole di punti consiste nella realizzazione della superficie solida detta *mesh*

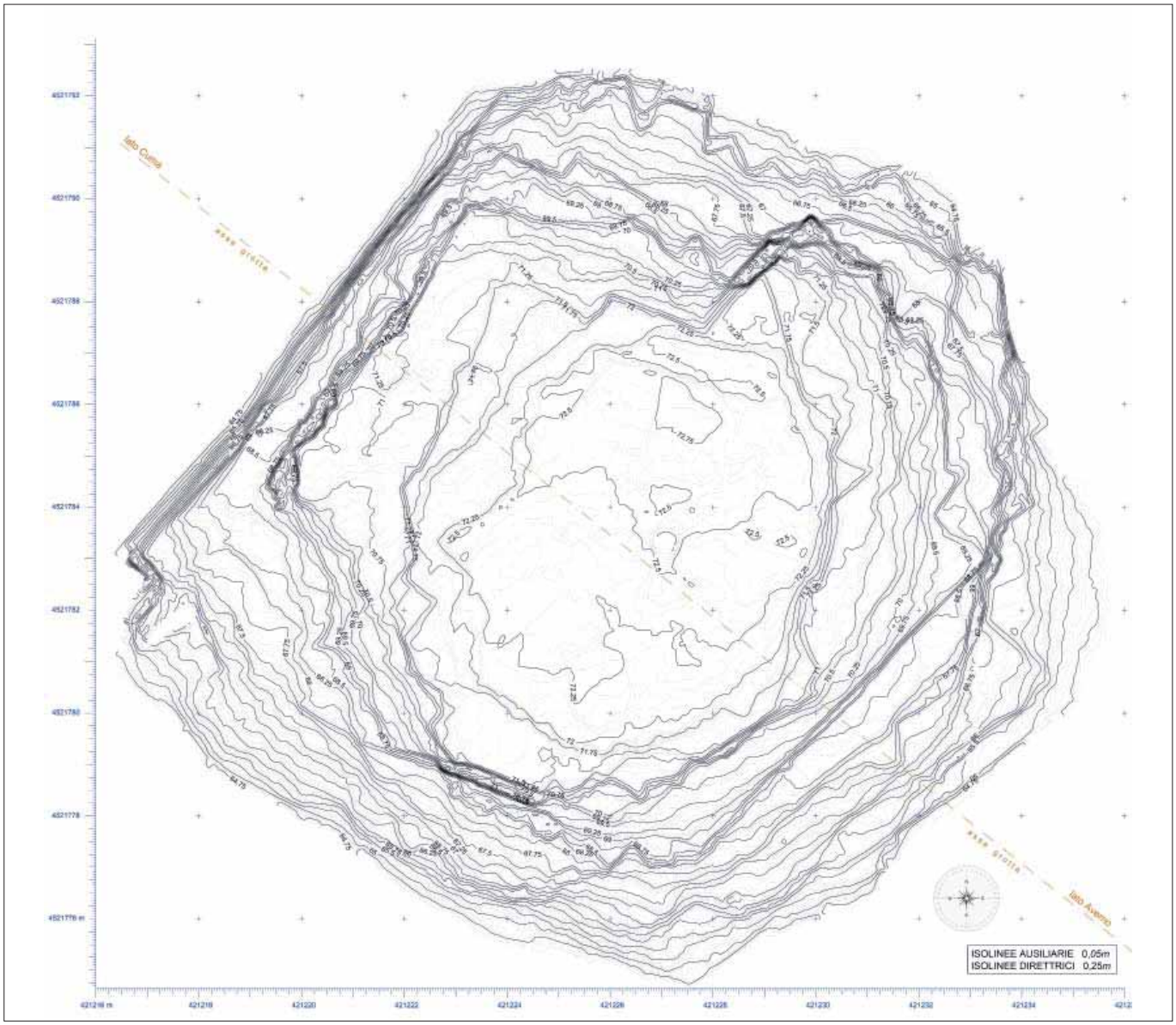


Figura 8 – Planimetria a curve di livello

(*Figg.* 7a e 7b) che rappresenta, in maniera esaustiva, la geometria della calotta.

Tutti i prodotti del rilievo confluiscono, infine, in elaborati grafici 2D e 3D rappresentati da planimetrie (*Fig.* 8), prospetti, sezioni, *mesh*, DTM (*Digital Terrain Model*), DSM (*Digital Surface Model*), etc.

ANALISI GEOMECCANICA SU NUVOLA DI PUNTI

L'analisi geostrutturale della Grotta di Cocceio è stata operata secondo metodi innovativi di analisi che prevedono la misura delle giaciture direttamente sulla nuvola di punti. Difatti, attraverso specifici software sono stati analizzati gli attributi della nuvola di punti e, più specificatamente, i valori delle normali associate ai piani che si adattano ad aggregati di punti tra loro adiacenti (*CloudCompare*).

Tali normali definiscono l'orientazione delle entità geometriche a cui appartengono nello spazio, difatti anch'esse sono definite da una terna di coordinate spaziali.

Pertanto, a partire dalla nuvola di punti e dal suo DSM occorre stimare le equazioni analitiche, nella forma $AX + BY + CZ + D = 0$, che determinano l'orientamento e la posizione nello spazio dei piani che meglio approssimano la nuvola di punti.

Tra i metodi utilizzati per definire e misurare detti piani vi è il metodo dei minimi quadrati e quello della segmentazione geometrica del DSM (Roncella *et al.*, 2004).

Il metodo dei minimi quadrati considera tutto il set di dati messi a disposizione. Tale metodo, però, non prevede l'utilizzo di meccanismi interni per individuare e rifiutare gli errori grossolani, presenti soprattutto quando si trattano dati sperimentali. Con questo metodo si può avere un alto rischio di errori grossolani non compensati che vanno ad inficiare la validità del modello assunto; infatti il rischio è quello di avere nel set di punti iniziali da interpolare punti appartenenti ad un altro piano (*Fig.* 9).

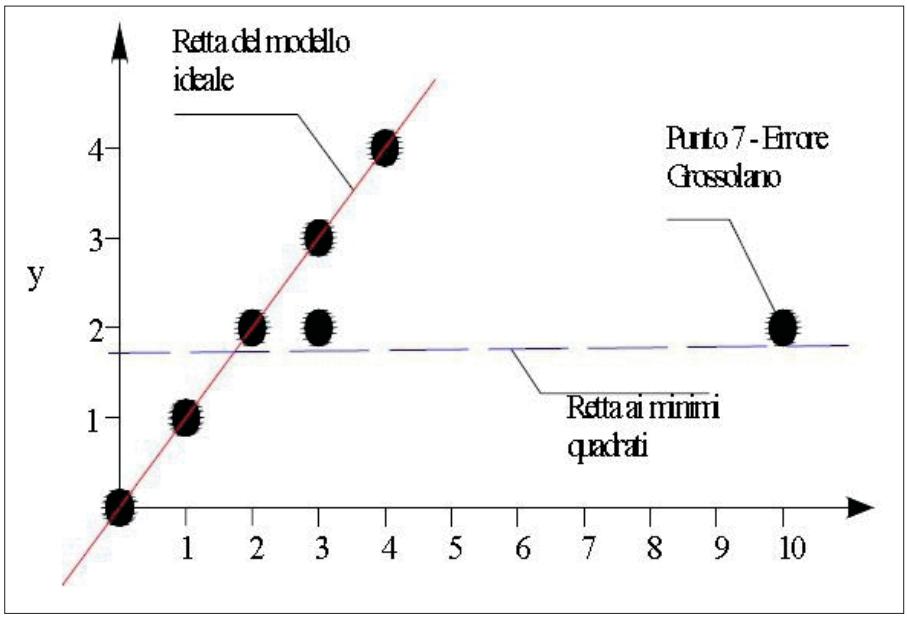


Figura 9 – Fallimento della riduzione a minimi quadrati per la stima di dati affetti da errori grossolani

L'algoritmo RANSAC (Fischler & Bolles,1981) permette, invece, di individuare i vari piani e stimare le relative equazioni caratteristiche, anche in presenza di una rilevante percentuale d'errori grossolani.

La procedura seguita dall'algoritmo è totalmente diversa da quelle impiegate nelle normali metodologie di stima: anziché utilizzare inizialmente il maggior numero possibile di dati per ottenere una soluzione di partenza, dalla quale poi distinguere i punti non validi, RANSAC utilizza il minor numero possibile di dati iniziali per generare il modello, cercando poi di allargare questo set con dati coerenti al modello, se possibile.

Per chiarire la procedura si riporta il riferimento al caso bidimensionale della retta da ricercare in un insieme di dati sperimentali contenente una percentuale anche molto rilevante di errori grossolani (*Fig.* 10a, Project INTERREG III ALCOTRA 2002-2006):

- Vengono eseguite un numero adeguato i di prove:
  - estrazione casuale di $n=2$ dati (minimo indispensabile per definire il modello);
  - valutazione degli scarti rispetto al modello: vengono selezionati i punti che cadono entro una soglia predefinita s (verdi) e si scartano gli altri (rossi).
- L'insieme che contiene il numero maggiore di dati rappresenta il modello ricercato;
  - il modello prescelto viene ristimato a minimi quadrati utilizzando tutti i punti classificati come *inliers*.

Ripetendo il procedimento per i volte si otterranno, pertanto, i insiemi di punti ognuno generato da una differente scelta dei 2 punti iniziali. Per un appropriato valore di i, si può asserire che con una determinata probabilità p almeno una delle coppie di punti iniziali non comprende al suo interno nemmeno un *outlier*.

Nel caso in cui siano presenti più sottoinsiemi coerenti di dati (*Fig.* 10.b, Project INTERREG III ALCOTRA 2002-2006), l'algoritmo elimina tutti i punti appartenenti alla retta che ha ottenuto il maggior consenso (in rosso) e ripete la procedura di ricerca della retta che meglio approssima i punti rimanenti.

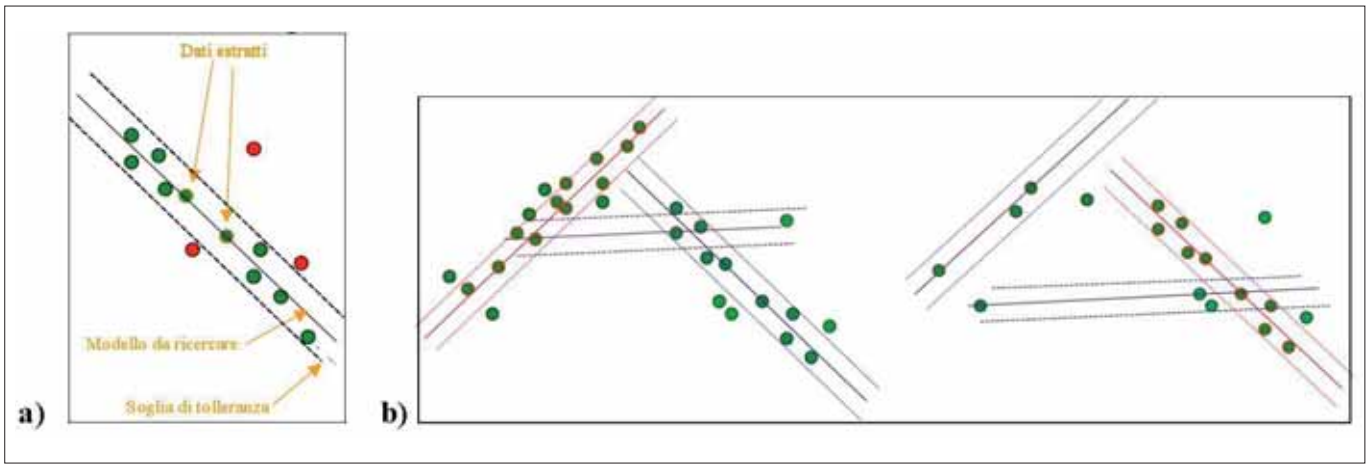


Figura 10 – a) Individuazione della retta interpolante nel caso sia presente un solo insieme di dati; b) Individuazione della retta interpolante nel caso siano presenti più sottoinsiemi di dati (più rette)

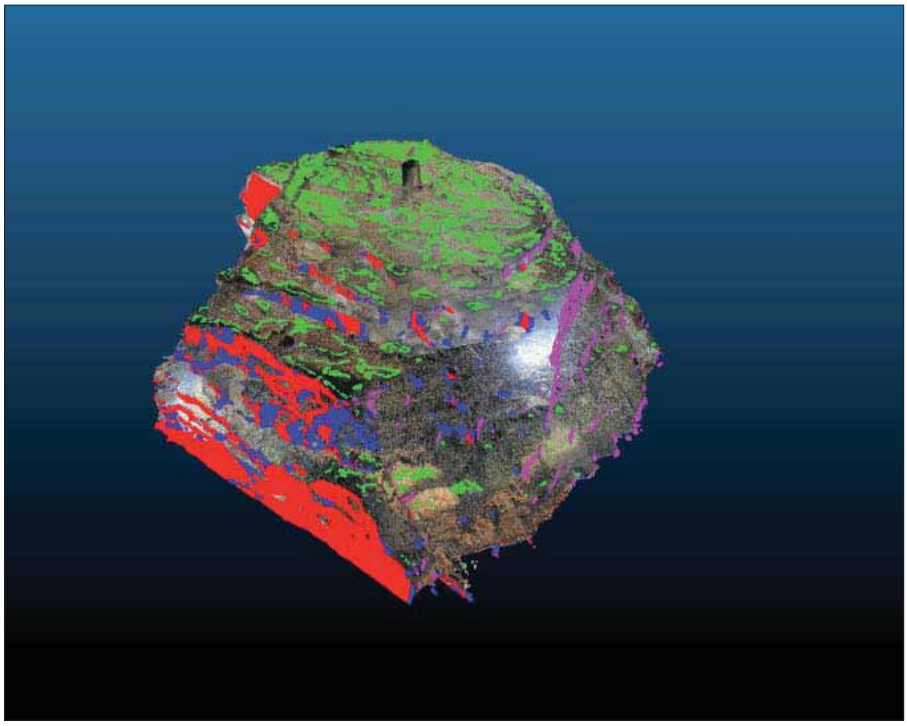


Figura 11 – Rappresentazione del set di punti selezionati in quanto ritenuti rappresentativi di una determinata famiglia di discontinuità

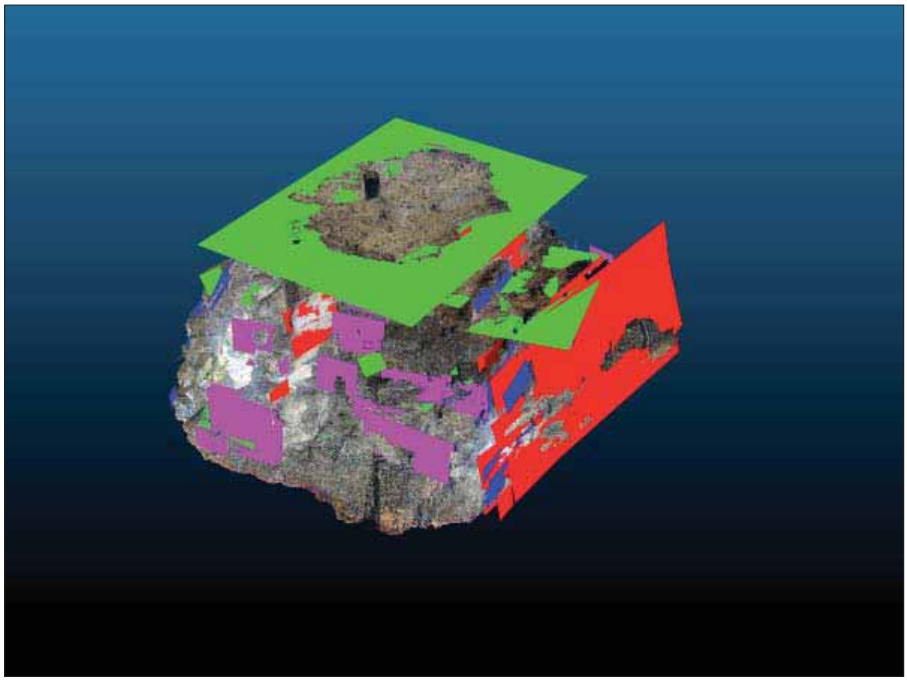


Figura 12 – Rappresentazione dei piani di discontinuità interpolanti i set di punti selezionati

A tale fine, per ogni modello, sono state condotte delle prove su diverse porzioni di DTM, per ricercare un valore di soglia che si dimostrasse efficiente, indipendentemente dalla dimensione media delle porzioni, dalla rugosità e dall'ondulazione della parete.

In particolare il presente studio è stato operato avvalendosi dell'algoritmo RansacSD (RANSAC *Shape Detection*). Si tratta di un algoritmo di rilevamento automatico della forma proposto da ricercatori dell'Università di Bonn (Schnabel *et al.*, 2007), che consente di isolare forme, o un insieme di forme, all'interno del DSM (procedura eseguita con il software *open source Cloud Compare*).

Pertanto, per estrapolare i piani interpolanti aggregati di punti ad egual giacitura si è eseguita, sulla nuvola di punti filtrata e decimata, una analisi delle normali associate ai singoli piani così determinati; ciò ha consentito di individuare porzioni di spazio con orientazione simile. Tali valori sono stati, quindi, parametrizzati attribuendo alla nuvola di punti un nuovo attributo, calcolato associando al valore della normale di ogni singolo piano, il valore di giacitura (Dip/Dip Direction).

A questo punto, sono stati selezionati tutti i punti a giacitura simile entro un certo *range* di variabilità, lungo quelli che sono i lineamenti geologici di interesse, al fine di interpolare i piani che meglio si adattano alla distribuzione di punti individuata.

I parametri considerati sono (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2008):

- numero massimo di punti appartenenti allo stesso piano, che è funzione della densità di punti;
- soglia di tolleranza della distanza tra il piano scelto e gli altri punti, che è funzione dell'accuratezza della nuvola di punti;
  - massima deviazione dal vettore normale al piano scelto;
- imposizione di valori di soglia, affinché il procedimento iterativo sia finalizzato alla ricerca di piani più adatti trascurando quelli con errore maggiore. Tale metodo è definito di tipo semi-automatico, con controllo e validazione manuale, in quanto ad una fase prettamente computazionale di riconoscimento, calcolo e conversione delle normali in dato geostruttuale, vi è alla base un processo di selezione manuale delle entità da modellare (*Fig.* 11), dettata dall'esperienza dell'operatore che mantiene un controllo diretto sul dataset di risultati in uscita.

Infine, si è proceduto alla creazione automatica del piano di discontinuità interpolante i punti selezionati e limitrofi (*Fig.* 12) ed alla estrazione delle giacitura per ciascuno di essi (calcolo di Dip Direction – Dip).

I piani così individuati dai parametri medi di immersione e inclinazione vengono rappresentati mediante proiezione stereografica. La discretizzazione in famiglie di discontinuità è operata per mezzo di una selezione dei poli dei piani mediante finestre entro le quali è stato mediato il valore di dip/dip direction.

Essendo le giaciture in oggetto in gran parte ad alto angolo di inclinazione si è tenuto conto della possibile variazione di polarità delle discontinuità connessa ad un eventuale

Tabella 1 – Giacitura media delle principali famiglie di discontinuità identificate mediante analisi geostrutturale su nuvola di punti.

SET	Analisi Geostrutturale su Nuvola di Punti		
ID	Immersione	Inclinazione	N. di Piani
K1	310	82	41
K2	112	78	53
K3	20	75	38
S'	205	15	22

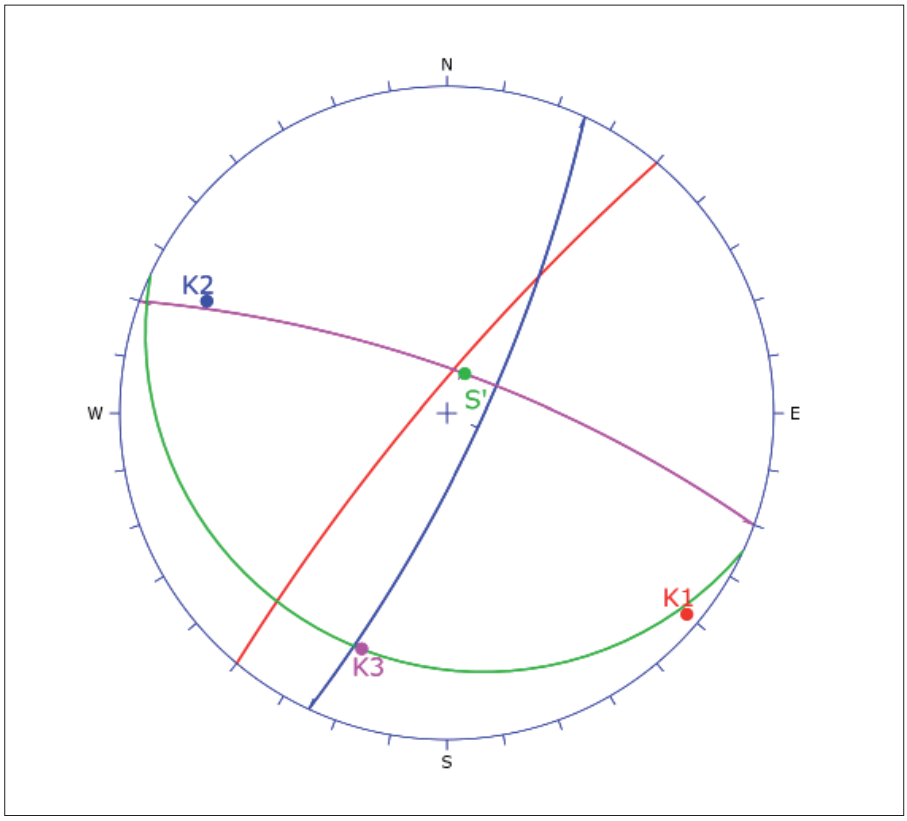


Figura 13 – Rappresentazione delle ciclografiche delle famiglie di discontinuità individuate mediante analisi geostrutturale su nuvola di punti

andamento ondulato. Di conseguenza le finestre entro cui sono stati mediati i parametri delle discontinuità abbracciano porzioni opposte dello stereoplot.

Sono state effettuate 154 misure di discontinuità lungo tutta l'estensione delle pareti in esame, distinguendo almeno tre famiglie di discontinuità principali, oltre alla stratificazione, la cui giacitura media è illustrata nel diagramma stereografico di *Fig.* 13 e che sono riassunte in *Tab.* 1.

TARATURA E CONFRONTO QUANTITATIVO DEI DATI MEDIANTE TECNICHE STANDARD

Al fine di tarare il dato giaciturale acquisito in maniera semi-automatica sulla nuvola di punti, sono state saggiate sul posto alcune delle discontinuità presenti nell'ammasso tufaceo.

Più nel dettaglio, sono state identificate le principali famiglie di discontinuità che pervadono l'ammasso mediante osservazione diretta, e successivamente sono state eseguite misurazioni casuali delle stesse, con tecniche standard utilizzando la bussola geologica tipo Clar (*Fig.* 14) secondo le Raccomandazioni dell'*International Society of Rock Mechanics* (ISRM 1978). I dati di orientazione delle discontinuità in tal modo acquisiti sono stati raccolti in proiezione equiareale polare. In definitiva, è stata evidenziata la presenza, oltre alla stratificazione (S', S"), di tre famiglie di discontinuità principali (K1, K2, K3) e di una famiglia K4 scarsamente rappresentata (*Tab.* 2).

In ultima analisi è stata effettuata una comparazione dei dati strutturali ricavati con le due differenti tecniche di rilievo, ovvero rilievo geomeccanico manuale e rilievo geostrutturale su nuvola di punti acquisita con tecnica TLS.

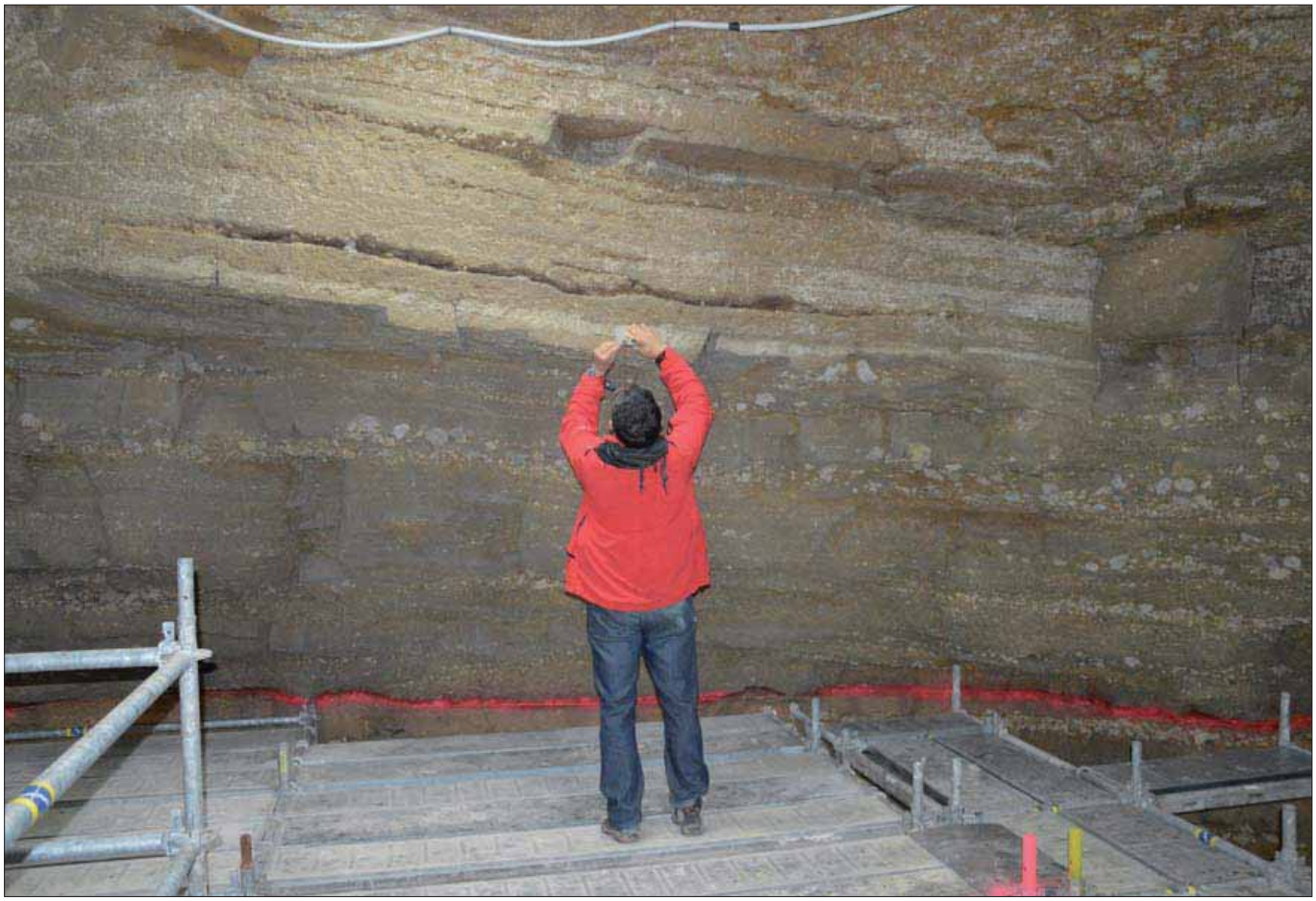


Figura 14 – Fase di acquisizione dei dati geomeccanici con tecniche standard

Dal confronto dei dataset ottenuti risulta evidente che i risultati conseguiti attraverso l'analisi geostrutturale su nuvola di punti sono congruenti con quanto acquisito in modo diretto (*Fig.* 15 e *Tab.* 2).

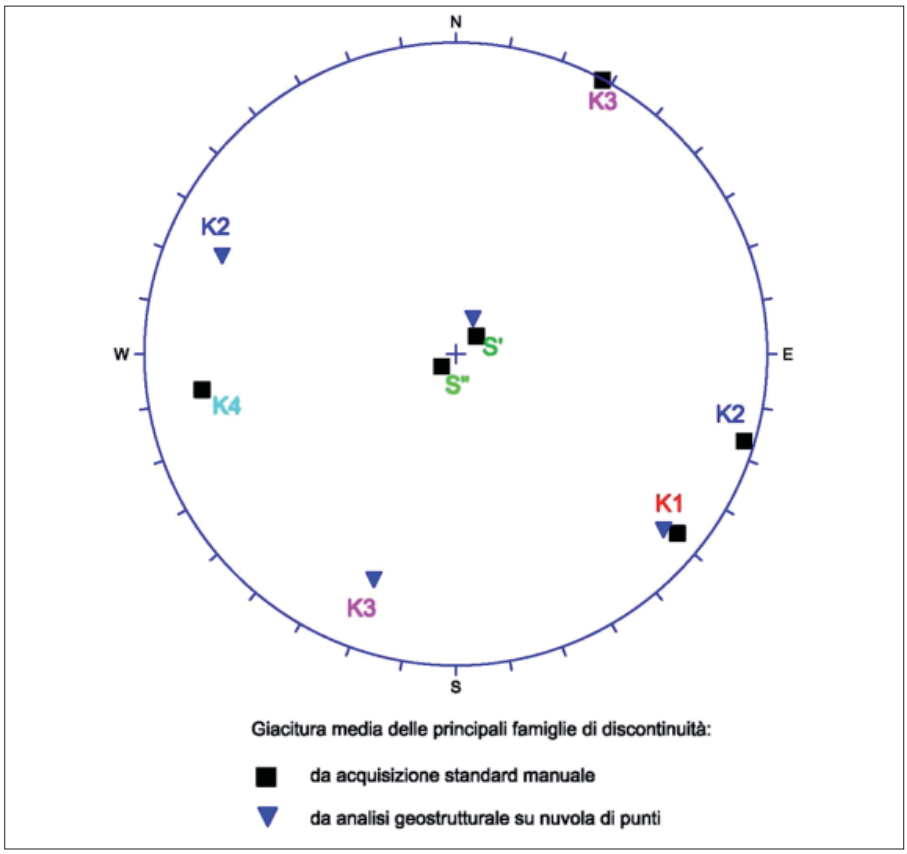


Figura 15 – Stereoplot relativo al confronto dei dati derivati da analisi geostrutturale su NP e da acquisizione con tecniche standard manuali

Tabella 2 – Confronto tra dati giaciturali acquisiti

SET	Tecniche Standard di Acquisizione		Analisi Geostrutturale su Nuvola di Punti	
ID	Immersione	Inclinazione	Immersione	Inclinazione
K1	309	85	310	82
K2	287	88	112	78
K3	208	90	20	75
K4	82	79		
S'	228	10	205	15
S"	50	7		

Fa eccezione la famiglia denominata K4, per lo più evidenziata da lineazioni lungo le pareti della calotta ma in generale scarsamente rappresentata nell'ammasso roccioso ed, apparentemente, le giaciture degli strati. A tal ultimo proposito, è da evidenziare che la differenza di immersione degli strati scaturita dal rilievo di tipo standard manuale è da correlare alla genesi dei materiali vulcanici (flussi piroclastici) caratterizzati da un andamento ondulato della stratificazione.

CONCLUSIONI

L'analisi degli ammassi rocciosi può risultare in alcuni casi particolarmente complessa in considerazione delle condizioni logistiche e della estensione dei fronti da investigare, oltre che dispendiosa in termini di costi e di tempo. L'utilizzo di tecniche di indagine avanzate, come il rilievo scanner laser 3D per la accurata modellazione geometrica dei fronti rocciosi, risulta una metodologia essenziale per trovare una soluzione tecnica valida a tali problematiche.

Tale procedura consente, infatti, di sostituire le informazioni puntuali acquisite con le tecniche di rilievo tradizionale con quelle areali ed estese all'intero ammasso roccioso. Ciò, oltre a determinare una più approfondita conoscenza dell'assetto geostrutturale dell'ammasso, consente anche di eseguire i rilievi con maggiori livelli di sicurezza (talora proibitivi con l'esecuzione di indagini classiche) e con costi più ridotti.

A tal fine, è stato presentato il caso studio relativo alla Grotta di Cocceio a Bacoli, dal quale si evince il prezioso contributo del rilievo laser scanner 3D come supporto alla analisi geostrutturale degli ammassi rocciosi.

Difatti, le analisi condotte hanno consentito di ottenere dati altamente attendibili in condizioni logisticamente difficili, fornendo così ai progettisti la base per la definizione di tutti quegli elementi indispensabili per il dimensionamento degli interventi di consolidamento (orientazione dei giunti, cinematismi attesi, spaziature delle discontinuità, ecc.).

Gli ottimi risultati ottenuti da questa innovativa tecnica di rilievo inducono a considerare la possibilità di una sua applicazione a nuvole di punti acquisite avvalendosi della fotogrammetria terrestre da SAPR (*Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto*). Tale procedura consentirebbe di risolvere una delle maggiori problematiche legate al rilievo con LST, rappresentata dalla sovente impossibilità di acquisire l'oggetto in esame da più punti di vista a meno di installare il laser scanner su piattaforme inerziali in grado di consentire il rilievo anche su mezzi aerei, SAPR, o natanti.

BIBLIOGRAFIA

Beloch J. (1989), *Campania – Storia e topografia della Napoli antica e dei suoi dintorni.* Ristampa a cura di Claudio Ferone e Franco Pugliese Carratelli, Napoli, Bibliopolis.

Di Vito M. A., Arienzo I., Braia G., Civetta L., D'antonio M., Di Renzo V., Orsi G. (2011), *The Averno 2 fissure eruption: a recent small-size explosive event at the Campi Flegrei caldera (Italy).* Bull. Volcanol., 73, 295-320.

Fischler M. A., Bolles R. C. (1981), *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography.* Communications of the ACM, 24 (6), 381-395.

ISRM (1978), *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanical Abstracts, 15, 319-368.

Lirer L., Petrosino P., Alberico I., Armiero V. (2011), *Carta Geologica di Cuma, Averno e Monte Nuovo* (Scala 1:10.000).

Orsi G., De Vita S., Di Vito M. (1996), *The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration.* J. Volcanol. Geotherm. Res., 74, 179–214.

Projet INTERREG III ALCOTRA (2002-2006), *Rockslidetec - Développement d'outils méthodologiques pour la détection et la propagation des éboulements de masse* - Rapporto Finale.

RiscanPRO 64bit vers. 2.3.2, Riegl Laser Measurement System, www.riegl.com

Roncella R., Forlani G., Remondino F. (2004), *Photogrammetry for geological applications: Automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes.* Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.

Schnabel R., Wahl R., Klein R. (2007), *Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection.* Computer Graphics Forum, Citeseer, vol. 26, pp. 214-226.

CloudCompare Version 2.9.1 User Manual.

Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2008), *Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from Lidar data.* The Photogrammetric Journal of Finland, 21 (1), 97-109.

Studio numerico parametrico per la definizione di abachi per la valutazione preliminare della stabilità di cavità sotterranee in calcarenite tenera

Michele Perrotti[1], Piernicola Lollino[1], Nunzio Luciano Fazio[1], Luca Pisano[1], Giovanna Vessia[2], Mario Parise[3], Antonello Fiore[4], Michele Luisi[4], Maria Nilla Miccoli[4], Luigi Spalluto[4]

[1] CNR – IRPI, Bari (Italy)
[2] Università di Chieti-Pescara "G. D'Annunzio" (Italy)
[3] Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" (Italy), precedentemente CNR – IRPI
[4] Autorità di Bacino Puglia, Bari (Italy)

Numerical-parametric analyses to define charts for preliminary stability assessment of soft calcarenite underground quarries

Parole chiave (*key words*): Puglia (*Puglia*), Cavità sotterranee (*Underground cavities*), sinkhole (*sinkhole*), Analisi Parametrica (*Parametric Analisys*)

RIASSUNTO

Nel secolo scorso, la Puglia è stata interessata da un'intensa attività estrattiva di calcareniti tenere, utilizzate per lo più come materiale da costruzione. In particolare, l'estrazione in sotterraneo ha creato un numero elevato di cavità solitamente di forma regolare, a pianta e sezione rettangolari, a volte modellate secondo lo schema a "camere e pilastri". In tali cavità, progressivamente abbandonate, si sono registrati in tempi recenti numerosi collassi che, in alcuni casi, hanno coinvolto strutture e infrastrutture ubicate a piano campagna. Nel presente lavoro, si illustrano i risultati di analisi bidimensionali parametriche svolte con il metodo degli elementi finiti (software PLAXIS 2D) e si propone una metodologia utile a valutare, in via preliminare, la stabilità di cavità sotterranee in calcareniti tenere. In particolare, sono state individuate possibili correlazioni tra le principali caratteristiche geometriche delle cavità (larghezza, altezza e spessore della copertura) e le caratteristiche di resistenza dei materiali rocciosi interessati. Le analisi hanno previsto l'adozione sia di valori dei parametri geometrici osservati per un ampio numero di cavità sotterranee presenti in Puglia sia di parametri di resistenza misurati sulle calcareniti tenere affioranti nella stessa regione. I risultati sono sintetizzati in abachi utili a valutare, in modo preliminare e speditivo, le condizioni di stabilità di cavità con caratteristiche che ricadono nelle ipotesi del calcolo, da verificare successivamente con analisi più approfondite.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE DELLE ROCCE IN ESAME

Il numero di eventi di sprofondamento (o *sinkhole*) e altri fenomeni di dissesto dovuti al collasso di cavità sotterranee risulta essere in aumento in Puglia; le cavità sotterranee interessate da processi di instabilità, ed oggetto del presente studio, sono ubicate all'interno di calcareniti. Questo litotipo, molto diffuso nella regione pugliese (Parise e Lollino, 2011; Lollino *et al*., 2013) può essere classificato come roccia tenera o addirittura molto tenera e per questa ragione è stato cavato per poi essere utilizzato come materiale da costruzione nei decenni passati. Data la estesa diffusione nell'ambito regionale, nonché la maggiore presenza al loro interno di cavità artificiali, sono state prese in considerazione le calcareniti appartenenti alla formazione della Calcarenite di Gravina (affiorante soprattutto nella provincia di Bari, Brindisi, Taranto e Lecce) e a quella della Calcarenite del Miocene (che affiora esclusivamente nel territorio leccese). Nella mappa di *Fig.* 1 (Lepore *et al*., 2014) sono riportati i principali affioramenti calcarenitici in Puglia.

I valori medi di resistenza a compressione monoassiale per la Calcarenite di Gravina variano, in condizioni drenate, in un range di valori compreso tra 1 e 9 MPa (Andriani and Walsh 2010; Ciantia *et al.* 2015); in condizioni sature tali valori si riducono fino anche a 0,3 – 0,6 MPa in virtù dell'elevata influenza del grado di saturazione della roccia. La resistenza a trazione si attesta generalmente in un intervallo di valori compreso tra 0,2 e 2 MPa (Coviello *et al*. 2005). Le calcareniti del Miocene esibiscono una maggiore resistenza a compressione monoassiale con valori, in coindizioni drenate, compresi tra 10 e 22 MPa (Andriani & Walsh, 2010). Più in generale, per le calcareniti prese a riferimento in questo studio, possono essere considerati i range di valori dei parametri geotecnici riportati in *Tab.* 1 (Luisi *et al*., 2015).

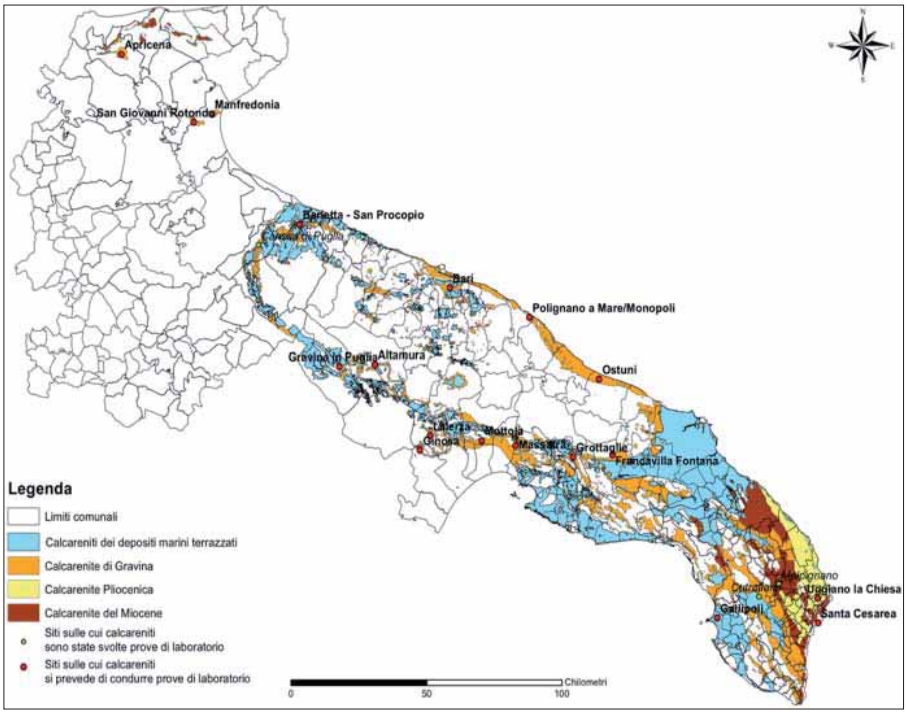


Figura 1 – Affioramenti calcarenitici in Puglia (da Lepore et al.*, 2014)*

Tabella 1 – Caratteristiche geotecniche delle calcareniti considerate (da Luisi *et al.*, 2015)

Peso specifico dell'unità di volume	14 ÷ 17	kN / m^3
Peso specifico dei grani	25,8 ÷ 27,4	kN / m^3
Porosità	28 ÷ 51	%
Resistenza a compressione monoassiale	1000 ÷ 2000	kPa
Resistenza a compressione monoassiale (campioni saturi)	750 ÷ 1500	kPa
Resistenza a trazione	100 ÷ 200	kPa
Angolo di attrito	30 ÷ 35	(°)
Coesione efficace	80 ÷ 200	kPa
Modulo di elasticità longitudinale	100 ÷ 150	MPa

ANALISI FEM BI-DIMENSIONALI DI TIPO PARAMETRICO

Lo studio parametrico bidimensionale ha indagato il comportamento di cavità ideali di forma regolare (a pianta e sezioni rettangolari) per le quali si sono ricercate le correlazioni tra le dimensioni, i parametri di resistenza del materiale e le condizioni di stabilità. È stata pertanto condotta un'ampia serie di analisi agli elementi finiti con il software di calcolo PLAXIS 2D per valutare la stabilità della cavità al variare delle sue dimensioni L (larghezza), h (altezza) e t (spessore della copertura, cioè distanza dell'intradosso dal piano campagna) (*Fig.* 2). Il dominio di calcolo del modello bidimensionale è costituito da un rettangolo di dimensioni 100 x 60 metri suddiviso in due zone: una prima zona, nella quale simulare lo scavo di una cavità con dimensioni rappresentative L, h e t, per la quale si è adottata una mesh di calcolo fine e una seconda zona, circostante alla prima, nella quale la mesh adottata è più grossolana; tale suddivisione è stata effettuata in modo da trovare un buon compromesso tra la qualità dei risultati e la durata delle analisi FEM 2D. Le condizioni al contorno hanno previsto l'imposizione di spostamenti impediti alla base del modello (rappresentati dal vincolo di incastro), spostamenti verticali liberi ai due lati (sono impediti gli spostamenti orizzontali rappresentati dal vincolo del carrello) e, ovviamente, spostamenti liberi in entrambe le direzioni al piano campagna. Tutte le analisi sono state svolte simulando condizioni drenate dell'ammasso roccioso.

Ciascuna analisi è stata condotta impostando tre fasi sequenziali di calcolo:
la prima fase ha previsto il calcolo dello stato tensionale iniziale (procedura K_0) sulla base del peso dell'unità di volume assegnato; in particolare si è posta la tensione verticale iniziale pari alla tensione orizzontale iniziale (ovvero valore di $K_0 = 1$);
la seconda fase ha previsto un calcolo elasto-plastico dell'intero ammasso roccioso;
la terza fase, infine, ha visto la simulazione dello scavo della cavità (in un'unica soluzione) con seguente analisi elasto-plastica drenata.

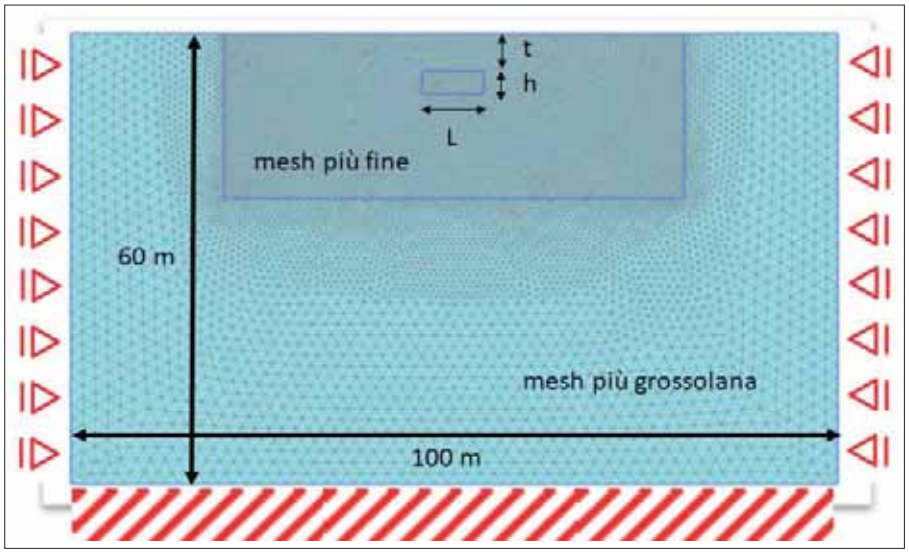


Figura 2 – Schema geometrico di modellazione di cavità singola di forma regolare

Un passaggio fondamentale nella modellazione FEM è rappresentato dalla scelta del modello costitutivo rappresentativo del comportamento del materiale in esame. È noto che le rocce mostrino, nel piano di Mohr, un inviluppo di resistenza non lineare che può essere ben simulato attribuendo al materiale un comportamento elastico perfettamente plastico con criterio di rottura secondo Hoek & Brown (Hoek e Brown, 1997). Nella sua formulazione generale più recente, data dall'equazione

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad \begin{cases} m_b = f(GSI, D, m_i) \\ s = f(GSI, D) \\ a = f(GSI) \end{cases}$$

le grandezze rappresentative del criterio di rottura di Hoek & Brown sono individuate da σ_c, valore della resistenza a compressione monoassiale e dai parametri m_b, *s* e *a* che dipendono dalle costanti del materiale GSI, D e m_i.

A titolo cautelativo, per il modello adottato si sono adottate condizioni di flusso non associato (in particolare, dilatanza nulla $\Psi = 0$).

Il valore di GSI *(Geological Strength Index)* controlla il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso; volendo simulare, in questo studio, l'ammasso roccioso come massivo ed intatto (senza discontinuità o famiglie di giunti che possono rappresentare elementi condizionanti la stabilità dell'ammasso e conferire un certo grado di anisotropia di comportamento dello stesso) il valore da attribuire al GSI risulta essere pari a 100.

Il parametro *D* rappresenta il fattore di disturbo della roccia indotto dalla tecnica di scavo ed è stato posto pari a 0, volendo così simulare un materiale roccioso non alterato dalla particolare tecnica di scavo o da fenomeni di rilascio tensionali conseguenti ad una tecnica di scavo che comporti disturbo significativo della roccia.

Infine, il valore m_i, costante del materiale della roccia intatta, è il parametro rappresentativo del rapporto tra la resistenza a compressione e quella a trazione della roccia; poiché tale valore varia, in un intervallo compreso, all'incirca, tra 3 e 16, sono state sviluppate analisi FEM che prevedono l'utilizzo di tre diversi valori di mi, pari rispettivamente a 3, 8 e 16, ed il confronto dei risultati ottenuti dall'adozione dei tre diversi valori è discusso nel seguito.

Lasciando costanti le suddette grandezze (GSI, D e m_i), si è quindi fatto variare, per ciascuna analisi relativa ad una assegnata cavità ideale, il solo valore di σ_c, al fine di ricercare il valore limite dello stesso parametro associato alla condizione di collasso locale o globale. Si fa presente, a tal proposito, che la variabile del criterio di Hoek & Brown qui utilizzata nelle analisi parametriche (la resistenza a compressione monoassiale, σ_c) rappresenta un parametro di rapida valutazione nelle usuali indagini di laboratorio (prove di compressione monoassiale o prove empiriche quali Point Load Test, prove sclerometriche), e dunque di agevole stima da parte di tecnici ed operatori del settore.

Pertanto, scopo delle analisi condotte nell'ambito di questo studio, è stata la ricerca, in ambito bidimensionale, di correlazioni tra le caratteristiche geometriche della cavità ed i valori di resistenza della roccia mobilizzata al collasso.

Per stabilire le condizioni che generano il collasso della cavità sono stati perseguiti i seguenti obiettivi:

a) ricercare il valore della resistenza mobilitata al collasso ovvero il valore $\sigma_{c,lim}$ della resistenza a compressione monoassiale limite;
b) ricerca del meccanismo di primo collasso;
c) influenza del parametro m_i (che tiene conto del rapporto fra resistenza a compressione e resistenza a trazione del materiale) sulla resistenza mobilitata e sul meccanismo di collasso.

Per ogni specifica cavità in esame, si è ricercato il set di valori dei parametri di resistenza del materiale che conducono alla formazione di un meccanismo di rottura, sia esso locale o generale.

Nello sviluppo delle diverse analisi è stata definita una combinazione di criteri per l'individuazione di un meccanismo di rottura vero e proprio (locale o generale). In particolare, si è scelto quale criterio di definizione di un meccanismo di rottura la coesistenza delle seguenti condizioni:

- mancato raggiungimento della convergenza numerica;
- meccanismo di plasticizzazione 'chiuso' che individua un cinematismo all'interno dell'ammasso roccioso (es. *Fig.* 3);
- spostamenti verticali di punti appartenenti alla regione coinvolta nel collasso in aumento al procedere dei cicli di calcolo.

Relativamente al criterio sulla individuazione di un meccanismo di plasticizzazione 'chiuso' si vedano, a titolo esemplificativo in *Fig.* 3, gli output tipici di un meccanismo di rottura generale in termini di punti plastici, distribuzione della tensione tangenziale relativa (rapporto tra la tensione tangenziale effettivamente mobilizzata e quella massima disponibile a rottura) e distribuzione della deformazione di taglio.

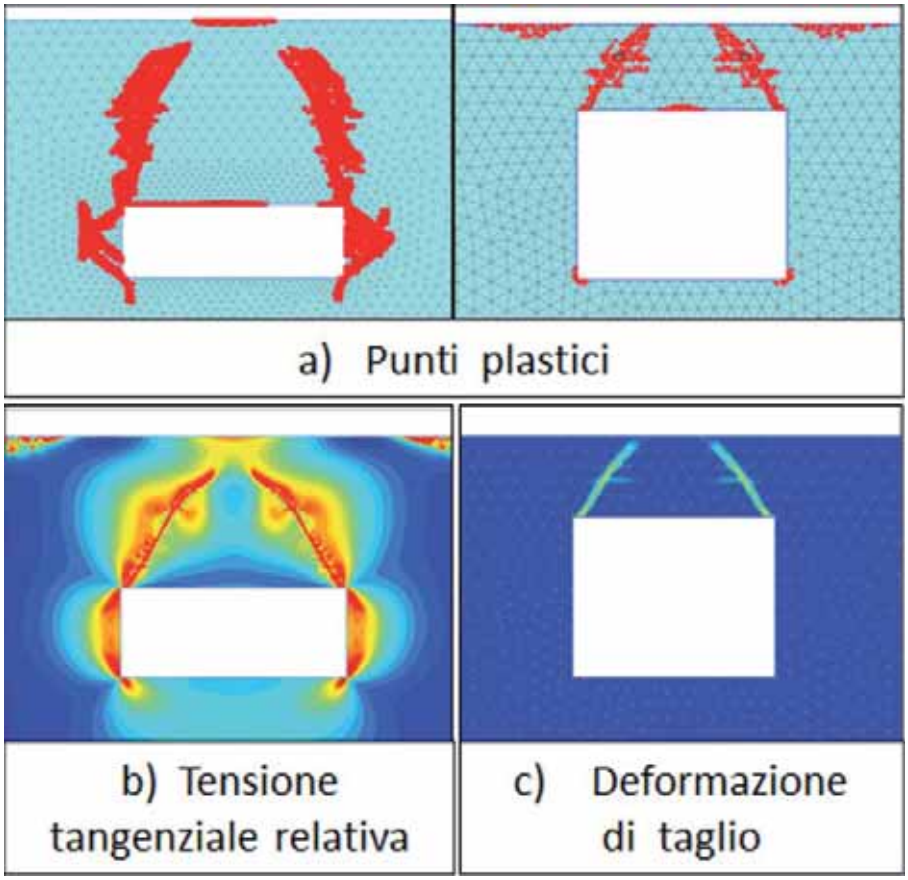


Figura 3 – a) Meccanismo di plasticizzazione, b) distribuzione della tensione tangenziale relativa, c) distribuzione della deformazione di taglio

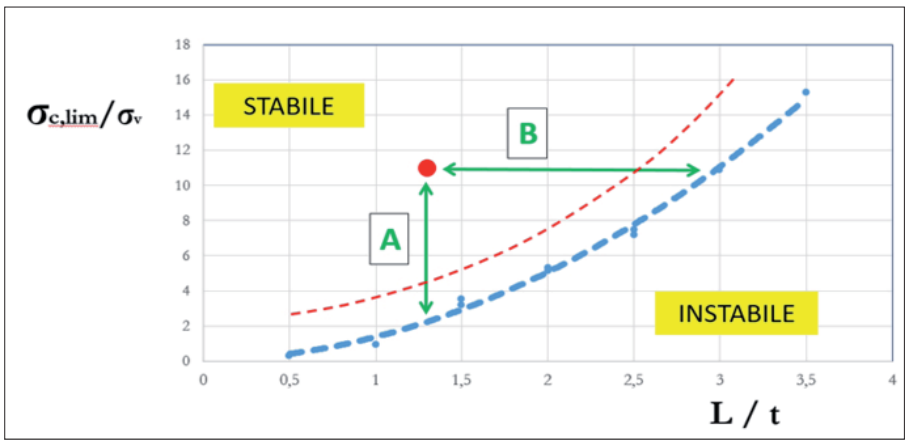


Figura 4 – Esempio di un abaco per la valutazione delle condizioni di stabilità di una cavità (modificato da Perrotti et al.*, 2018)*

Nel corso delle analisi parametriche 2D sono stati inoltre monitorati, in funzione dei cicli di calcolo *(time-steps)*, gli andamenti degli spostamenti verticali di alcuni punti ubicati nella porzione di ammasso roccioso compresa tra la volta ed il piano campagna; al raggiungimento di un meccanismo di rottura globale con sprofondamento si assiste ad una rapida evoluzione degli spostamenti con valori che aumentano rapidamente ad indicare l'innesco della rottura dell'ammasso roccioso e la perdita di equilibrio del sistema.

Sia le grandezze geometriche (L, t e h) sia i parametri di caratterizzazione geomeccanica del materiale (peso di volume, modulo di elasticità, ecc…), sono stati individuati prendendo a riferimento gli intervalli di variazione tipicamente riscontrati per le cavità pugliesi costituite da calcareniti tenere; in particolare si è posto L variabile tra 5 e 35 metri, h variabile tra 2 e 8 metri, t variabile da 2 a 10 metri.

A partire da tali dati si è ricercato il valore limite del parametro di resistenza $\sigma_{c,lim}$ in corrispondenza del quale l'ammasso raggiunge una situazione di incipiente collasso, generale o locale.

L'obiettivo finale delle analisi è stato dunque quello di individuare un abaco di stabilità, come quello riportato, a titolo esemplificativo, in *Fig.* 4 (da Perrotti *et al.*, 2018).

In questo abaco è riportato in ascissa il rapporto L/t, o fattore di approfondimento, cioè il rapporto adimensionale fra la larghezza della cavità, L, e lo spessore di copertura della stessa, t, inteso come distanza tra il piano campagna e l'intradosso superiore della cavità, ed, in ordinata, il rapporto $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$, cioè il rapporto adimensionale tra il valore limite di resistenza a compressione monoassiale mobilizzato in concomitanza della formazione di un meccanismo di rottura ed il valore della tensione verticale litostatica antecedente allo scavo agente a livello dell'intradosso superiore della volta (in assenza di sovraccarichi al piano campagna essa è pari al prodotto del peso dell'unità di volume γ della roccia sovrastante la cavità per lo spessore di copertura t ($\sigma_v = \gamma \times t$)).

In questo modo si sono ricercati i luoghi delle combinazioni di caratteristiche geometriche e meccaniche al di sopra dei quali è presumibile ipotizzare condizioni di stabilità dell'ammasso o, viceversa, di probabile instabilità qualora il punto rappresentativo del rapporto tra resistenza e

stato tensionale verticale si trovi al di sotto dello stesso inviluppo.

Pertanto, entrando nell'abaco con il punto rappresentativo della cavità da valutare (punto rosso in *Fig.* 4), risulterebbe possibile:

A) calcolare un margine di sicurezza rispetto ad un meccanismo di rottura in volta tramite il rapporto tra la resistenza a compressione monoassiale del materiale in sito, σ_c, ed il valore limite della resistenza a compressione monoassiale $\sigma_{c,lim}$ che deriva come output dalle analisi parametriche, a parità di valore del rapporto L/t;
B) calcolare un valore critico del rapporto L/t come fattore di approfondimento massimo sostenibile dal sistema cavità, per un assegnato valore del rapporto tra la resistenza a compressione monoassiale della roccia, σ_c, e la tensione verticale agente, σ_v.

RISULTATI

I risultati delle analisi condotte assumendo un valore di $m_i = 3$ sono riportati in *Fig.* 5 (da Perrotti *et al.*, 2018), sotto forma di diagramma che riporta $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ in funzione di L/t, per diversi valori del rapporto tra la larghezza e l'altezza della cavità, di seguito indicato come fattore di forma della cavità, L/h.

Il trend generale osservato per le diverse curve di interpolazione così ottenute mostra un aumento del rapporto $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ all'aumentare del rapporto L/t, a testimonianza che, all'aumentare del valore del fattore di approfondimento, il valore del rapporto tra la resistenza a compressione limite e la tensione verticale agente sulla volta aumenta.

Inoltre, le stesse curve sono distinte per valori del fattore di forma, L/h, suddivisi nei quattro intervalli individuati dai valori pari a L/h = 1, 2 e 3. Il grafico di *Fig.* 5 evidenzia che, con un simile valore di m_i, il fattore di forma L/h esercita un'influenza pressoché modesta sull'inviluppo trovato.

In *Fig.* 6 (da Perrotti *et al.*, 2018) sono invece riportati i risultati delle analisi ottenuti nell'ipotesi in cui $m_i = 8$.

Anche in questo caso, il trend generale mostra un aumento del rapporto $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ all'aumentare del rapporto L/t, ma, rispetto al caso con $m_i = 3$, si nota un generale incremento dei valori $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ nell'area della figura caratterizzata da valori elevati di L/t.

Il grafico in *Fig.* 6 evidenzia che, per valori del rapporto L/t minori di 1,5, il fattore di forma ha un'influenza limitata, mentre, per valori di L/t maggiori di 1,5, all'aumentare del rapporto L/h il valore del rapporto $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$, a parità di L/t, tende ad aumentare. In *Fig.* 7 (da Perrotti *et al.*, 2018) sono invece riportati i risultati delle analisi ottenuti assumendo gli stessi valori dei diversi parametri geometrici sopra riportati e nell'ipotesi in cui $m_i = 16$.

Anche in questo caso, il trend generale mostra un aumento del rapporto $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ all'aumentare del rapporto L/t, ma, rispetto ai casi precedenti con $m_i = 3$ e con $m_i = 8$, si nota un generale incremento dei valori $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ nell'area della figura caratterizzata da valori elevati di L/t. Anche in questo caso, per valori di L/t maggiori di 1,5, all'aumentare del rapporto di forma L/h il valore del rapporto $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$, a parità di L/t, tende ad aumentare.

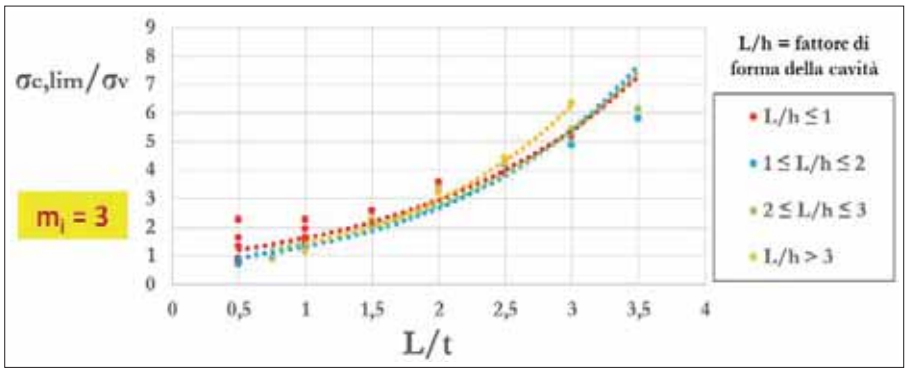


Figura 5 – Curve $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ - L/t, per diversi valori del rapporto L/h, ottenute per cavità di forma rettangolare ($m_i = 3$) (modificato da Perrotti et al.*, 2018)*

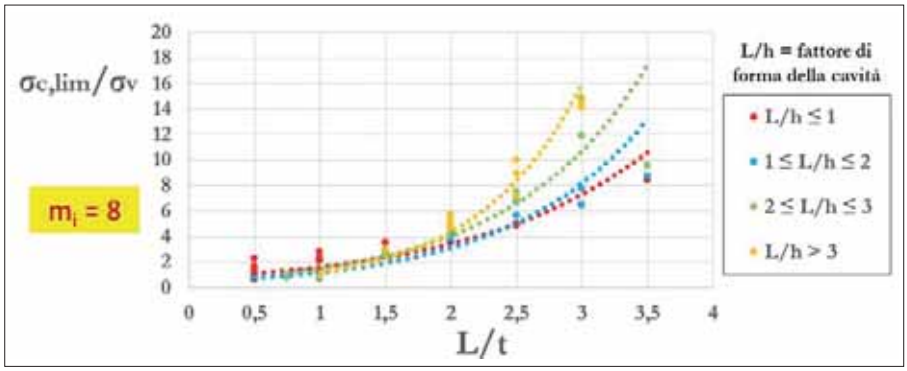


Figura 6 – Curve $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ - L/t, per diversi valori del rapporto L/h, ottenute per cavità di forma rettangolare ($m_i = 8$) (modificato da Perrotti et al.*, 2018)*

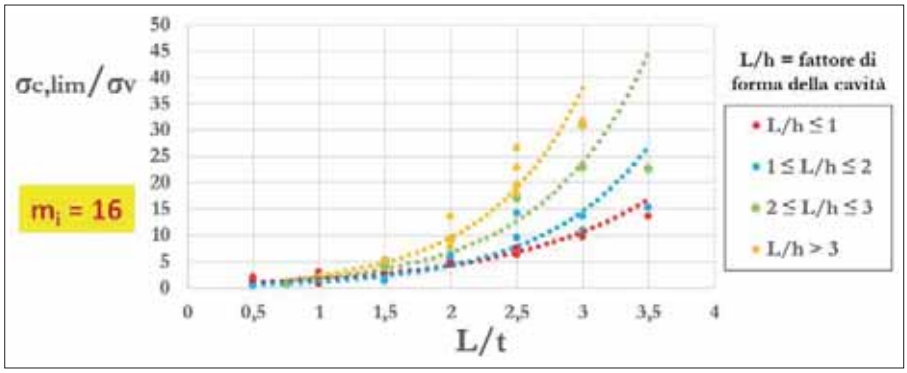


Figura 7 – Curve $\sigma_{c,lim}/\sigma_v$ - L/t, per diversi valori del rapporto L/h, ottenute per cavità di forma rettangolare ($m_i = 16$) (modificato da Perrotti et al.*, 2018)*

CONDIZIONI LIMITE DI STABILITÀ DI UN SISTEMA CON DUE CAVITA' ADIACENTI

Al fine di valutare l'influenza di un interasse ridotto tra due cavità adiacenti e, quindi, della potenziale interazione esistente tra le stesse cavità sulle condizioni di stabilità dell'intero sistema, sono state condotte ulteriori analisi in ambito bi-dimensionale. Tali analisi hanno previsto lo studio dell'influenza della distanza d tra due cavità uguali poste ad una stessa profondità t rispetto al piano campagna; in tal senso sono state modellizzate cavità poste ad una distanza variabile tra un valore massimo pari a d = 4L ed un valore minimo pari a d = 0.5L. Dalla *Fig.* 8 si evince che, per valori della distanza tra le due cavità maggiori o uguali a d = 2L, i risultati delle analisi non hanno indicato interazione tra le due cavità ed i valori corrispondenti di resistenza a compressione limite sono confrontabili con quelli dello schema con singola cavità di pari dimensioni ($\sigma_{c,lim}$ = 120 kPa).

Riducendo la distanza d, aumenta l'influenza reciproca tra le due cavità adiacenti; infatti per d = L si instaura una moderata interazione fra le due cavità con conseguente aumento del valore della resistenza a compressione monoassiale limite $\sigma_{c,lim}$ fino al valore di 150 kPa.

Per valori della distanza d inferiori a L, invece, i risultati numerici mostrano un evi-

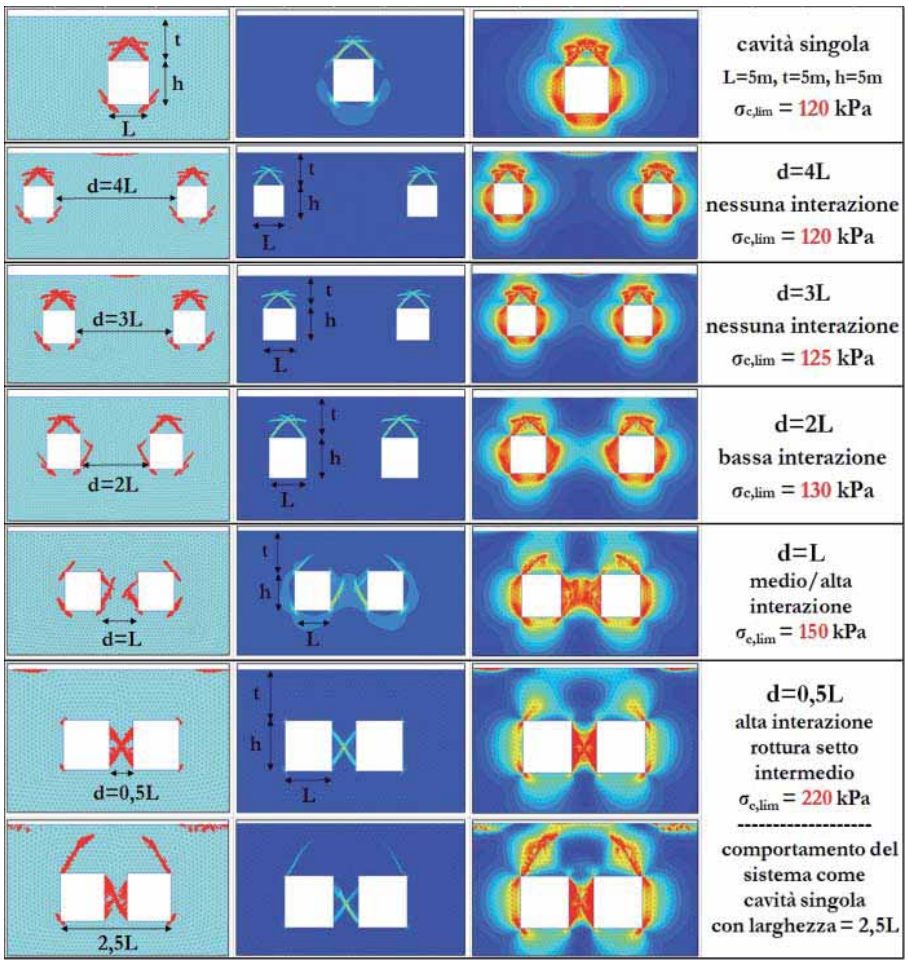


Figura 8 – Interazione fra due cavità adiacenti al variare della distanza

dente aumento della resistenza limite mobilitata al collasso ed un meccanismo di rottura che evidenzia, dapprima, il collasso del setto intermedio tra le cavità e, in seguito, la generazione di un meccanismo di rottura unico che coinvolge l'intero sistema delle due cavità.

I risultati di queste analisi, volte ad indagare la stabilità di cavità adiacenti in funzione della loro distanza d, sono sintetizzati in *Fig.* 9: le curve sono riferite ai diversi valori della distanza d e mostrano come, a parità di valore del rapporto L/t, al decrescere della distanza tra le due cavità, il valore della resistenza a compressione limite (rapportato al valore della tensione verticale agente) aumenti progressivamente, comportando così margini di sicurezza inferiori per la stabilità dell'intero sistema.

CONCLUSIONI

Le analisi FEM 2D parametriche hanno consentito di redigere abachi di stabilità utili ad una valutazione preliminare della stabilità di cavità sotterranee in calcarenite tenera, quando queste si presentino omogenee e intatte. I risultati hanno evidenziato che, all'aumentare del rapporto L/t, la resistenza a compressione limite utile a garantire la stabilità, aumenta. L'influenza del parametro m_i è risultata elevata e pone una certa particolare attenzione nella stima di questo parametro rappresentativo del rapporto tra la resistenza a trazione e resistenza a compressione della roccia; i tre casi esaminati con l'adozione dei valori di m_i pari a 3, 8 e 16 hanno mostrato un trend generale di aumento del valore di $\sigma_{c,lim} / \sigma_v$ all'aumentare del rapporto L/t, ma con valori, passando da 3 a 16, notevolmente diversi in termini di resistenza.

Infine, la valutazione dell'influenza della distanza fra due cavità ha evidenziato una certa gerarchia delle resistenze, da tenere in conto soprattutto nei casi in cui le cavità siano scavate con il metodo "a camere e pilastri"; infatti, riducendo la distanza fra due cavità adiacenti, il setto intermedio raggiunge la rottura e dà luogo ad un meccanismo di collasso generale che coinvolge l'intero sistema con sprofondamento.

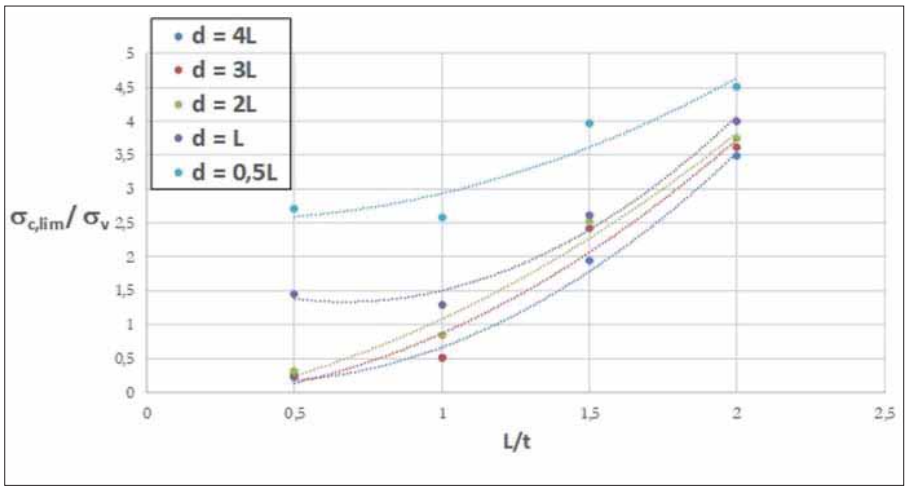


Figura 9 – Condizioni limite di stabilità. Effetto della distanza tra due cavità adiacenti

BIBLIOGRAFIA

Andriani G.F., Walsh N. (2010), *Petrophysical and mechanical properties of soft and porous building rocks used in Apulian monuments (south Italy)*, Geological Society, London, Special Publication, 333, 129-141.

Ciantia M. O., Castellanza R., Di Prisco C. (2015), "Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites." Rock Mech. Rock Eng., 48(2), 441-461.

Coviello A., Lagioia R., Nova R. (2005), "On the measurement of the tensile strength of soft rocks." Rock Mech. Rock Eng., 38(4), 251-273.

Hoek E., Brown E. T. (1997), *Practical estimates of rock mass strength*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 34(8), 1165-1186.

Lepore D., Spalluto L., Fiore A., Luisi M., Miccoli M. N. (2014), "Distribuzione delle cavità antropiche nel territorio pugliese in relazione alle caratteristiche litostratigrafiche delle calcareniti neogeniche" 3° Workshop Internazionale "Voragini in Italia," ISPRA, Roma.

Lollino P., Martimucci V., Parise M. (2013), *Geological survey and numerical modeling of the potential failure mechanisms of underground caves*, Geosystem Engineering, 16 (1), 100-112.

Luisi M., Di Santo A., Fiore A., Lepore D., Lollino P., Miccoli M.n., Parise M., Spalluto L. (2015), *Modellazione numerica 3D agli elementi finiti (FEM) per la valutazione delle condizioni di stabilità di cavità antropiche del territorio pugliese: il caso studio della cava ipogea di San Procopio (Barletta, Murge settentrionali)*, Mem. Descr. Carta Geol. D'It. XCIX (2015), pp. 327-336.

Parise M., Lollino P. (2011), *A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and manmade underground caves in Southern Italy*, Geomorphology, 134, 132-143.

Perrotti M., Lollino P., Fazio N.L., Pisano L., Vessia G., Parise M., Fiore A., Luisi M. (2018), *Finite element-based stability charts for underground cavities in soft calcarenites*, International Journal of Geomechanics, 10.1061/(ASCE) GM.1943-5622.0001175.

Analisi speditiva del quadro fessurativo caraterizzante gli ambienti sotteranei della "Ricerca Buca del Serpente" (Campiglia Marittima, Toscana)

Quick analysis of crack pattern of the underground cavity "Ricerca Buca del Serpente" (Campiglia Maritime, Tuscany)

Emilio Poggetti
Geologo - Gruppo Speleologico Maremmano CAI
E-mail: emiliopoggetti@gmail.com

Luca Tinagli
Geologo - Gruppo Speleologico Archeologico Livornese
E-mail: ltinagli88@gmail.com

Parole chiave (*key words*): ipogeo (*hypogeum*), Campiglia Marittima, geomeccanica (*geomechanics*), analisi delle fratturazioni (*fracture analysis*), mineralizzazioni a metalli (*metals ores*)

RIASSUNTO

L'area di Campiglia Marittima (Livorno) è nota per l'attività estrattiva, iniziata dal periodo Etrusco e in parte attiva ancora oggi. Le mineralizzazioni presenti sono a Fe, metalli di base, Ag e Sn, e si sviluppano all'interno di un esteso affioramento carbonatico, interessato da carsismo (epigeo e ipogeo) con genesi a forte controllo strutturale.

La "Ricerca Buca del Serpente" è un esempio di cavità artificiale del Campigliese caratterizzata dall'associazione di ipogei naturali e artificiali (gallerie e vuoti di coltivazione mineraria) sfruttati in diverse epoche storiche. In questo caso le ultime attività risalgono agli anni '50.

L'analisi delle strutture fragili presenti, eseguita in più stazioni di misura, ha individuato tre principali sistemi: N030°, N080° e N170°; strutture che hanno influenzato i processi carsici e minerogenetici, connessi sia alla genesi della cavità sia alla sua stabilità. Nello specifico l'analisi di stabilità effettuata con i metodi di Bieniawski (1973, 1989) e Barton (1974, 2002) hanno dato, rispettivamente, come risultati un ammasso di qualità buona (classe II) e mediocre (classe V).

Lo studio geologico e speleologico della cavità ha portato al suo accatastamento nel Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana e permesso di analizzare in dettaglio la natura e il ruolo delle strutture deformative fragili nella genesi naturale e artificiale della cavità.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area di Campiglia M.ma (LI) è situata tra la Costa degli Etruschi e le Colline Metallifere; geologicamente rappresenta una porzione di catena appenninica originata durante l'ultima orogenesi (Costantini *et al.*, 1993; Molli, 2008). Nello specifico l'area è caratterizzata da un *horst* carbonatico (Falda Toscana;

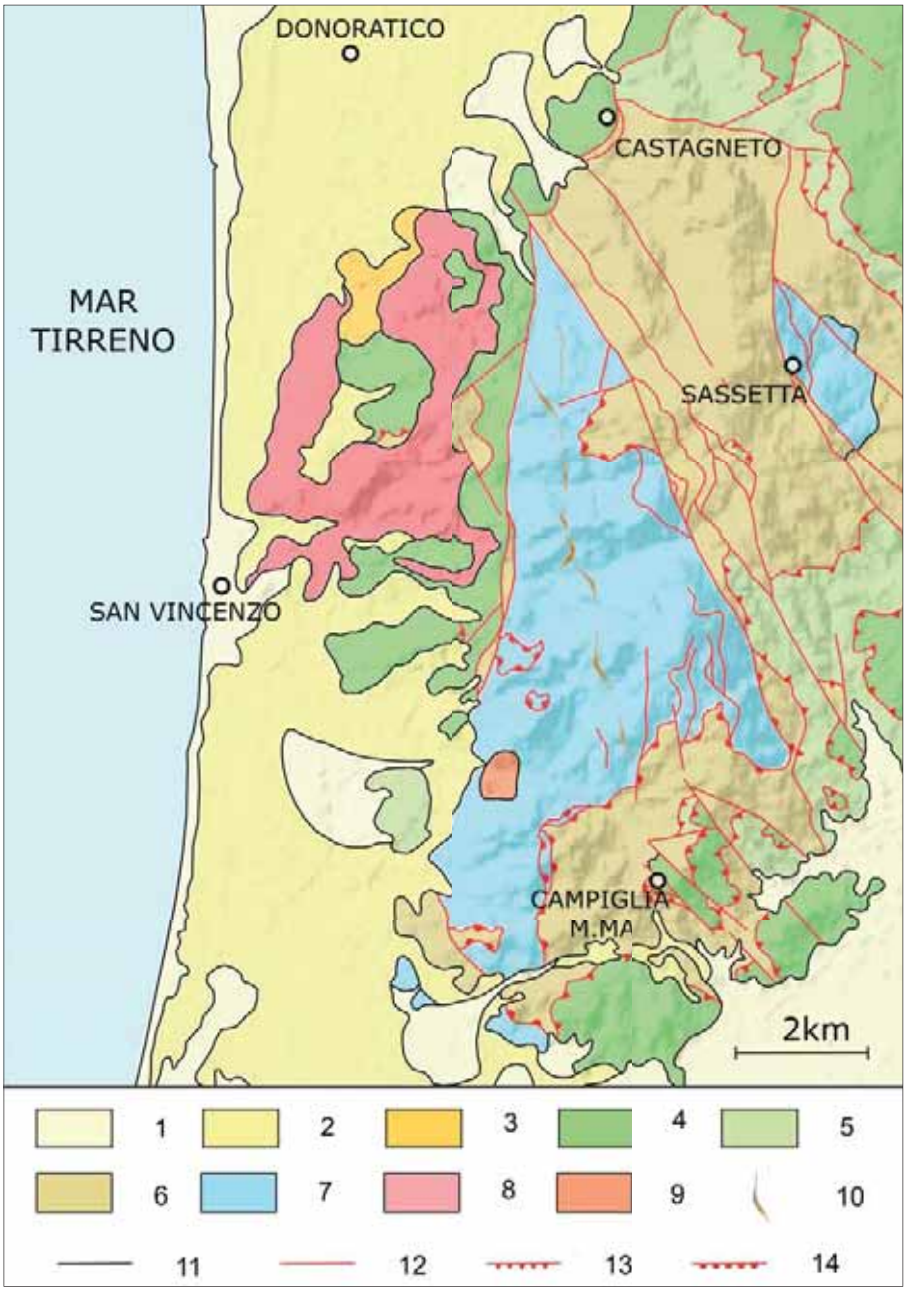


Figura 1 – Schema tettonico dell'area del Campigliese (mod. da Cerrina Feroni & Masetti): 1) Olocene 2) Pleistocene 3) Miocene sup. 4) Unità Liguri; 5) Unità Subliguri; 6) Falda Toscana sup. (Scaglia e Macigno); 7) Falda Toscana inf. (successione mesozoica); 8) Vulcaniti di San Vincenzo (4,7 Ma); 9) Granito di Botro ai Marmi (5,7 Ma); 10) filoni di porfido, 11) contatti stratigrafici, 12) faglie e contatti tettonici; 13) sovrascorrimenti; 14) contatti tettonici, sottrattivi a basso angolo

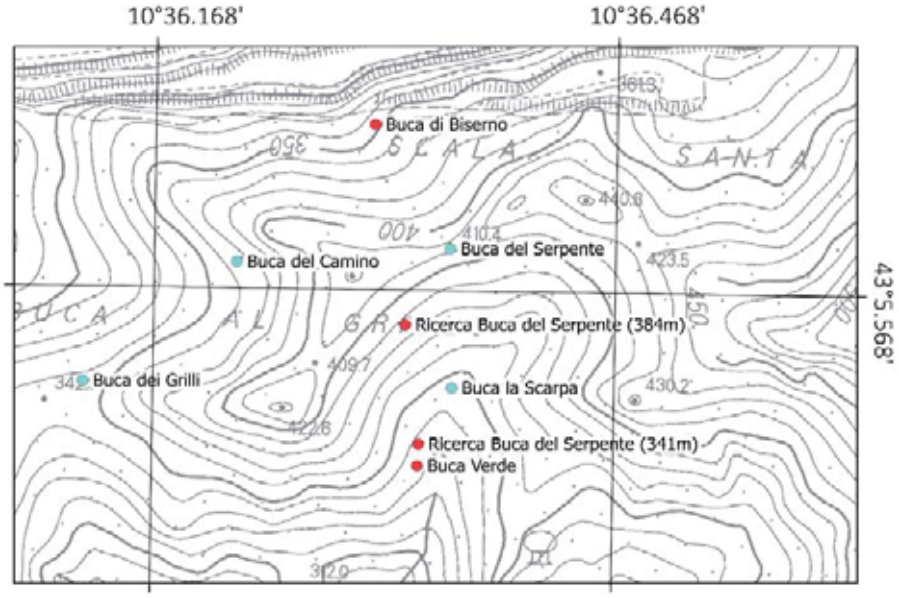


Figura 2 – Posizione delle cavità naturali (azzurro) e artificiali (rosso) in prossimità della Ricerca Buca del Serpente

Fig. 1) orientato N-S e tettonicamente delimitato a nord, sud ed est da formazioni pelagiche e torbiditiche (Marne a *Posidonomya*, Diaspri, Maiolica, Scaglia Toscana, Macigno e Unità di Canetolo) e a ovest dai *flysch* liguri (Giannini, 1955; Costantini *et al.,* 1993.). L'ammasso carbonatico è interessato da tre sistemi di fratturazione principale: N-S, N050°-070° e NNO-SSE (Acocella *et al.*, 2000; Cascone, 2000).

Oltre che da una tettonica fragile l'area, a partire dal Miocene Superiore fino al Pliocene, è stata interessata da un magmatismo intrusivo ed effusivo a cui si associano spazialmente (e geneticamente) gli skarn a silicati di Fe-Mg-Ca con solfuri di Cu-Zn-Pb(-Ag) e ossidi di Fe e Sn (Stella, 1955; Barberi *et al.*, 1967; Venerandi-Pirri e Zuffardi, 1981; Cascone, 2000; Dini *et al.*, 2013; Vezzoni *et al.*, 2016); metalli estratti per più di duemila anni (Casini, 1993).

Le strutture deformative, come per le mineralizzazioni, hanno avuto un ruolo chiave anche per lo sviluppo del carsismo, ipogeo ed epigeo, dell'intero territorio al quale si associano le mineralizzazioni a metalli e antiche opere di estrazione definite grotte-miniera per la coesistenza di ambienti carsici e artificiali (Cascone, 1993).

STORIA DELLA MINIERA

L'attività mineraria del Campigliese, legata alla presenza di mineralizzazioni a solfuri misti, ha una tradizione millenaria che va dal tempo degli Etruschi fino al secolo scorso.

L'ingresso alto della "Ricerca Buca del Serpente" è impostato in un probabile ingresso carsico e fu descritto per la prima volta nel XIX, sia da i francesi Burat (1845) e Simonin (1858) sia successivamente dal tedesco Vom Rath (1877), i quali gli attribuirono il nome di Buca del Serpente; di recente utilizzato per indicare una cavità carsica che si trova in vicinanza (Poggetti, 2017) (*Fig.* 2). Come riportato nei loro scritti, con molta probabilità, questo ingresso venne sfruttato in epoca antica.

Nel '900 la Soc. Montecatini che possedeva diversi permessi di ricerca a Campiglia Marittima, tra i quali quello di "Valle San Silvestro" e della valle "I Manienti", s'interessò all'antica miniera eseguendo nel 1953-54 indagini geoelettriche e campagne di perforazione, indagini che portarono nel 1957-59 allo scavo della galleria inferiore e il pozzetto di collegamento all'ambiente antico allargandone l'ingresso superiore tramite una trincea, scavo denominato "Ricerca Buca del Serpente" (Benedettini, 1983; AQUATER, 1996; DBGM).

La Montecatini applicò metodologie di scavo moderne realizzando una galleria che permise di intercettare l'antica miniera, ad una quota inferiore rispetto al suo ingresso, coltivando così il minerale dal basso verso l'alto.

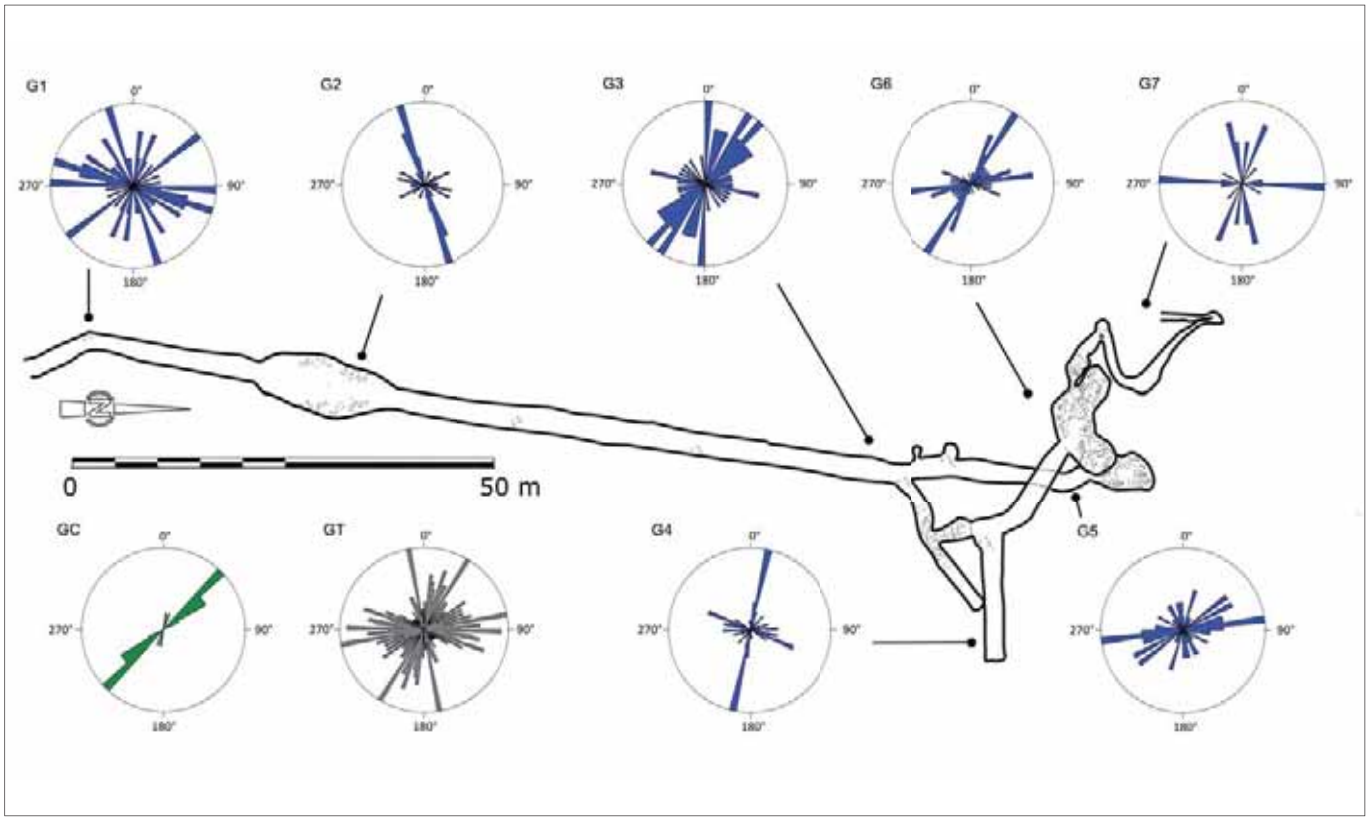


Figura 3 – Pianta della Ricerca Buca del Serpente con diagrammi a rosa delle stazioni speditive (da G1 a G7), dei dati totali (GT) e delle giaciture carsificate (GC) (modificato da scheda catastale 152 T/LI del catasto SSI delle cavità artificiali)

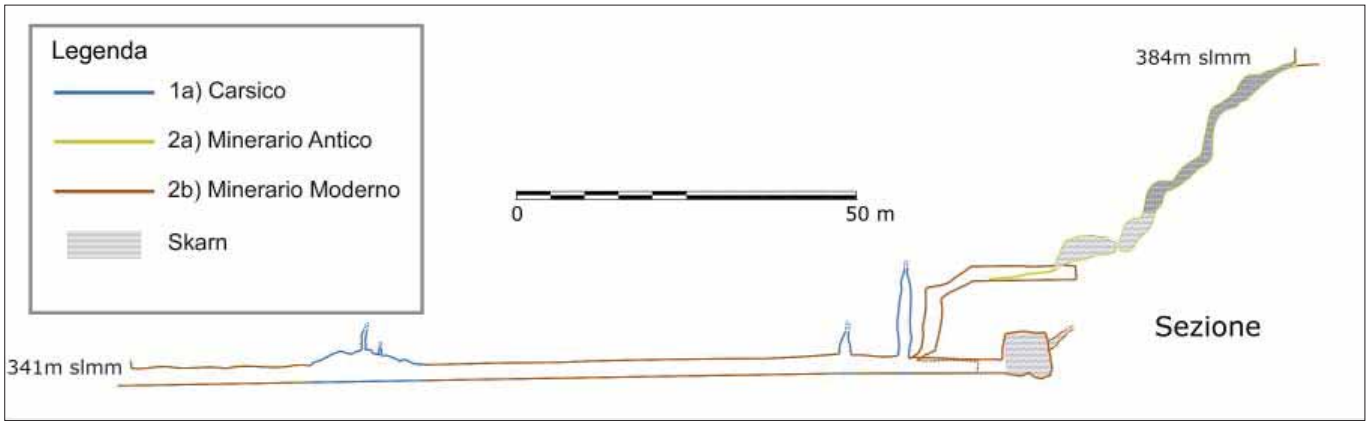


Figura 4 – Sezione con classificazione degli ambienti sotterranei della Ricerca Buca del Serpente (modificato da scheda catastale 152 T/LI del catasto SSI delle cavità artificiali)

MORFOLOGIE E GEOLOGIA DEGLI AMBIENTI SOTTERRANEI

La "Ricerca Buca del Serpente" (*Fig.* 3) è un esempio di ipogeo del Campigliese che vede il suo assetto attuale come il prodotto finale di più fattori naturali e antropici. I fattori naturali (litologia, strutture deformative fragili e mineralizzazioni) hanno generato strutture carsiche associate spazialmente, in molti casi, alle mineralizzazioni. Su questi, si sono impostate, in epoca antica, opere antropiche di ricerca ed estrazione mineraria riprese poi in epoca moderna. Le cavità così prodotte dall'azione di fattori naturali e antropici hanno portato alla formazione delle cosiddette grotte-miniera (Cascone e Casini, 1999).

Nello specifico della "Ricerca Buca del Serpente" si possono osservare i principali processi naturali e artificiali che hanno agito, con vario grado, in tutto l'ammasso carbonatico Campigliese; processi testimoniati dalle forme e strutture ipogee presenti.

All'interno si possono individuare vari tipi di ipogei: 1a) carsico, 2a) minerario antico e 2b) minerario moderno (*Fig.* 4).

- 1a: Pozzi carsici che si sviluppano verticalmente con direzione ~N050°, visibili nella galleria moderna della cavità.
- 2a: La natura antica è testimoniata dall'andamento irregolare dell'ipogeo scavato per seguire la mineralizzazione. Questo tipo occupa la parte alta della cavità e si sviluppa, all'interno dello skarn e delle mineralizzazioni a solfuri, lungo il contatto con l'incassante carbonatico carsificato.
- 2b: Caratterizzano la parte inferiore tra cui la galleria scavata per la quasi totalità nel marmo e la trincea di accesso all'ingresso alto impostata sull'originario ingresso "naturale" (grotta-miniera) cancellandolo nel suo primo tratto.

Il rilevamento morfologico ha portato all'accatastamento della cavità nel Catasto Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana come "Ricerca Buca del Serpente - 152 T/LI".

La cavità si sviluppa all'interno di un marmo foliato con orientazione N060°-090°, immersione verso SE a basso angolo, marmo che è l'incassante di una mineralizzazione a skarn (roccia metasomatica a grana grossa di silicati calcio-magnesiaci con minerali economici di Fe, Au, Cu, Zn, W, Mo e Sn; Meinert *et al.*, 2005) a hedenbergite, ilvaite e quarzo a cui sono associati solfuri di Pb-Fe-Cu-Zn; lo skarn ha un grado di alterazione medio-alto. Lo skarn presenta anche dei geodi di forma equidimensionale e allungata, formate da quarzo e ilvaite, su cui si è avuta in alcuni casi una sovracrescita di fasi secondarie come solfati (es. gesso). La mineralizzazione si presenta come un corpo subverticale con orientazione preferenziale a ~N050° e ~N140° e immersione verso est, questa si mette in posto lungo le fratture dell'incassante carbonatico.

CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

Per valutare la stabilità dell'ammasso roccioso, della miniera, e individuare eventuali relazioni con i corpi mineralizzati, sono stati misurati i sistemi di frattura applicando per una stazione geomeccanica il metodo *straight scan line* (Priest & Hudson, 1981), ed eseguendo sette stazioni speditive (di tipo "esplorativo"), che hanno permesso una visione generale dei sistemi di fratturazione.

Il metodo *straight scan line* (o *linear scanline sampling*) permette di rilevare in modo sistematico tutte le discontinuità in affioramento che intersecano una certa linea di riferimento (linea di scansione o stendimento).

I parametri presi in considerazione, così definiti dall' ISRM (1993) sono stati:

- orientazione: direzione d'immersione e inclinazione della discontinuità;
- spaziatura: distanza tra discontinuità adiacenti. Normalmente ci si riferisce alla spaziatura modale di un sistema di fratture;
- continuità o persistenza: lunghezza della traccia della discontinuità osservata in un affioramento. Può dare una misura grossolana dell'estensione areale o della profondità di penetrazione di una discontinuità;
- apertura: distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità in cui lo spazio interposto è riempito di aria o acqua;
- riempimento: materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità.

Anche se questo metodo permette di ottenere in maniera rapida molti dati per vari sistemi di fratturazione, va considerato che le aperture visibili sulla roccia esposta sono da ritenere aperture disturbate, sia per le locali alterazioni superficiali della roccia, sia per le operazioni di scavo della galleria. Inoltre, anche per la spaziatura esiste il problema della creazione di stime errate in quanto la presenza di più sistemi di fratturazione, con orientazioni oblique rispetto allo stendimento, portano a considerare valori della frequenza sottostimati e valori della spaziatura sovrastimati. Per ovviare a questo si è utilizzato la tecnica di correzione di Terzaghi (1965); applicata per ogni singolo gruppo di frattura, misurando in affioramento:

- tutte le distanze (d) fra le discontinuità adiacenti che si trovano lungo la linea di scansione, che deve essere almeno 10 volte più grande della spaziatura stimata. Le distanze dovrebbero essere misurate con un'approssimazione del 5% (ISRM, 1993 e bibliografica citata)
- il più piccolo angolo (α) misurato tra la linea di scansione ed il sistema di fratturazione osservato (ISRM, 1993 e bibliografica citata).

Il valore modale della spaziatura riferito al singolo sistema di fratturazione preso in considerazione è ottenuto attraverso l'equazione:

$$S = dm \cdot \sin \alpha$$

dove d_m è il valore modale della distanza misurata.

Il metodo *straight scan line* risulta molto accurato nella descrizione dei caratteri geometrici e morfologici osservati e descritti per ogni sistema di fratturazione, ma va comunque considerato il fatto che queste informazioni vengono raccolte su una traccia lineare in 1D, senza ottenere alcuna informazione nella variabilità del dato in 2D e 3D.

Al fine di ottenere una valutazione sulla qualità dell'ammasso roccioso le informazio-

Tabella 1 – Principali sistemi di fratturazione individuati dall'applicazione del metodo *straight scan line*

Famiglia	Direzione	Inclinazione	Spaziatura (m) (Terzaghi, 1965)	Persistenza (m)	Apertura (mm)	Riempimento
I	30-40	76	0,27	3 - 10	0.1 - 1.0	nessuno
II	80-90	70	0,36	1 - 3	0.1 - 1.0	nessuno
III	50-60	74	0,38	< 1	0.1 - 1.0	nessuno

ni raccolte sono state utilizzate per le classificazioni di Bieniawski (1973, 1989) e di Barton (1974, 2002).

ANALISI DELLA FRATTURAZIONE

La stazione geomeccanica è stata eseguita nella galleria principale a 80 metri dall'ingresso, applicando il metodo *straight scan line* per una lunghezza dello stendimento di 10 metri nel Calcare Massiccio metamorfico. La scelta di questo punto è legata a vari fattori: la buona esposizione delle discontinuità lungo una parete continua, la possibilità di avere una visione tridimensionale evitando anche sottostime della persistenza e allo spessore di roccia, di 20 m circa, rispetto alla superficie.

In *Tab.* 1, vengono riportani i principali sistemi di fratturazione misurati lungo lo stendimento. Il sistema predominante è quello con direzione N030° - 040° ad alto angolo, moderatamente persistente, con aperture molto piccole e prive di riempimento.

Dall'osservazione diretta è stato possibile associare un determinato comportamento dell'ammasso roccioso applicando due classificazioni geomeccaniche: quella di Bieniawski (1973, 1989) e quella Barton (1974, 2002). Entrambi i metodi sono stati creati per stimare il tempo di autosostegno di una galleria, definendo una classe di qualità dell'ammasso.

Nella classificazione di Bieniawski le rocce vengono caratterizzate mediante un indice noto come *Rock Mass Rating* (RMR) variabile da 1 a 100. Il valore di questo indice è dato dalla somma di cinque coefficienti che tengono conto delle caratteristiche fondamentali: resistenza alla compressione monoassiale della roccia (valori da 1 a 15), *rock quality designation* (RQD) (valori da 3 a 20), spaziatura delle discontinuità (valori da 5 a 20), caratteristiche delle discontinuità (valori da 0 a 30), condizioni idrogeologiche (valori da 0 a 15).

Il valore della compressione monoassiale della roccia è stato determinato sul campo utilizzando uno sclerometro (o martello di Schmidt) ottenendo un valore compreso tra 50 e 100 MPa corrispondente a un valore di 7 per questo coefficiente.

L'indice RQD viene normalmente determinato sulla base di un carotaggio andando a calcolare il rapporto tra la somma delle lunghezze degli spezzoni di carota maggiori di 10 cm e la lunghezza totale del tratto indagato. Nel nostro caso si è scelto di calcolare questo indice misurando i tratti di roccia compatta su una sezione lineare di 2 metri, perpendicolare allo stendimento. Si è così ottenuto un RQD=88,1% corrispondente al valore del coefficiente di 17.

Tabella 2 – Parametri e rispettivi valori assegnati ai fini della classificazione di Burton (1974, 2002)

Parametro	Descrizione	Coefficiente
RQD	Assume il suo valore nominale se > 10	88.1
Jn	Due serie di discontinuità più quelle random	6
Jr	Giunti scabri o irregolari, piani	1.5
Ja	Giunti non alterati o con lievi ossidazioni	1
Jw	Acqua assente o scarsa, localmente < 5 l/min	1
SFR	Condizioni tensionali favorevoli	1

La spaziatura, le caratteristiche delle discontinuità e le condizioni idrogeologiche sono state valutate direttamente sull'affioramento:

- spaziatura tra le fratture (della famiglia predominante N030°- 040°): 0,27 m coefficiente 10;
- larghezza tra 3 e 10 metri: coefficiente 2;
- apertura delle discontinuità tra 0,1 e 1 mm: coefficiente 3;
- superfici leggermente scabre: coefficiente 3;
- nessun riempimento nelle discontinuità: coefficiente 6;
- superfici inalterate: coefficiente 6;
- superfici di frattura umide coefficiente 10.

Il valore dell'indice RMR è risultato di 67, che secondo la classificazione proposta da Bieniawski (1973, 1989) corrisponde a una classe II, ovvero una buona qualità nella stabilità dell'ammasso roccioso.

Anche la classificazione di Barton sviluppata nel 1974 ed estesa nel 2002, prevede la stima di un indice Q (variabile da 0,001 a 1000) determinato con la seguente equazione:

In cui i vari indici sono: (*Rock Quality Designation*) descritto precedentemente; (*Joint Set Number*) che dipende dal numero di famiglie di giunti presenti nell'ammasso roccioso; (*Joint Roughness Number*) che dipende dalla rugosità delle superfici delle fratture (valutato sull'affioramento utilizzando un profilometro); (*Joint Alteration Number*), che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento; (*Joint Water Number*), che dipende dalle condizioni idrogeologiche; (*Stress Reduction Factor*), che è funzione dello stato tensionale in rocce massive o dal disturbo tettonico.

In *Tab.* 2 vengono riportati i valori assegnati ai fini della classificazione.

In questo caso, secondo Barton (1974, 2002) si ottiene una classe V, che corrisponde ad un ammasso roccioso di tipo mediocre ai fini della stabilità.

Le stazioni speditive hanno permesso di campionare, in modo rapido e preciso, le giaciture delle fratture in più zone della miniera ottenendo così un quadro generale della loro distribuzione nello spazio.

Dal diagramma a rosa di tutte le giaciture raccolte (264 dati; GT in *Fig.* 3) si può osservare come i principali sistemi di fratturazione abbiano direzione N030°, N080° e N170°. Tra i tre il più frequente è il N170°, mentre il sistema N080° si nota molto meglio nelle parti più interne della miniera in vicinanza dei cantieri di coltivazione (*Fig.* 3).

Dall'analisi sistematica delle inclinazioni delle fratture risulta che oltre l'88% è subverticale (inclinazione di 60°- 90°) e che di queste oltre il 32% è verticale (80°-90°; *Fig.* 5).

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto all'interno della miniera ha portato al riconoscimento e classificazione di tre distinti ambienti sotterranei; 1a) carsico, 2a) minerario antico e 2b) minerario moderno. Il primo si sviluppa interamente nel marmo ed è stato intercettato dall'attività mineraria moderna. L'ambiente minerario antico si è sviluppato lungo le mineralizzazioni a stretto contatto con l'incassante carbonatico e piccole strutture carsiche, mentre quello moderno è andato ad intercettare il corpo mineralizzato ad una quota più bassa rispetto al vuoto coltivato nel precedente periodo.

Lo studio sistematico delle discontinuità ha messo in luce la presenza di tre principali sistemi subverticali con direzioni N030°, N080° e N170°.

I pozzi carsici e le fratture carsificate si sviluppano con una direzione media di N045° (GC in *Fig.* 3), subverticale-verticale, mentre le fratture mineralizzate e/o attraversate da skarn rientrano nel secondo sistema avendo una direzione media di N068°.

Il corpo mineralizzato, con orientazione principale a N050° ad alto angolo verso est, vede le fratturazioni come la principale struttura di messa in posto.

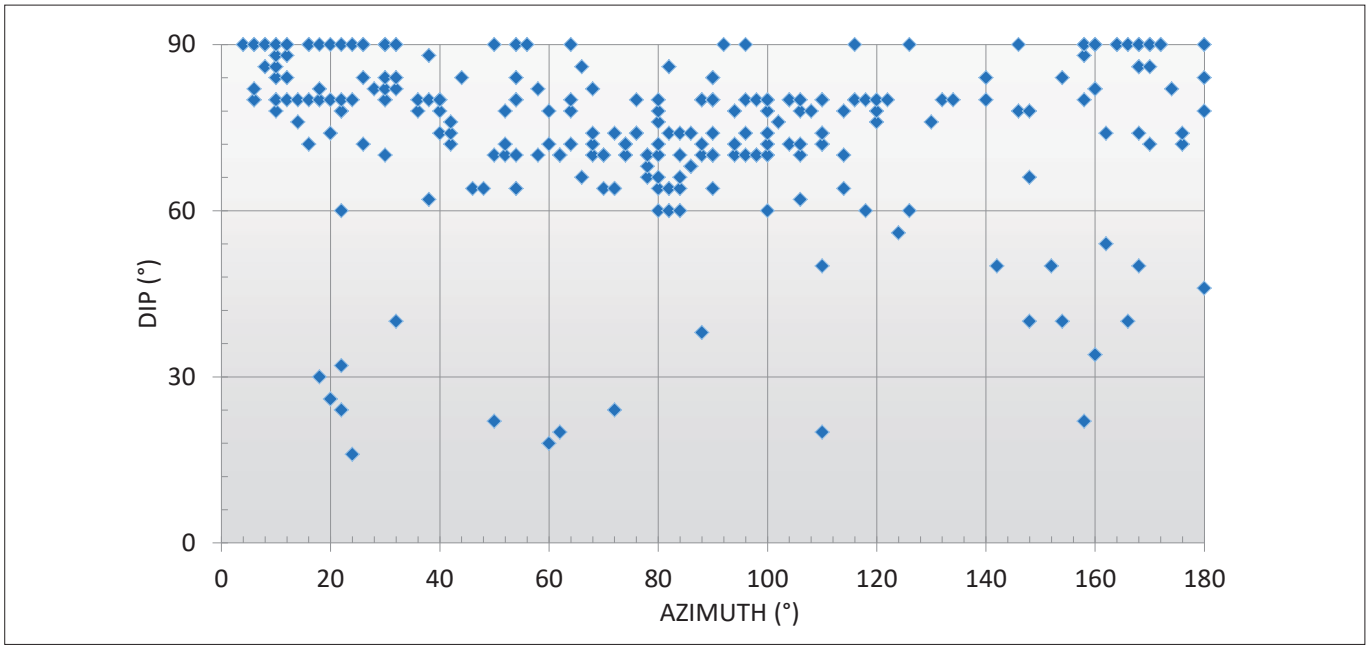


Figura 5 – Grafico a dispersione dei dati di fratturazione

Si dimostra quindi come le fratture siano state le principali strutture su cui si sono formati vuoti carsici e mineralizzazioni.

Il rilievo geomeccanico effettuato sulla roccia incassante (Calcare Massiccio metamorfosato) ha poi definito, secondo le classificazioni di Bieniawski (1973, 1989) e di Barton (1974, 2002), una qualità della roccia buona ai fini della stabilità della galleria mineraria che considerando la sua altezza di circa 2,10 metri non richiede l'utilizzo di sostegni.

Di fatto, l'assenza di opere di sostegno in galleria, ormai da quasi settant'anni, sembra dare una comnferma dei risultati.

Lo studio geologico e speleologico della cavità ha portato ad un accatastamento nel Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana focalizzando l'attenzione sulla natura degli ambienti, vista la numerosa e diversificata coesistenza nel Campigliese di ipogei carsici e antropici-minerari, e sul ruolo delle strutture deformative fragili nella genesi naturale e artificiale della cavità.

BIBLIOGRAFIA

Acocella V., Rossetti F., Faccena C., Funiciello R., Lanzarotto A. (2000), Strike-*slip faulting and pluton emplacement in southern Tuscany: the Campiglia Marittima case*. Bollettino Società Geologica Italiana, 119, pp. 517-528.

AQUATER (1996). *Relazioni conoscitive*, n.7, Storie delle Miniere Lanzi e Temperino.

Barberi F., Innocenti F., Mazzuoli R. (1967), *Contributo alla conoscenza chimico-petrografica e magmatologica delle rocce intrusive, vulcaniche e filoniane del Campigliese (Toscana).* Mem. Soc. Geol. Ital, 6, pp. 643-681.

Barton N. (2002), *Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39, pp. 185-216.

Barton N., Lien R., Lunde J. (1974), *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock mechanics, 6(4), 189-236.

Benedettini G. (1983), *Le miniere a Campiglia: dagli Etruschi ai giorni nostri*. Editore Bandecchi & Vivaldi, 195 p.

Bieniawski Z. T. (1973), *Engineering classification of jointed rock masses*. Civil Engineer in South Africa, 15(12), pp. 335-344.

Bieniawski Z. T. (1989), *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons. 251 p.

Burat A. (1845), *Minerais du campigliese. Etude sur les mines. Théories des gîtes métalliferes.* Paris, pp. 230-247.

Cascone G., Casini A. (1999), *Alla scoperta del sottosuolo dei monti di Campiglia Marittima (LI).* Metodologie e ricerca nelle miniere di periodo preindustriale. TALP, 19, pp. I-XX.

Cascone G. (1993), *La zona speleologica del Massiccio del Monte Calvi. Primo contributo alla sua conoscenza*. Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno, XIII, suppl, 2, pp. 183-212.

Cascone G. (2000), *Le grotte naturali della provincia di Livorno. Inquadramento geologico.* TALP, 21, pp. 12-21.

Casini A. (1993), *Archeologia di un territorio minerario: i Monti di Campiglia*. Quad. Mus. Stor. Nat. di Livorno, 13(2), pp. 303-314.

Cerrina Feroni A., Masetti G., *Schema tettonico alla scala 1:100.000* - Foglio n. 305, San Vincenzo. Carta Geologica della Regione Toscana.

Costantini A., Lazzarotto A., Maccantelli M., Mazzanti R., Sandrelli F., Tavarnelli E., Elter F. M. (1993), *Geologia della provincia di Livorno a sud del Fiume Cecina*. Quad Mus Stor Nat di Livorno, 13 (suppl 2), pp. 1-164.

Dini A., Vezzoni S., Rocchi S. (2013), *Geologia e minerogenesi. L'evoluzione del pensiero scientifico nel campigliese.* Rivista Mineralogica Italiana, 1/2013, pp. 21-29.

Giannini E. (1955), *Geologia dei monti di Campiglia Marittima (Livorno)*. Bollettino Società Geologica Italiana, 74, pp. 219-296.

ISRM (1993), *Metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità nelle masse rocciose.* Rivista italiana di Geotecnica, 2, pp. 151-197.

Meinert D., Dipple G. M., Nicolescu M. (2005), *World Skarn Deposits*. Economic Geology, 100th Anniversary Volume, pp. 299-336.

Molli G. (2008), *Northern Apennine-Corsica orogenic system: an updated overview*. Geological Society, London, Special Publications, 298(1), pp. 413-442.

Poggetti E. (2017), Un *mistero svelato per caso: piccola esplorazione nei Monti di Campiglia Marittima*. TALP, 53, pp. 28-35.

Priest S.D., Hudson J.A. (1981), *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, v. 18, pp. 183-197.

Simonin M.L. (1858), *De l'exploitation des mines, et de la métallurgie en Toscane pendant l'antiquité et le moyen age*. Annales des Mines, 14, pp. 557-615.

Stella A., a cura di Dessau G. (1955), *La miniera di stagno di Monte Valerio e i giacimenti del Campigliese nel quadro della Catena Metallifera Toscana*. Bollettino Società Geologica Italiana, 74, pp 109-218.

Terzaghi R. D. (1965), *Sources of error in joint surveys*. Geotechnique, 15(3), pp. 287-304.

Venerandi-Pirri I., Zuffardi P. (1981), *The Tin Deposit of Monte Valerio (Tuscany): New Factual Observations for a Genetic Discussion*. Rendiconti Società italiana di Mineralogia e Petrologia, 37, 529-39.

Vezzoni S., Dini A., Rocchi S. (2016), *Reverse telescoping in a distal skarn system (Campiglia Marittima, Italy)*. Ore Geology Reviews, 77, 176-193.

vom Rath G. (1877), *I monti di Campiglia nella Maremma Toscana*. Boll. del R. Comitato geologico d'Italia, n.8, pp. 192-193.

SITOLOGIA

DBGM (DataBase Geologico Minerario): http://www.neogeo.unisi.it/dbgmnew/

Catasto Cavità Artificiali – Società Speleologica Italiana: http://catastoartificiali.speleo.it

Preesistenze di natura antropica in una delle regioni più antiche delle Catacombe dei SS. Marcellino e Pietro a Roma

Pre-existences of anthropic nature in one of the oldest regions of the Catacombs of St. Marcellin and St. Peter in Rome

Monica Ricciardi
Collaboratore PCAS

Raffaella Giuliani
Ispettore delle Catacombe PCAS

Dominique Castex
Direttore di ricerca CNRS; Università di Bordeaux

Parole chiave (*key words*): preesistenze catacombe (*catacombs pre-existence*), sepolture (*burial*)

ABSTRACT

In December 2003, during an emergency intervention, caused by the breaking of a water pipe, some underground cavities were discovered in the area of the Catacombs of Saints Marcellin and Peter on the Via Casilina in Rome. In a garden of private property bordering the building of the Sisters of the Holy Family, located in the ground above the catacomb, the subsidence of the ground had given rise to a chasm that had opened in the ground floor highlighting the walls of a gallery, dug into the tuff, almost entirely devoid of the original roof and completely filled with earth landfill. This gallery is connected to other cavities, arranged on several levels, all existing before the funerary occupation of the subsoil. The reuse for burial purposes, which took place even before the development of the catacombs, involved, only at a later date, the annexation of the same cavities to the net-



Figura 1 – Pianta generale della catacomba dei SS. Marcellino e Pietro con indicazione dell'area indagata

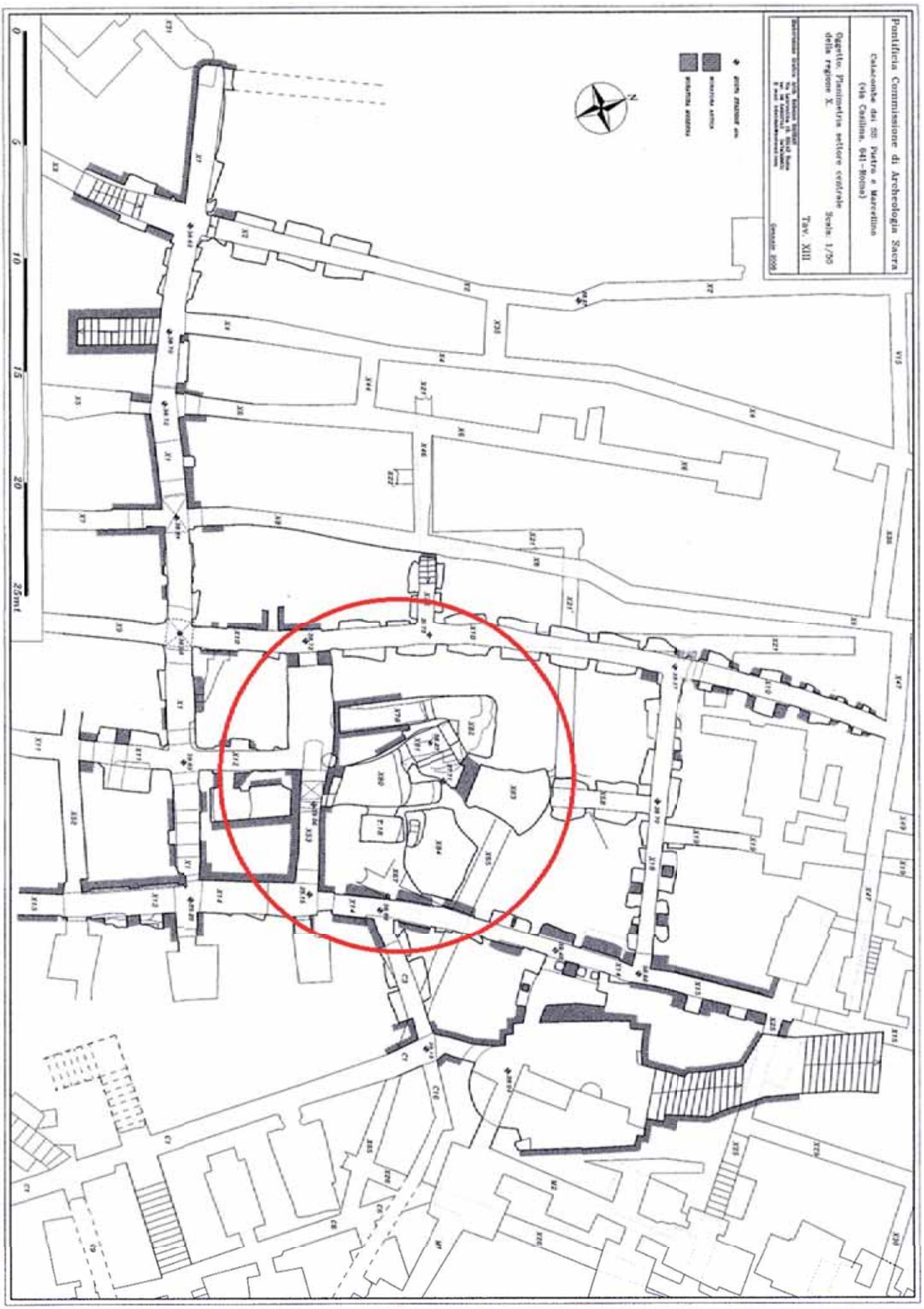


Figura 2 – Particolare della regione X della catacomba dei SS. Marcellino e Pietro con indicazione dell'area indagata

work of cemetery tunnels. The first anthropic intervention, therefore, with a purpose different from that of funerary, is presumably connected to the exploitation of the subsoil for industrial purposes, for the extraction of the pozzolana, as is amply documented by the underground cavities, already known, present in the surrounding area. However, for the tunnel located at the highest level, the possibility cannot in all probability be ruled out that it may be used hydraulically as a rainwater catchment area. On the other hand, many pipes, wells and cisterns, linked to the agricultural exploitation of the surface area, are located in the immediate vicinity of the catacomb and, in some cases, were included in the path of the cemetery tunnels. Intensive mining activity is documented, finally, in modern times, before the definitive abandonment and interruption of the cavities. The archaeological excavation, conducted by the Pontifical Commission for Sacred Archaeology and followed on site by the writer under the direction of Dr. R. Giuliani, has brought to light and allowed the conservation, incorporated in one of the oldest regions of the catacomb, of this significant pre-existence, which is part of the broader picture of the many underground cavities of anthropogenic origin documented in the reference sector of the Roman suburbs of the Via Casilina.

RIASSUNTO

Nel dicembre del 2003 nel corso di un intervento di emergenza, causato dalla rottura di una conduttura idrica, sono state scoperte alcune cavità ipogee nell'area delle Catacombe dei Santi Marcellino e Pietro sulla via Casilina a Roma. In un giardino di proprietà privata confinante con l'edificio delle Suore della Sacra Famiglia, ubicato nel terreno al di sopra della catacomba, il cedimento del terreno aveva dato origine ad una voragine che si era aperta nel piano di campagna mettendo in luce le pareti di una galleria, scavata nel tufo, quasi del tutto priva dell'originaria copertura e completamente riempita da terra di riporto. A questa galleria si collegano altre cavità, disposte su più livelli, tutte preesistenti all'occupazione funeraria del sottosuolo. Il riutilizzo a scopo sepolcrale, avvenuto ancor prima dello sviluppo delle catacombe, ha comportato, soltanto in un momento successivo, l'annessione delle stesse cavità alla rete delle gallerie cimiteriali. Il primo intervento antropico, dunque, con finalità diversa da quella funeraria, è presumibilmente connesso alle attività di sfruttamento del sottosuolo a scopo industriale, per l'estrazione della pozzolana, come è ampiamente documentato dalle cavità ipogee, già note, presenti nell'area circostante. Tuttavia, con ogni probabilità, non si può escludere, per la galleria ubicata al livello più alto, un uso di tipo idraulico, quale bacino di raccolta dell'acqua piovana. D'altronde numerosi condotti, pozzi e cisterne, legati allo sfruttamento agricolo dell'area di superficie, sono attestati nelle immediate adiacenze della catacomba e, in alcuni casi, furono inglobati nel percorso delle gallerie cimiteriali. Una intensa attività estrattiva è documentata, infine, in età moderna, prima del definitivo abbandono e dell'interro delle cavità. Lo scavo archeologico, condotto dalla Pontificia Commissione di Archeologia Sacra e seguito sul posto da chi scrive sotto la direzione dalla dott.ssa R. Giuliani, ha portato in luce e permesso di conservare, inglobata in una delle regioni più antiche della catacomba, questa significativa preesistenza, che si inserisce nel quadro più ampio delle numerose cavità ipogee di origine antropica documentate nel settore di riferimento del suburbio romano afferente alla via Casilina.



Figura 3 – Area del cantiere presso l'edificio della Suore della Sacra Famiglia

Nell'estate del 2003, in circostanze del tutto casuali, sono state scoperte alcune cavità di natura antropica, preesistenti allo sviluppo delle gallerie cimiteriali delle Catacombe romane dei SS. Marcellino e Pietro sulla via Casilina (*Fig.* 1). All'inizio del mese di agosto 2003, infatti, l'apertura di una voragine nel sopratterra della catacomba, nel giardino di proprietà privata confinante con l'Istituto delle Suore della Sacra Famiglia, ha richiesto l'intervento immediato della Pontificia Commissione di Archeologia Sacra (PCAS).

In quella occasione si è proceduto a mettere in sicurezza l'area interessata dello sprofondamento, che si era verificato proprio in corrispondenza di una delle regioni più antiche del cimitero (Regione X, *Fig.* 2), e dopo qualche mese hanno avuto inizio i lavori di scavo e di restauro delle gallerie e degli ambienti ipogei[1] . Nel sopralluogo del 7 agosto 2003, effettuato dagli scriventi insieme all'Ing. Andrea M. Parisi di Finale (direttore dell'Ufficio Tecnico della PCAS) che con il fossore Ugo Viva aveva già preso visione della voragine dopo la segnalazione delle Suore, si è potuto constatare che la causa del crollo era dovuta alla rottura di una conduttura idrica della rete pubblica.

La tubazione ACEA, infatti, era interrata alla profondità di metri 1.50 circa e attraversava la proprietà del Sig. Antonio Trequattrini (Soc. Imm. LABICO S.r.l.) nell'area al confine con l'edificio delle Suore (*Fig.* 3).

L'infiltrazione idrica, protrattasi probabilmente per lungo tempo, aveva provocato il cedimento dei riporti superficiali e dei riempimenti delle gallerie sotterranee e quindi l'apertura della voragine. Le gallerie della catacomba, in prossimità del punto in cui si era verificato lo sprofondamento, si presentavano infatti invase dal fango. Fu proprio il potente interro che occupava una parte di

1 I lavori di scavo e di restauro sono stati diretti da Raffaella Giuliani (Ispettrice delle Catacombe di Roma, PCAS) e seguiti in loco da Monica Ricciardi (collaboratrice PCAS) avvalendosi dell'opera di tutto il corpo dei fossori coordinati dal direttore dell'Ufficio Tecnico della Pontificia Commissione di Archeologia Sacra, Ing. Andrea M. Parisi di Finale.



Figura 4 – Cantiere di scavo

Energia e Ambiente, il flusso dell'acqua si è iniziato a rimuovere, procedendo dall'esterno, i detriti crollati nella voragine, in modo da raggiungere il livello della catacomba (*Figg*. 3 e 4).

Lo scavo e i lavori di consolidamento si sono protratti dall'autunno del 2003 fino all'estate del 2006. Sono state coinvolte, oltre agli archeologi, altre professionalità e in particolare si sono succedute alcune équipe di antropologi per il recupero e lo studio dei resti scheletrici[2]. Gli ambienti ipogei portati in luce sono ubicati su due livelli e presentano caratteristiche diverse rispetto alle più comuni gallerie e ai cubicoli delle catacombe (*Fig*. 5). A meno di tre metri di profondità, dopo aver rimosso la parte più alta dell'interro, sono venute in luce le pareti di una galleria scavata

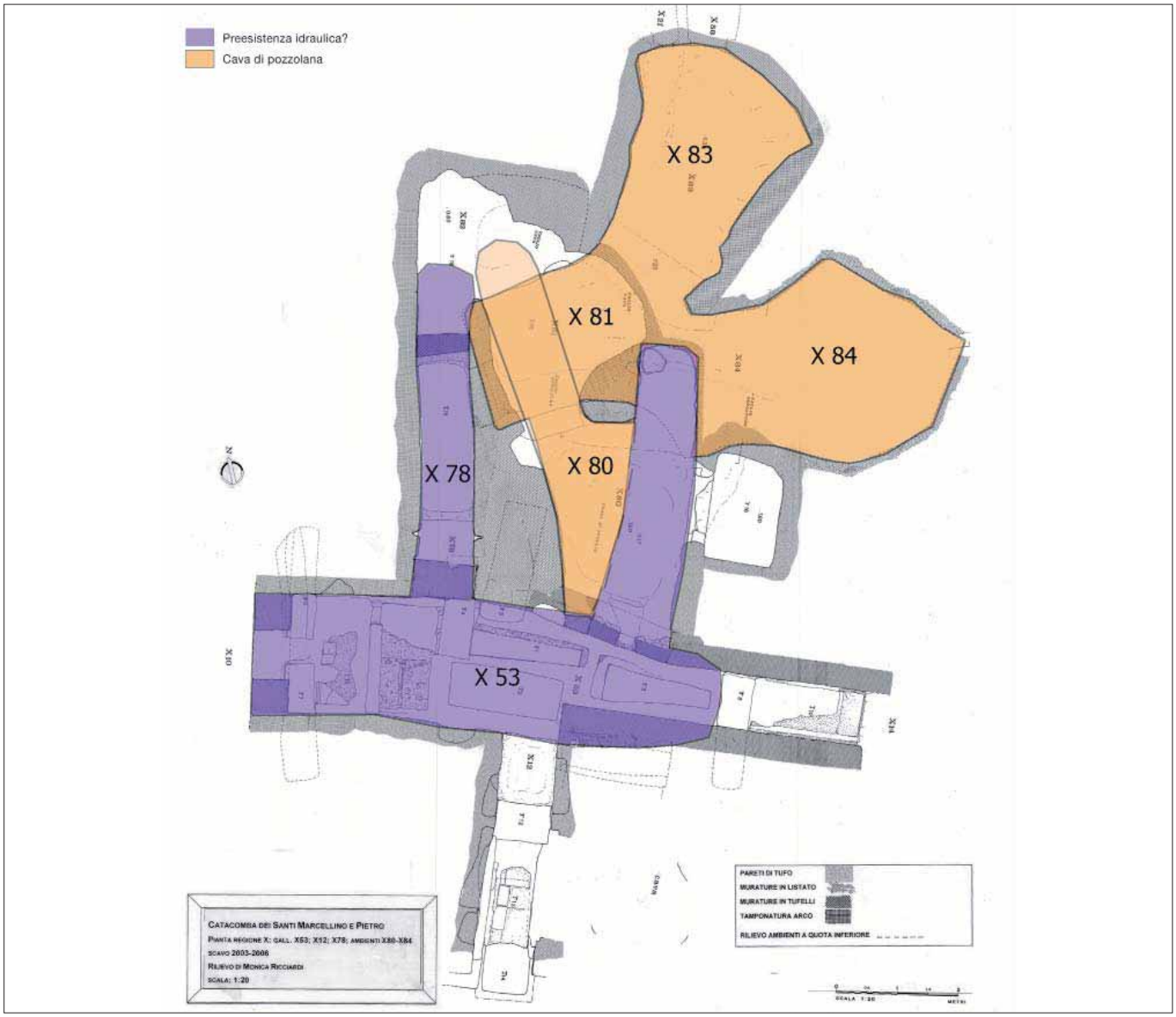


Figura 5 – 5 Pianta dell'area di scavo. Rilievo di Monica

queste gallerie, il cui scavo doveva risultare in passato particolarmente difficile e impegnativo, ad averne impedito l'esplorazione, in una regione della catacomba indagata in maniera veramente capillare, anche per la presenza della cripta dei martiri eponimi Marcellino e Pietro. Una volta fatto cessare, mediante l'intervento dell'azienda Comunale

2 L'intervento antropologico è stato diretto da Dominique Castex (Università di Bordeaux).

nel tufo che si presentava quasi del tutto priva dell'originaria copertura e completamente riempita da terreno di riporto (Galleria X 53 nella pianta, *Fig.* 5). Si è proceduto dunque con lo scavo dei depositi dei livelli più in basso fino a raggiungere il piano pavimentale della galleria; l'indagine è stata poi estesa agli ambienti vicini, verso nord, di cui si intravedeva l'imbocco (X 78, X 80-84). Questi ultimi, caratterizzati da forma e dimensioni diverse, si presentavano anch'essi colmi delle terre di riporto. La galleria X 78 - X 82 e l'ambiente X 80 si trovano allo stesso livello della galleria X 53 e sono ad essa collegati; l'accesso a questi vani risulta tuttavia sbarrato da due muri di tamponamento (*Fig.* 5).

Gli altri vani X 81 e X 83-84 sono ubicati più in basso e corrispondono a una fase successiva di approfondimento e ampliamento dello spazio ipogeo. Gli ambienti scoperti hanno un'origine diversa da quella sepolcrale e sono preesistenti all'occupazione funeraria del sottosuolo. In una prima fase fu realizzata la galleria X 53, di forma allungata e con due brevi diramazioni verso nord (in viola nella pianta, *Fig.* 5).



Figura 6 – Ambiente X80, con gallerie preesistenti al riuso funerario

Questa doveva costituire, con ogni probabilità, un bacino di raccolta dell'acqua, a servizio delle attività agricole del sopratterra. Numerosi condotti, pozzi e cisterne, legati allo sfruttamento agricolo dell'area, sono attestati, infatti, nelle immediate adiacenze della catacomba e talvolta risultano inglobati nel percorso stesso delle gallerie cimiteriali. In un momento successivo, cessato l'uso idraulico del serbatoio dello sfruttamento del sottosuolo fu legato a una intensiva attività di cava per l'estrazione della pozzolana.



Figura 7 – Ambiente X 83, riuso funerario



Figura 8 – Ambiente X 84, riuso funerario

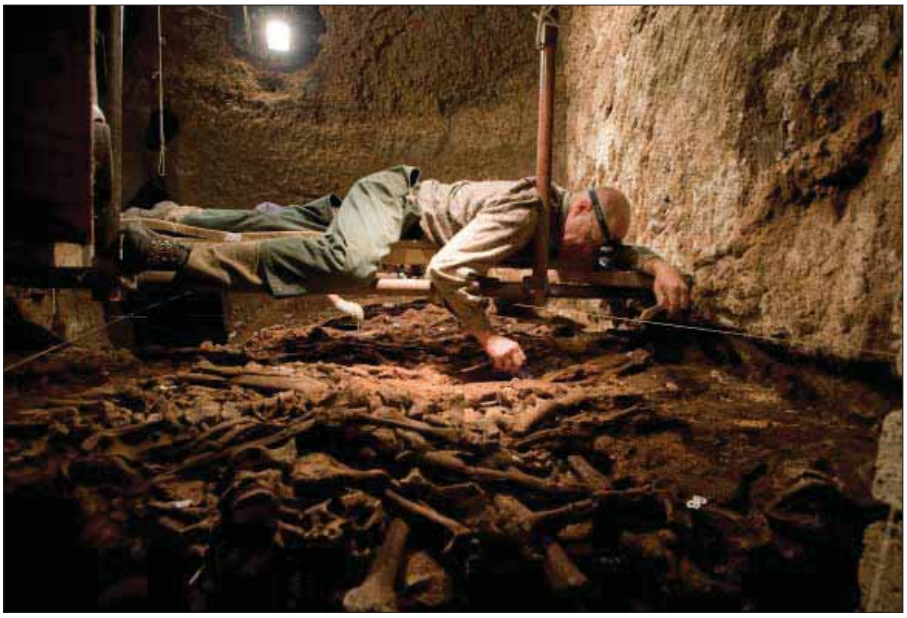


Figura 9 – Ambiente x 83, scavo antropologico

A questa attività si riferiscono i vani X 81, X 83-84, più profondi di circa due metri, che furono scavati procedendo da X 80 presumibilmente attraverso un pozzo, di cui le successive distruzioni non hanno lasciato alcuna traccia (*Fig.* 6).

Escavazioni di questo tipo sono ampiamente documentate, in età romana, nel settore di riferimento del suburbio, afferente alla via Casilina, anche in aree non distanti dalla catacomba. Il riuso sepolcrale di X 78 e dei vani X 80-84 è avvenuto ancor prima dello sviluppo delle catacombe, a partire dai primi secoli dell'impero. Questi ambienti, infatti, furono progressivamente riempiti da sepolture stratificate su più livelli fino ad occupare per intero lo spazio ipogeo (*Figg.* 7- 8).

Lo scavo antropologico, di non facile esecuzione, ha permesso di ricostruire il metodo con cui è avvenuto il seppellimento: il contesto, per le sue caratteristiche e per il numero



Figura 10 – Galleria X 83

di sepolture rinvenute, è stato messo in relazione ad alcuni eventi, probabili epidemie, ai quali si legava, come è ovvio, una elevata crisi di mortalità (*Fig.* 9).

La galleria X 53, invece, fu occupata da sepolture (in modo tradizionale con loculi lungo le pareti e tombe pavimentali scavate nel tufo) soltanto dopo l'annessione alla rete delle gallerie cimiteriali, avvenuta presumibilmente nel IV secolo d.C. (*Fig.* 10). Fu inoltre dotata, in un periodo più tardo, di una decorazione pittorica, di cui si conservano alcuni lacerti significativi, e di particolari strutture strettamente connesse al culto dei martiri. Infine gli stessi ambienti, dopo l'abbandono della catacomba, sono stati oggetto, in epoca moderna, di un'ultima intensa attività estrattiva (*Fig.* 10).

In questa occasione, prima del definitivo interro, la galleria X 53 è stata privata di buona parte della volta, così come è stato notevolmente compromesso l'assetto originario sia della galleria X 78, per quanto riguarda il primo tratto della volta, sia di e X 82, nel suo prolungamento relativo alla fase funeraria. L'attività dei cavatori moderni ha cancellato, inoltre, ogni traccia dell'originario collegamento tra il vano X 80, nella parte del suo prolungamento verso nord (crf. *Fig.* 5), e gli ambienti ubicati in basso (X 81, X 83, X 84). Non si conserva infatti, come si è detto, alcuna evidenza del pozzo che, a nord di X 80, costituiva l'accesso a questi vani, lo stesso da cui dovette avvenire lo scavo al tempo della cava antica. Laddove si è ritenuto necessario il restauro e il consolidamento strutturale è stato eseguito con l'inserimento di murature di sostegno; sono state ripristinate le pareti e le volte degli ambienti e delle gallerie, dove il tufo originario era stato asportato dalla moderna attività estrattiva (*Figg.* 11 e 12).

Gli interventi di scavo e di restauro hanno permesso la conservazione di questo particolare nucleo di gallerie e di vani ipogei preesistenti alla nascita della catacomba. Gli ambienti scoperti sono riconducibili, dunque, a due diversi momenti di scavo: il primo a scopo idraulico per la realizzazione di un bacino di raccolta dell'acqua; il successivo approfondimento, invece, è relativo all'attività di cava per l'estrazione della pozzolana. Infine l'occupazione sepolcrale, caratterizzata da un uso intensivo dello spazio, ha reso necessario un ulteriore approfondimento del piano nella galleria X 78 e in X 80. L'accesso agli ambienti ipogei, anche in questa ultima fase, prima della definitiva annessione al cimitero, avveniva dall'unica apertura esistente e quindi in corrispondenza dall'antico pozzo di raccolta dell'acqua, all'incirca dove si trova il lucernario della galleria X 53 (*Fig.* 12). L'area di scavo , custodita nel cuore del cimitero *inter duas lauros* e rimasta per secoli sconosciuta agli studiosi per circostanze del tutto casuali, è oggi in parte visibile lungo il percorso di visita all'interno della Catacomba dei SS. Marcellino e Pietro.

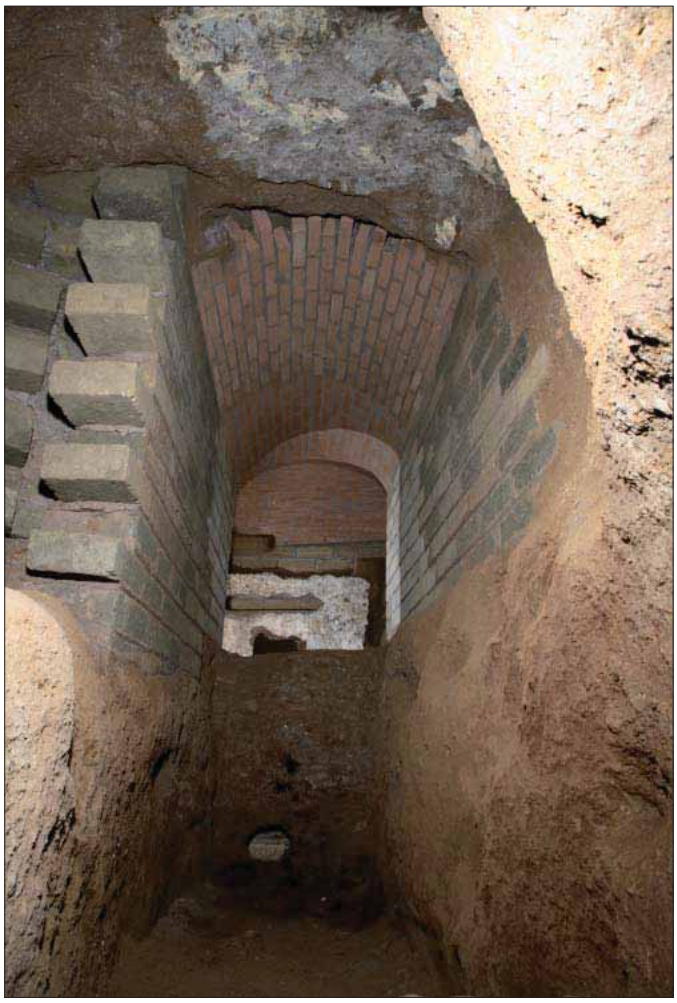


Figura 11 – Galleria X 78, ricostruzione pareti e volta



Figura 12 – galleria X53, ricostruzione volta con pozzo-lucernario

BIBLIOGRAFIA

Giuliani R., Castex D., *La scoperta di un nuovo santuario nella catacomba dei SS. Marcellino e Pietro e lo scavo antropologico degli insiemi funerari annessi. Risultati preliminari di un'indagine multidisciplinare*, Atti PARA 79, 2006-2007, 83-124.

Castex D., Blancard PH., Giuliani R., Ricciardi M., *Les ensembles funéraires du secteur central de la Catacombe des saints Pierre-et-Marcellin (Rome, I-III siècle): caractérisation, hypothèses d'interprétations et perspectives de recherches*, in Mefra 119-1, 2007, pp. 274-282.

J. Guyon, *Le cimitière aux deux lauries. Recherches sur les catacombes romaines*, Città del Vaticano 1987.

G. De Angelis D'Ossat, La geologia delle catacombe romane, 1943, pp. 257-281.

L'utilizzo di fotografie aeree dell'Aerofototeca Nazionale degli anni precedenti l'urbanizzazione del suburbio romano per l'individuazione e catalogazione di cavità di crollo connesse alla evoluzione perniciosa di cavità sotterranee legate ad attività estrattive

The use of Aerofototeca Nazionale aerial imagery prior to urbanization of the Roman suburb for the identification and cataloging of collapse cavities related to the pernicious evolution of underground cavities linked to mining activities

Carlo Rosa
Sigea Lazio; Istituto Italiano di Paleontologia Umana
E-mail: carlorosa62@gmail.com

Gianluigi Giannella
Geologo, libero professionista
E-mail: gg.giannella@gmail.com

Parole chiave (*key words*): fotografie aeree (*aerial photographs*), cavità sotterranee (*underground cavities*), individuazione e catalogazione (*identification and cataloging*), cavità da collasso (*sink holes*)

RIASSUNTO

Questo studio si basa sull'analisi del vasto patrimonio di fotografie aeree disponibili presso l'Aerofototeca Nazionale (ICCD) ed in particolare quelle di età precedente alla urbanizzazione del suburbio romano (anni 1930-1969) relative ai Fogli IGM 149 e 150. Soprattutto quelle risalenti al periodo precedente al 1950 mostrano molto nitidamente diverse aree al cui interno sono presenti numerosissime cavità da crollo, connesse all'evoluzione perniciosa di cavità sotterranee legate ad attività estrattive, di età antica o moderna, di materiali da costruzione, tra i quali sono particolarmente sensibili depositi di pozzolana o ghiaie.

In questa prima fase della ricerca sono stati esaminati in dettaglio tre settori appartenenti al suburbio di Roma:

1. La collina tra l'ex forte Portuense e l'ansa del Tevere di Santa Passera, indicata nelle tavolette I.M.G. come Villa Negroni;
2. La zona della Montagnola sulla via Laurentina;
3. I Monti dell'Infernaccio.

Per alcuni di questi settori si può seguire una evoluzione notevole in termini di dissesto superficiale nell'arco di decine di anni.

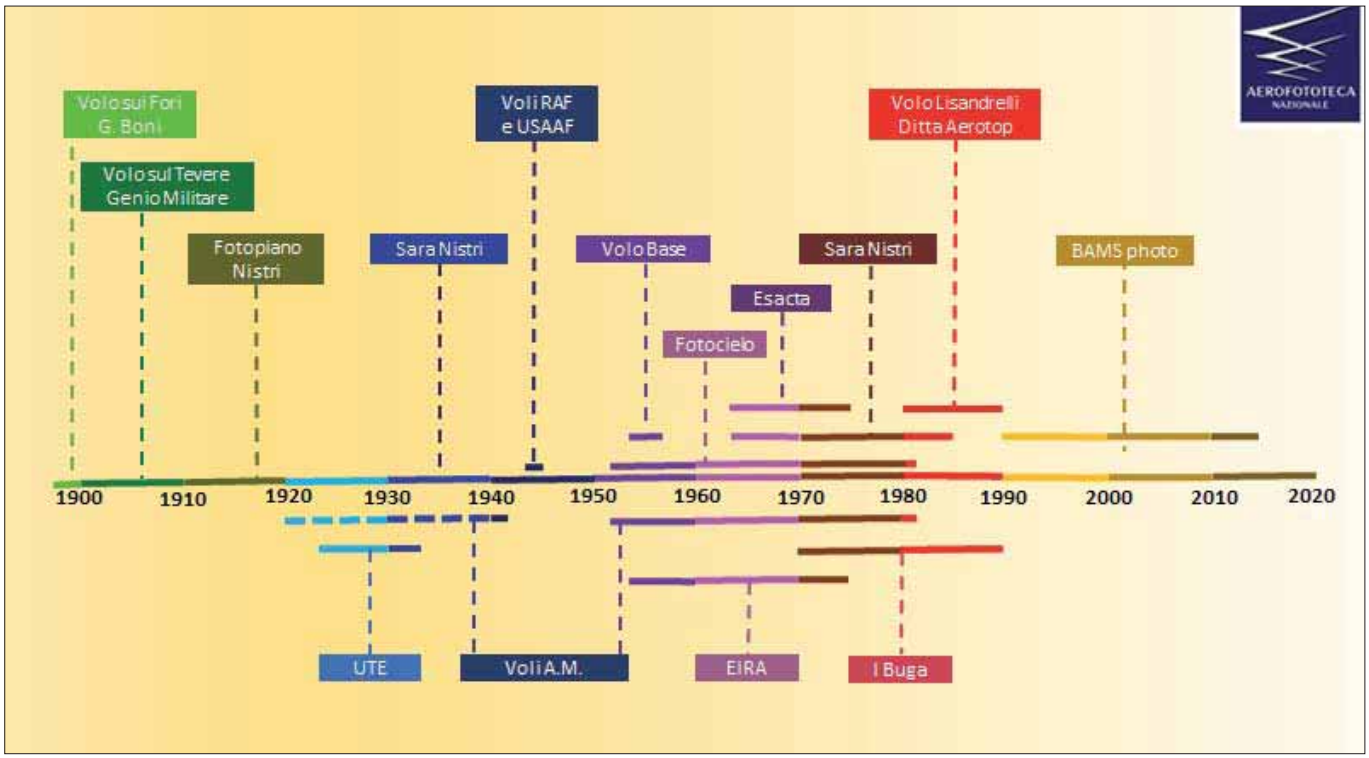


Figura 1 – Cronologia dei voli significativi e delle principali collezioni aerofotografiche conservate dall'Aerofototeca Nazionale. (Si ringrazia l'Aerofototeca Nazionale per la concessione dell'immagine)

INTRODUZIONE

L'Aerofototeca Nazionale (AFN) dell'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione del MIBAC detiene alcuni milioni di foto aeree del territorio italiano, raccolte in diverse collezioni che vanno dalla fine dell'Ottocento fino ad oggi. Gran parte di questo patrimonio si riferisce a riprese zenitali, pur non mancando foto realizzate a volo d'uccello.

La raccolta delle immagini dal cielo che rappresentano la città di Roma è molto consistente, realizzata a partire dalla fine dell'800-primi anni del '900 con le riprese del Foro Romano di Giacomo Boni e della Brigata Specialisti del Genio. Essa si sviluppa nel corso di tutto il XX secolo, dapprima sulla base di voli su aree specifiche (Volo sul Tevere del Genio Militare, 1908; Fotopiano Nistri, 1919), per poi via via far parte di programmi di più ampio respiro, condotti su archi di tempo anche ultradecennali e su porzioni di territorio molto ampie (ad esempio il Volo Base, realizzato a metà degli anni '50, copre l'intero territorio nazionale). Le aerofoto sono state riprese a differenti quote, da cui derivano rapporti di scala diversi e, quindi, il grado di dettaglio che riescono a rappresentare.

Tra le collezioni di maggiore importanza si annoverano le foto stereoscopiche planimetriche e, in minor misura, oblique scattate tra 1943 e 1945 dai ricognitori delle Forze Alleate (Fondo MAPRW- Mediterranean Allied Photographic Reconnaissance Wing - collezione BSR (British School at Rome) già R.A.F. - e USAAF, alle quali si aggiungono quelle dei voli dell'Aeronautica Militare Italiana svolti nell'arco del ventennio 1920-1940, dell'Ufficio Tecnico Erariale di Firenze a cavallo degli anni '30 e della Sara Nistri degli anni 1930-1936. Di grandissima importanza il fotomosaico dell'11 febbraio 1919 della Città di Roma eseguito dal tenente Umberto Nistri in scala nominale 1:10.000, che costituisce il primo volo fotografico aereo completo della città.

A partire dal secondo dopoguerra le attività di ripresa aerea si intensificano. L'Aerofototeca Nazionale acquista o riceve in dono numerose collezioni da molte società di rilevazione aerofotografica o produzione di cartografia, quali Aerofoto Consult, Aerotop, EIRA, ESACTA, E.T.A. Nistri, Fotocielo, I-BUGA, IRTA, S.A.F. Nistri, SIAT, molte delle quali riguardano l'area romana (*Fig.* 1). Questo materiale è disponibile per la consultazione presso l'Aerofototeca e su richiesta è possibile richiederne la duplicazione.

L'Aerofototeca dispone, inoltre, anche di una raccolta di attrezzature storiche per le riprese aeree e per la restituzione cartografica.

Le foto aeree disponibili, con l'indicazione geografica delle strisciate e gli ingombri delle singole foto sui Fogli al 100.000 dell'Istituto Geografico Militare, sono consultabili al sito www.iccdold.beniculturali.it/aerofototeca/ (*Fig.* 2). Sarà inoltre disponibile a breve un webgis di consultazione. Purtroppo, nonostante la sua grande importanza per la comunità scientifica e non, l'Aerofototeca Nazionale dal mese di dicembre 2016 è chiusa al pubblico per mancanza di personale e le richieste devono pervenire ad essa tramite il portale eFoto, disponibile sul sito ICCD.

Gli scriventi hanno avuto modo entrambi di servirsi delle collezioni dell'Aerofototeca Nazionale[1] e di apprezzarne le enormi possibilità di studio della evoluzione del territorio fornite dalle fotografie aeree disponibili. In particolare, sono subito apparse di grande interesse le foto aeree degli anni precedenti l'urbanizzazione estensiva della Città di Roma, nelle quali comparivano sul piano campagna numerosissime cavità da crollo legate all'evoluzione perniciosa di vecchie cave sotterranee di pozzolana. Queste cavità, inoltre, mostravano, in alcuni casi, anche una abbastanza rapida evoluzione nel tempo, constatabile dall'esame di foto aeree prese a distanza di tempo di dieci anni.

L'interesse di questo studio quindi risiedeva non solo nella individuazione e cartografia di cavità esistenti, alcune delle quali di età romana e rinascimentale, e dei loro crolli superficiali ma anche, quando possibile, la analisi delle velocità di evoluzione dei fenomeni di dissesto, in base ai dati di superficie, una volta che questi fenomeni di dissesto raggiungono il piano campagna.

Il progetto, di cui presentiamo in questa sede uno studio preliminare su tre aree campione, è mirato alla individuazione, cartografia su base QGIS e, dove possibile, velocità di evoluzione superficiale dei crolli legati a cavità sotterranee dissestate in seguito ad abbandono di cave estrattive sotterranee di materiali che vanno dalle pozzolane, ai tufi ed alle ghiaie. Le aree esplorate dalle foto aeree anteguerra sono ormai completamente urbanizzate o comunque in parte bonificate e quindi non è possibile fare questo tipo di studi da immagini recenti ed attuali anche se molto dettagliate.

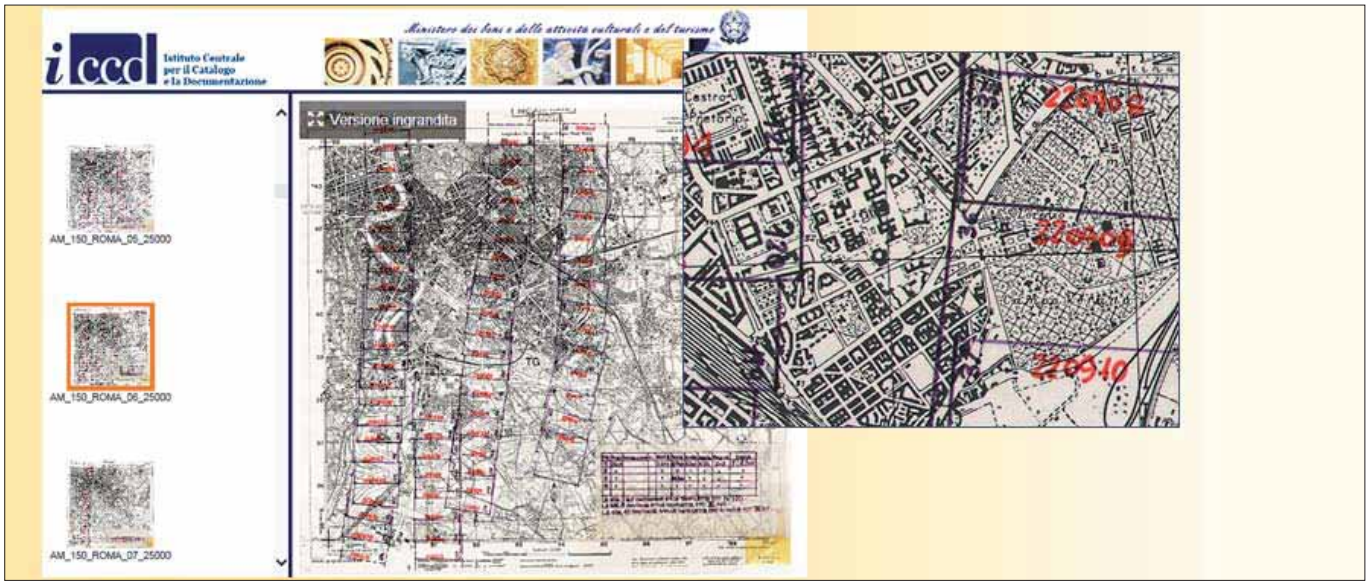


Figura 2 – Pagina del sito http://www.iccdold.beniculturali.it/aerofototeca/ con interrogazioni riguardanti Voli dell'AM sul Foglio I.G.M. 150 Roma

LO STUDIO DELLE CAVE SOTTERRANEE ESISTENTI NEL XVIII E XIX SECOLO

In uno studio parallelo condotto dagli scriventi con Orietta Verdi dell'Archivio di Stato di Roma, presentato in questo stesso volume (Verdi *et al.* 2018 in questo vol.), si utilizzano i risultati della analisi dettagliata delle apposite licenze di scavo concesse alle compagnie dei cavatori dalla Presidenza delle strade, contenute nei *Libri Patentium* (i regi-

1 Desideriamo ringraziare la Dott.ssa Elizabeth J. Shepherd, Responsabile dell'Aerofototeca Nazionale, per la concessione dell'utilizzo delle fotografie aeree presentate in questa sede ed il costante incoraggiamento, attivo sostegno ed aiuto nel corso del lavoro.

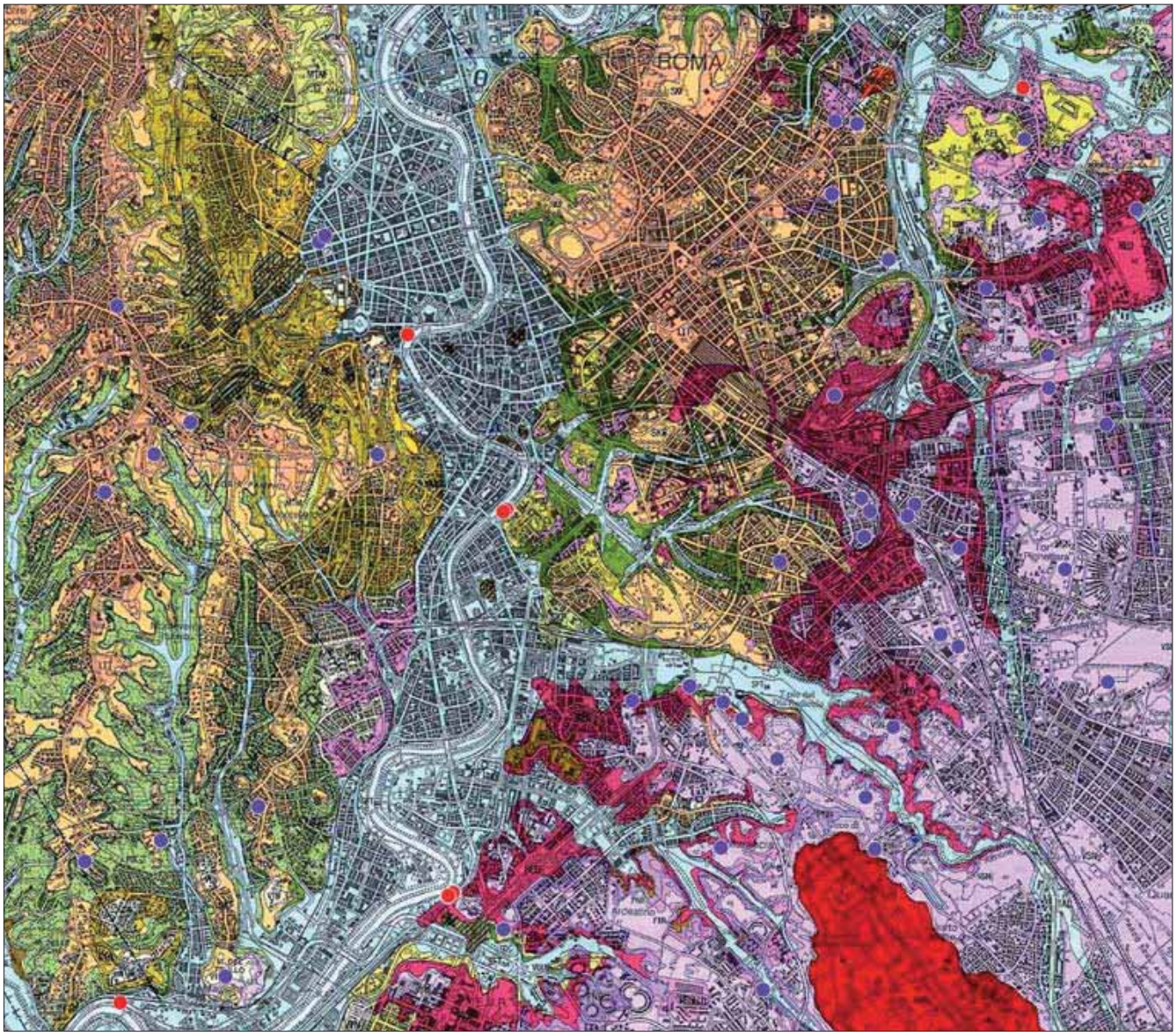


Figura 3 – Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello, Giordano 2008, particolare) con riportate le cave di pozzolana (pallini viola) ed i porti della pozzolana (pallini rossi) esistenti a Roma nella prima metà del Settecento. Si noti la coincidenza tra affioramenti di pozzolane e cave nei settori ad Est del Tevere

stri di Lettere Patenti) e conservate all'Archivio di Stato di Roma, per quanto riguarda le cave di pozzolana. Lo studio di dette Licenze, relative ad ogni tipo di scavo, da quello per la ricerca di materiali archeologici a quelli per la ricerca di materiali da costruzione, condotto negli anni Novanta dall'Archivio di Stato di Roma e il CROMA-Università di Roma Tre in seguito ad un progetto, coordinato rispettivamente da Orietta Verdi e Carlo M. Travaglini, prevede l'informatizzazione di tutte le licenze registrate nei *Libri Patentium* della Presidenza delle strade per il Settecento, e di cui si sta curando la pubblicazione della prima parte del lavoro relativa al 1700-1740.

In *Fig.* 3 sono indicate, con pallini in violetto, le ubicazioni delle cave di pozzolana esistenti nel XVIII secolo sovrapposte alla recente Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008); salta subito all'occhio come la maggior parte delle cave siano aperte nel settore orientale della città, dove sono presenti i depositi di pozzolane di maggiore pregio.

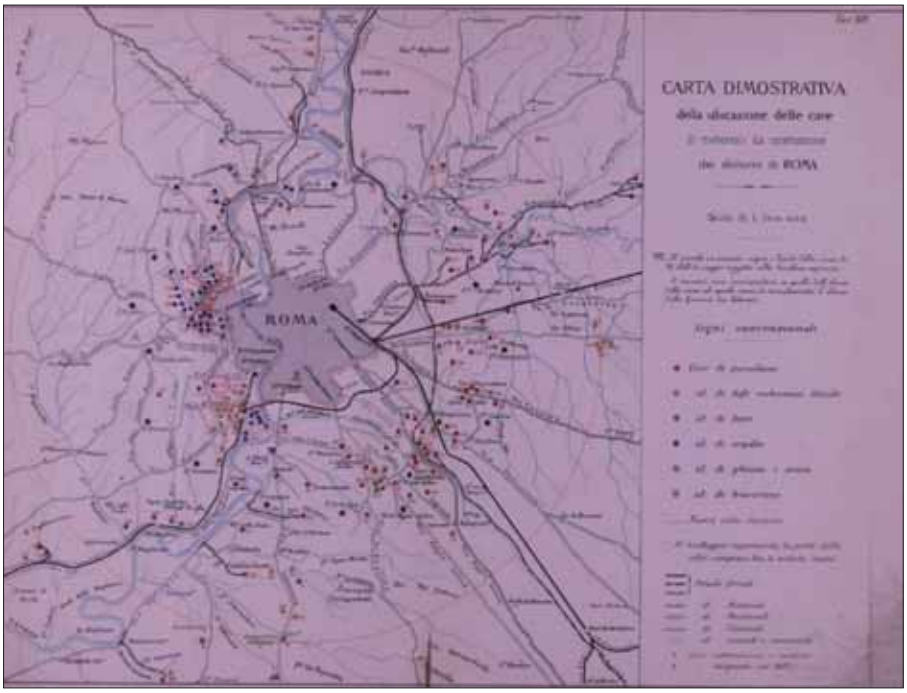


Figura 4 – Carta dimostrativa della ubicazione delle cave di materiali da costruzione dei dintorni di Roma. (da Rivista Mineraria, 1887)

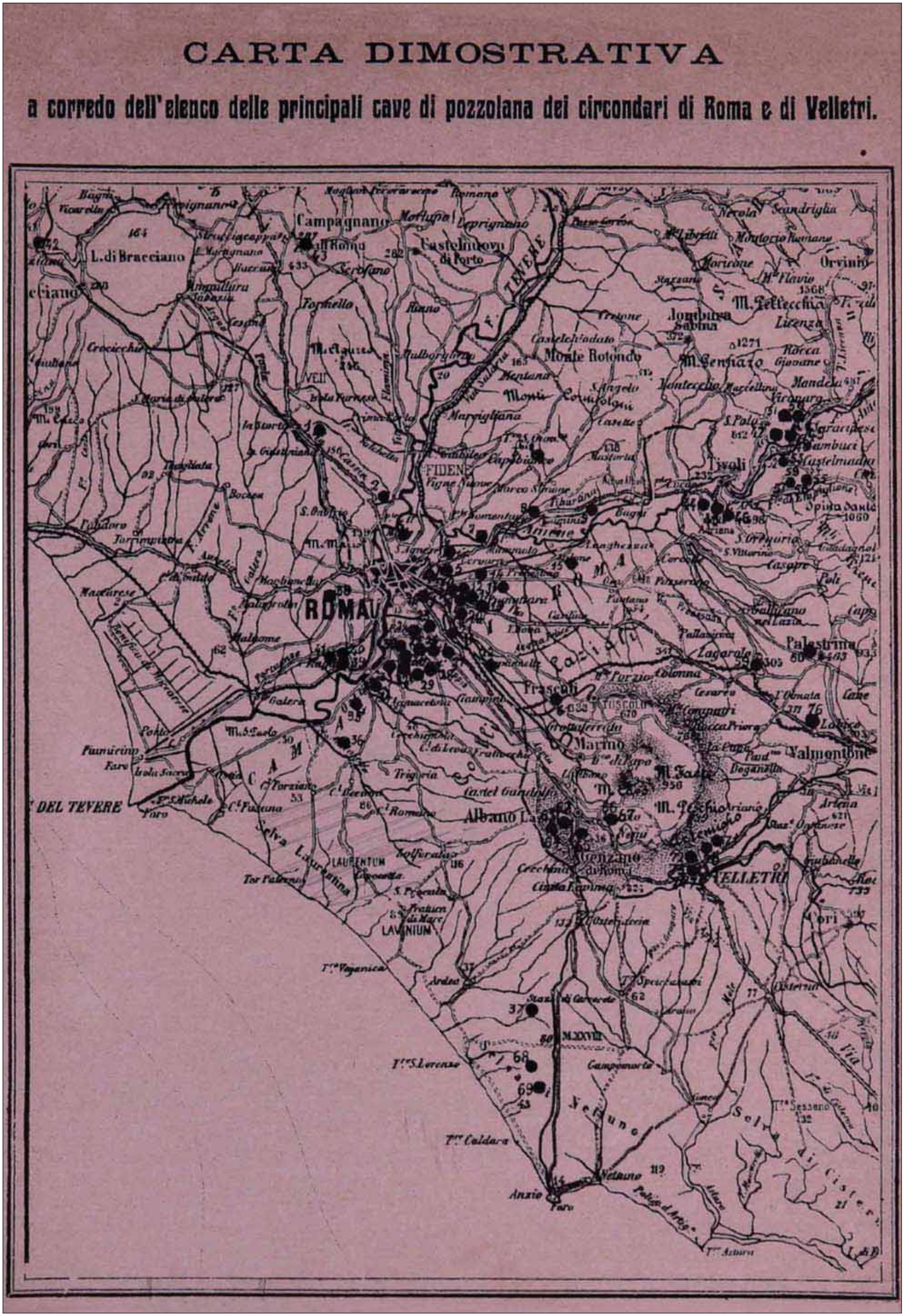


Figura 5 – Carta dimostrativa a corredo dell'elenco delle principali cave di pozzolana dei circondari di Roma e di Velletri (da "Le cave di pozzolana dei dintorni di Roma", De Marchi 1894)

Per avere una idea delle cave di materiali da costruzione esistenti a Roma negli ultimi decenni del XIX secolo si può consultare la pubblicazione della Rivista Mineraria del 1887 a cura del Ministero dell'Agricoltura, Industria e Commercio: "Elenco delle cave e fornaci in esercizio nei dintorni di Roma al 31 dicembre 1887". Oltre alla ubicazione su di una pianta delle cave (*Fig.* 4), numerate da 1 a 170, vengono forniti per ogni cava: il toponimo della ubicazione della cava, il nome del proprietario del terreno (P) ed il nome dell'esercente della cava (E), la natura del materiale estratto, il numero degli operai impiegati nella cava, la distanza dalle porte delle mura aureliane e le strade per giungere alla cava.

Altro documento importantissimo è la pubblicazione di L. De Marchi, Ingegnere capo del R. Corpo delle Miniere, del 1894: "Le cave di pozzolana nei dintorni di Roma", contenuta nello "Studio sulle condizioni di sicurezza delle miniere e delle cave in Italia", pubblicazione dell'allora Corpo Reale delle Miniere.



Figura 6 – Ubicazione dei tre settori campione. (In rosso il Grande Raccordo Anulare)



Figura 7 – Carta topografica di Roma e dei suoi contorni fino alla distanza di 10 miglia fuori le mura, indicante tutti i siti ed edifizii moderni ed i ruderi antichi ivi esistenti: eseguita coll'appoggio delle osservazioni astronomiche e per mezzo della mensola delineata sulla proporzione di 1:25 000 / negli anni 1845 a 1846 / dal Barone di Moltke aiutante di campo di S.A. Reale il Principe Enrico di Prussia a Roma. (Helmuth Karl Bernhard Moltke, 1852, particolare, nel cerchio rosso l'area 1 esaminata)



Figura 8 – Tavolette F149 ISE Maglianella e F150 IVSO Roma I.G.M. edizioni rispettivamente del 1873-1894 (Particolare, nel cerchio rosso l'area 1 esaminata)

In questa pubblicazione, oltre alla ubicazione delle cave su di una pianta (*Fig.* 5), vengono descritte le principali varietà di pozzolana, i terreni che le accompagnano, gli scavi a cielo aperto ed in sotterraneo, i rapporti tra i proprietari del suolo ed i cavatori (che normalmente non coincidevano) i canoni di affitto fissi o a misura, le condizioni di lavoro, il trasporto dalle cave ai cantieri in Roma con spedizioni attraverso tram ferrovia e Tevere, arnesi da lavoro utilizzati nelle cave, il dazio comunale per la pozzolana che entrava a Roma, i prezzi e la produzione annua di pozzolana, i casi di infortunio e le disposizioni per prevenirli.



Figura 9 – Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008, particolare, nel cerchio rosso l'area 1 esaminata)

LE AREE ESAMINATE

Le aree campione scelte in questa prima fase della ricerca sono tre settori del suburbio di Roma (*Fig.* 6):

1. La collina tra l'ex forte Portuense e l'ansa del Tevere di Santa Passera, indicata nelle tavolette I.G.M. di fine '800 con il toponimo di Villa Negroni, ed attualmente circondata dalle vie Piero Colonna e Giannetto Valli;
2. La zona della Montagnola, tra la via Laurentina e la via Ardeatina;
3. I Monti dell'Infernaccio, presso il Casale della Magliana, di fronte all'attuale Parco dé Medici.

Per ogni area sono state esaminate le condizioni presenti nella cartografia di fine '800 e dei primi anni del XX secolo e immagini da foto aeree che consentissero un esame della evoluzione dei dissesti sotterranei attraverso il riscontro dei collassi superficiali.

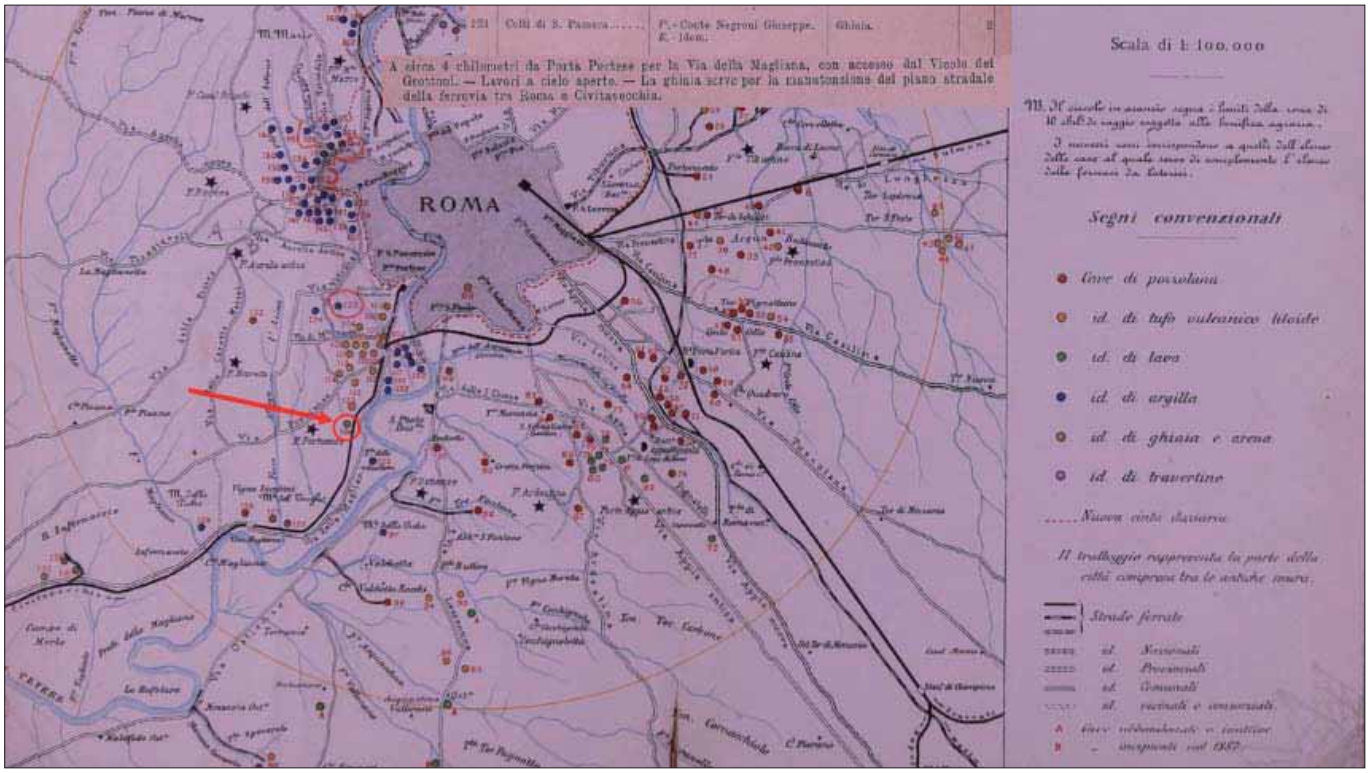


Figura 10 – Carta dimostrativa della ubicazione delle cave di materiali da costruzione dei dintorni di Roma. (da Rivista Mineraria, 1887, particolare area 1 esaminata, la freccia rossa ed il cerchio indicano la cava di ghiaia)

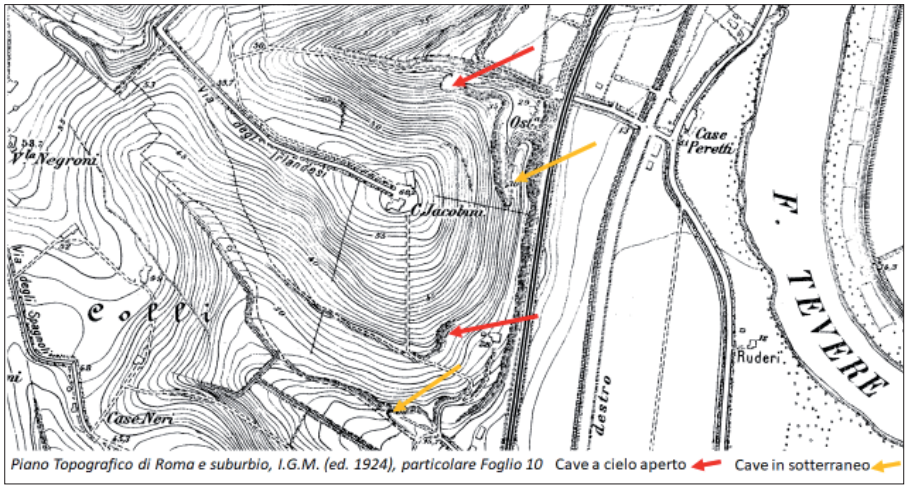


Figura 11 – Piano Topografico di Roma e Suburbio, I.G. M., edizione del 1924, Foglio 10, particolare, le frecce rosse indicano cave a cielo aperto, le frecce gialle ingressi di cave in sotterraneo

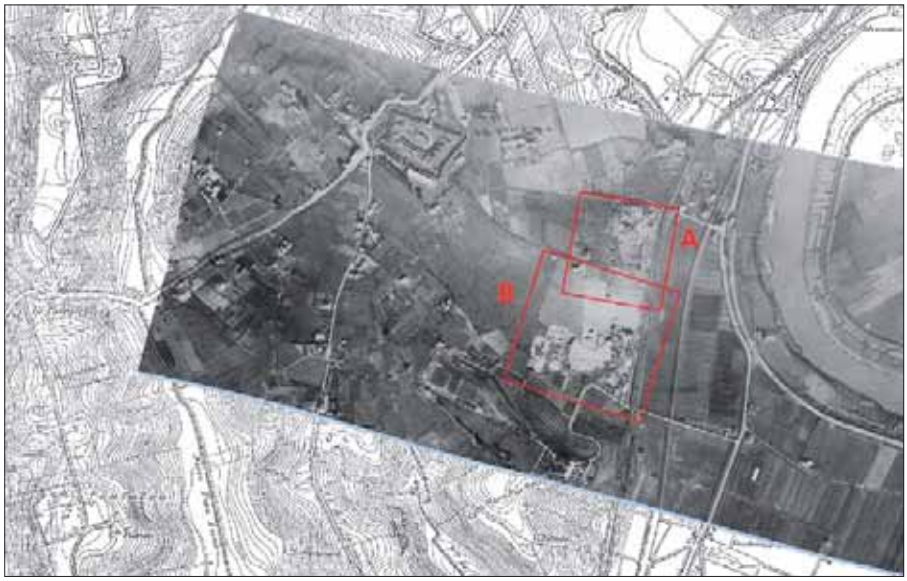


Figura 12 – Foto aerea del volo SARA del 1934 georiferita su base GIS (AFN, fondo SARA, 1934, str.2, fot. 11, neg. 34335), in rosso i due settori A e B ingranditi nelle figure successive

AREA 1 – LA COLLINA TRA LE VIE PIERO COLONNA E GIANNETTO VALLI

La prima area presa in esame, localizzata tra l'ex Forte Portuense e l'ansa del Tevere di Santa Passera, in una carta del 1852 (Barone von Moltke, Carta topografica di Roma e contorni, *Fig.* 7) appare pressochè libera da costruzioni a parte qualche casale sparso e con apparente assenza di ingressi di cave in sotterraneo e di cave a cielo aperto.

Nelle due tavolette F149ISE, Maglianella - F150IVSO, Roma del 1873-1894 appare completamente libera da costruzioni a parte un casale sulla cima del colle con il toponimo di Villa Negroni, e comunque con apparente assenza di ingressi di cave in sotterraneo e di cave a cielo aperto (vedi *Fig.* 8).

Dal punto di vista geologico, la recente Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008) evidenzia nella collina la presenza di una sequenza sedimentaria pre-vulcanica (Formazione di Ponte Galeria) nella quale, dopo alcuni metri di limi argillosi grigi in basso (litofacies argilloso-sabbiosa - PGL3b), sono presenti in prevalenza sabbie e ghiaie (litofacies sabbiosa e ghiaiosa PGL3c) e un piccolo lembo di depositi vulcanici (TDC ed SKF) sulla cima della stessa collina (*Fig.* 9).

Osservando la pianta delle cave in esercizio nel 1887 (*Fig.* 10) si vede l'esistenza, con il numero 124, di una cava di ghiaia a cielo aperto, con due operai, utilizzata per la locale manutenzione della strada ferrata Roma-Civitavecchia.

Nel Piano Topografico di Roma e Suburbio, dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) nella versione del 1924 che comprende l'area in

esame (*Fig.* 11), il casale ha cambiato proprietà e nome in Casale Jacobini e sono visibili due ingressi di cava in sotterraneo e due cave a cielo aperto, ma non sono segnalati collassi in superficie; è probabile che l'attività di cava in sotterraneo sia iniziata nei primi anni del XX secolo. Georeferenziando su base GIS la prima foto aerea del volo SARA del 1934 (*Fig.* 12) sono visibili, a poco più di dieci anni dal rilevamento della carta I.G.M. del 1924, evidenti collassi superficiali che testimoniano il degrado delle cavità sotterranee probabilmente abbandonate, mentre sono evidenti attività estrattive in superficie.

Nel settore A, ingrandito nella *Fig.* 13, sono visibili almeno 13 collassi superficiali con diametro variabile da 16 a 5 metri, l'ingresso nord della cava in sotterraneo è completamente reinterrato probabilmente in seguito all'abbandono.

Nel settore B, ingrandito nella *Fig.* 14, sono presenti almeno altri 5 collassi superficiali, connessi anche essi al degrado delle cavità sotterranee legate all'ingresso sud di

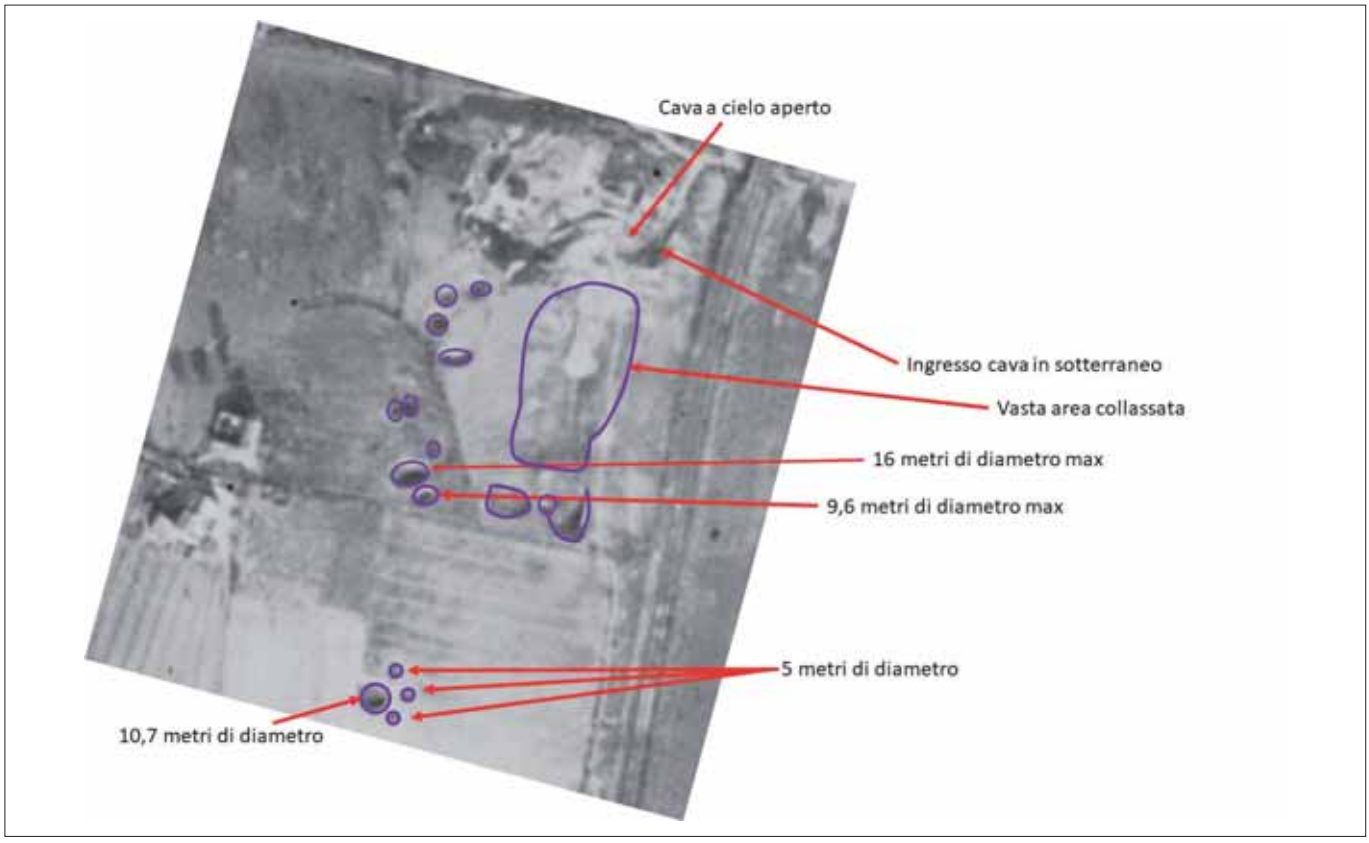


Figura 13 – Settore A ingrandito della foto aerea SARA del 1934

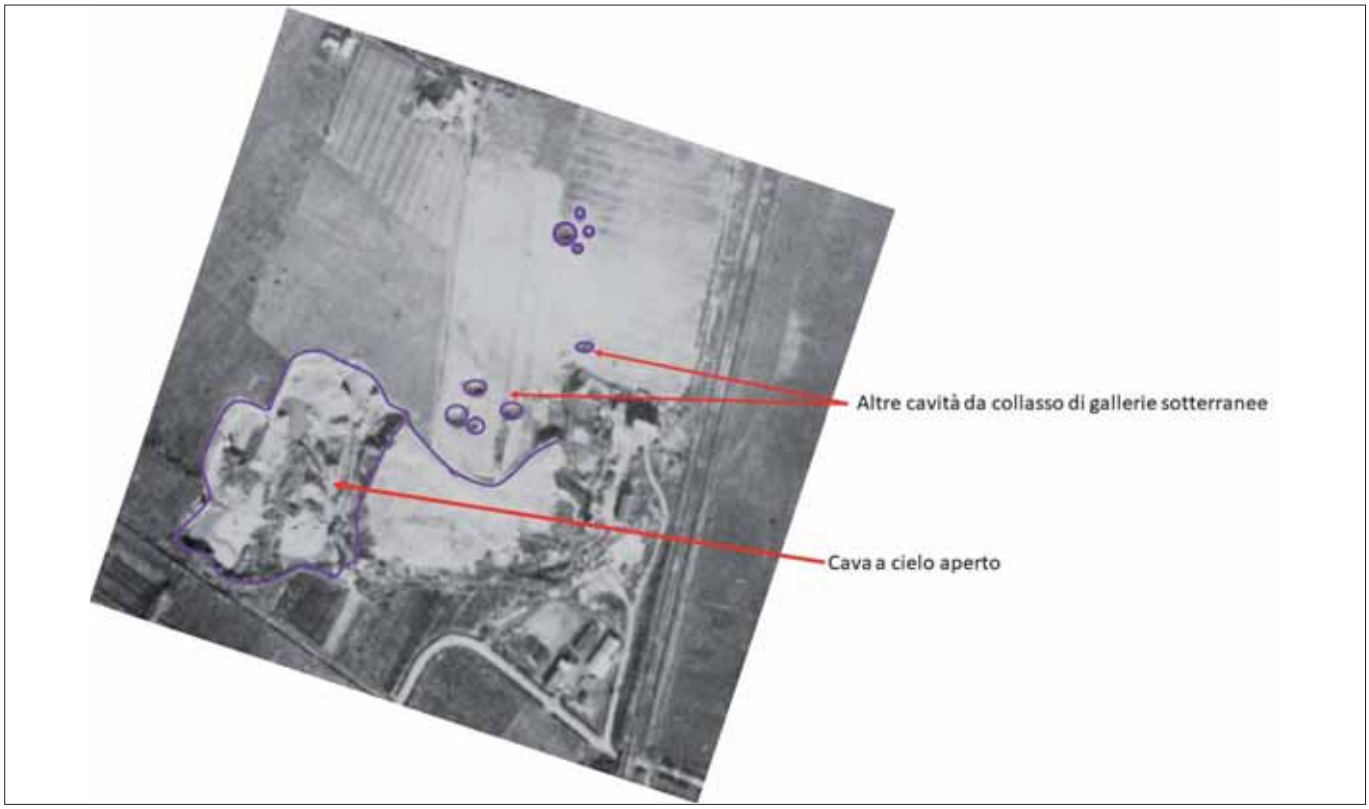


Figura 14 – Settore B ingrandito della foto aerea SARA del 1934



Figura 15 – Foto aerea del volo RAF del 16 gennaio 1944 georiferita su base GIS (AFN, fondo RAF, 1944, strisciata 742, fot.3026 neg.186405)



Figura 16 – Confronto, a parità di scala ed orientazione, tra le foto aeree del 1934 e del 1944



Figura 17 – Confronto fra la foto aerea RAF del 1944, a sinistra, e la carta IGM del 1924 sovrapposta su CTR al 5000 del 2005, a destra

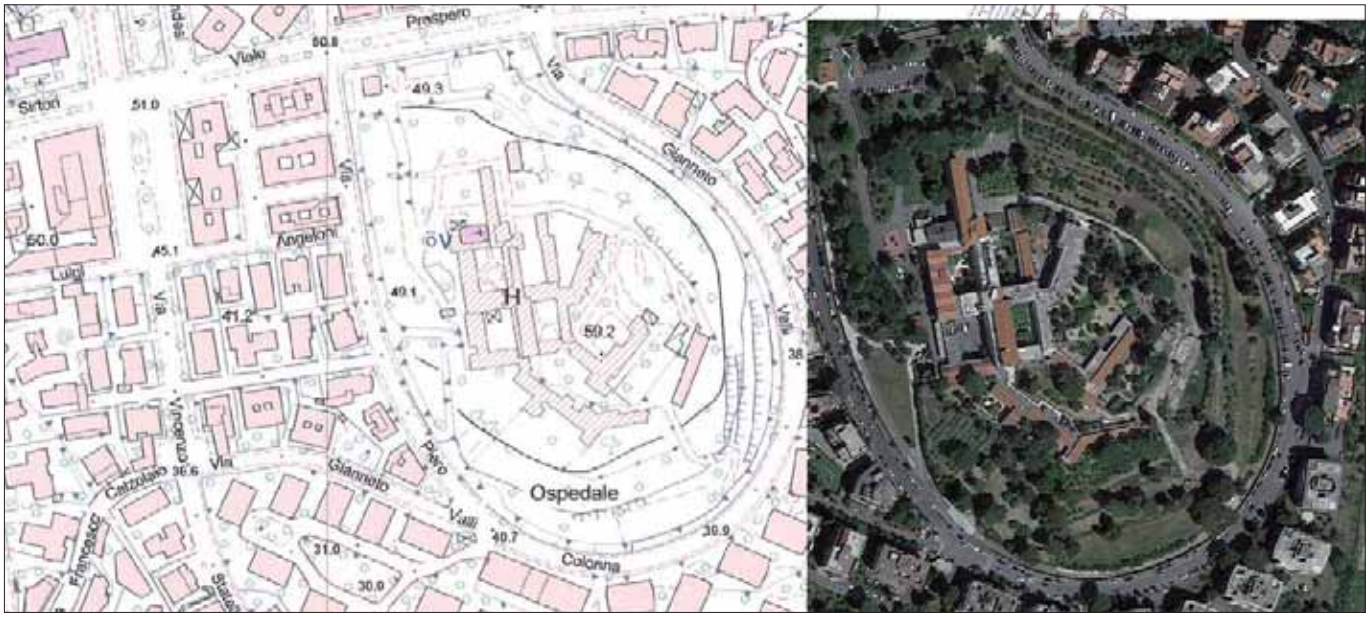


Figura 18 – Confronto fra la CTR al 5000 del 2005, a sinistra, e una immagine satellitare da Google Earth dello stesso sito 1



Figura 19 – Carta topografica di Roma e dei suoi contorni fino alla distanza di 10 miglia fuori le mura, indicante tutti i siti ed edifizii moderni ed i ruderi antichi ivi esistenti: eseguita coll'appoggio delle osservazioni astronomiche e per mezzo della mensola delineata sulla proporzione di 1:25 000 / negli anni 1845 a 1846 / dal Barone di Moltke aiutante di campo di S.A. Reale il Principe Enrico di Prussia a Roma. (Helmuth Karl Bernhard Moltke, 1852, particolare, nel cerchio rosso l'area 2 esaminata)



Figura 20 – Tavoletta F150 IVSO Roma del 1894, I.G. M., particolare, nel cerchio rosso l'area 2 esaminata

Fig. 11. Una cava a cielo aperto è visibile a sinistra dell'immagine.

Se consideriamo la seconda aerofoto disponibile, da un volo RAF del 16 gennaio 1944, anche essa georiferita su base GIS (*Fig.* 15) osserviamo come dopo soli altri dieci anni, dismessa definitivamente da tempo anche l'attività di cava a cielo aperto, i collassi superficiali spesso interferendo tra loro, abbiano interessato praticamente tutta la collina da nord a sud e anche la sua porzione sud-occidentale. Nella *Fig.* 16 si possono osservare le notevoli differenze in termini di densità di collassi superficiali tra le due riprese aeree, nel 1944 praticamente quasi tutte le cavità presenti hanno subito un crollo della volta che ha raggiunto la superficie.

In poco più di venti anni a partire dall'abbandono delle attività della cava in sotterraneo si sono manifestati crolli significativi che hanno condotto al completo dissesto della collina.

Nella *Fig.* 17 sono posti a confronto alla stessa scala: a sinistra la foto RAF del 1944 e a destra la carta topografica I.G.M. del 1924 con sovrapposto alla stessa scala e georiferito l'elemento 374103 della CTR al 5000 della regione Lazio del 2005. Attualmente la zona è densamente urbanizzata, come è possibile vedere meglio nella figura 18 dove sono messi a confronto la CTR di *Fig.* 17 e una immagine satellitare tratta da Google Earth.

AREA 2 – LA ZONA DELLA MONTAGNOLA

La seconda area presa in esame, localizzata tra la via Laurentina e la via Ardeatina, a nord della Tenuta delle Tre Fontane, in una carta del 1852 (Barone von Moltke, Carta topografica di Roma e contorni, *Fig.* 19) appare pressochè libera da costruzioni a parte qualche casale sparso e l'Abbazia delle Tre Fontane e con espressa presenza di cave di

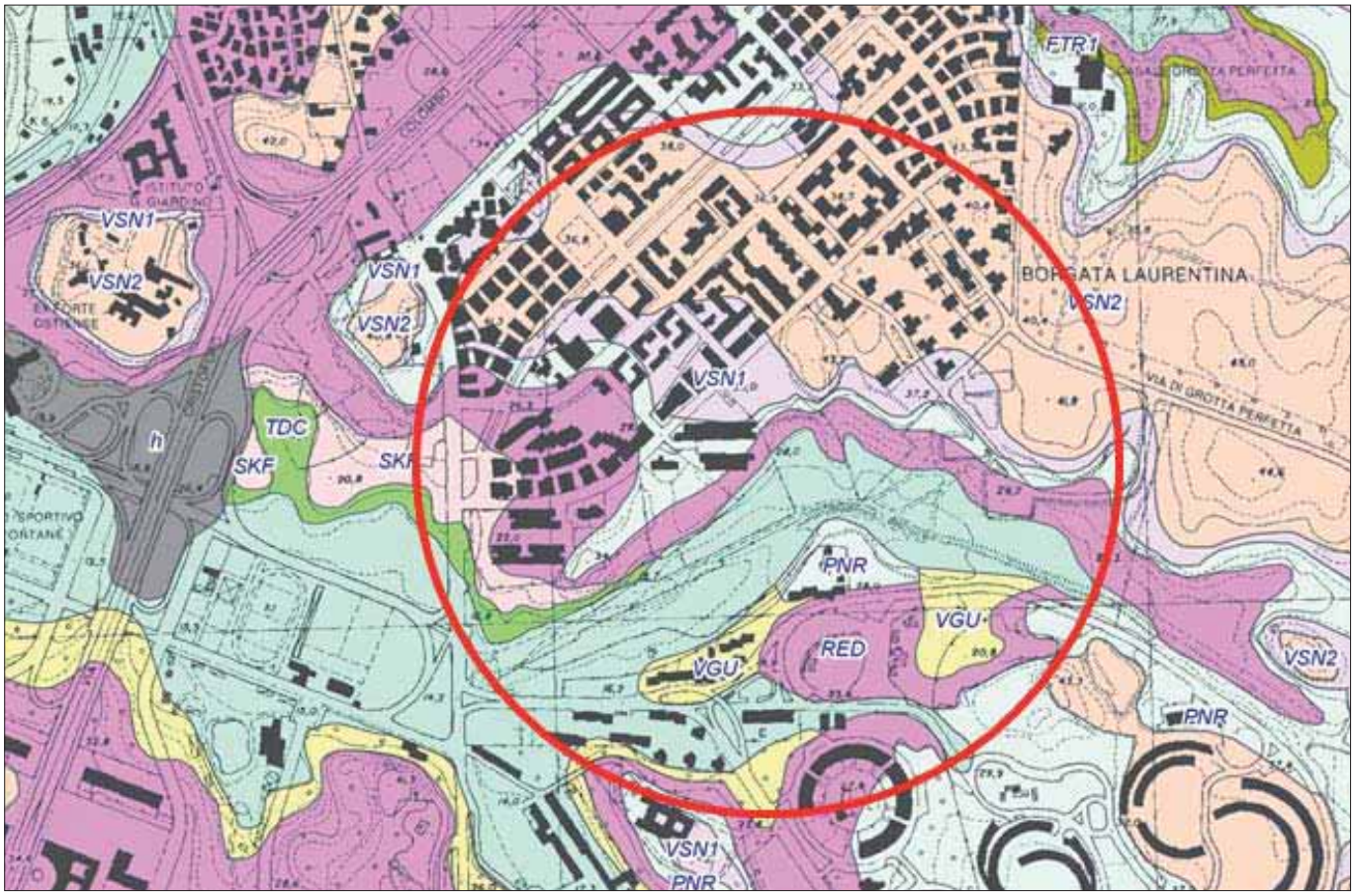


Figura 21 – Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008, particolare, nel cerchio rosso l'area 2 esaminata)

pozzolana probabilmente in sotterraneo. La tavoletta F150 IVSO Roma del 1894, visibile in figura 20, evidenzia già una serie di collassi superficiali riconducibili alle attività di cava in sotterraneo nel settore a nord del Fosso delle Tre Fontane.

Dal punto di vista geologico, la recente Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008) evidenzia la estesa presenza di pozzolane, sia le Pozzolane Rosse (RED) che le Pozzolanelle (VSN2) con interposto tra le due il Tufo lionato (VSN1) (*Fig.* 21).

La pianta delle cave in esercizio nel 1887 (*Fig.* 22) mostra l'esistenza, con i numeri 90, 91 e 92, di almeno tre cave di pozzolana, di cui la cava n. 90 in sotterraneo (Grotta Perfetta), la n. 91 a cielo aperto e la n. 92 (nella Tenuta delle Tre Fontane) sia in sotterraneo che a cielo aperto.

Nel Piano Topografico di Roma e Suburbio, dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) nella versione del 1924 che comprende l'area in esame (*Fig.* 23), sono visibili sia fronti di cava a cielo aperto che numerosissimi collas-

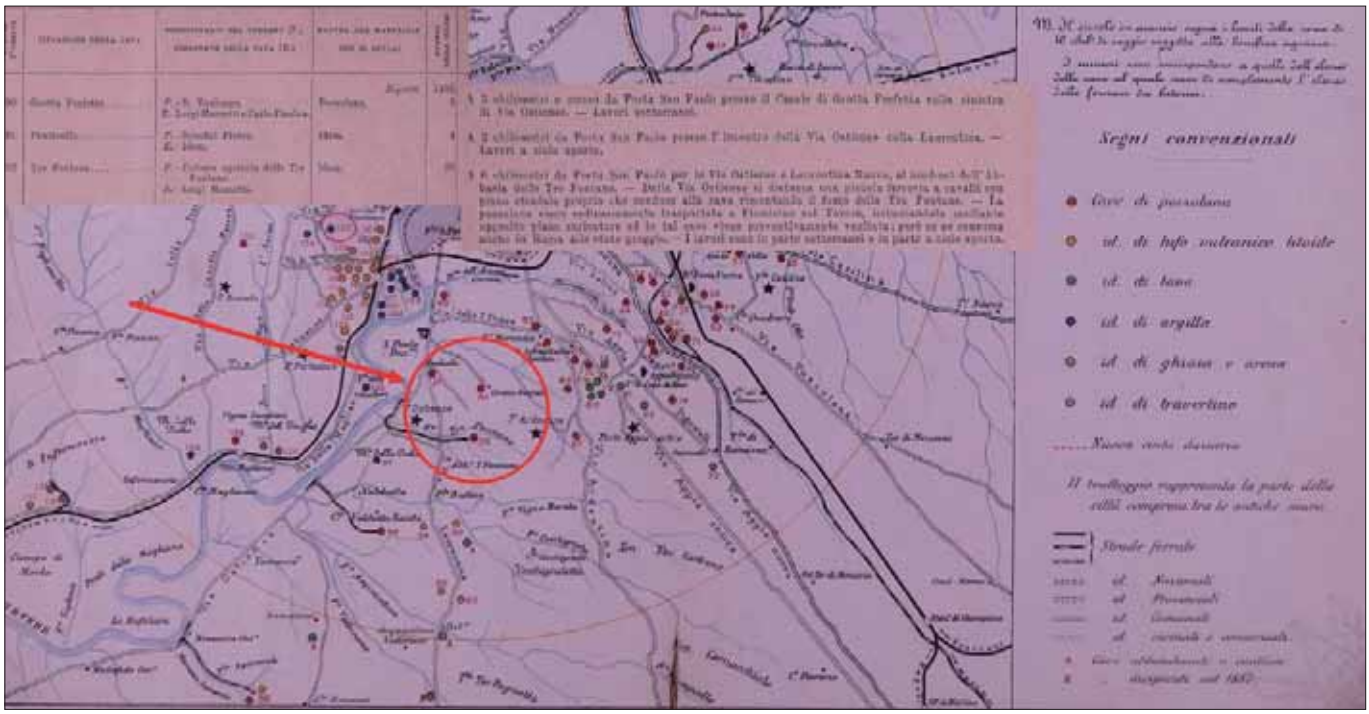


Figura 22 – Carta dimostrativa della ubicazione delle cave di materiali da costruzione dei dintorni di Roma. (da Rivista Mineraria, 1887, particolare area 2 esaminata, la freccia rossa ed il cerchio indicano le cave di pozzolana)

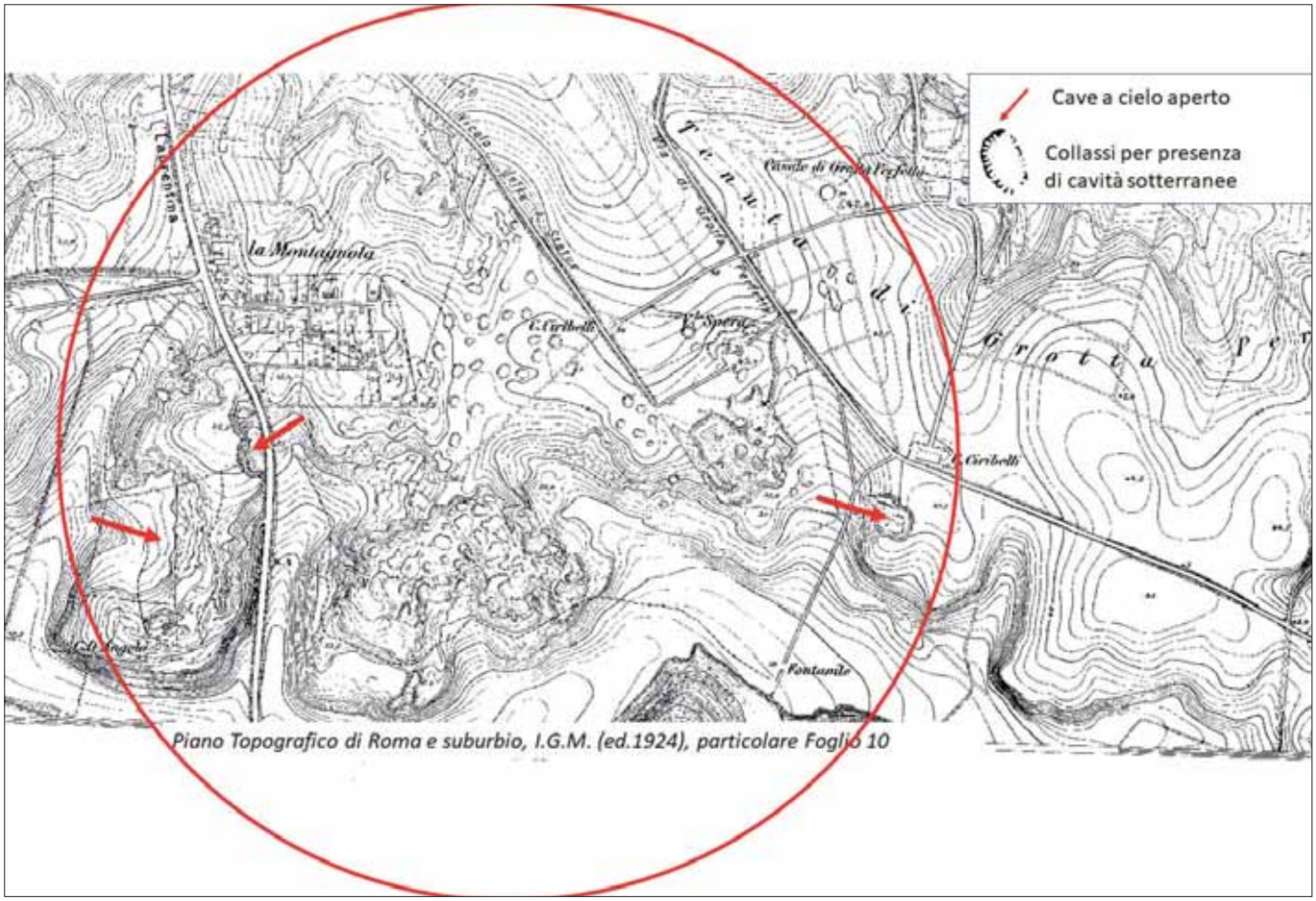


Figura 23 – Piano Topografico di Roma e Suburbio, I.G. M., edizione del 1924, Foglio 10, particolare, le frecce rosse indicano cave a cielo aperto



Figura 24 – Foto aerea del volo SARA del 1934 georiferita su base GIS (AFN, fondo SARA, 1934, neg. 34350)



Figura 25 – Foto aerea del volo RAF del 1944 georiferita su base GIS (AFN, fondo RAF, 1944, str 773, fot. 4005)

si superficiali, ricollegabili a crolli di cavità sotterranee per l'estrazione della pozzolana, probabilmente già abbandonate al tempo. È importante sottolineare come anche all'interno dell'area edificata della Montagnola sono presenti collassi superficiali che rivelano anche in quel settore la presenza nel sottosuolo di cave di pozzolana.

Un volo SARA del 1934 (*Fig*. 24) permette di verificare, dopo poco più di dieci anni dal rilevamento della carta edita nel 1924, una notevolmente aumentata presenza di collassi in superficie.

Il volo RAF del 1944 passa sopra l'area in esame e permette di constatare la ormai quasi completa distruzione per collasso delle cavità esistenti, con la presenza in superficie di una miriade di collassi che pervadono praticamente tutta la morfologia in parte amplificando gli effetti per la reciproca interferenza. In *Fig.* 25 è presentata una foto del volo RAF georiferita su base GIS ed in figura 26 il confronto a parità di scala tra la carta del 1924 e la situazione visibile nel 1944.

Nelle *Figg*. 27 e 28 è presentata la situazione attuale, notevolmente urbanizzata, alla stessa scala, sia con una CTR al 5000 della Regione Lazio che come immagine satellitare da Google Earth.

AREA 3 - I MONTI DELL'INFERNACCIO, DI FRONTE ALL'ATTUALE PARCO DE' MEDICI

La terza ed ultima area presa in esame, localizzata sui Monti dell'Infernaccio di fronte all'attuale Parco de' Medici, in una carta del 1852 (Barone von Moltke, Carta topografica di Roma e contorni, *Fig.* 29) appare pressoché libera da costruzioni a parte il Casale dell'Infernaccio ed il Casale della Magliana.

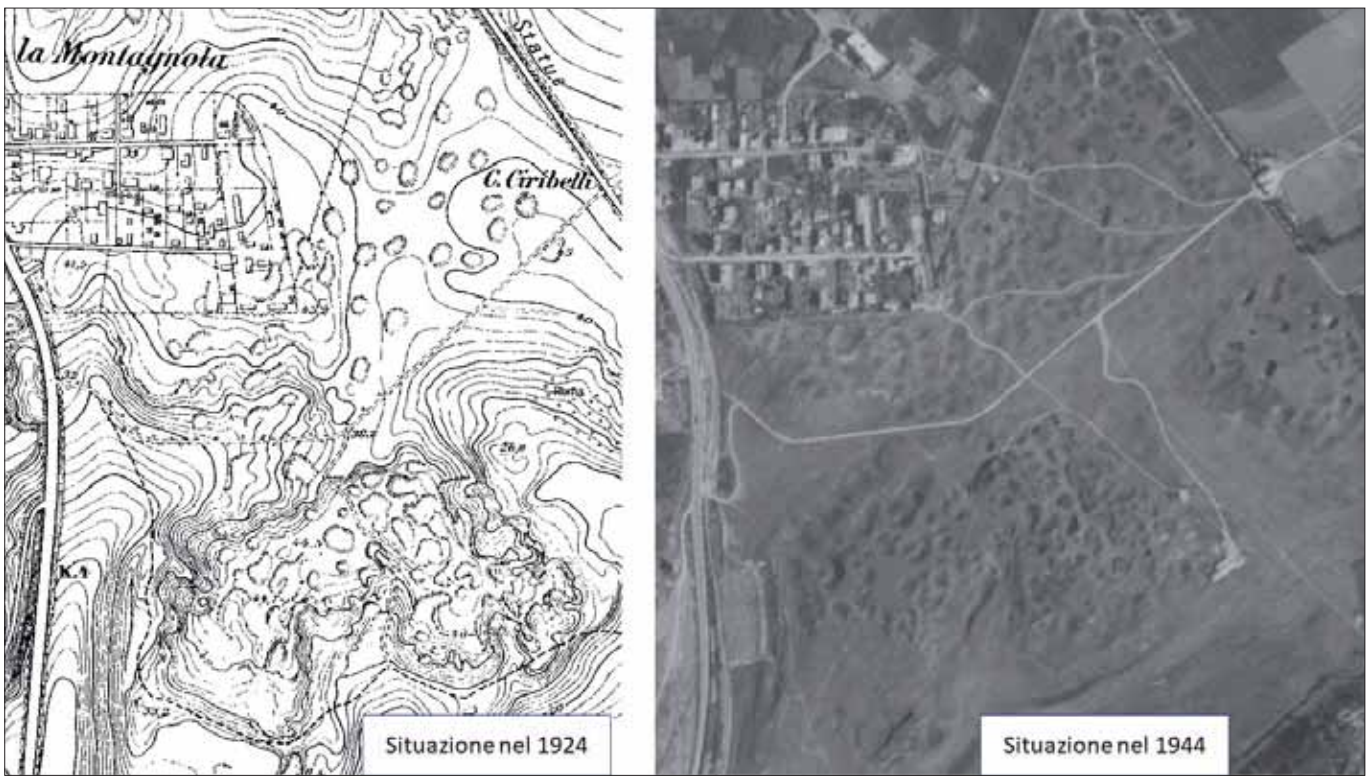


Figura 26 – Confronto, a parità di scala, tra la carta del 1924 e la situazione visibile nel 1944

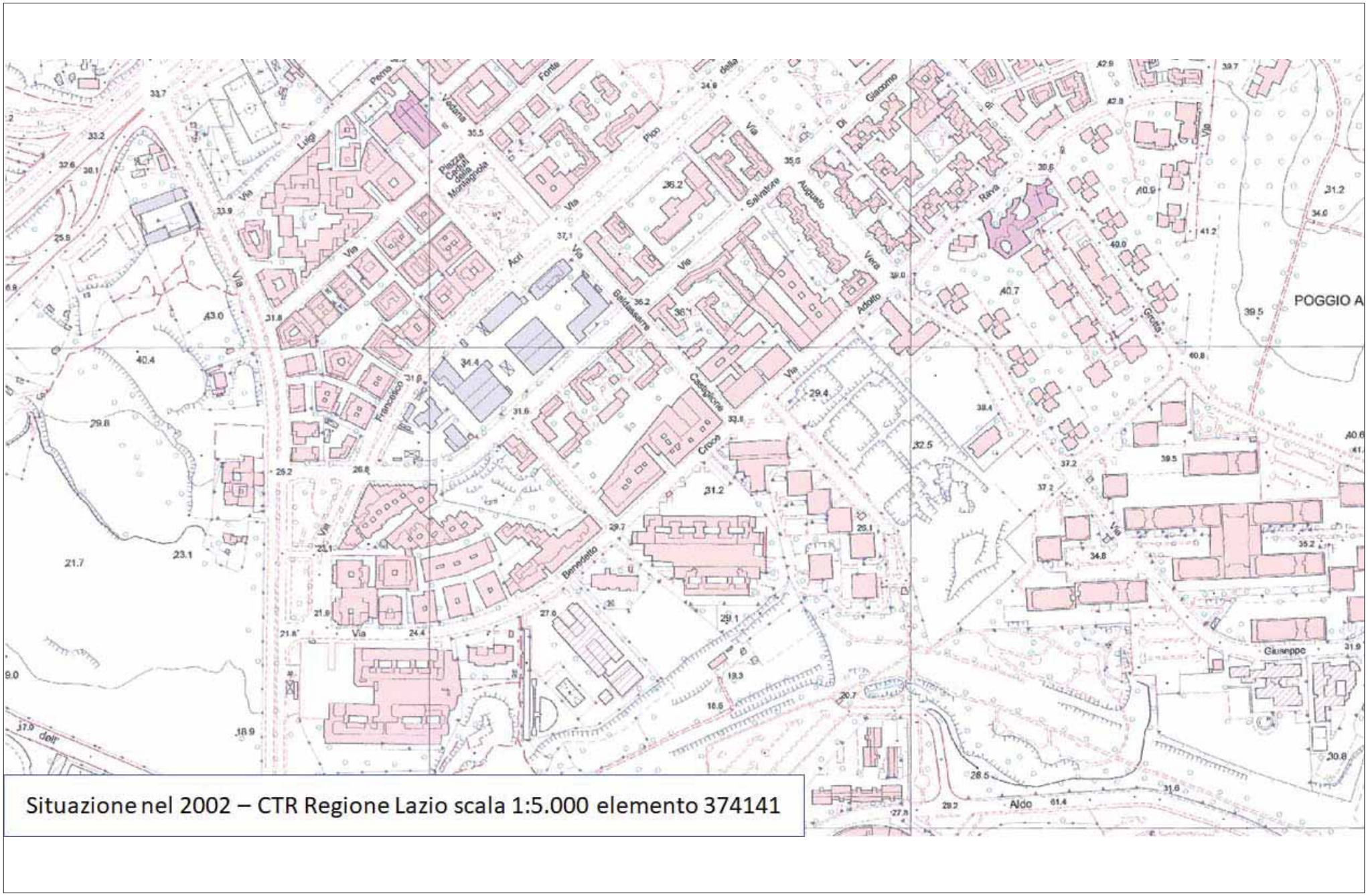


Figura 27 – CTR Regione Lazio scala 1:5000, elemento 374141, 2005



Figura 28 – Foto satellitare da Google Earth 2016

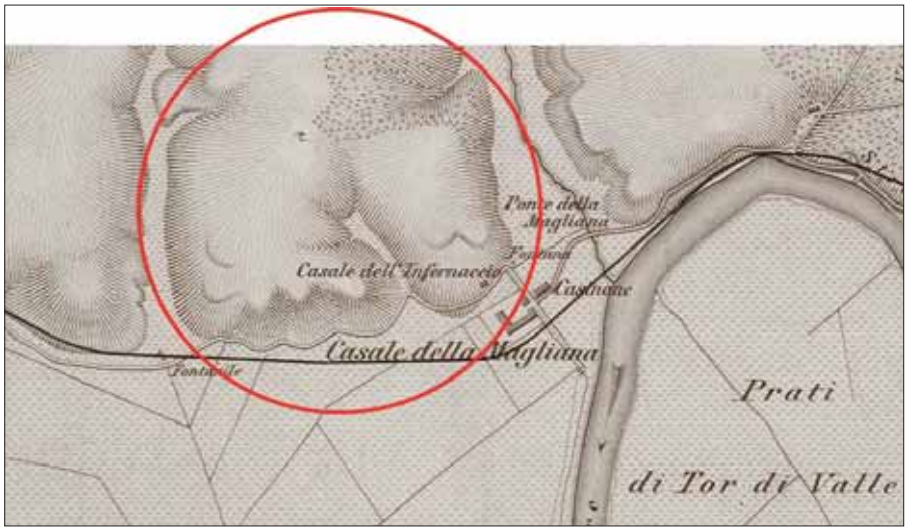


Figura 29 – Carta topografica di Roma e dei suoi contorni fino alla distanza di 10 miglia fuori le mura, indicante tutti i siti ed edifizii moderni ed i ruderi antichi ivi esistenti: eseguita coll'appoggio delle osservazioni astronomiche e per mezzo della mensola delineata sulla proporzione di 1:25 000 / negli anni 1845 a 1846 / dal Barone di Moltke aiutante di campo di S.A. Reale il Principe Enrico di Prussia a Roma. (Helmuth Karl Bernhard Moltke, 1852, particolare, nel cerchio rosso l'area 3 esaminata)



Figura 30 – Tavoletta F149 IINE Ponte Galeria del 1873, particolare, nel cerchio rosso l'area 3 esaminata)

La tavoletta F149 IINE Ponte Galeria del 1873, visibile in figura 30, evidenzia l'assenza di collassi superficiali e la presenza di 2 fronti di cava.

Dal punto di vista geologico, la Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008) evidenzia la presenza della sequenza deposizionale di Ponte Galeria (PGL1, PGL2, PGL3), con sabbie, ghiaie e depositi pleistocenici di sequenze più giovani (Formazione di Fosso del Torrino - FTR) (*Fig.* 31).

La pianta delle cave in esercizio nel 1887 (Fig.32) mostra l'assenza di cave in quegli anni in questo settore, che evidentemente è stato sfruttato successivamente.

Nel volo RAF del 1944 che attraversa il settore in esame sono visibili numerosissimi collassi superficiali da crollo di cavità sotterranea (*Fig.* 34) mentre nella *Fig.* 33, ingrandimento della tavoletta di *Fig.* 30 del 1873, sono praticamente assenti fenomeni di crollo in superficie.

Il volo della Aeronautica Militare (AM) del 1953 (*Fig.* 35) conferma praticamente la situazione di estremo degrado con aumento delle cavità superficiali ed estensione nelle colline ad est dei collassi di superficie che nella foto RAF non erano presenti.

Nelle figure 36, 37 e 38 sono presentate rispettivamente la CTR al 5000 della Regione Lazio (Elemento 374131) del 2005, una immagine satellitare da Google Earth del 2007 ed una immagine satellitare sempre da Google Earth del 2017.

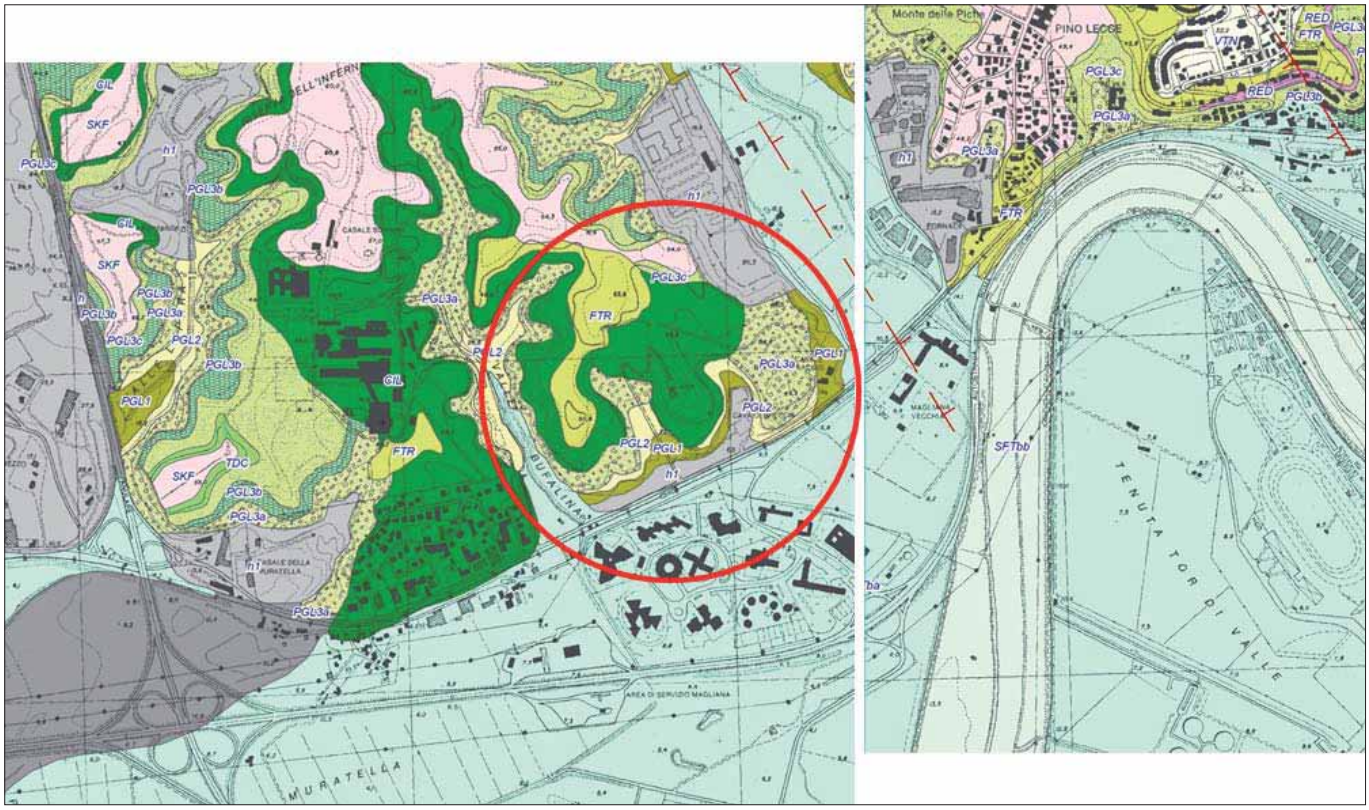


Figura 31 – Carta Geologica del Comune di Roma (Funiciello e Giordano, 2008, particolare, nel cerchio rosso l'area 3 esaminata)

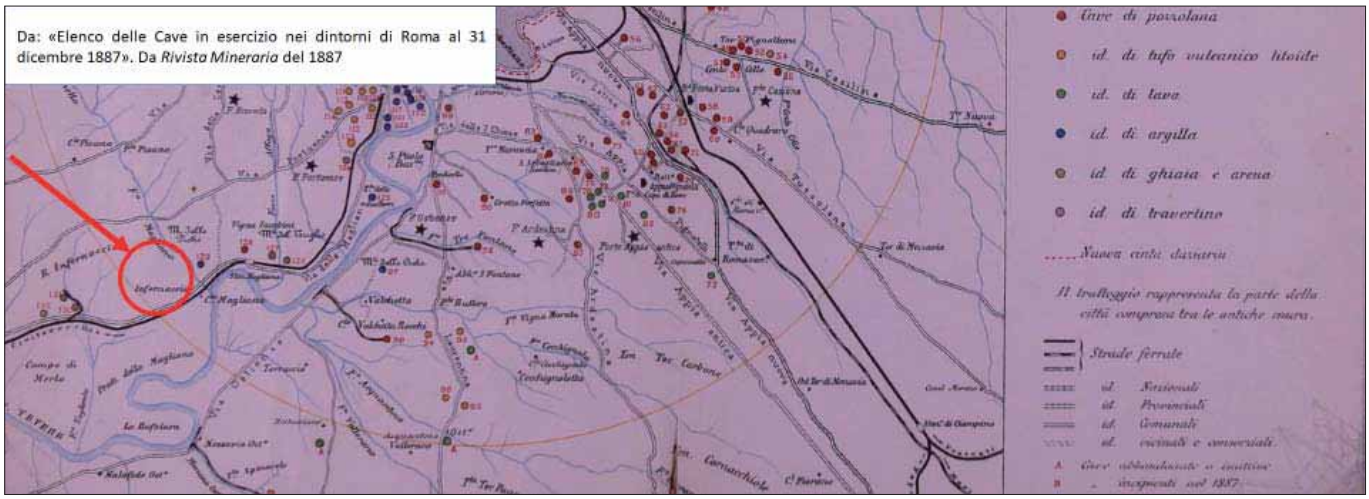


Figura 32 – Carta dimostrativa della ubicazione delle cave di materiali da costruzione dei dintorni di Roma. (da Rivista Mineraria, 1887, particolare area 3 esaminata, la freccia rossa ed il cerchio indicano la assenza di cave di pozzolana)



Figura 33 – Tavoletta F149 IINE Ponte Galeria del 1873, particolare della fig. 30)

CONCLUSIONI

Attraverso lo studio di tre aree campione scelte appositamente è stato possibile analizzare, attraverso l'utilizzo di fotografie aeree disponibili presso l'Aerofototeca Nazionale e precedenti la urbanizzazione del suburbio di Roma negli anni '50-'60 del Novecento, la evoluzione di cavità sotterranee connesse con cave per estrazione di pozzolana e ghiaie. Lo studio dimostra che, dopo l'abbandono dell'attività estrattiva, in poche decine di anni si possono creare notevoli dissesti e crolli successivi nelle cavità sotterranee, tali da far emergere in superficie le cavità con collassi ripetuti che possono spesso interessare vuoti contigui tra loro ed ingrandirsi, fino a modificare completamente la morfologia superficiale, con effetti devastanti anche sulla



Figura 34 – Foto aerea RAF del 1944 georiferita su base GIS (AFN, fondo RAF, 1944, strisciata 216 – fot. 4096, neg. 193235)



Figura 35 – Foto aerea AM del 1953 georiferita su base GIS (AFN, fondo AM, 1953, neg. 223101)

possibile fruizione di queste aree. La grande espansione urbanistica della città che si è registrata a partire del XX secolo ha infatti inglobato vastissime aree nel cui sottosuolo si sono sviluppate le attività di escavazione di inerti, per la massima parte pozzolana; interi quartieri di Roma, specie del quadrante orientale, presentano questo tipo di problematica che, se per alcuni fabbricati può essere stato risolto attraverso la realizzazione di fondazioni profonde (pali) che attraversano i vuoti sotterranei, crea situazioni di rischio per gli altri fabbricati e per tutte le aree non edificate (strade, giardini, spazi pubblici, ecc.).

La possibilità di estendere lo studio a tutto il territorio del Comune di Roma permetterebbe di delimitare con grande esattezza le aree sensibili a questo tipo di evoluzione e di provvedere a indirizzare bonifiche adeguate nel caso di urbanizzazione già esistente o in progetto.

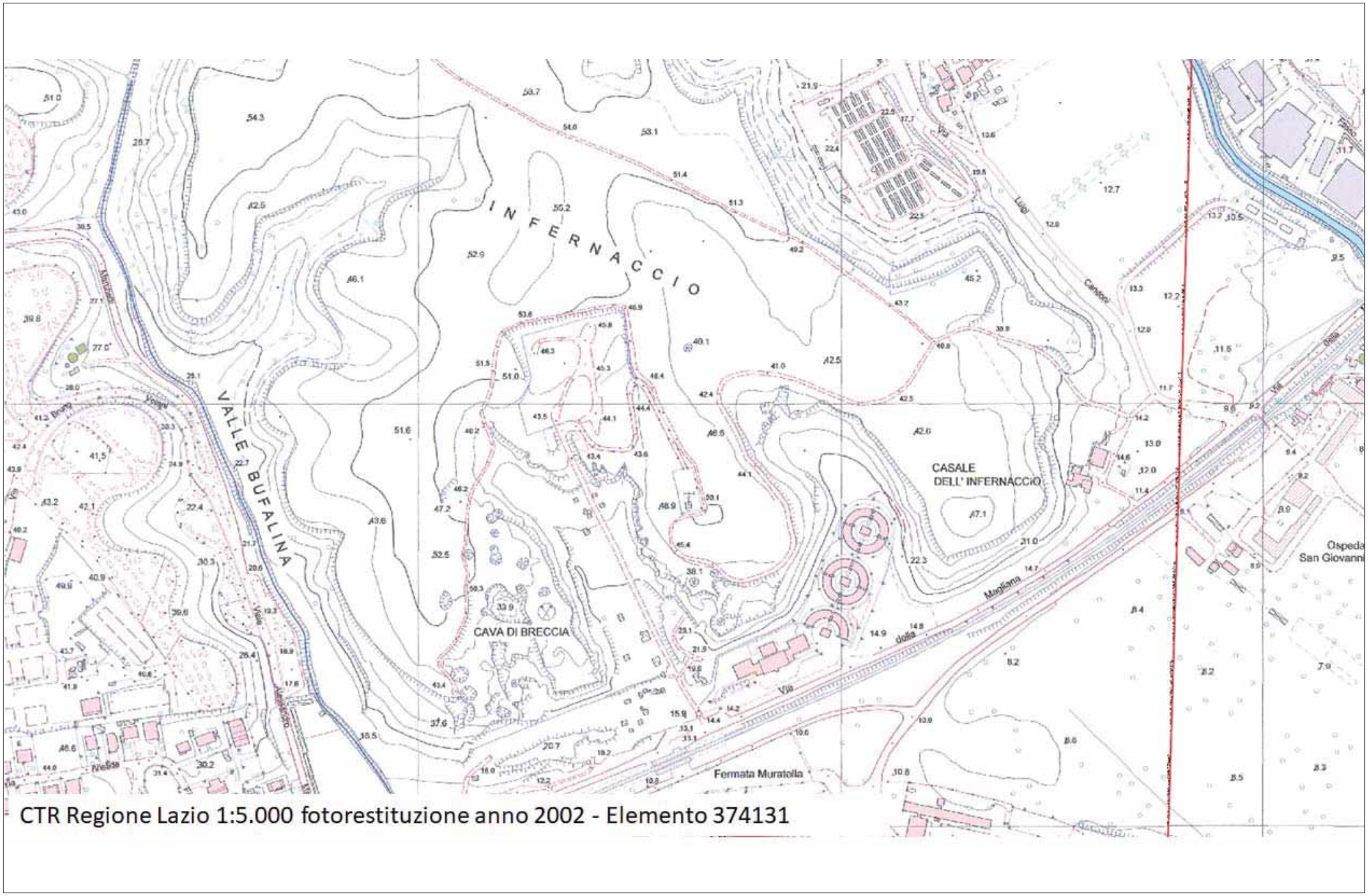


Figura 36 – CTR Regione Lazio in scala 1:5000, elemento 374141. Particolare



Figura 37 – Immagine satellitare da Google Earth dell'area 3, 27 luglio 2007



Figura 38 – Immagine satellitare da Google Earth dell'area 3, 29 aprile 2017

BIBLIOGRAFIA

Archivio di Stato di Roma (secoli XVI-XVIII), *Libri Patentium*, Roma.

Archivio Storico Capitolino (1580-1634), *Libri Patentium*, Roma.

Moltke H. K. B. (1852), *Carta topografica di Roma e contorni.*

De Marchi L. (1894), *Le cave di pozzolana nei dintorni di Roma*. In: "Studio sulle condizioni di sicurezza delle miniere e delle cave in Italia", pubblicazione dell'allora Corpo Reale delle MINIERE.

Funiciello R., Giordano G. (2008), *Carta Geologica del Comune di Roma*.

Istituto Geografico Militare (1873-1894), *Tavolette F149* ISE Maglianella *F150 IV SO Roma*

Istituto Geografico Militare (1908-1924), *Piano Topografico di Roma e suburbio.*

Ministero dell'Agricoltura, Industria e Commercio (1887), *Elenco delle cave e fornaci in esercizio nei dintorni di Roma al 31 dicembre 1887.* Rivista Mineraria.

Verdi C., Giannella G., Rosa C. (2018), *Le cave di pozzolana a Roma e nel territorio nelle fonti letterarie settecentesche*. (In questo volume).

SESSIONE C

TECNICHE E PROCEDURE DI MONITORAGGIO E CONSOLIDAMENTO

Le tecniche per operare in sicurezza in spazi confinati applicate nel progetto di studio e recupero "*Forma Aquae Maxentii*"

Elettra Santucci
Luca Girardo
Stefano Adornato
Susanna Basso

Roma Sotterranea

The techniques to operate safely in confined spaces applied to the project "Forma Aquae Maxentii" for the study and recovery of the hydraulic system of Villa Maxentius

Parole chiave (*key words*): spazio confinato (*Confined space*), ambienti ipogei (*hypogea environment*), sicurezza (*safety*), normativa (*labor law*), Villa di Massenzio (*Villa di Massenzio*)

ABSTRACT

La Sovrintendenza ai Beni Culturali di Roma Capitale ha avviato, in collaborazione con l'Associazione Roma Sotterranea, il progetto *Forma Aquae Maxentii*, per lo studio del sistema idraulico della Villa di Massenzio. Il complesso, localizzato tra il secondo e terzo miglio della via Appia Antica, è costituito da tre edifici principali: il palazzo, il mausoleo dinastico e il circo. Il complesso sorse nel IV secolo d.C. su strutture precedenti risalenti a epoca tardo repubblicana e alla media età imperiale, relative rispettivamente a una villa rustica e ai resti della villa sorta all'interno della vasta proprietà che Erode Attico possedeva nella zona: il Pago Triopio.

Nel 2009 una campagna di scavo, effettuata da Roma Sotterranea sotto la direzione scientifica della Sovrintendenza Capitolina e in collaborazione con l'Università del Colorado, ha interessato l'area del palazzo di Massenzio, all'interno e all'esterno dell'aula Palatina, con l'intento di indagare le strutture idrauliche pertinenti alle diverse fasi di occupazione. Attualmente, le indagini sono state estese all'area del mausoleo dinastico e del relativo portico, al fine di identificare il sistema di smaltimento delle acque meteoriche.

Lo studio di ipogei, che spesso si configurano come spazi confinati, richiede l'utilizzo di tecniche specifiche per l'accesso, la permanenza, il rilievo e lo scavo, al fine di garantire la sicurezza degli operatori applicando la normativa vigente in materia di salute e sicurezza sul lavoro. Tali tecniche sono il risultato di diciassette anni d'esperienza da parte dell'Associazione Roma Sotterranea, che ha affinato sul campo le teorie di base per rendere possibili tali lavorazioni in ambienti confinati. Nel quadro della valutazione dei rischi presenti nelle strutture sotterranee, si procede, come attività propedeutica, a ispezioni supportate da campionamenti dell'aria nonché a video ispezioni tramite robot filoguidato. Si implementano successivamente le predisposizioni antiinfortunistiche volte a garantire la sicurezza nell'accesso e nelle operazioni in sotterranea. A tali misure preventive è necessario associare una pianificazione per la gestione delle emergenze che possa assicurare il soccorso e recupero dell'operatore in caso di infortunio.

Saranno inoltre trattate le specifiche procedure che necessariamente, attesa la particolarità degli ambienti indagati, devono integrare le comuni tecniche di studio, rilievo e scavo.

***

The Sovrintendenza ai Beni Culturali del Comune di Roma has launched the "Form Aquae Maxentii" project in collaboration with the Association Roma Sotterranea for the study of the hydraulic system of Villa Maxentius. The complex, located between the second and third Roman mile of the Appian Way, consists of three main buildings: the palace, the dynasty mausoleum and the circus. The suburban imperial estate was erected in the 4th century AD. on previous structures dating back to the Late Republican and the Middle Imperial period, respectively a rustic Villa and the remains of the residential complex built within the vast property that Herodes Atticus possessed in the area: the Pago Triopio.

In 2009 an excavation campaign was carried out by Roma Sotterranea, under the scientific direction of the Sovrintendenza Capitolina and in collaboration with the University of Colorado, on the area of Maxentius' palace, inside and outside the Palatine hall, with the aim of investigating the hydraulic structures relevant to the different stages of occupation. At present, investigations have been extended to the area of the dynastic mausoleum and its monumental quadri-porticus in order to identify the meteoric water disposal system.

The study of hypogea, which often take the form of confined spaces, necessitates special techniques for access, occupancy, survey and excavation, in order to guarantee the safety of the operators by applying the regulations of the labour legislation. These techniques are the result of seventeen years of experience by the Associazione Roma Sotterranea, where basic theories in the field have been refined allowing them to be applied to confined spaces. As part of the risk assessment in underground structures, inspections supported by air sampling as well as video inspections by wireguided robots, are carried out as a preliminary activity. Accident prevention measures are then implemented to ensure safety when accessing as well as for underground operations. Together with these preventative measures, an emergency management plan is put in place to ensure the rescue and recovery of any operator in the event of an accident. Bearing in mind the specific requirements of such an environment, the specific measures must also be integrated with the common techniques of study, survey and excavation of hypogeal environments.

PREMESSA

Nel 2009 la Sovrintendenza ai Beni Culturali di Roma Capitale ha avviato, in collaborazione con l'Associazione Roma Sotterranea, il progetto "*Forma Aquae Maxentii*", per lo studio del sistema idraulico della Villa di Massenzio.

La campagna di scavo, effettuata da Roma Sotterranea sotto la direzione scientifica della



Figura 1 – Complesso della Villa di Massenzio, vista con inclinazione panoramica (Immagini 2017 Google)

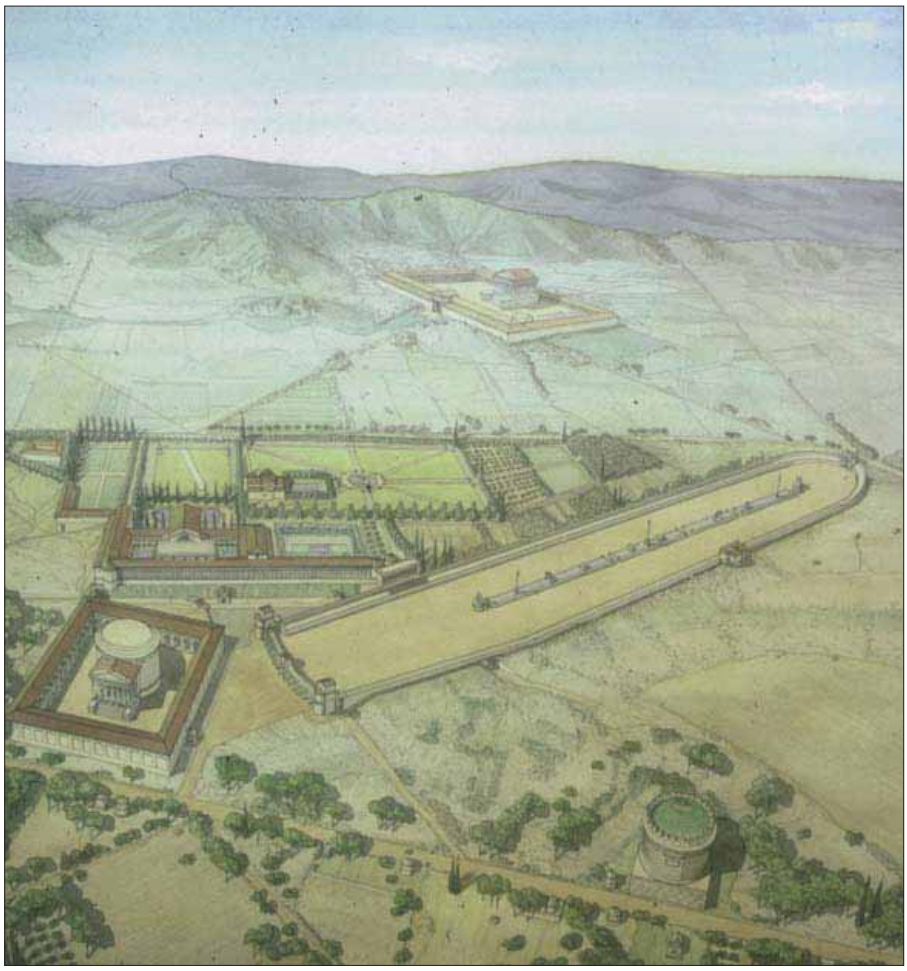


Figura 2 – La Villa di Massenzio secondo la restituzione di J.C. Golvin (PISANI SARTORIO 2008)

Sovrintendenza Capitolina e in collaborazione con l'Università del Colorado, ha interessato l'area del palazzo di Massenzio, all'interno e all'esterno dell'aula Palatina, con l'intento di indagare le strutture idrauliche pertinenti alle diverse fasi di occupazione.

Successivamente le indagini sono state estese all'area del Mausoleo dinastico e del portico, al fine di identificare il sistema di smaltimento delle acque meteoriche.

Lo studio di ipogei, che spesso si configurano come spazi confinati, al fine di garantire la sicurezza degli operatori applicando la normativa vigente in materia di salute e sicurezza sul lavoro, richiede l'utilizzo di tecniche specifiche per l'accesso, la permanenza, il rilievo e lo scavo. Roma Sotterranea, grazie a diciassette anni d'esperienza sul campo, ha affinato tali tecniche permettendo il corretto svolgimento delle lavorazioni in ambienti confinati.

INQUADRIMENTO STORICO ARCHEOLOGICO

Il complesso massenziano è una delle aree archeologiche più suggestive della campagna romana. Si estende tra il II e il III miglio della via Appia Antica, ed è costituito da tre edifici principali – il Palazzo, il Circo ed il Mausoleo dinastico – progettati come un'unità architettonica per la celebrazione dell'imperatore Massenzio, l'avversario di Costantino il Grande nella battaglia di Ponte Milvio del 312 d.C. (*Fig.* 1).

Lo schema del Circo abbinato al palazzo imperiale, già noto in altre residenze tetrarchiche, è qui arricchito dalla presenza di un Mausoleo dinastico, più noto come Tomba di Romolo, che diventa il nucleo principale dell'intero complesso (*Fig.* 2).

I tre edifici sono stati costruiti assecondando e sfruttando la naturale orografia del territorio al fine di evitare grossi lavori di sbancamento e colmature. Il Palazzo venne edificato sui resti delle costruzioni precedenti ed il Circo fu adagiato con andamento ovest-est nell'avvallamento che dalla via Appia Antica risale gradualmente verso l'attuale via Appia Pignatelli (PISANI SARTORIO 2006, DELFINO ROSSI 2013).

I resti delle costruzioni massenziane (*Fig.* 4) si configurano come l'ultima fase della trasformazione di un'originaria villa rustica repubblicana del II sec. a.C., costruita in una posizione scenografica su un'altura caratterizzata da terrazzamenti, rivolta verso i Colli Albani. Dopo una prima fase risalente al primo impero, nel II sec. d.C. la villa subì una radicale trasformazione ad opera di Erode Attico, che la inglobò nel suo "Pago Triopio", una vasta proprietà con caratteri agricolo-religiosi compresa tra le rive dell'Almone, la c.d. Marrana della Caffarella, e la via Appia Anti-



Figura 3 – Esempio delle strutture idrauliche nell'area di palazzo e del mausoleo (CAMARDO, GIRARDO, LORETI 2017)

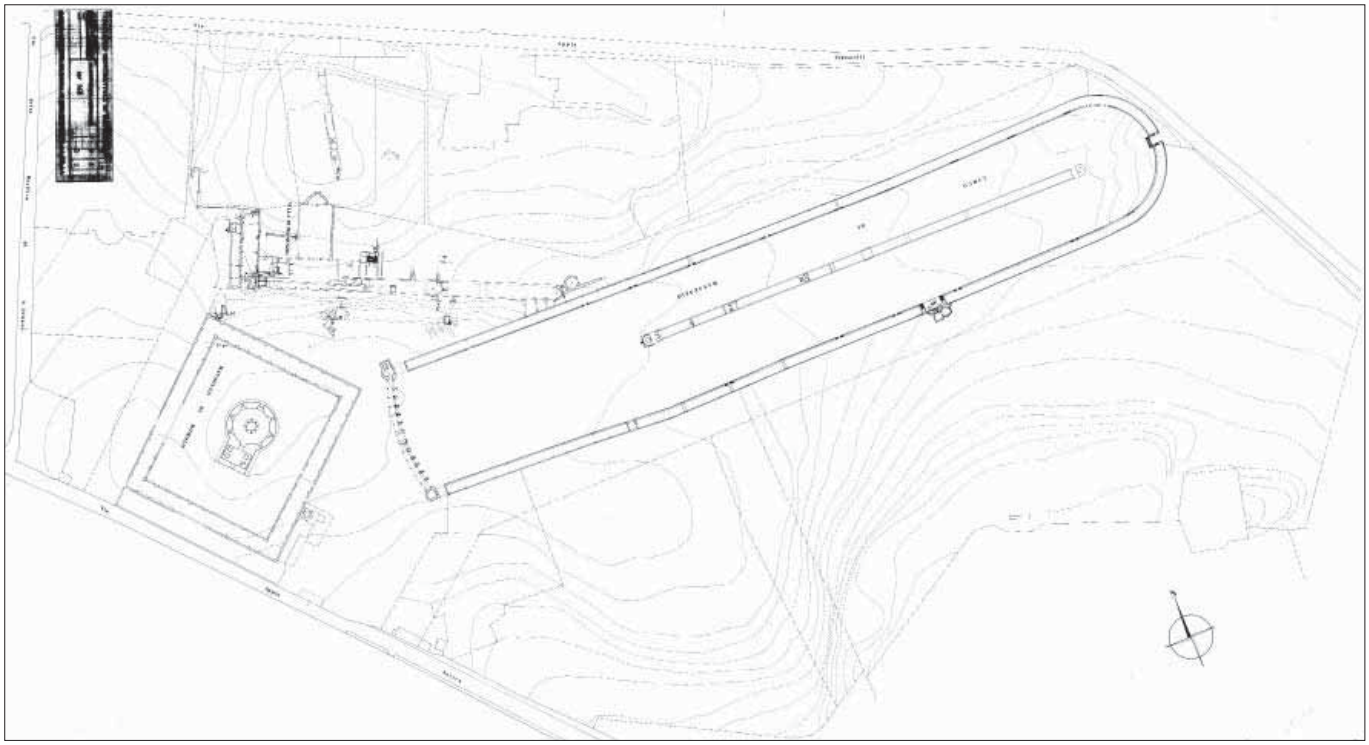


Figura 4 – Il palazzo massenziano del IV sec.: IV fase (rilievo a cura di G. Ioppolo (PISANI SARTORIO 2006)

ca. La fase massenziana è quella attualmente visibile e include, oltre a quelle già citate, anche delle strutture idrauliche, indagate nel progetto "*Forma Aquae Maxentii*" (CAMARDO, GIRARDO, LORETI 2017) (*Fig.* 3).

Nel 2011, su richiesta della Sovrintendenza Capitolina, l'associazione Roma Sotterranea ha avviato una seconda fase finalizzata allo studio dei complessi idraulici del Palazzo.

Le esplorazioni hanno avuto inizio accedendo da un pozzo circolare situato nei pressi dell'Aula Palatina. Le strutture ipogee fino ad oggi indagate sono composte da 5 pozzi e 10 cunicoli, completamente rivestiti di cocciopesto, hanno una lunghezza complessiva di circa 72 m e sono disposte su tre livelli, con un dislivello complessivo di circa 2,80 m. (*Figg.* 5-6). Inizialmente utilizzate come cisterna di accumulo delle acque meteoriche, nell'ultima fase furono connesse a pozzetti con funzione di smaltimento (CAMARDO, GIRARDO, LORETI 2017).

L'attività di studio del sistema idraulico nell'area del Palazzo proseguirà con la prospezione fisica e strumentale, ove possibile, dei cunicoli non ancora raggiungibili a causa degli interri presenti e l'identificazione dell'ipotizzata connessione con il sistema di deflusso degli ambienti termali, situati in prossimità del quadriportico.

In parallelo continuerà lo studio del sistema idraulico nelle altre aree della Villa di Massenzio. Nell'area del Mausoleo di Romolo è in atto un'indagine sui condotti con copertura a cappuccina con funzione di smaltimento delle acque meteoriche, il cui sviluppo planimetrico è caratterizzato da due anelli concentrici. Lo scavo del riempimento dei condotti ha

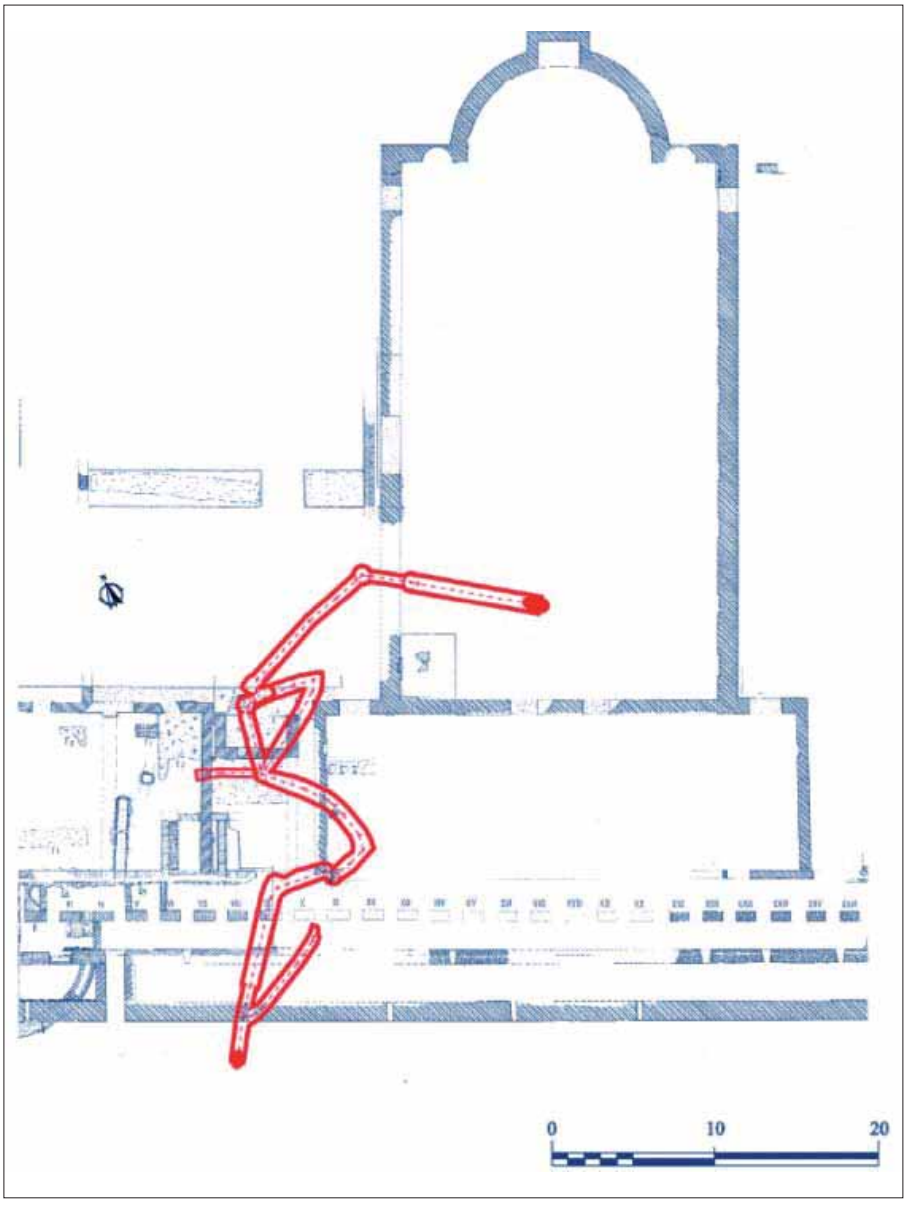


Figura 5 – Pianta dei condotti (rilievo a cura di Elettra Santucci e Elena Silvestro in (CAMARDO, GIRARDO, LORETI 2017) e sovrapposizione con pianta generale di Giovanni Ioppolo (PISANI SARTORIO 2006)

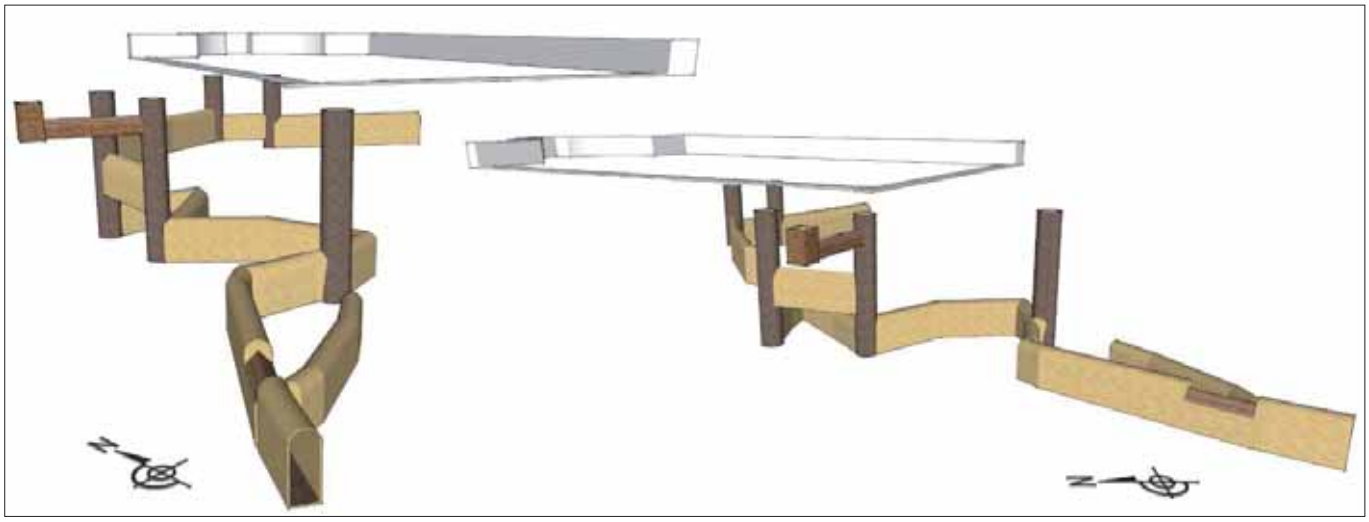


Figura 6 – Modello 3D del sistema idraulico ad oggi studiato da Roma Sotterranea (restituzione a cura di Alessio Lo Conte) (CAMARDO, GIRARDO, LORETI 2017)

come scopo principale il miglioramento del deflusso delle acque piovane, che possono causare, come già avvenuto, l'allagamento dell'interno del Mausoleo (*Fig.* 7).

L'attuale stato di conservazione dei laterizi utilizzati per la costruzione della copertura dei condotti a cappuccina (bipedali) è eccellente. In molti casi, sono ancora chiaramente visibili i bolli di produzione, che rappresentano uno dei pochi elementi datanti rinvenuti, nonché impronte umane e di animali e rimaste impresse sulle lastre di argilla durante il processo di essiccazione. Tali testimonianze, emerse dallo scavo dei condotti anulari che circondano il Mausoleo, sono state preservate dallo strato di fango che obliterava i condotti a cappuccina per circa due terzi della loro altezza e ne impediva l'accesso e l'eventuale spoglio di materiali. In prossimità del Mausoleo sono venuti alla luce numerosi frammenti laterizi, marmorei e di opera cementizia, presumibilmente derivanti dalle lavorazioni degli elementi architettonici e delle decorazioni del monumento e da quelle risultanti dalla loro demolizione.

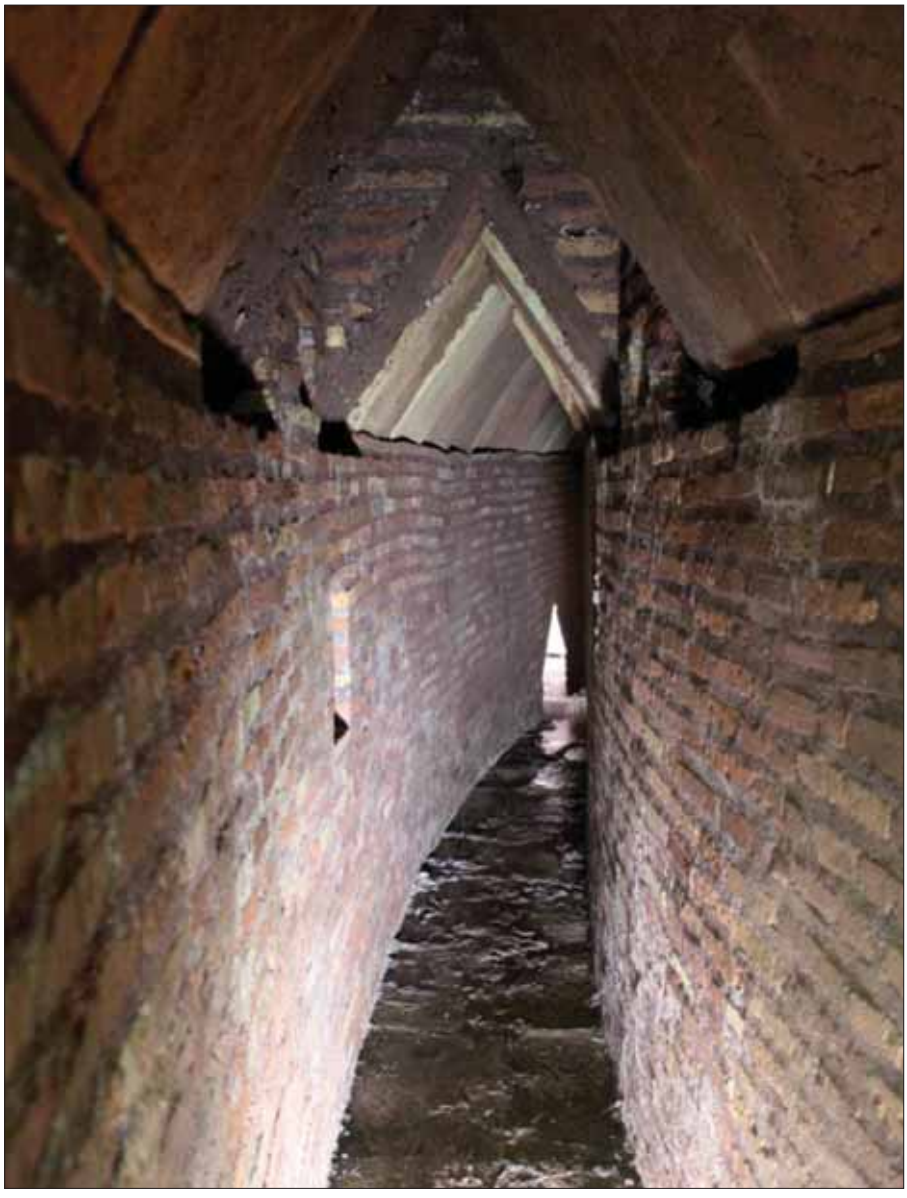


Figura 7 – Esempio di condotto idraulico del sistema di deflusso delle acque del Mausoleo di Romolo

Nell'area del Circo l'attività di studio si concentrerà sul rilievo e sulla documentazione delle due conserve individuate negli anni '60, il loro rapporto con i condotti di smaltimento delle acque adiacenti alla prima e alla seconda *meta* del circo e l'ispezione di un pozzo moderno, situato in prossimità del pulvinare. L'obiettivo è di comprendere il ruolo delle cisterne in relazione al Circo, e come il sistema idraulico dello stesso si rapportasse con il sistema del portico del Mausoleo.

PROCEDURE DI SICUREZZA

Agli inizi degli anni 2000 l'Associazione Roma Sotterranea operava negli ambienti ipogei con le tecniche e l'esperienza acquisita da attività di tipo speleologico; con l'avvento della normativa in materia di sicurezza sul lavoro si è reso necessario aggiornare il *modus operandi* assimilando le attività alle lavorazioni svolte nei cantieri. Ciò ha comportato l'esigenza di formare/qualificare gli operatori volontari dell'associazione poiché equiparati dalla normativa di settore a tutti gli effetti a Lavoratori. In tale quadro, l'Associazione si configura come un'impresa esecutrice. Tutte le figure coinvolte hanno quindi l'obbligo di rispettare le prescrizioni vigenti in materia di salute e sicurezza sul lavoro, riunite in un unico testo normativo, il D.lgs. n. 81/2008 o *Testo unico sulla sicurezza*. Questo prevede la presenza di figure con specifici ruoli legati

alla sicurezza, sia all'interno dell'impresa, che nel cantiere. Tali figure sono: il Presidente, che si configura come il Datore di Lavoro; il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione; il Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza. Le figure responsabili che devono invece essere presenti in cantiere sono: i responsabili delle attività; i preposti per la sicurezza; gli addetti alla gestione delle emergenze, primo soccorso e antincendio. Tutte le figure elencate hanno l'obbligo di frequentare specifici corsi di formazione.

Secondo quanto previsto dalle misure generali di tutela, di cui all'Art. 15 dello stesso decreto, è necessario valutare tutte le situazioni di potenziale pericolo per la salute al fine dell'eliminazione o riduzione dei rischi. A questo scopo è di fondamentale importanza un'accurata informazione preventiva e una formazione specifica delle figure coinvolte nonché la predisposizione di adeguate misure di emergenza da attuare in caso di primo soccorso, di lotta antincendio e di evacuazione dei lavoratori.

accesso al sito, il mantenimento del cantiere in condizioni ottimali, la delimitazione dell'area di intervento, il controllo degli accessi e delle potenziali interferenze e l'identificazione di aree destinate alla movimentazione e allo stoccaggio dei materiali. Altro fondamentale adempimento ai fini della sicurezza riguarda la verifica del funzionamento e del corretto utilizzo di attrezzature e dispositivi impiegati nell'attività, soggette a controlli periodici.

Un aspetto strettamente connesso alle attività svolte dall'Associazione Roma Sotterranea è quello di operare in ambienti ipogei, alcuni dei quali si configurano per normativa come spazi confinati. Questo specifico settore implica l'adempimento di ulteriori prescrizioni ed obblighi sia da parte del Datore di Lavoro che dei Lavoratori (D.P.R. 177/2011).

Per ambiente confinato si intende uno spazio circoscritto caratterizzato da vie d'accesso e di uscita di dimensioni ridotte e con ventilazione limitata, un ambiente non progettato per svolgervi attività lavorative continuative, difficile da abbandonare rapidamente in caso di emergenza e che presenti difficoltà di manovra in caso di soccorso o recupero di una persona infortunata.

cessario predisporre una specifica procedura di emergenza, da mettere in atto in caso di soccorso degli operatori vittime di infortunio, e per il coordinamento con il sistema di emergenza del Servizio Sanitario Nazionale e dei Vigili del Fuoco.

In particolare, i *dispositivi di protezione individuale* (costituiti da tuta, casco, guanti, luci, mascherine, occhiali, scarpe antinfortunistiche, imbragatura, ecc.) hanno lo scopo di proteggere il Lavoratore e devono essere indossati per l'intera durata dell'attività, mentre i *dispositivi anticaduta e recupero* (treppiedi, verricello, cavo retrattile, ecc.) hanno lo scopo di proteggere gli operatori durante le operazioni di accesso permettendo una discesa controllata e possibilità di recupero. Gli operatori hanno l'obbligo di sottoporsi a programmi di formazione/aggiornamento sul loro utilizzo, averne cura e, segnalare qualsiasi malfunzionamento e verificare che siano correttamente utilizzati da tutto il personale presente in cantiere. Per l'emergenza devono essere inoltre sempre disponibili attrezzature



Figura 8 – Esempio di allestimento di cantiere temporaneo con posizionamento di alcuni dispositivi di protezione collettiva

Le attività che Roma Sotterranea svolge ricadono in quelle elencate negli Allegati X e XI del *Testo unico sulla sicurezza* e rientrano nell'ambito dei cantieri temporanei e mobili in attuazione delle prescrizioni e degli adempimenti previsti dal Titolo IV dello stesso decreto.

Le misure generali di tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori specifiche per i cantieri temporanei (Art. 95) prevedono un'attenta scelta dell'ubicazione dell'area di intervento, tenendo conto delle condizioni di

Lavorare all'interno di questi ambienti prevede l'attuazione di specifiche procedure di sicurezza come l'impiego di *dispositivi di protezione individuale* (DPI) e *collettiva* (DPC), di strumentazioni/attrezzature idonee alle attività in ambienti confinati, come i dispositivi anticaduta, e il relativo addestramento all'uso. Oltre a prevedere le operazioni finalizzate alla riduzione dei rischi, sarà necessario predisporre una specifica procedura di emergenza, da mettere in atto in caso di soccorso degli operatori vittime di infortunio, e per il coordinamento con il sistema di emergenza del Servizio Sanitario Nazionale e dei Vigili del Fuoco.

quali estintori, cassette di medicazione e sistemi di comunicazione.

I volontari dell'Associazione frequentano corsi di formazione, di addestramento e *retraining* in relazione alle peculiari richieste della committenza. In particolare, per poter partecipare alle attività, è condizione necessaria frequentare uno specifico corso di formazione per "*ambienti confinati non industriali*", nel quale sono previste prove pratiche appositamente formulate per le specifiche attività svolte da Roma Sotterranea. Prima di ogni attività, i



Figura 9 – Videoispezione preventiva per la valutazione del rischio con robot filoguidato

partecipanti devono essere informati sulle caratteristiche del luogo, sui rischi presenti, la probabilità di accadimento e la gravità dei danni che tali rischi possono causare.

SISTEMI E PROCEDURE PER OPERARE IN SICUREZZA

I criteri di sicurezza indicati dalla normativa, migliorati di volta in volta e adattati ad ogni singolo caso in base alle specificità dei luoghi, hanno permesso di standardizzare le procedure di prevenzione rischi e di gestione delle emergenze. L'area archeologica della Villa di Massenzio rappresenta un concreto esempio relativo all'applicazione di tali procedure.

Una meticolosa pianificazione delle misure da adottare in fase di lavoro e in caso di emergenza è indispensabile per la buona riuscita dell'attività. L'elaborazione di una "procedura di sicurezza" costituisce una fase importante per la riduzione dei rischi nell'esecuzione dei lavori; tale procedura dovrà necessariamente tenere in considerazione alcuni aspetti fondamentali.

Al fine di rendere l'area di intervento segnalata e ben riconoscibile, l'allestimento del cantiere temporaneo dovrà prevedere una recinzione tramite il posizionamento di transenne mobili o fisse ovvero paletti con bandella bianco-rossa nonché l'apposizione di apposita cartellonistica di sicurezza che evidenzi le prescrizioni da osservare nell'area di cantiere e che vieti l'accesso al personale estraneo all'attività. Dopo aver transennato l'area si provvederà a posizionare i citati *dispositivi di protezione collettiva* (*Fig*. 8).

In determinate situazioni e prima di effettuare l'accesso quali ambienti sconosciuti, per effettuare una corretta valutazione di rischio, è consigliabile videoispezionare preventivamente il sito. Roma Sotterranea ha progettato un robot filoguidato, munito di quattro ruote motrici indipendenti, luci frontali e telecamere a colori con il quale ottenere filmati digitali in tempo reale guidando l'esplorazione dall'esterno e visualizzando l'ambiente esplorato in tempo reale tramite *laptop* (*Fig*. 9).

Sarà inoltre necessario, prima dell'accesso nell'ipogeo effettuare l'analisi dell'atmosfera interna con un analizzatore multigas che permetta di verificare la percentuale di ossigeno, di anidride carbonica e l'eventuale presenza di gas nocivi. Questo strumento dovrà essere mantenuto attivo all'interno dell'ipogeo per tutto il tempo di permanenza degli operatori. Possono infatti verificarsi condizioni quali la carenza di ossigeno dovuta a consumo (per la respirazione stessa degli operatori o per la presenza di vegetazione), per processi di ossidazione (in cisterne/tubazioni metalliche arrugginite), per l'aumento della concentrazione di altri gas (metano, anidride carbonica ecc.) o per decomposizione batterica (presenza di idrogeno solforato). Una corretta ventilazione è fondamentale per garantire la qualità dell'aria e per evitare l'accumulo di atmosfere potenzialmente dannose, o il pericolo di sottossigenazione. Ventilare gli ambienti permette inoltre di controllare temperatura, umidità, particolato e odori, aumentando il comfort del lavoratore. Dove la ventilazione naturale è scarsa o assente si dovrà ricorrere all'uso di macchinari per la ventilazione forzata.

In base alle caratteristiche del sito si dovranno predisporre sistemi sicuri di accesso/uscita. Solitamente l'accesso in spazi confinati avviene dall'alto, utilizzando sistemi di discesa quali treppiede, gancio di sicurezza, verricello di recupero e imbrago da cantiere. È necessario verificare che i punti di accesso abbiano dimensioni minime tali da permettere il transito agli operatori muniti di attrezzatura e il recupero di un operatore infortunato.

Al fine di attivare le procedure di emergenza/soccorso, all'esterno dello spazio confinato dovrà essere sempre presente almeno un operatore, che osservi e comunichi con gli operatori all'interno. Nel caso in cui non vi sia contatto visivo diretto con gli operatori in esterna, andranno posizionati altri operatori in posizione intermedia.

Una continua comunicazione tra i lavoratori impegnati nell'ambiente confinato e quelli di supporto all'esterno è fondamentale. Sarà assicurata da contatto vocale diretto quando possibile, o tramite apparecchiature elettriche/elettroniche come citofono a filo o apparecchiature ricetrasmittenti appositamente progettate e dotate di un cavo-antenna posizionato nell'ipogeo.

EMERGENZA E PRIMO SOCCORSO

Con il termine "Emergenza" è definita una "situazione anomala rispetto alle normali condizioni lavorative che può determinare incidenti o infortuni, che espongono i lavoratori a rischi gravi e immediati".

Senza un'adeguata programmazione non è possibile gestire l'emergenza. Risulta essenziale pertanto la predisposizione di un apposito piano, che preveda un sistema di attivazione di allarme e di immediato soccorso.

Un esempio delle procedure d'emergenza da adottare in caso d'incidente può essere schematizzato in funzione dell'urgenza dell'intervento:

In caso di malore/incidente senza immediato pericolo di vita:

- i lavoratori all'interno dell'ipogeo danno l'allarme, comunicando con gli operatori esterni;
- il preposto alla sicurezza, all'esterno dell'ipogeo, gestisce i soccorsi per il recupero dell'infortunato;
- un operatore chiama il 112, richiedendo il pronto intervento della squadra sanitaria o Vigili del Fuoco;
- l'addetto alle operazioni di primo soccorso assiste l'infortunato stabilizzandolo in attesa dei soccorsi esterni.

In caso di soccorso improcrastinabile dato dalla presenza di gas nocivi o assenza di ossigeno (casi di asfissia, avvelenamento o sommersione) gli operatori sono addestrati a prestare immediato soccorso:

- il preposto alla sicurezza fa chiamare il 112 e contemporaneamente allerta la squadra di emergenza.

Questa è formata da operatori appositamente addestrati alle procedure di evacuazione rapida, da un ambiente confinato, con situazione di pericolo evolutiva. Gli operatori sono in grado di effettuare operazioni di primo soccorso in spazi confinati e a praticare rianimazione cardiopolmonare. Nel caso di irrespirabilità dell'aria, gli operatori della squadra di emergenza utilizzeranno dispositivi idonei quali autorespiratori e maschere antigas, che devono essere necessariamente sempre presenti durante le attività e situati in prossimità dell'area di cantiere (*Fig*. 10).

LAVORAZIONI

Nel quadro delle lavorazioni effettuate all'interno degli ambienti ipogei possiamo riconoscere diverse attività quali ispezione, rilievo, scavo stratigrafico, documentazione video-fotografica e trattamento del reperto archeologico.

Per quanto concerne le ispezioni, frequentemente gli operatori si trovano a operare in ambienti difficili da esplorare poiché parzialmente interrati, con possibilità di presenza d'acqua e, in alcuni casi, con potenziale rischio batteriologico. Tali caratteristiche sono spesso riscontrabili contemporaneamente.

L'attività di documentazione video-fotografica, utilizzabile per scopi scientifici, divulgativi e didattici, rappresenta uno strumento fondamentale per la successiva fruizione del sito ed è svolta anche in fase di ispezione preventiva. Dovendo operare in siti con difficoltà di accesso, in tale attività risulta fondamentale poter disporre di apparecchiature video controllabili da remoto.

Lo strumento principale della ricerca archeologica è lo scavo stratigrafico, con il quale si procede alla rimozione di singole unità che documentano le attività antropiche o naturali che si presentano in un preciso ordine cronologico e che descrivono in modo puntuale la storia dell'utilizzo del luogo. Tale metodologia viene applicata anche all'interno degli spazi confinati, nonostante le difficoltà di progressione.



Figura 10 – Operatore della squadra di emergenza equipaggiato con autorespiratore durante esercitazione di soccorso in ambiente confinato

Il rilievo prevede l'impiego di strumentazioni caratterizzate da un diverso grado di precisione, quali fettuccia metrica, distanziometri ottici, strumenti laser (livella, stazione totale, disto 3D o laser scanner) (*Fig.* 11).

Le informazioni così raccolte, inizialmente inserite in schizzi e disegni effettuati sul posto, in seguito sono restituite con l'ausilio di programmi di tipo vettoriale (AutoCAD) per la realizzazione di elaborati grafici da consegnare alla committenza.



Figura 11 – Attività di rilievo con Leica Disto 3D dei condotti idraulici del Mausoleo

CONCLUSIONI

L'accesso ad ambienti ipogei da parte di operatori risulta essere ancora il metodo più efficace per il loro studio attraverso prospezioni fisiche, strumentali, rilievo topografico e scavo stratigrafico, dove esso sia necessario.

Configurandosi tali ambienti come spazi confinati, non si può prescindere dall'applicazione delle misure necessarie per permettere ai volontari di operare ad un livello di rischio accettabile, contestualmente a un'attenta formazione nell'utilizzo di tutti i presidi di sicurezza e nelle procedure d'emergenza.

Grazie all'esperienza acquisita dall'Associazione Roma Sotterranea, tali misure sono inquadrate in un sistema di gestione organico e standardizzato finalizzato a garantire il raggiungimento degli obiettivi di salute e sicurezza sul lavoro tenendo conto del crescente "grado" di impegno e allo stesso tempo rispondendo alle necessità contingenti. Per poter raggiungere gli obiettivi prefissati è necessario applicare una sequenza ciclica di fasi di pianificazione, attuazione, monitoraggio e riesame delle procedure di lavoro per mezzo di un processo dinamico.

Lo schema applicato viene a configurarsi come un vero e proprio Sistema di Gestione della Sicurezza sul Lavoro (SGSL) affinato e configurato per l'utilizzo da parte dell'Associazione di volontariato specializzata nello studio di ambienti ipogei.

BIBLIOGRAFIA

CAMARDO C. A., GIRARDO L., LORETI E.M. (2017) *Forma Aquae Maxentii: considerazioni sulla trasformazione del sistema idraulico nell'area del Palazzo di Massenzio sulla via Appia Antica dalla prima fase tardo repubblicana all'ultima fase imperiale del complesso massenziano,* in *I sistemi di smaltimento delle acque nel mondo antico*, Aquileia

CONLIN D.A., HAECKL A.E., PONTI G., GREGG C.,VIRGILI P. (2006/2007) *The Villa of Maxentius on the Via Appia: Report on the 2005 Excavations,* in *Memoirs of the American Academy in Rome,* Vol. 51/52 pp. 347-370, Roma

Delfino A. Rossi M. (2013) *Villa di Massenzio Relazione preliminare dello scavo effettuato presso il tratto nord-occidentale dell'ambulacro di collegamento tra l'Aula Palatina e il Pulvinare,* in *Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma, Vol. CXIV pp. 333-345, Roma*

Paolini A., Picari F. (2014) *L'antico sistema delle acque nella Valle della Caffarella*, in *Landscape Archeology Conference Proceedings 2014*, Amsterdam

PISANI SARTORIO G. (2006), *Maxentii praedium*, in *Lexicon Topographicum Urbis Romae* – Suburbium, Vol. IV, pp. 49-59, a cura di A. La Regina, Roma

PISANI Sartorio G. (2008) *Le cirque de Maxence et les cirques de l'Italie antique,* in *Le cirque romain et son image,* pp.47-71, a cura di J. Nelis-clement e J. Roddaz, Bordeaux

Sviluppi nelle tecniche e tecnologie di indagine e monitoraggio delle cavità in venti anni di applicazione nel laboratorio naturale dell'Orvieto ipogea

Developments in surveying and monitoring techniques and technologies of the cavities in twenty years of application in the natural laboratory of Orvieto ipogea

Endro Martini
Alta Scuola
E-mail: endromartini@gmail.com

Claudio Soccodato
Alta Scuola
E-mail: claudio.soccodato@iol.it

Filippo M. Soccodato
I.A.T. Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio Srl
E-mail: f.soccodato@iating.it;

Angelo Celano
Leica Geosystems SpA
E-mail: angelo.celano@leica-geosystems.com

Michele Curuni
Leica Geosystems SpA
E-mail: michele.curuni@leica-geosystems.com

Valentina Albano
Leica Geosystems SpA
E-mail: valentina.albano@leica-geosystems.com

Parole chiave (*key words*): monitoraggio (*monitoring*), indagini (*geotechnical investigation*), rilievi geodetici (*geodetic survey*), laser scanner (*laser scanner*)

1. INQUADRAMENTO

La storia della città di Orvieto risale, come è noto, al periodo etrusco e ne sono testimonianza, oltre che i numerosi reperti archeologici, la presenza di necropoli lungo le pendici Nord e Sud. Da tale epoca e continuando nel periodo medievale fino a giorni nostri, sono state effettuate nel sottosuolo della Rupe numerose escavazioni alcune delle quali utilizzate sia come cisterne o depositi, che come cave di materiale, a volte riprendendo ed ingrandendo le esistenti ed a volte realizzandone di nuove per soddisfare le nuove esigenze della popolazione. Come conseguenza, si ha, allo stato attuale, la presenza di una estesa rete di cavità e cunicoli sotterranei che tagliano in varie direzioni il masso tufaceo su cui sorge la città.

Tali cavità, presenti sia sulle pareti che sul pianoro ed al piede della rupe, possono provocare cedimenti del piano stradale soprattutto se ubicate a profondità non di sicurezza, sotto vie o piazze interessate da intenso traffico veicolare o essere possibili concause di pericolo per i fabbricati su di essi insistenti. Per tale motivo, durante i lavori di consolidamento del colle, si è ritenuto opportuno predisporre un censimento delle cavità conosciute ed eseguire un loro rilievo plano altimetrico e tematico allo scopo di acquisire il maggior

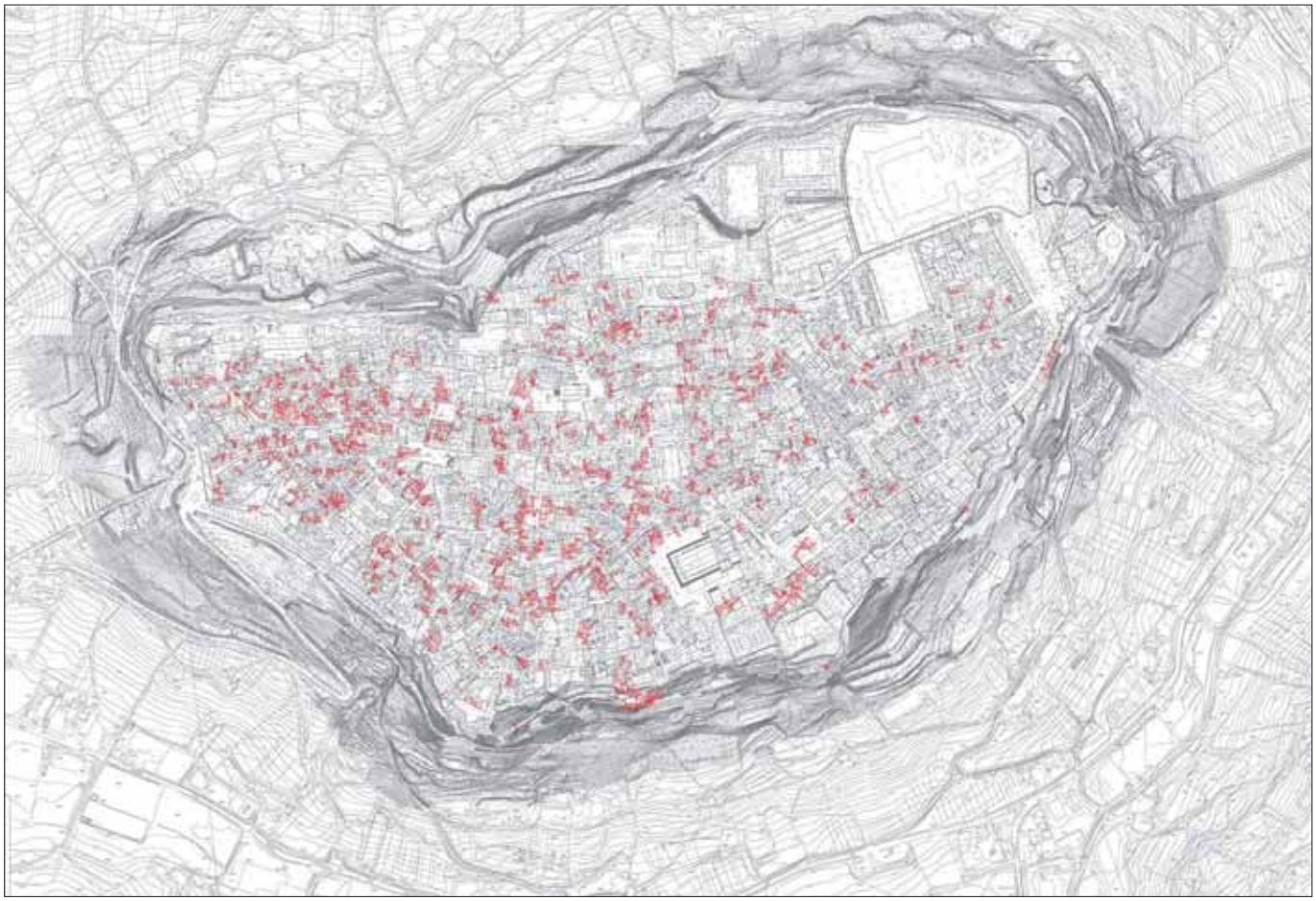


Figura 1 – Planimetria con indicazione delle cavità di Orvieto

numero di informazioni possibili coinvolgendo diverse professionalità, come topografi, speleologi, ingegneri, geologi ed archeologi. Una prima conoscenza si ebbe con il lavoro condotto in occasione della legge 230/78 e successivamente con la redazione del progetto di massima del 1987-88; in tale occasione il Gruppo Speleologico Orvietano, con finanziamento regionale, censì un certo numero di grotte, in totale n.638, restituendone una localizzazione di massima e fornendo preliminari indicazioni sullo stato di conservazione.

Con l'assegnazione del contratto di Concessione per il Consolidamento della Rupe di Orvieto (1989) fu progettato e realizzato un rilievo specifico e sistematico delle cavità sul pianoro della rupe e sul ciglio della stessa (1991-1993) , restituendo la posizione georeferenziata di ciascuna cavità e la sua posizione in rapporto agli edifici soprastanti ed individuati sulla carta catastale di Orvieto (*Fig.* 1).

In considerazione del notevole numero di cavità presenti il rilievo fu condotto secondo priorità dettate dallo stato di conservazione delle stesse e dalla loro estensione; per ciascuna cavità, oltre alla geometria, furono rilevati gli elementi più caratterizzanti, quali la natura dei terreni, la presenza di fratture, l'eventuale percolazione di acque, gli interventi antropici, eventuali prosecuzioni, etc. Per alcune furono anche messe in evidenza particolari emergenze di carattere storico-archeologico.

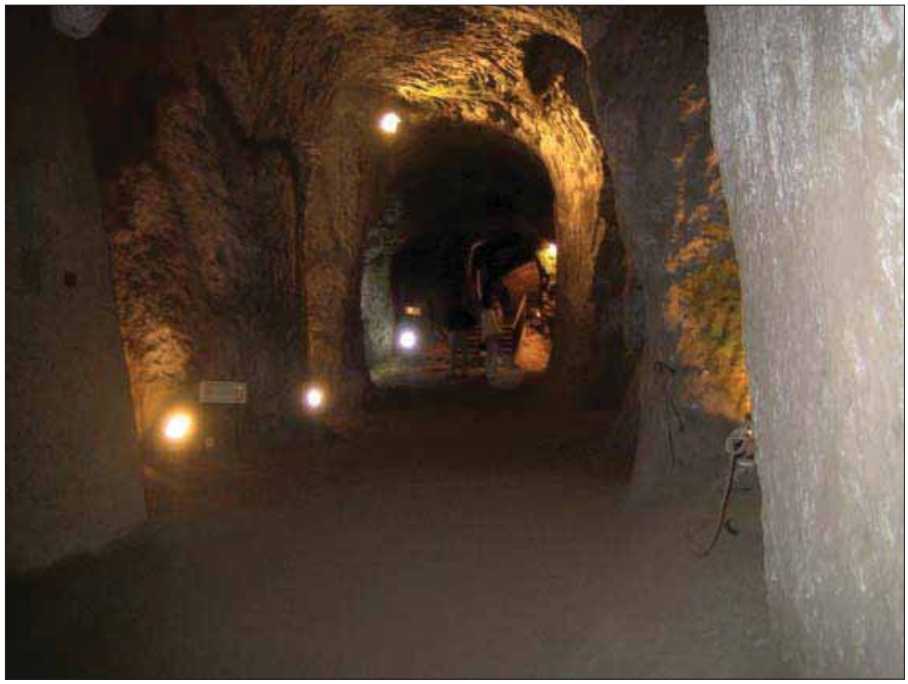


Figura 2 – La grotta delle Macine dopo il consolidamento

2. PRINCIPALI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO REALIZZATI

Sulla base di quanto emerso, sia dai rilievi plano altimetrici (in riferimento alla posizione della cavità rispetto ad aree private o pubbliche), sia dall'esame di dettaglio delle situazioni riscontrate (fratture, crolli, strati deteriorati, etc.), furono redatti vari progetti sia di controllo e monitoraggio che di consolidamento, dando la priorità alle cavità poste nella fascia perimetrale della Rupe, in quanto connesse all'equilibrio geostatico della stessa e/o ricadenti sotto area pubblica.

Nella fascia perimetrale furono eseguiti quattro interventi:

- n.16 grotte nel lato Sud, posizionate fra lo sperone di San Bernardino, l'Ospedale ed il Convento di San Paolo;
- n.4 grotte sottostanti i Giardini di San Paolo;
- n.6 grotte posizionate sotto l'Ospedale, sotto il Convento di San Paolo al piede della rupe, sotto Piazza Malcorini e a Nord nel settore della Gonfaloniera;
- n.17 cavità sul pianoro che riportavano uno stato di potenziale pericolo e pertanto prioritaria necessità.

Le metodologie di intervento furono di due tipi: le grotte che presentavano rilevanti emergenze di carattere storico-archeologico sono state consolidate con l'obiettivo del mantenimento della cavità (*Fig.* 2), le altre cavità sono state colmate e chiuse.

Altro importante intervento eseguito sulla rupe si inserisce nel Piano di Mobilità Alternativa, (promosso dalla Regione negli anni 80/90) la realizzazione di un percorso meccanizzato costituito da una galleria, della lunghezza di circa 180 metri, che collega il parcheggio Campo della Fiera con Piazza Ranieri. La galleria si sviluppa all'interno della rupe in gallerie e cunicoli naturali in gran parte preesistenti, adeguati alle esigenze di percorribilità pubblica (*Fig.* 3).

3. INDAGINI E MONITORAGGIO

Le attività di indagine e monitoraggio sono iniziate durante la redazione dei progetti di consolidamento e sono state realizzate durante tutto lo svolgimento dei lavori di



Figura 3 – Antichi cunicoli consolidati e riadattati a percorso meccanizzato

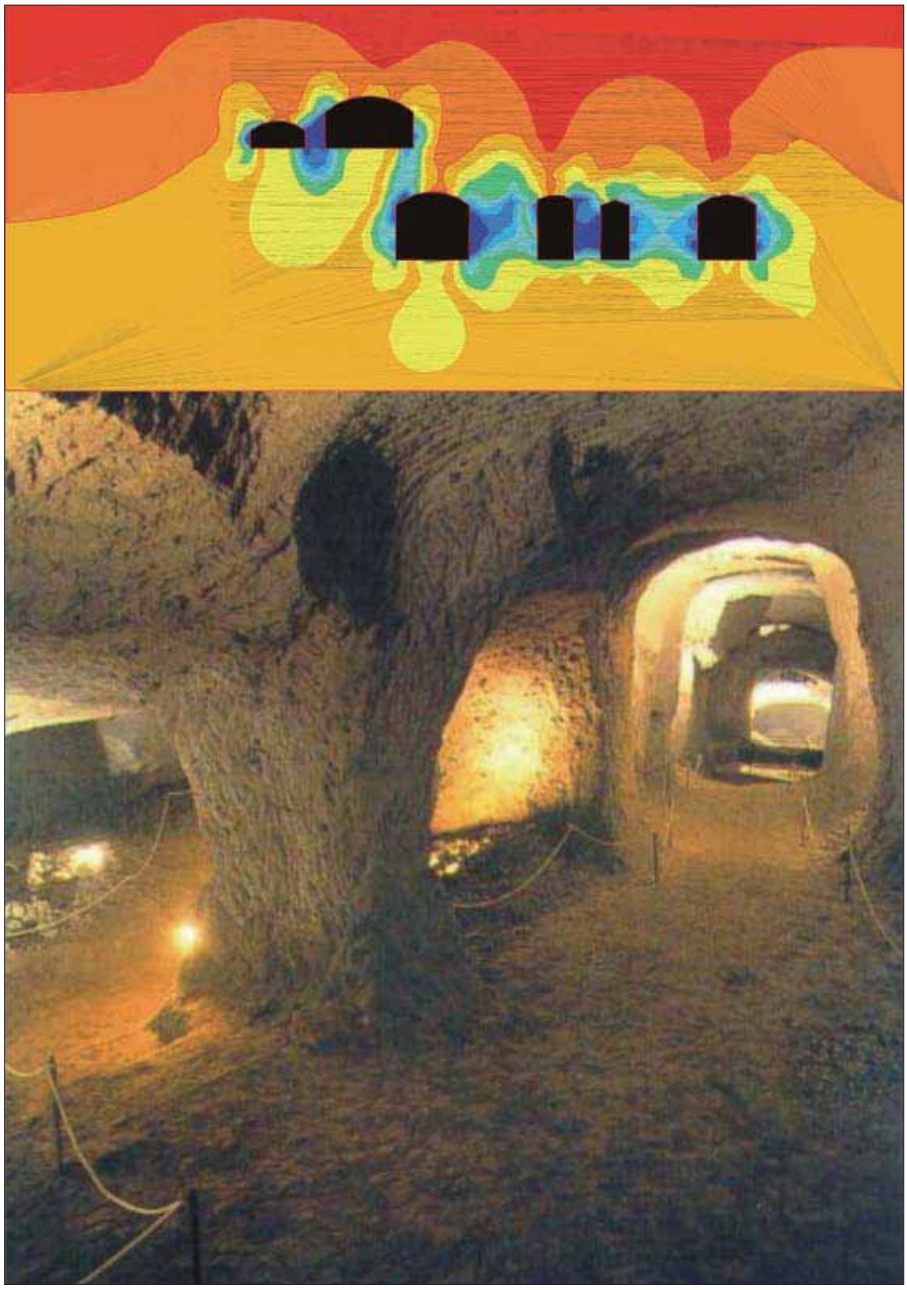


Figura 4 – Restituzione di indagini geofisiche nella Grotta delle Macine

consolidamento, come supporto alla verifica e implementazione degli interventi. Al termine dei lavori ad Orvieto è stato istituito un Osservatorio Permanente per il monitoraggio e la manutenzione delle opere e del territorio. L'Osservatorio (1995-1997), negli anni, ha continuato ad eseguire un monitoraggio costante del colle, implementando i sistemi con il progresso tecnologico della strumentazione e lo sviluppo delle nuove tecniche.

Le informazioni acquisite dalle indagini geognostiche e dalla strumentazione di monitoraggio continuano ad implementare una banca dati, ad oggi, di oltre 20 milioni di dati.

3.1 Lo studio delle cavità

Le indagini sulle cavità sono state realizzate con tecniche e tecnologie geofisiche e georadar (*Fig.* 4), affiancate da rilievi topografici e geodetici. Nel corso degli anni, Orvieto è stato quindi un laboratorio naturale per l'utilizzo delle nuove tecnologie sia nell'ambito delle indagini che del monitoraggio. Ad esempio per i rilievi geodetici dai primi interventi eseguiti con Teodoliti, si è passati all'utilizzo di Stazioni Totali Robotizzate e successivamente ai Laser Scanner 3d implementati con termocamere (*Fig.* 5).

Le indagini sono state integrate con: prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche (velocità delle onde elastiche, resistenza in condizioni di trazione indiretta e di compressione uniassiale e triassiale, deformabilità) dei materiali; verifiche del danneggiamento roccia all'intorno dei vuoti mediante misure geofisiche di superficie (rifrazione, SASW, trasmissione) in parete o sul piano di calpestio (vuoti sovrapposti); determinazione dello stato di sforzo mediante misure di martinetto piatto nei pilastri o nei piedritti delle camere/gallerie.

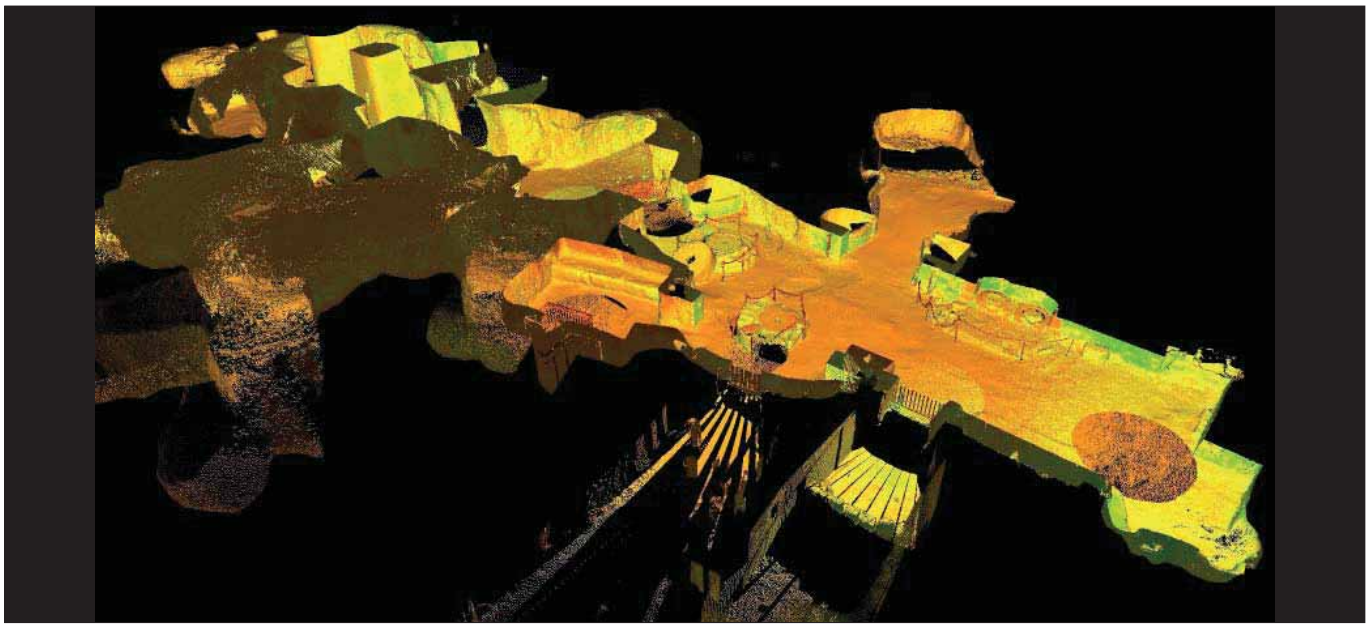


Figura 5 – Restituzione di rilievi laser scanner della Grotta delle Macine - Nuvola di Punti

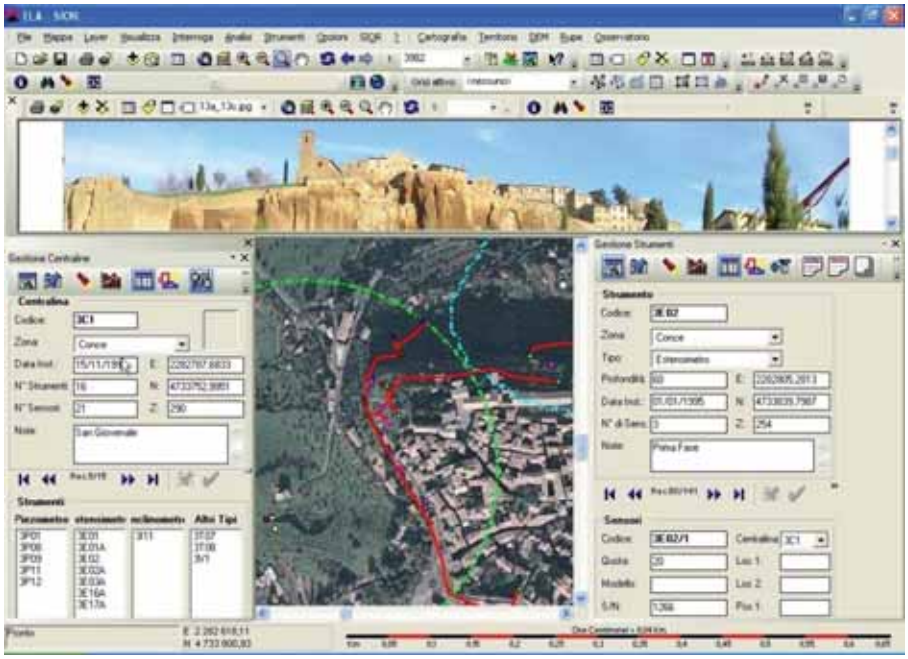


Figura 6 – Esempi di tools del SIOR Sistema Informativo dell'Osservatorio Rupe. Interfaccia di gestione del sistema di monitoraggio in logica GIS

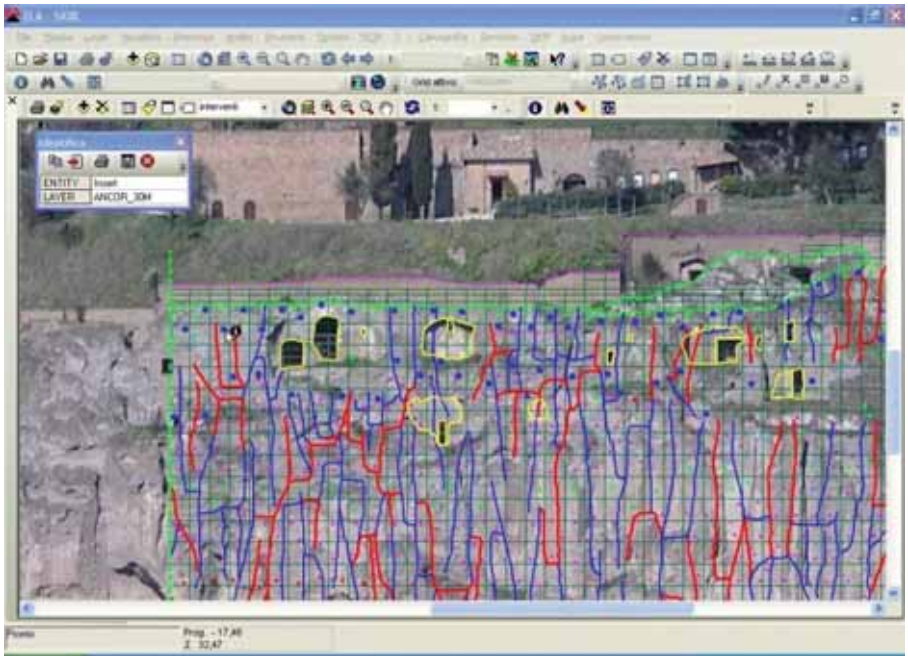


Figura 7 – Esempi di tools del SIOR Sistema Informativo dell'Osservatorio Rupe. Visualizzazione del catalogo georeferenziato degli Interventi (ancoraggi e chiodature, sarcitura lesioni)



Figura 8 – Strumenti e metodi di rilievo

I monitoraggi di contatto sono stati implementati con una vasta tipologia di sensoristica (dalle celle di carico, ai fessurimetri, agli strain gauges, etc.) utile allo studio e controllo dello stato tensodeformativo delle cavità e delle opere di consolidamento.

Tutte le informazioni acquisite nelle campagne di indagini geofisiche, goegnostiche e geodetiche, nei rilievi e nelle attività di monitoraggio sono state informatizzate e archiviate in un Sistema Informativo Territoriale (GIS) customizzato, strumento stesso di gestione del sistema di monitoraggio attivo (*Figg.* 6 e 7).

Con i risultati delle indagini e dei monitoraggi si è proceduto all'esecuzione di analisi a ritroso (su sezioni tipo) della stabilità dei dissesti osservati, sia con semplici modelli analitici, sia con più complessi modelli numerici tenso-deformativi. In tal modo è stato possibile analizzare l'influenza dei diversi fattori geometrici, geotecnici e dei carichi applicati sulla stabilità dei vuoti sotterranei, con particolare riferimento alle forme di dissesto o di instabilità incipiente osservate.

3.2 Sperimentazione di applicazioni integrate per il rilievo ed il monitoraggio

Le attività di sperimentazione iniziano nel 2010 per lo sviluppo di applicazioni di rilievi Laser Scanner spinti ad elevata precisione ai fini del monitoraggio geotecnico-strutturale. Nella sperimentazione sono state effettuate diverse campagne di rilievi nell'arco di circa sette anni (2010- 2017), acquisendo i dati di un tratto della parete tufacea della rupe (per un estensione lineare di circa 500 metri, ed un'altezza media di 50 metri), e delle cavità della Grotta delle Macine.

La sperimentazione, tesa alla verifica di eventuali deformazioni dell'ammasso roccioso, ha anche permesso il confronto delle informazioni 3d acquisite nelle distinte attività, con particolare attenzione alle differenti caratteristiche del dato reso disponibile in tempi diversi dalle diverse tecnologie utilizzate.

3.2.1 La tecnologia

La strumentazione impiegata fa parte della linea di Strumenti Laser Scanner Leica Geosystems (TLS) specifici per la misura di nuvole di punti 3D in ambito di soluzioni per la geomatica. Tale tecnologia è stata implementata nel tempo grazie a importanti investimenti nella ricerca e sviluppo sin dagli albori della tecnologia, concepita alla fine degli anni '90. Con la comparsa dei primi laser scanner si è cominciato a parlare di Rilievo tridimensionale ad Alta Definizione (HDS - High Definition Survey) in riferimento alla densità del dato acquisito, la nuvola di punti, capace di descrivere superfici geometricamente complesse. Negli ultimi venti anni l'evoluzione del-

la tecnologia ha visto lo sviluppo dei sensori divenuti via via più veloci, resistenti a condizioni ambientali estreme, maneggevoli e trasportabili, capaci di collezionare dati sempre più accurati e dettagliati. Tale cambiamento ha reso possibile l'utilizzo della tecnologia in campi di applicazione per i quali non era stata inizialmente concepita, come ad esempio il rilievo di ambienti ipogei impervi e difficili da percorrere o il monitoraggio di spostamenti di intere superfici. I sistemi Laser Leica hanno da sempre rispettato la concezione topografica ereditata dal'esperienza sulle stazioni totali sia in termini di congegni elettromeccanici, sia di software a bordo. Inoltre tali sistemi stanno raggiungendo grandi precisioni anche in movimento (*Fig.* 8).

Lo scanner utilizzato nel 2010 utilizzava la tecnologia TOF (Tempo di volo) e già permetteva con facilità di orientare le stazioni di scansione su punti noti nella scena, materializzati da target. Questa metodologia cosiddetta topografica permette di collocare automaticamente nello stesso sistema di coordinate dati acquisiti in tempi differenti e rende più semplice l'integrazione della nuvola di punti con altri dati tridimensionali provenienti da stazioni totali o sistemi di posizionamento satellitare.

I laser scanner di ultima generazione, con tempo di volo a modulazione di frequenza (ToF con WFD - Wave Form Digitazing), raggiungono qualità del dato acquisito tali da permettere di apprezzare spostamenti di pochissimi millimetri (realizzando misure con rumore submillimetrico e accuratezza minore di 3 mm fino a 50 m). Questo tipo di misura amplifica le capacità del sistema classico "TOF" e ne migliora le caratteristiche in termini di portata (oltre 1km.), precisione e velocità (1 milione di punti/secondo).

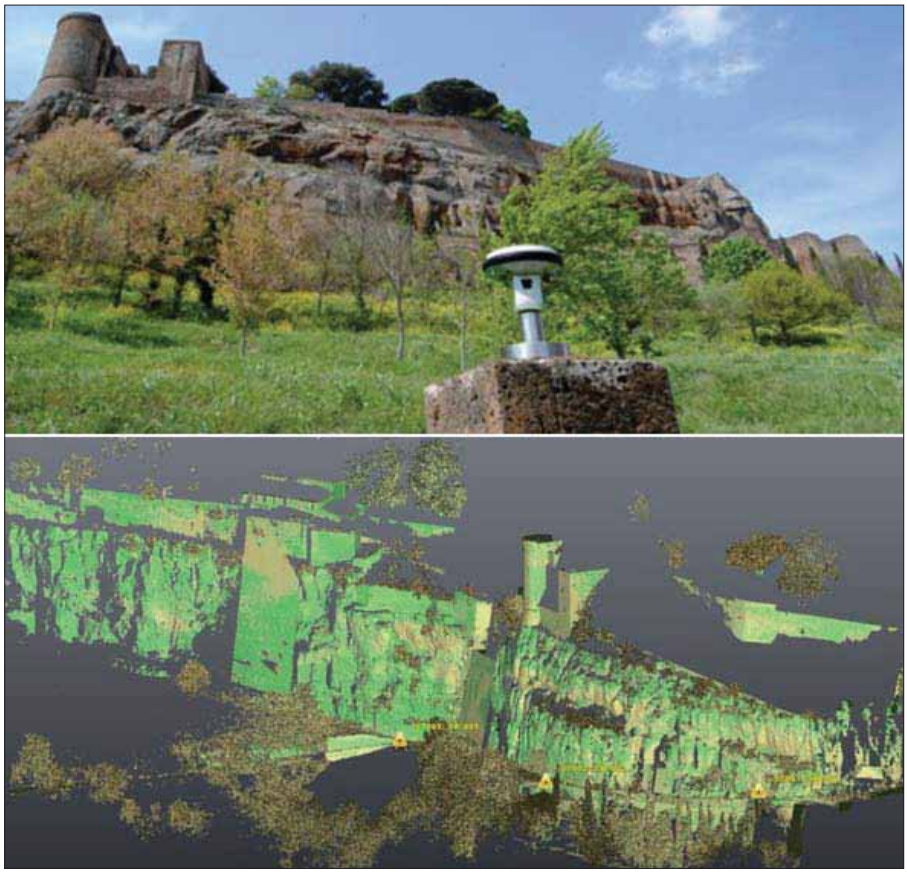


Figura 9 – Panoramica dell'area e restituzione LS3d

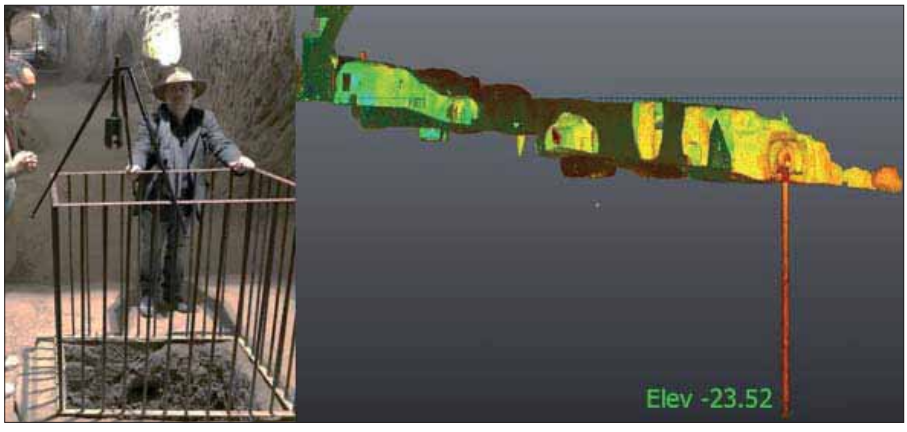


Figura 10 – Rilievo del pozzo all'interno della Grotta delle Macine

3.2.2 L'applicazione nell'Orvieto Ipogea

Nelle prime campagne di misura i rilievi sono stati effettuati mediante un laser scanner Leica C10 a tempo di volo con gittata massima di circa 300 metri in funzione della riflettanza del materiale e precisione fino a 6 mm. È stato creato un appoggio topografico di precisione, rilevato mediante stazione totale e georeferenziazione con sistema GNSS. L'utilizzo di Target (mire) e delle suddette modalità topografiche permette la registrazione delle nuvole di punti tra loro, l'orientamento delle stesse su una rete di punti di controllo verificati con stazione totale e la georeferenziazione di tutto il rilievo in un sistema di coordinate assoluto, con elevata precisione e ripetibilità. Nell'ultima campagna, realizzata nel 2017, è stato effettuato un rilievo con un laser scanner Leica P40 a tempo di volo con modulazione della forma dell'onda (*Fig.* 9). Così come per gli strumenti laser scanner, anche per le stazioni totali e i GPS è stato possibile, negli anni, utilizzare le tecnologie più avanzate, confrontandone caratteristiche e prestazioni in applicazioni in campo.

Ad esempio particolare attenzione è stata rivolta alla verifica della produttività dei differenti sistemi utilizzati nei diversi periodi. A parità di metodologia applicata, i dati delle scansioni sono stati prodotti con una riduzione dei tempi operativi di circa il 40%. Oltre ai vantaggi offerti dalle nuove tecnologie hardware, gli attuali software permettono una immediata fruizione dei dati acquisiti con possibilità di pubblicazione tramite internet (dati visibili, misurabili e commentabili tramite web browsers classici).

La sperimentazione relativa alla Grotta delle Macine ha permesso di apprezzare, grazie all'integrazione delle nuove tecnologie di rilievo utilizzate, una maggiore produttività e potenzialità del sistema di misura 3d. Infatti le misure del nuovo laser scanner a tempo di volo con modulazione della forma dell'onda (Leica P40) sono state integrate con le misure effettuate utilizzando uno strumento di nuova generazione (Leica BLK 360) con particolari caratteristiche dimensionali che lo rendono idoneo per l'acquisizione dati in ambienti di limitate dimensioni e difficilmente accessibili. Come nel caso del rilievo del pozzo, dove lo strumento è stato utilizzato in posizione capovolta (*Fig.* 10), permettendo di rilevare la completa geometria dello stesso.

Lo studio della riflettanza ha evidenziato nelle varie scansioni una diversa definizione delle aree più chiare, tali diversità di contrasto risultano correlabili al diverso grado di umidità delle aree nei vari periodi di esecuzione dei rilievi.

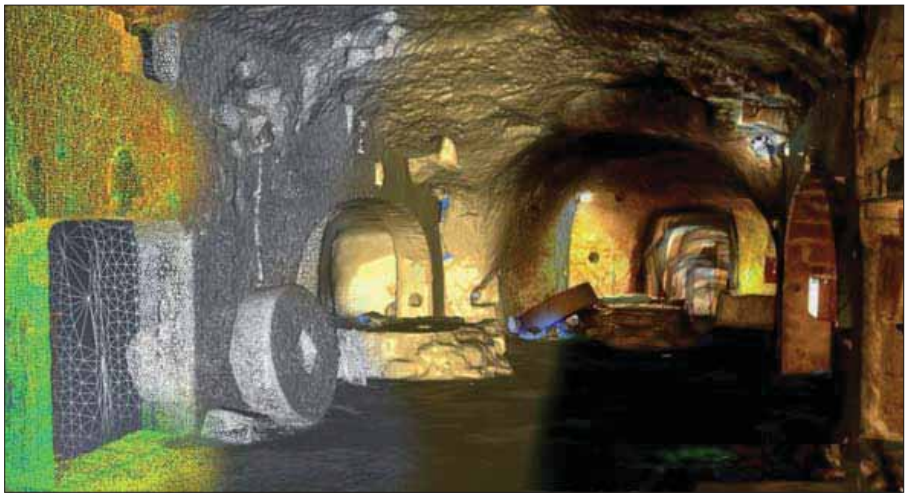


Figura11 – Grotta delle Macine - Elaborazione dei dati 3d

eventuali rumori accidentali e sono state poi comparate evidenziando le zone di maggior distacco sia in termini di sporgenze che di lacune. Sono state riscontrate differenze nelle superfici calpestabili, modificatasi nel tempo, mentre sulle volte i rilievi hanno riportato una buona omogeneità. Sono stati scelti quindi, dopo una attenta analisi anche visiva, i punti dove approfondire le indagini, mediante la realizzazione di sezioni specifiche e comparazioni sulle stesse, e/o con la pianificazione di ulteriori indagini da altra strumentazione o sensoristica (*Fig.* 13).

Nota di particolare utilità del rilievo Laser Scanner è, infatti, rappresentata dai vantaggi della integrazione del dato 3D con le informazioni provenienti da altri sensori dedicati a indagini diffuse non distruttive, quali georadar e termocamera. Tale integrazione porta il vantaggio di disporre di dati tridimensionali precisi e ripetibili, consentendo di utilizzare ed interpretare al meglio le informazioni, spesso non dimensionali, ottenute dai sensori sovraindicati, anche acquisite in successive e distinte fasi temporali.

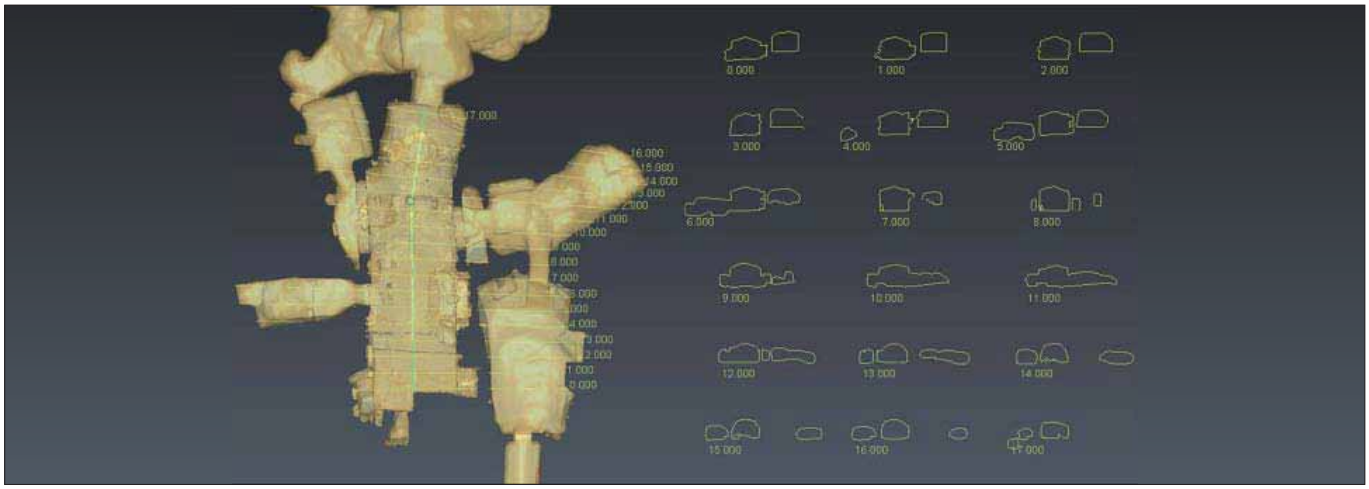


Figura12 – Grotta delle Macine - Restituzione sezioni

Ai fini dello studio di eventuali deformazioni verificatesi nel tempo, si è proceduto all'analisi dei dati 3d acquisiti, anche mediante comparazioni tramite software commerciali di nuova generazione, quali 3dReshaper, che supportano particolari algoritmi di calcolo certificati che permettono di elaborare modelli molto precisi e confrontabili (*Fig.* 11), anche ad utenti non particolarmente esperti di modellazione, favorendone così l'utilizzo futuro anche direttamente ai tecnici operativi dell'Osservatorio.

Dal modello sono state estratte tutte le rappresentazioni grafiche bidimensionali quali sezioni, planimetrie e curve di livello (*Fig.* 12).

In termini di variazioni geometriche le nuvole di punti sono state filtrate e pulite da

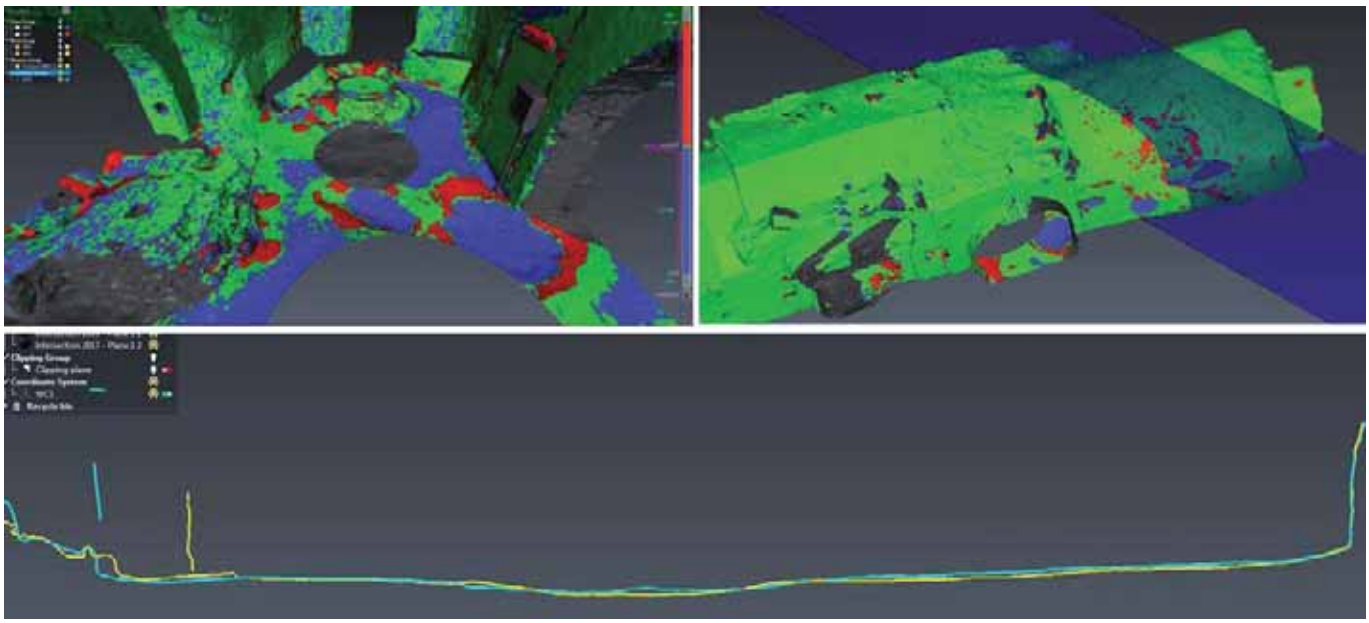


Figura13 – Grotta delle Macine - Studio delle anomalie e delle deformazioni

Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nel Cratere Sismico Aquilano

Plan for securing unstable underground cave's in the Abruzzi Seismic Crater

Giorgio Pipponzi
Emanuela Ferrini
Francesco Mattucci

Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere, Fossa (L'Aquila).

Parole chiave (*key words*): Cavità antropiche (*Anthropic cave's*), Piano (*Plan*), Censimento (*Census*), Cratere sismico (*Seismic cratere*), Terremoto L'Aquila (*L'Aquila earthquake*), Ricostruzione post-sisma (*post-seismic reconstruction*)

1.INTRODUZIONE

Il sottosuolo di alcuni centri storici del cratere sismico aquilano è interessato da un significativo numero di cavità sotterranee di origine antropica, scavate fin dalla preistoria, all'epoca romana fino ai giorni nostri, per essere utilizzate come stalle, cisterne per la raccolta di acque piovane, cantine, fungaie e, soprattutto, cave in sotterraneo di materiali da costruzione. Ne esistono di vario tipo e di dimensioni, e nel tempo si è persa la memoria della loro presenza, anche solo di alcuni tratti non più utilizzati o crollati.

Occorre quindi stabilire qual è il contributo alle condizioni di rischio che tale fenomeno può causare negli agglomerati urbani storici colpiti dal terremoto del 6 aprile 2009. La presenza di una cavità sotterranea, alla luce di determinate condizioni geologiche, può incidere sulla vulnerabilità degli edifici soprastanti, già danneggiati dal sisma, fino al punto da consentire di stabilire un nesso di causalità tra la sua presenza ed una determinata manifestazione di danno causato dal terremoto. A causa dello scuotimento provocato dal terremoto del 6 aprile 2009 infatti, in alcuni casi si è assistito al crollo della cavità, fino ad arrivare all'apertura di vere e proprie voragini in superficie (*Fig.* 1).

In altri casi, le cattive condizioni di stabilità delle cavità sono dovute al danneggiamento delle infrastrutture a rete soprastanti (reti idriche e fognarie), le quali in caso di perdite determinano infiltrazioni che provocano il degrado delle caratteristiche geomeccaniche del materiale nel quale risulta scavata la cavità.



Figura 1 – Sprofondamento di una cavità a seguito del terremoto del 6 aprile 2009 nel centro abitato di Castelnuovo, frazione di San Pio delle Camere (AQ)

2. CENSIMENTO E DATI DISPONIBILI

Ad oggi non esiste un censimento dettagliato di tutte le cavità presenti nel sottosuolo dei centri abitati dell'Abruzzo interno, e soprattutto non esiste un'analisi a scala locale per la valutazione sulle condizioni di stabilità di una cavità e/o del sistema cavità – edificato soprastante.

I dati ad oggi disponibili sono stati ricavati dalle banche dati nazionali pubbliche, ovvero: 1) Piani di Ricostruzione dei Comuni del Cratere sismico abruzzese; 2) PAI - Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale dell'Abruzzo "fenomeni gravitativi e processi erosivi"; 3) Piani di Microzonazione Sismica dei Comuni della Regione Abruzzo; 4) Microzonazione sismica dell'Area Aquilana - Dipartimento di Protezione Civile Nazionale (2011); 5) Progetto "Rischio Cavità" (2001-2003); 6) Progetto Sinkholes; 7) ISPRA – Database degli sprofondamenti in aree urbane; 8) ISPRA - Progetto IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia; 9) Studi geologici di dettaglio su base comunale e/o locale, reperiti presso i Comuni; 10) altre Pubblicazioni scientifiche. 11) Progetti di messa in sicurezza / bonifica di cavità sotterranee realizzati in alcuni Comuni dell'Abruzzo (San Benedetto in Perillis, Caporciano).

3. CARATTERISTICHE GENERALI DELLE CAVITÀ ANTROPICHE E CONDIZIONI DI PERICOLOSITÀ

Nella *Fig.* 2 è visibile uno schema tipologico di una cavità caratteristica del sottosuolo urbano dei Comuni dell'Abruzzo interno: l'ingresso si colloca al piano terra di un fabbricato e gli ambienti ipogei veri e propri si sviluppano nel sottosuolo oltrepassando la sagoma del singolo edificio (tratto 1 – edificio 1), andando ad impegnare anche consistenti parti sottostanti la viabilità pubblica ed altre proprietà private (tratti 2, 3 e 4 in Figura).

Soprattutto a seguito dell'intensa espansione edilizia del secolo scorso, spesso è stato realizzato un tessuto continuo di strutture urbane al di sopra di tali gallerie: ciò significa che vi sono numerosi casi di edifici costruiti con fondazioni dirette – in casi estremi realizzate a sbalzo - al di sopra di cavità sotterranee instabili (ovvero crollate anche parzialmente) che creano rischio per le abitazioni e per la pubblica incolumità.

In particolare, gli studi di Microzonazione Sismica coordinati dal Dipartimento di Protezione Civile Nazionale (DPC), condotti nell'area aquilana a seguito del terremoto del 6 aprile 2009, hanno fornito una preliminare interpretazione per quanto riguarda l'influenza delle cavità presenti nel sottosuolo sulla risposta sismica locale, ovvero che "…il moto sismico mediamente trasmesso in superficie non dovrebbe risultare amplificato in termini di accelerazioni. Lo scuotimento atteso potrà essere però caratterizzato da distribuzione non uniforme degli effetti inerziali sulle costruzioni, e da concentrazione di fenomeni deformativi localizzati nei diaframmi di terreno tra cavità e cavità, e tra le stesse e le fondazioni degli edifici.".

Tali studi si concludono con l'auspicio che la problematica delle cavità "…sia tenuta in massima considerazione prima di pensare ad un benché minimo recupero dei centri storici già gravemente compromessi e distrutti dal terremoto. Infatti prima di scegliere qualsiasi metodo di adeguamento sismico e ristrutturazione dei singoli edifici o meglio degli aggregati che spesso essi vanno a comporre nell'ambito dei centri storici, occorrerà effettuare un censimento al tappeto di tutte le cavità presenti al di sotto di edifici danneggiati e non. Solo dopo questo accurato lavoro si potrà definire il livello di consolidamento necessario per ciascuna cavità e che potrà variare a seconda dei casi da semplici opere di puntellamento a vere e proprie bonifiche con riempimenti e iniezioni con i metodi e le tecnologie più appropriate … omissis... La tenuta delle cavità, è evidente, giocherà un ruolo importante nella nuova suddivisione dei nuovi carichi dovuti alle opere di recupero e consolidamento delle strutture in elevazione, che … (attuando gli interventi di messa in sicurezza delle cavità - N.d.R.) … potranno essere realizzate nella massima sicurezza riconsegnando nuovamente integri al futuro ed alle nuove generazioni gli antichi

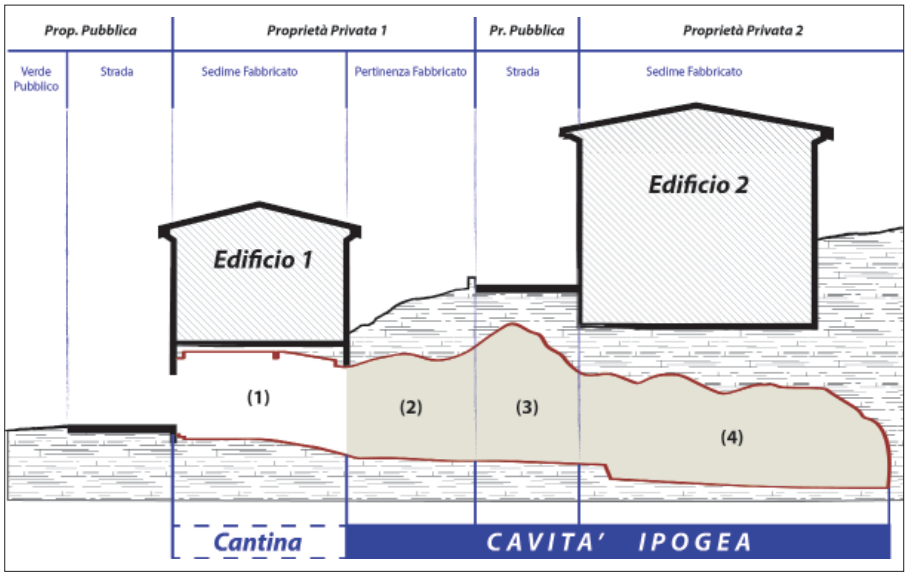


Figura 2 – Schema tipologico rappresentativo delle cavità presenti nel sottosuolo urbano dei Comuni dell'Abruzzo interno, realizzato in base all'analisi delle cavità ispezionabili. Il tratto indicato con (1) rappresenta il tratto di cavità sottostante l'edificio privato, che ne detiene l'accesso; esso risulta generalmente connesso, dal punto di vista strutturale, con la sovrastante struttura edilizia. Il tratto indicato con (3) rappresenta la porzione di calotta utilizzata dalle reti di sottoservizi (acquedotti, fognature, etc.). il tratto indicato con (4) rappresenta la porzione sottostante altri edifici privati, i cui proprietari spesso ignorano la presenza di un vuoto ipogeo al di sotto delle loro proprietà

borghi medievali in tutta la loro semplice bellezza." (DPC, 2010).

Per un corretto approccio al problema, risulta quindi determinante uno studio specialistico di dettaglio che stabilisca in maniera certa ed oggettiva le condizioni di stabilità delle cavità sotterranee. In alcuni casi, tali cavità sono in sufficienti condizioni di stabilità e sono utilizzate ancora oggi. In molti casi, invece, sono in condizioni di stabilità molto precarie sia per il modo in cui venivano condotti in passato gli scavi, sia per il progressivo, naturale ammaloramento delle strutture in sotterraneo; in molti casi il peggioramento delle condizioni di stabilità è dovuto alla realizzazione ed al cattivo stato di manutenzione delle infrastrutture a rete soprastanti (reti idriche e fognarie), le quali in caso di perdite determinano infiltrazioni che provocano il degrado delle caratteristiche geomeccaniche del materiale nel quale risulta scavata la cavità.

È importante sottolineare che gli studi sinora condotti in merito hanno escluso categoricamente che i centri abitati interessati dalla problematica non possano essere ricostruiti in piena sicurezza: al contrario, emerge con forza la necessità che il recupero e la ricostruzione dei centri storici investiti dal problema delle cavità sotterranee instabili debbano concretizzarsi attraverso una messa in sicurezza degli ambienti ipogei che avvenga preliminarmente o contestualmente agli interventi di ricostruzione post-sisma.

Tale approccio è in via di sperimentazione come "intervento pilota" (si veda il lavoro di *Durante et al.* nel presente volume) nel Piano di Ricostruzione della Frazione di Castelnuovo di San Pio delle Camere (AQ), dove la presenza di un vincolo di pericolosità molto elevata (P3) del PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) limitava in maniera diretta la ricostruzione dell'abitato alla messa in sicurezza del sottosuolo interessato da cavità sotterranee instabili.

In tale occasione è stato creato un Tavolo Tecnico congiunto tra gli Enti interessati (USRC, Regione Abruzzo, Autorità di Bacino, Comune di San Pio delle Camere, Università di Firenze-DICEAA), con lo scopo di stabilire le regole e le modalità per la ricostruzione dell'abitato di Castelnuovo, attraverso la realizzazione di un Piano di messa in sicurezza del sottosuolo che prevede la messa in sicurezza di tutte le cavità presenti nell'area.

4. PIANO PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLE CAVITÀ SOTTERRANEE INSTABILI NEL CRATERE SISMICO AQUILANO.

Per un corretto approccio al problema, l'USRC (Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere Sismico del Sisma 2009) ha proposto alla Struttura Tecnica di Missione per il coordinamento dei processi di ricostruzione e sviluppo dei territori colpiti dal sisma del 6 aprile 2009 (DPCM 1/6/2014) della Presidenza del Consiglio dei Ministri, un "Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nei comuni del Cratere Sismico dell'Abruzzo", che si compone di studio specialistico di dettaglio – su base comunale - per il censimento ed una valutazione oggettiva delle condizioni di stabilità delle cavità sotterranee e per la progettazione gli interventi per la messa in sicurezza.

Come già detto, si sottolinea che gli studi sinora condotti in merito hanno confermato la possibilità di ricostruire in piena sicurezza i centri abitati interessati dalla problematica delle cavità sotterranee: esiste cioè la concreta possibilità di recupero e ricostruzione dei centri storici del cratere investiti dal fenomeno attraverso un Piano di messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili, che avvenga preliminarmente o contestualmente agli interventi di ricostruzione previsti nei Piani di Ricostruzione, con modalità di intervento pubblico/privato a coordinamento pubblico.

IL PIANO DI MESSA IN SICUREZZA SI COMPONE DI TRE FASI PRINCIPALI:

FASE 1 "censimento e rilievo delle cavità sotterranee". La prima fase riguarda il censimento dettagliato degli ambienti ipogei presenti nel sottosuolo dei centri abitati del Cratere sismico ed una loro catalogazione in base alla seguente definizione: "Si definiscono cavità sotterranee qualunque vuoto di origine naturale presente nel sottosuolo e gli spazi vuoti di formazione storico-antropica che nel tempo sono stati creati o adattati per vari usi, scavati in roccia o in terreno compatto semi-litoide e con dimensioni significative in termini di diametro equivalente Deq > 1,5 metri. Gli ambienti ricavati nei piani interrati o seminterrati degli edifici che presentano strutture murarie in continuità strutturale con la restante parte dell'edificio fuori terra non sono da considerarsi cavità in senso stretto. La cavità sotterranea (o parte di essa) viene considerata "instabile" quando, per mezzo di studi di dettaglio condotti secondo le indicazioni contenute nel Piano, se ne accerti l'assenza delle condizioni di stabilità – statica e dinamica – in relazione allo stato della calotta e delle pareti, al grado di conservazione generale ed alla presenza di crolli e/o cedimenti strutturali, con specifico riferimento alle possibili interrelazioni di carattere dinamico con i soprastanti manufatti oggetto di intervento, in termini di fenomeni di dissesto in grado di provocare azioni dirette sulle opere.".

Inoltre, nel Piano Le cavità sono state distinte tramite una categorizzazione:

A) Cavità sottostante la proprietà ed esclusivamente private, accessibili dall'interno della stessa proprietà e connessa, dal punto di vista strutturale, con il resto della proprietà.
B) Cavità di dimensioni notevoli e con sviluppo plano-altimetrico che fuoriesce dal perimetro di una singola proprietà, con più accessi da proprietà differenti (ovvero anche da spazi pubblici), con un'estensione tale da interessare anche spazi pubblici ed altre proprietà private.
C) Cavità interessate e/o utilizzate, a tratti, dalle reti infrastrutturali (acquedotti, fognature, etc), accessibili sia dall'interno di proprietà private che pubbliche e/o di Enti di gestione di tali reti; questo risulta essere tra i casi più complicati, vista la necessità da parte dell'Ente di gestione (pubblico o privato) di monitorare ed intervenire sull'intera rete.

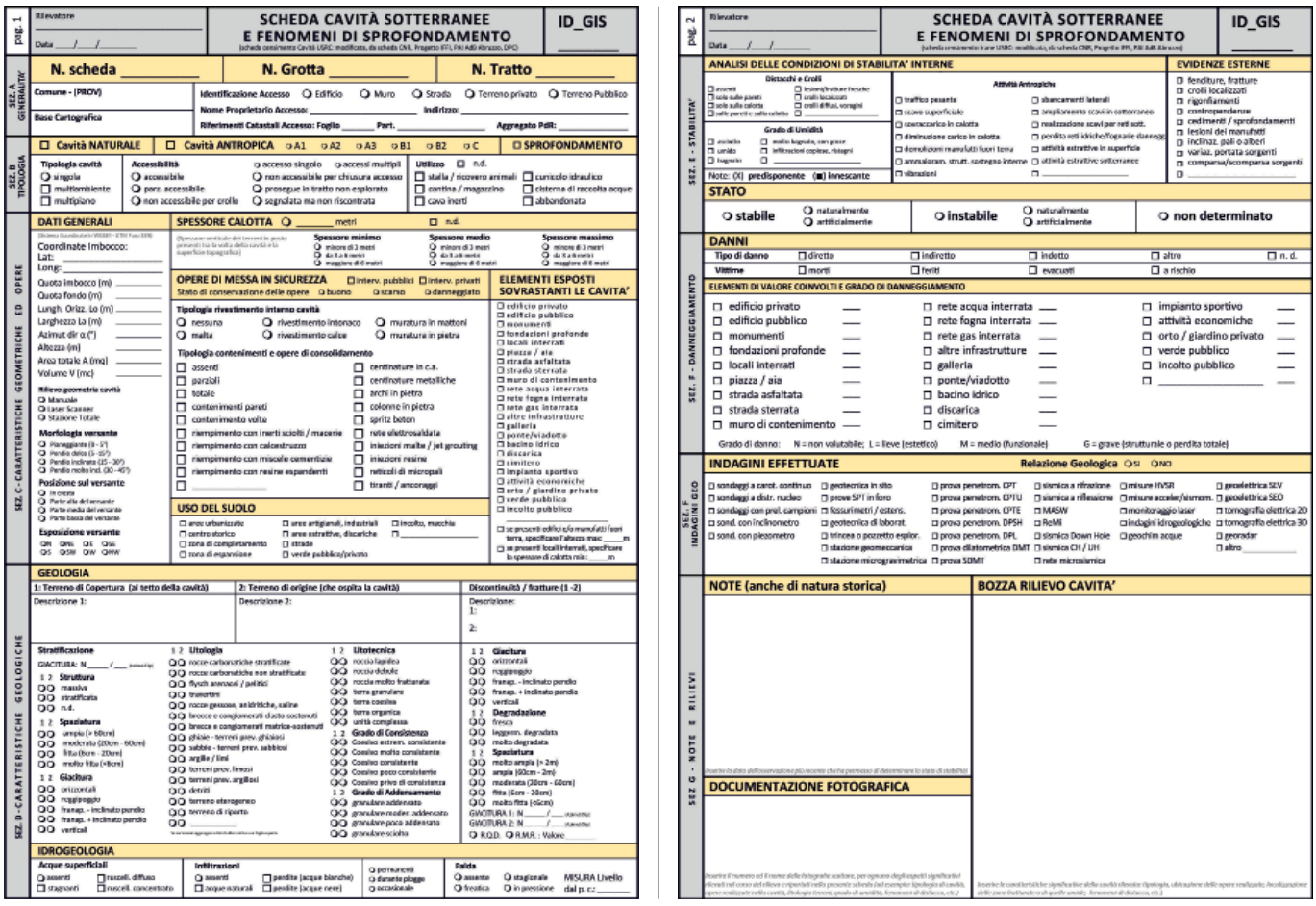


Figura 3 – Scheda predisposta dall'Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere (USRC) per il censimento di cavità sotterranee ed i fenomeni di sprofondamento, realizzata sulla base di uno schema già noto nella comunità scientifica / professionale in quanto già utilizzato per osservazioni di tipo geologico, geomorfologico ed idrogeologico. La Scheda di censimento USRC permette al rilevatore, in fase si sopralluogo tecnico in sito, di fornire una descrizione delle caratteristiche morfologiche e geologiche principali ed una prima valutazione delle sue condizioni di stabilità

D) Cavità di interesse storico-archeologico, per le quali gli interventi di messa in sicurezza devono essere realizzati nel rispetto dei criteri di tutela e conservazione.

Inoltre la Fase 1 si completa con uno studio delle caratteristiche principali attraverso il rilievo e valutazione della stabilità degli ipogei esaminati. A tal fine l'USRC ha predisposto una "Scheda di censimento per le cavità sotterranee ed i fenomeni di sprofondamento" (*Fig.* 3) sulla base di uno schema già noto nella comunità scientifica / professionale in quanto utilizzato giù da molti anni per il rilievo speditivo "di campagna" per osservazioni di tipo geologico, geomorfologico ed idrogeologico. La Scheda di censimento USRC permette al rilevatore, in fase si sopralluogo tecnico in sito, di fornire una descrizione delle caratteristiche morfologiche e geologiche principali ed una valutazione delle sue condizioni di stabilità. I dati ottenuti dalla Fase 1 andranno a confluire in un database geografico informatizzato denominato "Database GIS Cavità USRC", che ha lo scopo di raccogliere e censire in un archivio cartografico in ambiente GIS tutti gli ambienti ipogei artificiali presenti in ambito urbano nei comuni del cratere sismico abruzzese e di valutare il rischio di dissesto idrogeologico indotto da cavità sotterranee instabili. Tale database cartografico consentirà di visualizzare rapidamente tutti i dati relativi al sottosuolo, compresi i risultati dei sondaggi geognostici e delle prove geotecniche, la geometria delle cavità, le segnalazioni dei crolli, il reticolo idrico e fognario interferente. È stato ideato per:

1) Il censimento puntuale e la catalogazione delle Cavità Artificiali, in linea con quanto già si sta facendo in altre aree del territorio nazionale, raccogliendo i dati che determinano l'estensione accessibile delle stesse, ne precisano la morfometria 3D, la tipologia, le caratteristiche geologiche e le condizioni di stabilità.
2) L'individuazione delle cavità instabili che necessitano di un intervento di messa in sicurezza per la pianificazione dei successivi interventi.
3) Fornire a una base dati tutti i soggetti pubblici e privati che a diverso titolo hanno a che fare con le problematiche connesse con spazi scavati nel sottosuolo, per una esatta conoscenza del sottosuolo e delle relative interferenze con gli ipogei circa la sua utilizzazione.

FASE 2 "progettazione interventi di messa in sicurezza". La seconda fase attiene alla progettazione gli interventi per la messa in sicurezza, a partire da di uno studio specialistico per il rilievo e valutazione della loro stabilità e del sistema cavità – edificato soprastante. Ai fini della corretta progettazione degli interventi, è necessaria la determinazione il modello geologico e geotecnico in un intorno significativo delle cavità (o gruppi di esse), comprensivo di:

1 Caratterizzazione stratigrafica e strutturale del sottosuolo,
2) Descrizione dell'assetto idrogeologico.
3) Valutazione approfondita della stabilità, in primis della cavità stessa e secondariamente dell'insieme cavità – edificato soprastante, in termini di sovraccarichi sviluppati dal sistema insediativo esistente.
4) Presenza della rete di sottoservizi urbani che determinano un aggravamento delle condizioni di instabilità del sottosuolo.
5) Valutazione dell'influenza della cavità sotterranea nei confronti del grado di danneggiamento degli edifici soprastanti. È infatti ragionevole ipotizzare che in alcuni casi le cavità abbiano avuto un ruolo non secondario, se non da effetto amplificativo dell'azione sismica dovuto alla presenza di una cavità, quanto dal cedimento della calotta di ricoprimento o di parti delle pareti dovuto allo scuotimento sismico.
6) Validazione formale dell'eventuale nesso di causalità tra la presenza della cavità ed una determinata manifestazione di danno all'edificato soprastante, tale da determinare un incremento significativo della vulnerabilità del sistema.

FASE 3 "realizzazione interventi di messa in sicurezza". L'ultima fase si esplica attraverso la realizzazione degli interventi. Al fine di eliminare (o quantomeno mitigare) le condizioni di rischio connesse alla presenza di cavità instabili nel sottosuolo al di sotto degli spazi urbani, si individua nella loro bonifica con riempimento l'intervento ritenuto più efficace, risolutivo ed economico. In alternativa, si può prevedere la conservazione di alcune cavità ritenute più significative a memoria storica dei luoghi, attraverso il loro consolidamento strutturale, secondo le tecnologie ad oggi disponibili, in osservanza di quanto previsto dalle NTC vigenti.

5. MODALITÀ DI ATTUAZIONE DEGLI INTERVENTI E STIMA DEL FABBISOGNO ECONOMICO DEL PIANO

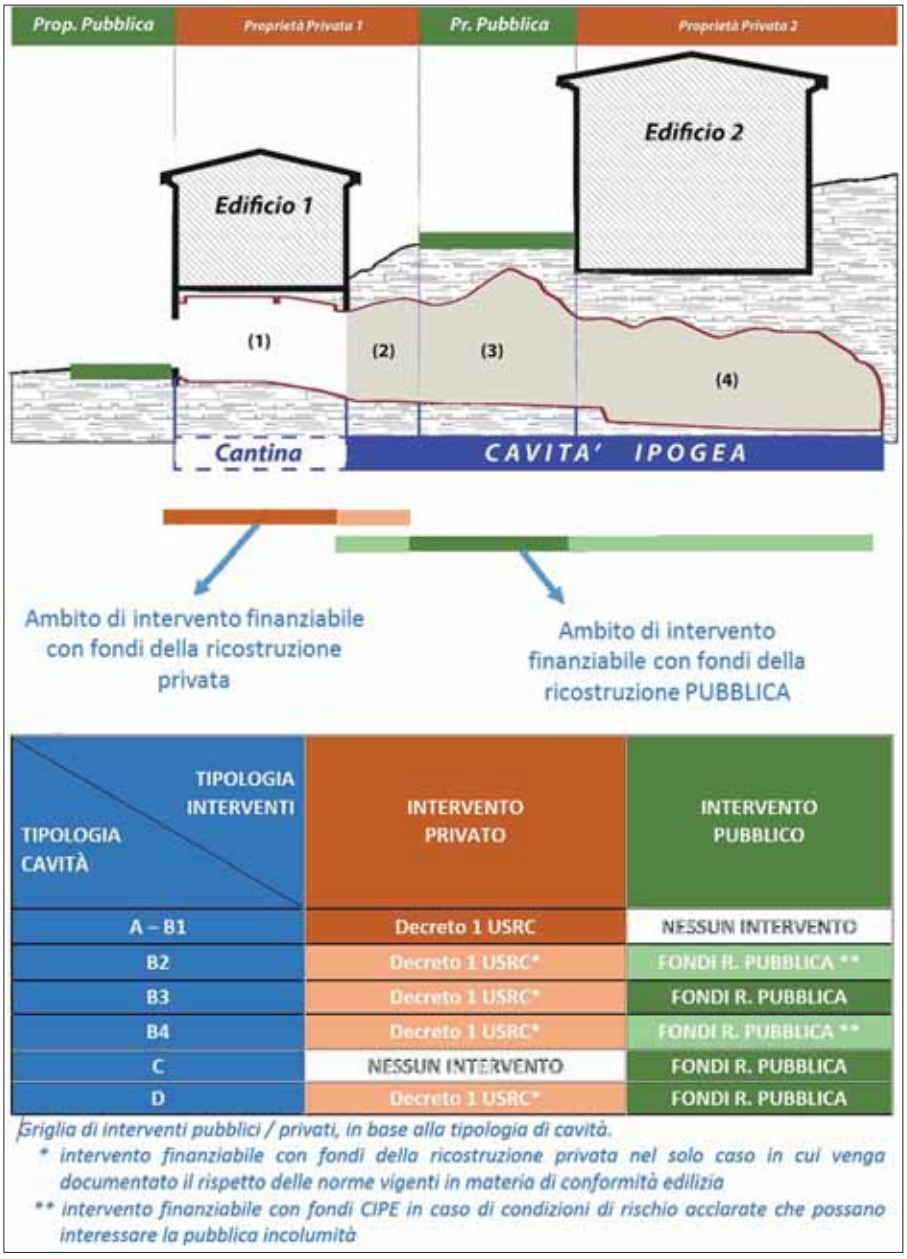
L'USRC ha provveduto, sulla base delle informazioni raccolte dal 2013 ad oggi, a definire una stima preliminare del fabbisogno economico necessario per attuare il descritto Piano, suddividendo in primo luogo il fabbisogno sulla base della competenza degli interventi, in capo ai Privati Cittadini, beneficiari del contributo per la riparazione dei danni da sisma del 2009, o alle Pubbliche Amministrazioni.

Per gli interventi di competenza privata, ovvero gli interventi per la messa in sicurezza delle cavità presenti esclusivamente al di sotto di edifici/aggregati privati oggetto di contributo per la riparazione dei danni da sisma attualmente già si procede ai sensi di quanto disposto dal Decreto USRC n. 1/2014, art. 9 comma 1 (concessione al soggetto privato di un contributo economico di 150 €/metro cubo di cavità - a valere sui fondi della Ricostruzione Privata - http://www.usrc.it/attivita/ricostruzione-privata/il-settore-ricostruzione-privata).

I portatori di interesse privati sono titolati all'esecuzione dell'intervento in quanto proprietari del tratto 1 di cavità indicato nella *Fig.* 2, ricadente esclusivamente al di sotto del perimetro dell'edificio soprastante che ne conserva l'accesso dall'esterno (le quali non sono da considerarsi cavità sensu stricto).

In merito agli interventi privati sulle cavità occorre precisare che per i Progetti di riparazione e ricostruzione Privata degli edifici danneggiati dal sisma del 2009 l'USRC ha provveduto a inserire nel Manuale MIC (Modello Integrato per i comuni del Cratere) specifiche indicazioni tecniche ai Progettisti per la restituzione dei rilievi dei vuoti ipogei eventualmente presente sotto gli aggregati oggetto di intervento (cfr.: appendice c - elenco documentazione per la richiesta di contributo al punto 35: Rilievo digitale tridimensionale e restituzione dei dati, anche in formato vettoriale (nativo, formato CAD 3D, nuvola di punti, ASCII, etc.) delle cavità ipogee, progetto e computo metrico estimativo dell'intervento di consolidamento proposto.). Inoltre, in fase di istruttoria dei Progetti effettuata dagli Uffici Territoriali per la Ricostruzione (UTR) viene richiesto ai Progettisti ed ai Geologi incaricati, nei casi in cui la presenza di cavità è probabile visto lo stato dei luoghi noto dalle informazioni disponibili (i.e. PdR, Microzonazione Sismica), di "integrare la relazione geologica con una valutazione in riferimento alla eventuale presenza di cavità nel sottosuolo (cfr. anche § 6.7.2 NTC 2008): Detta valutazione consisterà nella identificazione, anche attraverso adeguate indagini GEO, degli eventuali vuoti presenti nel sottosuolo, nel loro rilievo di dettaglio nel caso in cui le cavità siano accessibili (come specificato al punto 35 dell'Appendice C del Manuale MIC v.04) e nella valutazione delle condizioni di stabilità delle cavità con specifico riferimento alle possibili interrelazioni di carattere dinamico con i soprastanti manufatti oggetto di intervento, in termini di fenomeni di dissesto in grado di provocare azioni dirette sulle opere."

Gli interventi di iniziativa pubblica riguardano le parti di cavità localizzate al di sotto del sedime degli spazi pubblici e quelle non accessibili/crollate; appartengono a tale categoria il tratto di cavità (3) che ricade esclusivamente al di sotto di strade e spazi pubblici; nei casi più complessi ed in caso di condizioni di rischio acclarate che possano interessare la pubblica incolumità e/o la necessità di un intervento unitario per adeguate motivazioni tecniche l'intervento può riguardare anche i tratti di cavità (2) e (4) indicati nella *Fig.* 2, ovvero le porzioni di cavità sottostanti la proprietà privata che ha accesso esclusivo da parte della proprietà stessa ma esterna al perimetro strutturale dell'edificio e le restanti porzioni di cavità sottostanti ad altri edifici e proprietà privati (Edificio 2 in *Fig.*



TIPOLOGIA INTERVENTI / TIPOLOGIA CAVITÀ	INTERVENTO PRIVATO	INTERVENTO PUBBLICO
A – B1	Decreto 1 USRC	NESSUN INTERVENTO
B2	Decreto 1 USRC*	FONDI R. PUBBLICA **
B3	Decreto 1 USRC*	FONDI R. PUBBLICA
B4	Decreto 1 USRC*	FONDI R. PUBBLICA **
C	NESSUN INTERVENTO	FONDI R. PUBBLICA
D	Decreto 1 USRC*	FONDI R. PUBBLICA

Griglia di interventi pubblici / privati, in base alla tipologia di cavità.
** intervento finanziabile con fondi della ricostruzione privata nel solo caso in cui venga documentato il rispetto delle norme vigenti in materia di conformità edilizia*
*** intervento finanziabile con fondi CIPE in caso di condizioni di rischio acclarate che possano interessare la pubblica incolumità*

Figura 4 – Schema sinottico che illustra le modalità di intervento di iniziativa pubblica e/o privata, in riferimento alle tipologie di cavità illustrate nel testo, ed i relativi canali di finanziamento, sia quelli disponibili che quelli ulteriormente richiesti al Governo attraverso il Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) del Dipartimento per la programmazione e il coordinamento della politica economica della Presidenza del Consiglio dei ministri (DIPE)

2) ma che non hanno l'accesso diretto a detti ambienti ipogei. Dalla stima preliminare definita dall'USRC si deduce che il fabbisogno economico complessivo stimato per gli interventi di competenza pubblica (fabbisogno economico per l'importo lavori pari a 150 €/metro cubo di cavità esclusi Spese Tecniche, IVA e Oneri - a valere sui fondi della Ricostruzione. Pubblica - http://www.usrc.it/attivita/ricostruzione-pubblica/il-settore-ricostruzione-pubblica), risulta essere pari a € 18.613.503,83.

Espletati gli accertamenti descritti nelle fasi 1 e 2, in riferimento alle tipologie di cavità illustrate, è possibile quindi stabilire la modalità di intervento pubblico e/o privato, secondo lo schema di *Fig*. 4.

A seguito della richiesta avanzata dall'USRC alla citata Struttura Tecnica di Missione per il finanziamento della quota relativa agli interventi di competenza pubblica del Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nei comuni del Cratere Sismico dell'Abruzzo, il Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) del Dipartimento per la programmazione e il coordinamento della politica economica della Presidenza del Consiglio dei ministri (DIPE) ha deliberato il finanziamento di un primo stralcio del Piano con la Delibera n. 48 del 10/08/2016, pubblicata sulla G. U. n. 36 del 13/02/2017, pari a 2.163.498,78 per l'avvio delle attività descritte in cinque Comuni della provincia dell'Aquila (Barisciano, San Demetrio ne' Vestini, Fagnano Alto, Navelli, Poggio Picenze), affidando il comito di Stazione Appaltante per gli interventi al Provveditorato Interregionale alla Opere Pubbliche per i Lazio, Abruzzo e Sardegna.

BIBLIOGRAFIA

Alberico I., Guerra V., Lirer L.; *Il rischio sottosuolo nella Provincia di Napoli*, IV Conferenza Nazionale ASITA - Informazione Geografica: Innovazione e Formazione, pp. 1411-1416, Ottobre 2000.

Alterbitini V., Baldi A., Collini L., Esposito C., Guerra V., Miraglino P., Schiattarella F., Vallario A. (1988), *Le cavità sotterranee del napoletano: pericolosità e possibili utilizzi*. Geologia Tecnica N.3 anno 1998.

AA. VV. (2012-2017), *Piani di Ricostruzione dei Comuni del Cratere sismico abruzzese, Abruzzo*. Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere, Fossa AQ.

Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) del Dipartimento per la Programmazione e il Coordinamento della Politica Economica della Presidenza del Consiglio dei ministri (2016), *Delibera n. 48 del 10/08/2016*, pubblicata sulla G. U. n. 36 del 13/02/2017.

Catenacci G. (1992), *Studio sul Dissesto geologico e geo-ambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia, 47: 1-301.

Corazza A. (2004), *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in italia: le attività del dipartimento della protezione civile*. Atti del Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" Roma 20-21 maggio 2004, pp. 319-330.

Corazza A. (2004 b), *Censimento dei dissesti dovuti a cavità sotterranee in Italia. La scheda di rilevamento*. Atti del Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" Roma 20-21 maggio 2004, pp. 307 – 318. (Roma). Rel. 14/11/1997, Roma.

De Riso R., Lirer L. (1999), *I Caratteri Fisico-Ambientali del Territorio - La carta Geolitologica*, Il Piano territoriale di Coordinamento della Provincia di Napoli. Progetto Preliminare, pp. 63-70.

Di Ciero E. E Sevi F., con la consulenza del prof. Miccadei E. e il dott. geol. Piacentini T. del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara (2004), *Piano di attuazione interventi urgenti relativi a dissesti idrogeologici nel centro abitato di Navelli*.

Centro Interdipartimentale Ricerca "Ambiente" (C.I.R.AM.), Università degli Studi di Napoli Federico II (1998), *Analisi dell'ambiente fisico ed antropizzato, individuazione e definizione dei rischi naturali*. Studio condotto nell'ambito della convenzione tra l'Amministrazione Provinciale di Napoli ed il CIRAM, 1998.

DPC - Dipartimento di Protezione Civile Nazionale (2001-2003), *Progetto "Rischio Cavità"* http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/fenomeni_subsidenze.wp.

DPC - Dipartimento di Protezione Civile Nazionale (2010), *Microzonazione sismica dell'Area Aquilana*, Volume edito da DPC nel 2010, (http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/microzonazione_aquilano.wp).

Durante F., Pipponzi G., Del Monte E., Ghinelli A., Ilic V., Nocentini M. E Tallini M. (2018), *Censimento e mappatura della rete di cavità che sottende il paese di Castelnuovo, San Pio delle Camere (AQ)* (2018). Convegno Nazionale "Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione" 1/12/2017 - In questo volume.

Durante F., Pipponzi G., Amoroso S., Cantore L., Cosentino D., Di Domenica A., Di Giulio G., Di Naccio D., Macerola L., Milana G., Nocentini M., Pizzi A., Tallini M., Vassallo M. (2016), *Seismic microzonation of Castelnuovo (L'Aquila): Multidisciplinary investigations for the consolodation activities of the cave systems*, 88° Congresso della società geologica italiana, Napoli. 7-8/09/2016.

Durante F., Pipponzi G., Cosentino D., Del Monte E., Ghinelli A., Ilic V., Macerola L., Nocentini M., Tallini M. (2016), *Seismic microzonation of Castelnuovo (L'Aquila): multidisciplinary investigations for the consolidation activities of the cave systems,* 88° Congresso della società geologica italiana, Napoli, 7-8/09/2016.

Evangelista A. (1991), *Cavità e dissesti nel sottosuolo dell'area napoletana*, Atti del Convegno "Rischi naturali ed impatto antropico nell'area metropolitana napoletana" Napoli, Facoltà di Ingegneria 7-8 giugno 1991.

Evangelista L., Landolfi L., D'onofrio A., Silvestri F. (2016), *The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo eartquake,* Bull Earthquake Eng. December 2016, Volume 14, Issue 12, pp 3363–3387.

Ferrini G., Moretti A., Redi F., Cordisco A. (2013), *Un insediamento ipogeo nei pressi dell'Aquila in frazione S. Martino a Picenze e l'attribuzione al XIII-XIV secolo della facies in muratura*. Archeologia Medievale XL, 2013, pp. 259-266.

Fiore A. (2006), *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia*. Periodico di Scienze della Terra dell'Ordine dei Geologi della Puglia, Geologi e Territorio, n. 1/2/3-2006.

Gasparini P. (1992), *La localizzazione delle cavità con metodologie sismiche*, in "Frane e Territorio" pp. 444 - 450 Liguori Editore.

Ilic V., Del Monte E., Boschi S., Durante F., Pipponzi G., Nocentini M. E Tallini M. (2017), *Analisi della risposta sismica locale del colle di Castelnuovo (AQ) con modelli 2D*, Atti del Convegno Anidis 2017, Pistoia, 17-21 settembre 2017.

ISPRA e GNDCI-CNR – Gruppo Nazionale per la Difesa Dalle Catastrofi Idrogeologiche (2003-2004), *Progetto Sinkholes* - http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/il-progetto-sinkhole).

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - *Database degli sprofondamenti in aree urbane* (http://sgi2.isprambiente.it/sinkhole/sprofondamenti.asp)

ISPRA - *Progetto IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* (http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia, http://193.206.192.136/cartanetiffi/#).

Lanzini M. (1995), *Il problema delle cavità sotterranee a Roma (un rischio geologico).* SIGEA, Geologia dell'Ambiente, 3, Luglio-Settembre 1995.

Lirer L., Alberico I. E Balsamo A. (1997), *Le cavità nei comuni della Provincia di Napoli. Realizzazione di un database e indirizzi per la pianificazione nei comuni con elevata presenza di cavità artificiali nel sottosuolo*. Convenzione C.I.R.AM. - Provincia di Napoli.

Pipponzi G., Del Monte E., Genitti C., Leonardis F. (2013), *Linee Guida USRC per la messa in sicurezza delle cavità antropiche della frazione di Castelnuovo di San Pio delle Camere* (AQ). Atti dell'Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere, Fossa AQ, all'interno del Piano di Ricostruzione del Comuni di San Pio delle Camere (AQ).

Pipponzi G., Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere, Fossa (AQ) (2015), *Indirizzi Tecnici e Modalità di Attuazione del piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee nel cratere sismico abruzzese*. Allegato alla Delibera CIPE n. 48 del 10/08/2016, pubblicata sulla G. U. n. 36 del 13/02/2017.

Redi F., (2012), *L'Aquila: infrastrutture idrauliche e ruolo socio-economico dell'acqua in una città di fondazione medievale*, in R. Fiorillo, C. Lambert (a cura di), *Medioevo letto, scavato, rivalutato. Studi in onore di Paolo Peduto*, Medioevo scavato, VII, Firenze, pp. 331-350.

Regione Abruzzo - PAI (2008), *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale dell'Abruzzo "fenomeni gravitativi e processi erosivi"* - approvato in via definitiva con Delibera di Consiglio Regionale n.94/7 del 29/01/2008. (cfr.: Relazione Generale e Cartografia di Piano - http://autoritabacini.regione.abruzzo.it).

Regione Abruzzo – Protezione Civile Regionale (2011-2018) *Piani di Microzonazione Sismica dei Comuni della Regione Abruzzo* (disponibili presso gli uffici comunali e sul sito web http://protezionecivile.regione.abruzzo.it/index.php/microzonazione).

Somma M.C. (2011). *Organizzazione e funzioni degli ambienti rupestri: alcuni esempi dall'area abruzzese*, in DE MINICIS 2011, pp. 75-79.

Cavità di origine antropica e sicurezza degli edifici scolastici nella città di Roma: i casi di studio di via Asmara (Municipio II) e via Diana (Municipio V)

Anthropogenic sinkhole and/or cavities and safety of school buildings in the Rome urban area: case studies of via Asmara (Municipio II) and via Diana (Municipio V)

Alessio Argentieri[1], Maria Di Nezza[2], Michele Di Filippo[3], Maria Piro[1], Giovanni Rotella[1], Flavio Cecchini[4], Siro Margottini[4]

[1]Città Metropolitana di Roma Capitale - Dipartimento VI "Pianificazione territoriale generale" - Servizio 3, Geologico e difesa del suolo, protezione civile in ambito metropolitano, Roma
E-mail: a.argentieri@cittametropolitanaroma.gov.it

[2]Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma
E-mail: maria.dinezza@ingv.it

[3]IGAG-CNR, Roma
E-mail: michele.difilippo@uniroma1.it

[4]Geologo libero professionista, Roma

Parole chiave (*key words*): sprofondamenti *(sinkholes*), cavità (*cavity*), sicurezza (*safety*), edifici scolastici (*school buildings*), geofisica integrata (*integrated geophysics*), gravimetria (*gravity*), georadar (*georadar*), sismica (*seismic*)

RIASSUNTO

Negli ultimi anni l'incremento di fenomeni di sprofondamento nel territorio di Roma Capitale e nella sua area metropolitana costituisce un rischio sempre maggiore per la popolazione e per le infrastrutture. Il verificarsi di questi eventi è in gran parte dei casi connesso alla presenza di sistemi caveali di origine antropica e diversa età e funzione.

Un fattore di elevata criticità per l'assetto del territorio è rappresentato dalle reti ipogee non

censite in aree di intensa urbanizzazione. La Città Metropolitana di Roma Capitale, in continuità con l'esperienza amministrativa della Provincia di Roma, ha da alcuni anni concentrato l'attenzione sul monitoraggio di edifici strategici come quelli scolastici in aree

potenzialmente a rischio di sprofondamenti e/o collassi improvvisi.

Nell'ambito di un progetto di collaborazione sono stati eseguiti studi geofisici integrati su due edifici scolastici di competenza della Città Metropolitana di Roma Capitale, ubicati in Municipi della Città, noti per essere interessati da un complesso sviluppo di sistemi ipogei; le indagini hanno consentito di individuare anomalie nelle caratteristiche del sottosuolo imputabili alla presenza di possibili cavità non ancora note e/o esplorate.

Le indagini eseguite presso il plesso scolastico di Via Asmara (Municipio II), realizzato nel 1939, sono funzionali al corretto posizionamento delle scale di emergenza nel cortile dell'edificio per prevenire cedimenti e/o crolli legati alla possibile presenza di una catacomba.

Il secondo caso di studio si riferisce all'Istituto Jean Piaget di via Diana (Municipio V), costruito intorno al 1932, in prossimità del quale sono noti crolli e sprofondamenti negli anni passati. Da ultimo nel 2013, a qualche decina di metri dall'edificio scolastico ed in prossimità del muro di recinzione, si è verificata l'apertura di una grossa voragine che ha coinvolto un'abitazione privata. Per tale ragione è stata programmata un'apposita campagna di indagini geofisiche preventive presso l'Istituto**.**

Il presente studio ha permesso di perfezionare un protocollo speditivo di utilizzo integrato di alcuni metodi geofisici (microgravimetrico, georadar e sismico) funzionale all'individuazione di cavità nel sottosuolo in area urbana, che permette di mappare dimensioni, distribuzione spaziale e profondità. Tale base informativa risulta imprescindibile per una gestione e messa in sicurezza degli edifici scolastici esistenti e per la progettazione di nuovi interventi.

INTRODUZIONE

La conformazione geologica e geomorfologica del territorio della città metropolitana di Roma ha consentito in passato lo sviluppo nel sottosuolo di un sistema complesso di cavità di diversa natura e genesi legato principalmente all'utilizzo a cui era destinato. La tipologia delle cavità di origine antropica create in passato, come ad esempio cunicoli, tombe o ipogei, è strettamente da imputare alla natura stessa della estensione delle diverse formazioni geologiche su cui si sviluppavano i diversi municipi sul territorio.

Per alcuni sistemi ipogei più complessi risulta difficile definire anche le età della prima escavazione proprio per i loro innumerevoli riutilizzi; in altri casi, qualora preservati nel tempo non può essere definita la loro ubicazione in profondità, che può estendersi anche in diversi livelli, in quanto non ancora esplorati. Il rinvenimento di alcuni degli ambienti ipogei più importanti è avvenuta tra la metà e la fine dell'800 (De Rossi, 1905; Argentieri *et al.*, 2018; Lanzini, 2018), costituendo una risorsa archeologica per la città di Roma, ma rappresentando anche un punto di partenza per la comprensione del loro sviluppo in profondità.

Se da un lato, le cavità e/o cunicoli formatesi per l'approvvigionamento dei materiali edilizi furono abbandonate all'inizio del secolo scorso, dall'altro, molte cavità di interesse storico-artistico potrebbero essere ancora non note in alcune porzione del sottosuolo perdendosene la memoria storica della loro presenza. In entrambi i casi, l'incremento demografico della popolazione di Roma, iniziato dopo la seconda guerra mondiale, ha cancellato tutte quelle tracce geologiche e geomorfologiche presenti in superficie riconducibili all'esistenza in profondità di un sistema così sviluppato. Infatti il diffondersi di un'edilizia incontrollata ha provocato l'espansione della città (si pensi che la città di Roma era confinata all'interno delle mura Aureliane durante le due guerre mondiali) creando, da un lato una complessa storia urbanistica, ma anche un aumento del rischio di dissesto a cui è esposto il territorio.

Negli ultimi anni sempre maggior interesse viene rivolto ai dissesti riconducibili ai fenomeni di sprofondamento che generalmente si attuano in superficie in prossimità dello sviluppo di queste cavità note o poco note nel sottosuolo.

Per tal ragione il territorio romano rappresenta un importante campo di prova non solo per riuscire a catalogare in modo univoco il complesso sistema caveale, attraverso le diverse modalità di indagini geologiche e geofisiche e le relazioni tra urbanizzazione e fenomeni di dissesto, ma anche per indirizzare correttamente gli interventi per mitigare

il rischio attraverso un corretto monitoraggio per analizzare correttamente la pericolosità.

In questo senso il Servizio Geologico d'Italia di ISPRA, Dipartimento di Protezione Civile Nazionale, insieme a numerosi ricercatori, hanno fatto un interessante campionario della tipologia di dissesti in area urbana (Ciotoli *et al*., 2013), grazie anche alla disponibilità di dati, a partire dai dati storici dell'archivio e ai tanti lavori geofisici e geologici che vengono condotti, nonostante l'estensione del territorio. Studi multidisciplinari hanno così permesso di stilare una carta aggiornata sulla distribuzione delle cavità antiche e di recente formazione sull'intero territorio (Nisio *et al*., 2017)

Nonostante sia stato istituito nel 2016 dal MIUR la "*Giornata Nazionale per la sicurezza nelle scuole*", al fine di promuovere scuole sicure, adeguate sismicamente e sostenibili, la città metropolitana di Roma, come altre città d'Italia, deve fare i conti anche su eventuali edifici costruiti su possibili cavità. Pertanto essendo degli edifici di interesse strategico, è di primaria importanza valutare la possibilità che possano aumentarne la pericolosità e come mitigarne il rischio.

Molto spesso risulta complesso eseguire delle prospezioni geofisiche in un contesto urbano, in particolare in una Metropoli come Roma, che presenta una complessità geologica ed archeologica che può variare repentinamente all'interno dello stesso Municipio e soprattutto per l'alta densità di distribuzione degli edifici di diversa natura ed età. In un sistema così articolato generalmente una sola metodologia di indagine geofisica può non essere sufficiente a delineare l'andamento nell'immediato sottosuolo di un edificio e soprattutto a causa delle peculiari caratteristiche geologiche, archeologiche e antropiche.

In molte parti della città sono state scavate vere e proprie cave dall'epoca romana fino all'immediato dopoguerra, quando l'area che sovrastava le cave sotterranee è stata completamente urbanizzata. In alcune zone della città, questa reti caveali sono coincidenti con le catacombe cristiane, ebraiche e pagane, come è il caso del Municipio II. I tunnel sono principalmente scavati in una successione di depositi vulcanici del Pleistocene, di alcune decine di metri di spessore (Ventriglia, 1971, 2002; Marra *et al*., 2009). I tufi, in particolare il Tufo Lionato, per il suo colore giallastro, sono utilizzati per l'edilizia, eccellente materiale utilizzato per molti monumenti e edifici istituzionali (Jackson e Marra, 2006; Ciriaco *et al*., 2008), mentre i depositi di pozzolana sono stati ampiamente utilizzati dall'epoca romana per la produzione di un tipo di cemento, l'"*opus caementicium*" (De Vita *et al*., 2008). L'estrazione progressiva dei depositi di pozzolana fu generalmente intrapresa dallo sviluppo di una rete di gallerie (tecnica della "stanza e il pilastro"). Al termine dell'attività estrattiva, i tunnel furono abbandonati e gli ingressi spesso bloccati e dimenticati.

Il processo di urbanizzazione che costituisce il più importante e significativo processo di trasformazione del territorio ha completamente cancellato l'antica morfologia del territorio visibile fino a 50 anni fa.

Attualmente in un contesto urbano articolato in modo complesso, spesso le maggior aree a rischio sono rappresentate proprio da quegli edifici che gravano su antichi sistemi caveali.

Qualora poi si trattasse di edifici scolastici in aree potenzialmente a rischio di sprofondamenti e/o collassi improvvisi, è necessario perfezionare un protocollo speditivo di utilizzo integrato di alcuni metodi geofisici (microgravimetrico, georadar e sismico) funzionale all'individuazione di cavità nel sottosuolo, che permette di mappare dimensioni, distribuzione spaziale e profondità.

Nel caso del plesso scolastico di Via Asmara (Municipio II) (*Fig*. 1), realizzato nel 1939, le indagini geofisiche sono state richieste per il posizionamento delle scale di emergenza nel cortile dell'edificio al fine di prevenire cedimenti e/o crolli legati alla possibile presenza (densità di 25-50%, Nisio *et al*., 2017) di una catacomba (Ventriglia, 2002).

Il secondo caso di studio si riferisce all'Istituto Jean Piaget di via Diana (Municipio V) (*Fig*. 1), costruito intorno al 1932, in prossimità del quale sono noti crolli e sprofondamenti negli anni passati in prossimità del muro di recinzione. In questa porzione del Municipio V è probabile l'esistenza di cavità sotterranee (Ventriglia, 2002; Nisio *et al*., 2017). Inoltre l'edificio scolastico si trova non molto distante da un complesso sistema di cavità dell'area di Villa De Sanctis, non escludendo delle caratteristiche vulcanologiche del sottosuolo estremamente simili (Bianchi Fasani *et al*., 2011).

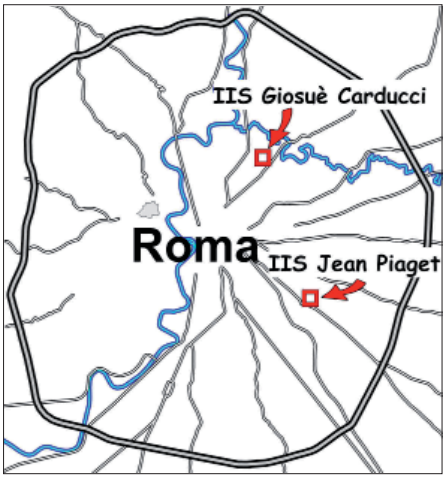


Figura 1 – Carta del territorio della città di Roma ed ubicazione delle aree di studio delle scuole: Via Asmara (Municipio II) e Istituto Jean Piaget di via Diana (Municipio V)

IL CASO DELL'EDIFICIO SCOLASTICO DI VIA ASMARA (MUNICIPIO II) CARATTERISTICHE GEOLOGICHE

Nel settore di indagine, comprende una successione di unità sedimentarie dei depositi neoautoctoni di mare aperto della formazione di Monte Vaticano (Pliocene) e la complessa successione di ambiente continentale, sedimentaria, vulcanica e vulcano-sedimentaria del Pleistocene medio-Olocene (SE, Foglio 374"Roma" della Carta Geologica d'Italia scala 1: 50.000, *Serv. Geol. D'Italia*, 2008). I depositi vulcanici sono stati deposti nell'arco di un lungo intervallo di tempo, come testimoniato dalla frequente presenza, a varie altezze stratigrafiche, di paleosuoli e depositi intercalati rimaneggiati nell'area (Funiciello e Giordano, 2008; Funiciello *et al*., 2008). All'interno della successione sono presenti molte superfici di discontinuità, sia regionali sia locali, che illustrano le complesse relazioni tra tettonica, vulcanismo e sedimentazione.

Più recenti di questa superficie, se ne riconoscono altre che sono legate alle principali oscillazioni del livello marino durante il Pleistocene medio e superiore colmate da depositi in facies fluvio-lacustri lungo la valle del Tevere e marini lungo la costa (formazione di S. Cecilia).

La geologia dell'area è caratterizzata dalla presenza, nei settori topograficamente più elevati, di lembi dell'Unità dei Tufi Stratificati Varicolori di La Storta (416 ± 6 Ka; Karner *et al*., 2001), di alternanze di piroclastiti primarie cineritico lapillose, di scorie grigie, di pomici da ricaduta e di livelli vulcanoclastici rimaneggiati con orizzonti pedogenizzati (*Serv. Geol. D'Italia., 2008*).

Al di sotto di questa unità affiorano, nelle porzioni intermedie dei versanti, i Tufi Stratificati Varicolori di Sacrofano (Pleistocene medio p.p., 488 ± 2 Ka; Karner e Renne, 1998; Karner *et al*., 2001).

Questi prodotti da ricaduta, ascritti alla struttura calderica di Sacrofano (Distretto Vulcanico Sabatino) ed estesamente rappresentati in quasi tutto l'areale del foglio 374 "Roma" della Carta Geologica d'Italia scala 1: 50.000 (*Serv. Geol. D'Italia*, 2008), sono stati deposti nell'arco di un lungo intervallo di tempo, come testimoniato dalla frequente presenza, a varie altezze stratigrafiche, di paleosuoli e depositi intercalati rimaneggiati (Funiciello e Giordano, 2008).

Nella successione stratigrafica dei rilievi le piroclastiti di Sacrofano poggiano sul Tufo Lionato (355 ±2 Ka; Karner e Renne, 1998; Karner *et al*., 2001), di provenienza albana, a sua volta sovraimposta alle sequenze sedimentarie continentali di ambiente fluviale ascrivibili alla formazione di S. Cecilia (Pleistocene medio p.p.), (*Serv. Geol. D'Italia*, 2008).

METODI DI INDAGINE

L'edificio scolastico si colloca tra delle vecchie cave in sotterraneo di tufo e pozzolana e catacombe, tombe ipogee, ambienti sotterranei, ecc. (Cimitero Maggiore o Ostriano e Cimitero di S. Agnese) aventi interesse archeologico, scavati interamente in rocce vulcaniche (Ventriglia, 2002). Inoltre sembrerebbe che i due cimiteri siano in connessione mediante delle gallerie sotterranee (De Rossi, 1905). Questa risulta una zona dove è molto probabile l'esistenza di cavità sotterranee (Ventriglia, 2002; Nisio *et al.*, 2017). Pertanto prima della realizzazione della scala di emergenza all'interno del cortile dell'edificio, si è voluto verificare l'esistenza di eventuali cunicoli presenti nel sottosuolo.

Nel caso in studio, tenendo conto del diverso grado di risoluzione in funzione della profondità, e della tipologia delle rocce nell'area con una ubicazione distale dal Distretto Vulcanico dei Colli Albani, sono state impiegate due diverse metodologie di prospezione: microgravimetria e georadar (*Fig.* 2).

Nell'ottobre 2014, è stata eseguita una prospezione microgravimetrica nel cortile della scuola (*Fig.* 2). Le stazioni, 83, sono state acquisite mediante dei circuiti chiusi su cui veniva controllata ogni ora il valore della deriva sulla stazione di riferimento (n. 1, *Fig.* 2). I valori di gravità assoluta sono stati connessi alla stazione di gravità assoluta ubicata nel Castello baronale di Sant'Angelo Romano (Rm) (Di Nezza, 2007; D'Agostino *et al.*, 2008).

Sono state effettuate 11 sezioni georadar lunghe 22 metri ed equidistanti di 1 metro formando una maglia quadrata in modo tale da avere una risoluzione dettagliata dei materiali costituenti tutta l'area interessata dalla prospezione microgravimetrica (*Fig.* 2). È stato utilizzato un apparato GSSI Sir10B con un'antenna con frequenza di 400 MHz.

RISULTATI

Dopo aver effettuato le usuali elaborazioni sono state ottenute le Anomalie Residue: su queste è possibile individuare l'effetto di cavità presenti nel sottosuolo (*Fig.* 3).

Le aree dove si osservano i valori positivi riscontrati in *Fig.* 3, devono essere intese come aree in cui la situazione stratigrafica non è variata nel tempo, quindi persiste la presenza di materiale tufaceo *Pozzolanelle*; nelle zone con valori negativi ci sono carenze di massa nel sottosuolo ed esse sono dovuti alla presenza di materiale poco addensato e/o di riempimento o di cavità.

Il rilievo georadar evidenzia solo il primo metro e mezzo del sottosuolo (*Fig.* 5).

In *Fig.* 5 è riportata la *slice* effettuata a circa un metro di profondità. I segnali registrati, evidenziati con toni più scuri, sono essere causati dalla condotta delle acque di deflusso a cui sono collegati i vari tombini.

L'analisi integrata dei risultati ottenuti dai rilievi microgravimetria e georadar ha permesso di elaborare un modello gravimetrico del sottosuolo (*Fig.* 4) e ottenere una carta di sintesi del sottosuolo riferita allo spessore di circa 6-7 metri (*Fig.* 6), il rilievo gravimetrico evidenzia la presenza nel sottosuolo di due cavità forse connesse al sistema caveale delle catacombe presenti nelle vicinanze (*Fig.* 4).

IL CASO DELL'EDIFICIO SCOLASTICO DI VIA DIANA I.I.S. JEAN PIAGET (MUNICIPIO V)

CARATTERISTICHE GEOLOGICHE

Il settore sud-orientale di Roma, dove ricade il Municipio V, è caratterizzato dalla presenza della sequenza piroclastica distale del Distretto Vulcanico dei Colli Albani; attualmente un vulcano quiescente situato a circa 25 km a sud est di Roma.

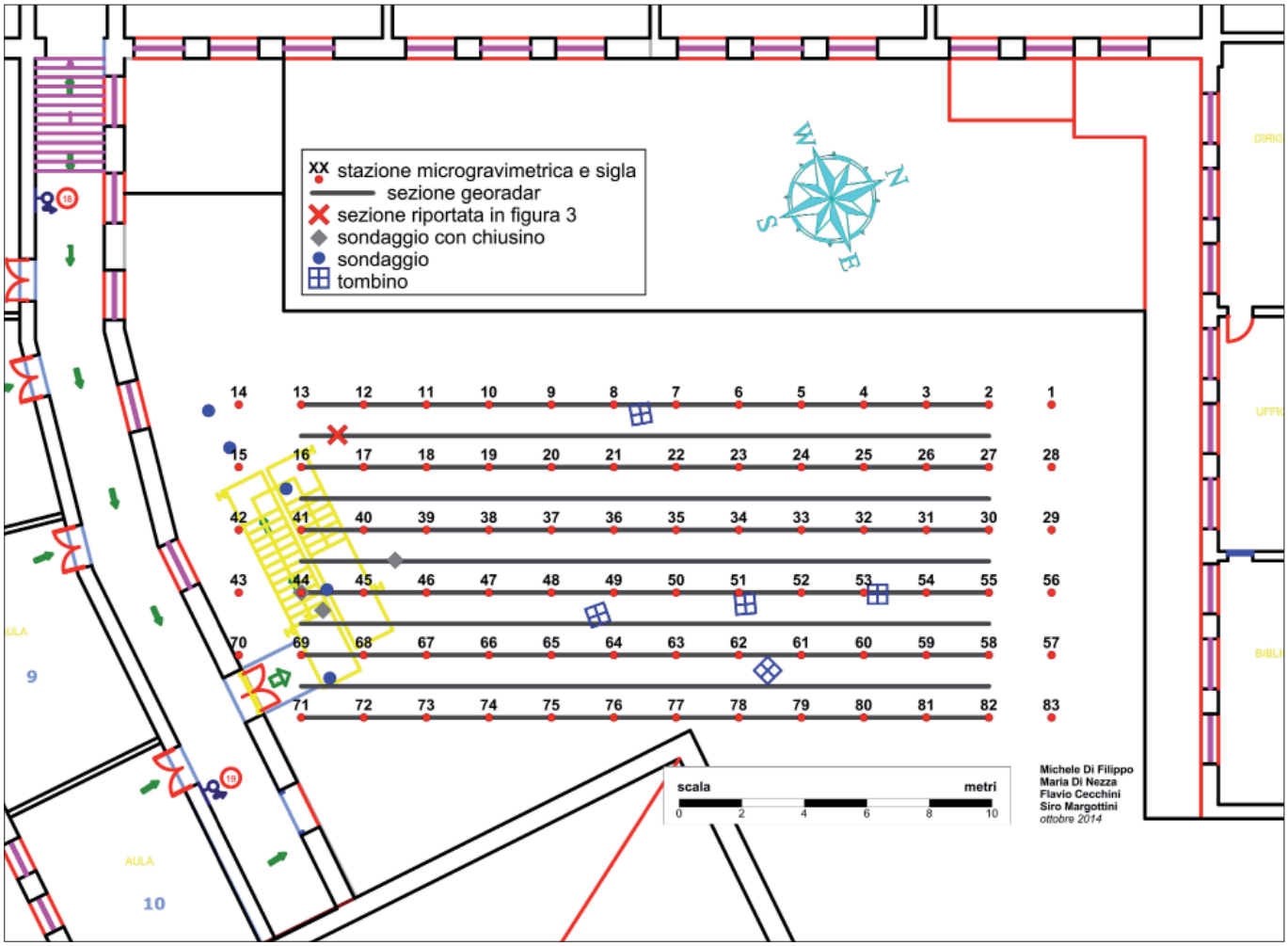


Figura 2 – Schema dell'area investigata del cortile con ubicazione delle singole stazioni e dei tracciati utilizzati per i vari metodi di indagine geofisica

I prodotti vulcanici sono il risultato di sequenza complessa di fasi eruttive con notevoli differenze nello stile dell'attività. La letteratura (Fornaseri *et al.*, 1963; De Rita *et al.*, 1988; Trigila *et al.*, 1995; Freda *et al.*,1997;

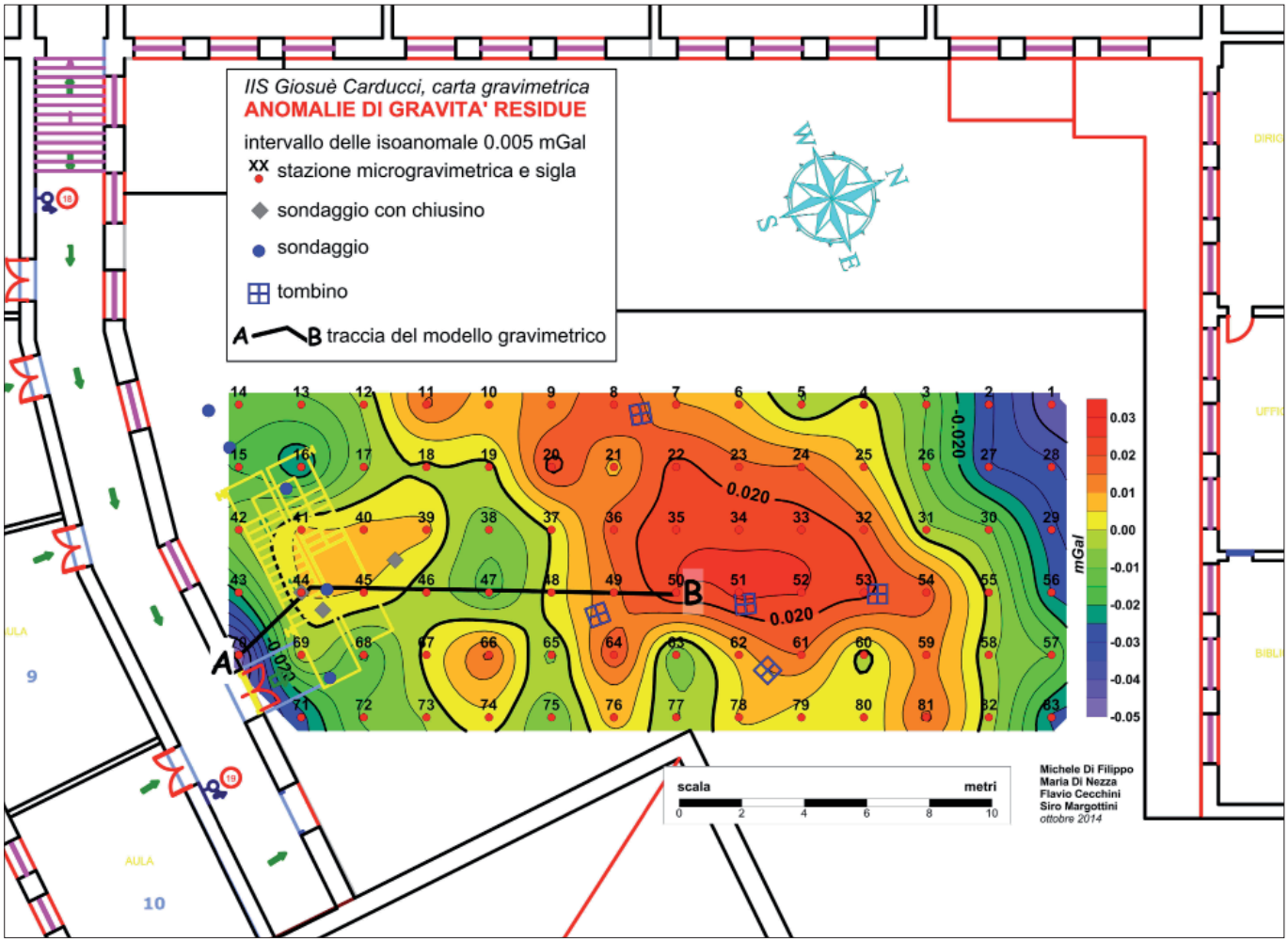


Figura 3 – Scuole Via Asmara (Municipio II): Carta delle anomalie gravimetriche residue sovrapposta all'ubicazione delle singole stazioni gravimetriche e alla traccia gravimetrica

Marra *et al.*, 2009) riconosce almeno tre fasi principali o litosomi (Giordano *et al.*, 2006): il Tuscolano-Artemisio fase (600-350 ka), la fase di Faete (350-270 ka) e la fase finale idromagmatica (200-36 ka).

La rete di cavità dove è ubicato l'edificio scolastico (Ventriglia, 2002; Nisio *et al.*, 2017) è situato all'interno dei prodotti vulcanici della fase Tuscolano-Artemisio. Questa fase è stata caratterizzata da un'attività altamente esplosiva che ha emesso volumi molto grandi (circa 280 km^3) di depositi di flusso piroclastico.

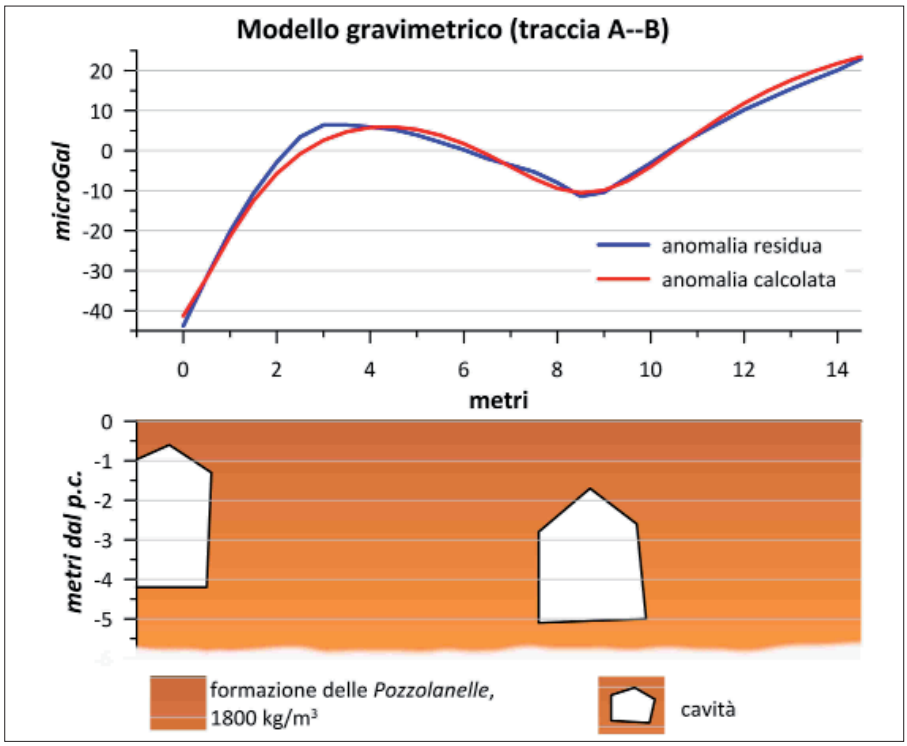


Figura 4 – Modello gravimetrico interpretativo con relativo confronto tra anomalie residue e calcolate

In questo settore la stratigrafia è abbastanza uniforme ed è nota ed è ascrivibile alla formazione di *Villa Senni* (VSN): al tetto si incontrano le *Pozzolanelle* (VSN2) con uno spessore di circa 5 m e il *Tufo Lionato* (VSN1) (2-3 m di spessore), divisi dalla parte sottostante da un paleosuolo di 2 m; poi si incontrano le *Pozzolane Nere* (5-6 m di spessore) separato dalle sottostanti *Pozzolane Rosse* da un altro paleosuolo (1 m) (Pleistocene medio).

Il sistema complesso di cavità del Municipio V **è** stato mappato con dettaglio da diversi gruppi Speleologici Romani (Bianchi Fasani *et al.*, 2011). Esistono due livelli distinti ma connessi. Quello superiore, situato a circa 10 m sotto dal livello del suolo, è stato scavato nell'unità delle *Pozzolana Nera* e ha al tetto un palaosolo 1. Il secondo livello è di circa 17 m dalla superficie, nell'unità di *Pozzolana Rossa*. I tunnel ad arco sono in genere alti 3 m e larghi 3 m; l'altezza massima registrata è di 7 m. Queste gallerie erano ascrivibili al sistema di cavità per l'estrazione delle pozzolane.

METODI DI INDAGINE

La complessità del sistema caveale anche a più livelli nel Municipio V e la continua criticità dovuta alla presenza di fenomeni di

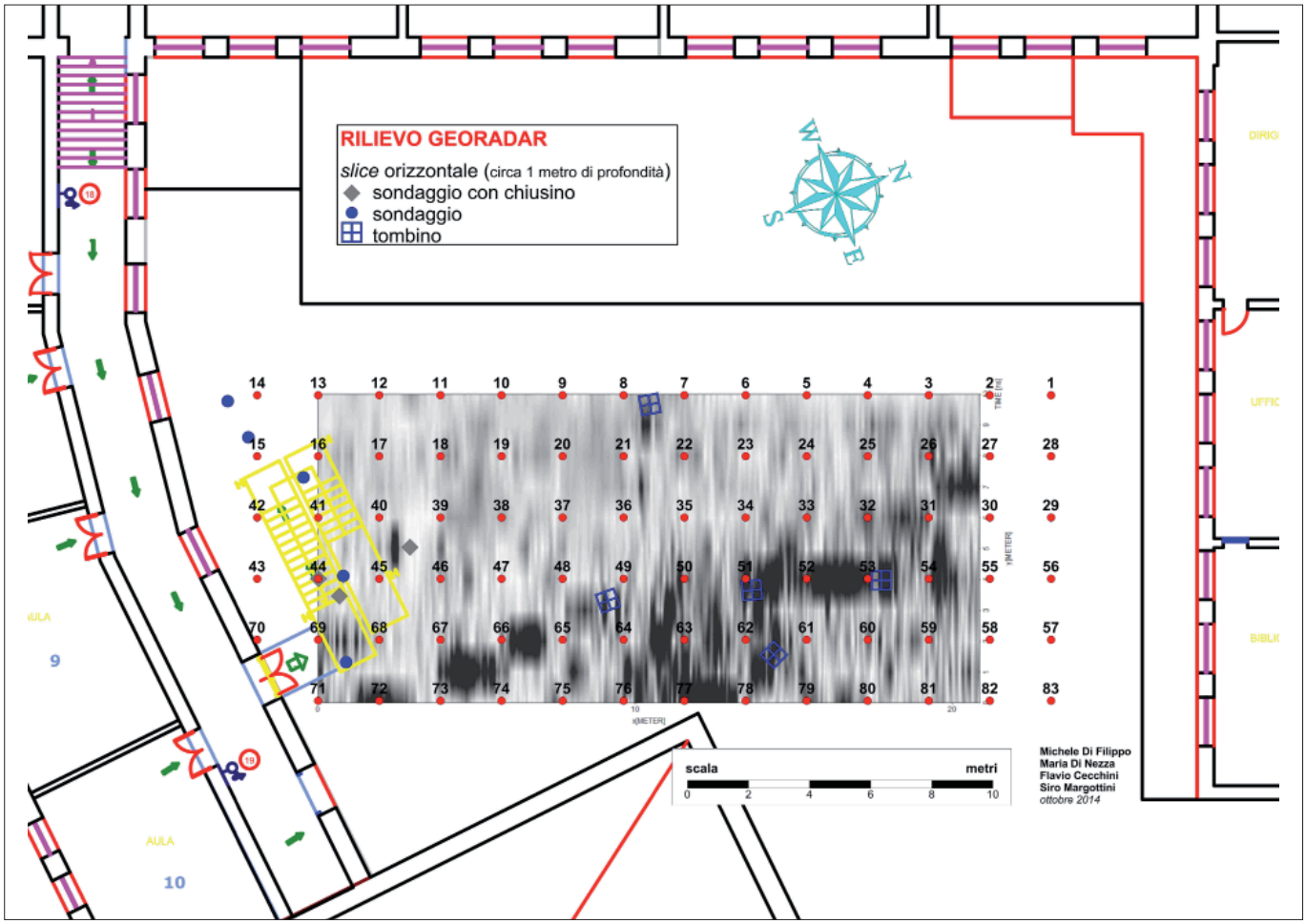


Figura 5 – Sezioni georadar con rispettive interpretazioni

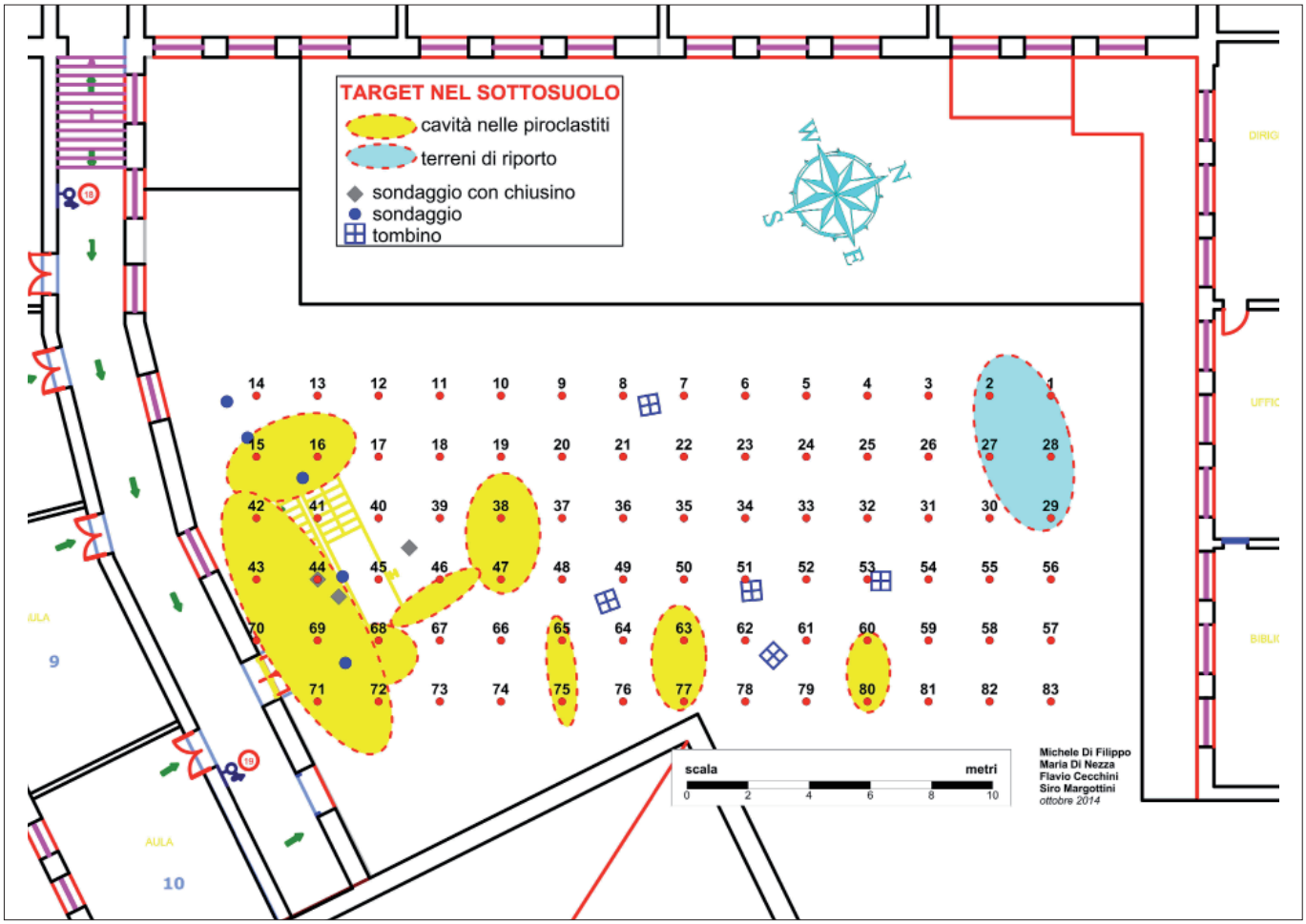


Figura 6 – Carta di sintesi dei target ottenuti dall'integrazione dei dati geofisici

sprofondamento, e la tipologia di successioni vulcaniche ampiamente cavate in passato rendono tale municipio a più alto rischio sprofondamento. Nel 2013, a qualche decina di metri dall'edificio scolastico ed in prossimità del muro di recinzione (via Cosimo Ridolfi), si è verificata l'apertura di una grossa voragine che ha coinvolto un'abitazione privata (*Fig.* 7). Tenendo conto che la scuola è ubicata in prossimità di Villa De Sanctis e nella zona prossimale del Distretto Vulcanico dei Colli Albani, e soprattutto del diverso grado di risoluzione in funzione della profondità, e della tipologia delle rocce geologiche nell'area, sono state impiegate tre diverse metodologie di prospezione: microgravimetrica, sismica e georadar.

A dicembre 2015, sono state eseguite 355 stazioni effettuate nell'area perimetrale l'edificio scolastico dell'I.I.S. Jean Piaget con una spaziatura tra le misure di circa 2 m (*Fig.* 8); tale valore risulta ottimale per l'individuazione di cavità e gallerie nell'estensione dell'area d'indagine, tenendo conto anche dell'impegno finanziario disponibile.

Infine sono stati eseguiti 13 profili georadar acquisiti in corrispondenza delle zone dove erano presenti anomalie gravimetriche negative. È stato utilizzato un apparato GSSI Sir10B con un'antenna con frequenza di 400 MHz.

RISULTATI

Dopo le elaborazioni delle misure di gravità e delle Anomalie gravimetriche è stata realizzata la mappa delle Anomalie Residue (*Fig.* 8). I valori di anomalia presentano un *range* diverso per entità (valori sia positivi che negativi) dalle Anomalie di Bouguer e hanno valori da -0.045 a +0.065 mGal e l'andamento delle isoanomale risulta molto più articolato; inoltre sono presenti zone con anomalie chiuse sia positive che negative.

I valori negativi riscontrati in *Fig.* 8, indicati con i punti 1, 2, 3, 4, 5, e 7 sono dovuti alla presenza di materiale meno denso delle *Pozzolanelle*; in alcuni casi la minor densità può essere causata da materiale poco addensato ubicata in prossimità delle fondazioni dell'edificio, punti 3 e 5. Nel caso del punto 4, la minor densità è imputabile alla presenza di materiale di riempimento utilizzato per costruire una piccola rampa.



Figura 7 – La voragine apertasi tra la scuola ed il muro di recinzione dell'abitazione posta a Via Cosimo Ridolfi come si presentava nel dicembre 2015

Al fine di studiare le proprietà elastiche del terreno sia in orizzontale che in verticale (ad es. Turker, 2004; Othman, 2005; Terzan *et al.*, 2006), nelle zone dove si ottenevano dei valori di minimo gravimetrico, sono stati eseguiti dei profili di sismica a riflessione. È stato utilizzato un sistema sismografo di registrazione a 24 canali (Geometrics Geological Seismograph) con geofoni verticali a 14 Hz (Geospace).

La linea sismica AB (*Fig.* 8 e *Fig.* 9) che si estende 25 m con 24 geofoni separati a intervalli di 1 m. Il tempo di registrazione totale per ogni colpo 512 ms. Le curve *travel-time* e le corrispondenti sezioni trasversali dell'onda P sono stati stimati usando la tomografia Eikonale Wavepath (Schuster e Quintus-Bosz, 1993). Variazioni della velocità dell'onda P sismica sono state determinate a profondità di circa 9 m per limitare le profondità degli strati, le morfologie e le composizioni.

Negli altri casi, punti 1, 2, 7 i valori negativi dovrebbero essere motivati dalla presenza di cavità vuote o parzialmente vuote nel sottosuolo.

Il punto 1, dove è presente un minimo gravimetrico di -0.20 mGal, è stato attraversato sia da una sezione sismica a riflessione sia da una sezione GPR (*Fig.* 9).

La sezione sismica è stata costruita lungo una traccia di 22 metri con i geofoni ogni 2 metri (*Fig.* 8). La profondità di indagine è stata di 8 metri. La sezione A-B mostra nel primo metro un terreno omogeneo, ma oltre i 2 metri di profondità si presenta articolata da numerose riflessioni sfalsate tra loro, ne consegue che non abbiamo un substrato omogeneo e massivo come può essere la formazione delle *Pozzolanelle*. Le zone in blu nella sezione sismica rappresentano i livelli dove avviene un cambiamento dell'impedenza sismica e coincidono con zone di minimo gravimetrico.

Il radargramma 5, *Fig.* 9, nel punto dove interseca la sezione sismica A-B mostra un'interruzione della stratificazione suborizzontale ad opera di un'iperbole, marcata dalla linea arancione; al di sotto dell'iperbole sono presenti numerosi piccoli disturbi della riflessione.

Non sono state riscontrate anomalie dovute a cavità con dimensioni analoghe a quelle esistenti a poche decine di metri negli sprofondamenti di via Cosimo Ridolfi.

Simulando l'entità delle anomalie generate da una galleria vuota con un diametro di 4 metri e con la volta a 3.5 m di profondità e di forma cilindrica, si otterrebbe un valore di anomalia negativa di forma allungata di circa -0.080 mGal, entità che non si riscontra sulla tavola delle Anomalie Residue, né come valori e né come forma e dimensioni.

Tuttavia è stata tentata un'indagine diretta nel sottosuolo, entrando dalla zona del crollo di via Cosimo Ridolfi. Da lì si è spinti nel sottosuolo per circa una ventina di metri verso l'edificio scolastico. In prossimità della verticale del muro perimetrale della scuola non si è potuto proseguire a causa della presenza un grosso accumulo di materiale di natura eterogenea. Tale accumulo è presente quindi sotto la parte nord del cortile scolastico in una cavità colmata forse al tempo della costruzione dell'edificio, primi anni '30.

Pertanto le anomalie negative riscontrate nel cortile sono ascrivibili alla bassa densità del materiale di accumulo a debole profondità, primi 3-4 metri, come si evince anche dalla sezione sismica a riflessione A-B e dalla sezione GPR n. 5 in *Fig.* 9.

Il motivo delle zone di anomalia negativa alla base dell'edificio è dovuto alla presenza di materiale poco addensato come si evince dalla sezione GPR n. 13 riportata sempre in *Fig.* 9.

L'anomalia negativa, 3 in *Fig.* 8, è causata in parte dalla presenza di materiali di riporto che costituiscono una rampa. Le anomalie 1, 2 e 4 sarebbero causate da cavità presenti nel sottosuolo ma colmate totalmente o parzialmente da materiali con densità minore del contesto. Non si esclude che ci potrebbero essere anche dei piccoli vuoti tra il cumulo dei materiali e la volta delle cavità; per tale motivo occorrerebbe un sondaggio esplorativo. Qualora si accertasse per mezzo del sondaggio questa ipotesi, bisognerebbe colmare le cavità tra la volta e il cumulo intercettate, in quanto la volta è costituita dalla formazione delle *Pozzolanelle*, che per le sue caratteristiche geotecniche non si comporta come una formazione tufacea.

Questa situazione è possibile constatarla anche nella parte sommitale del crollo av-

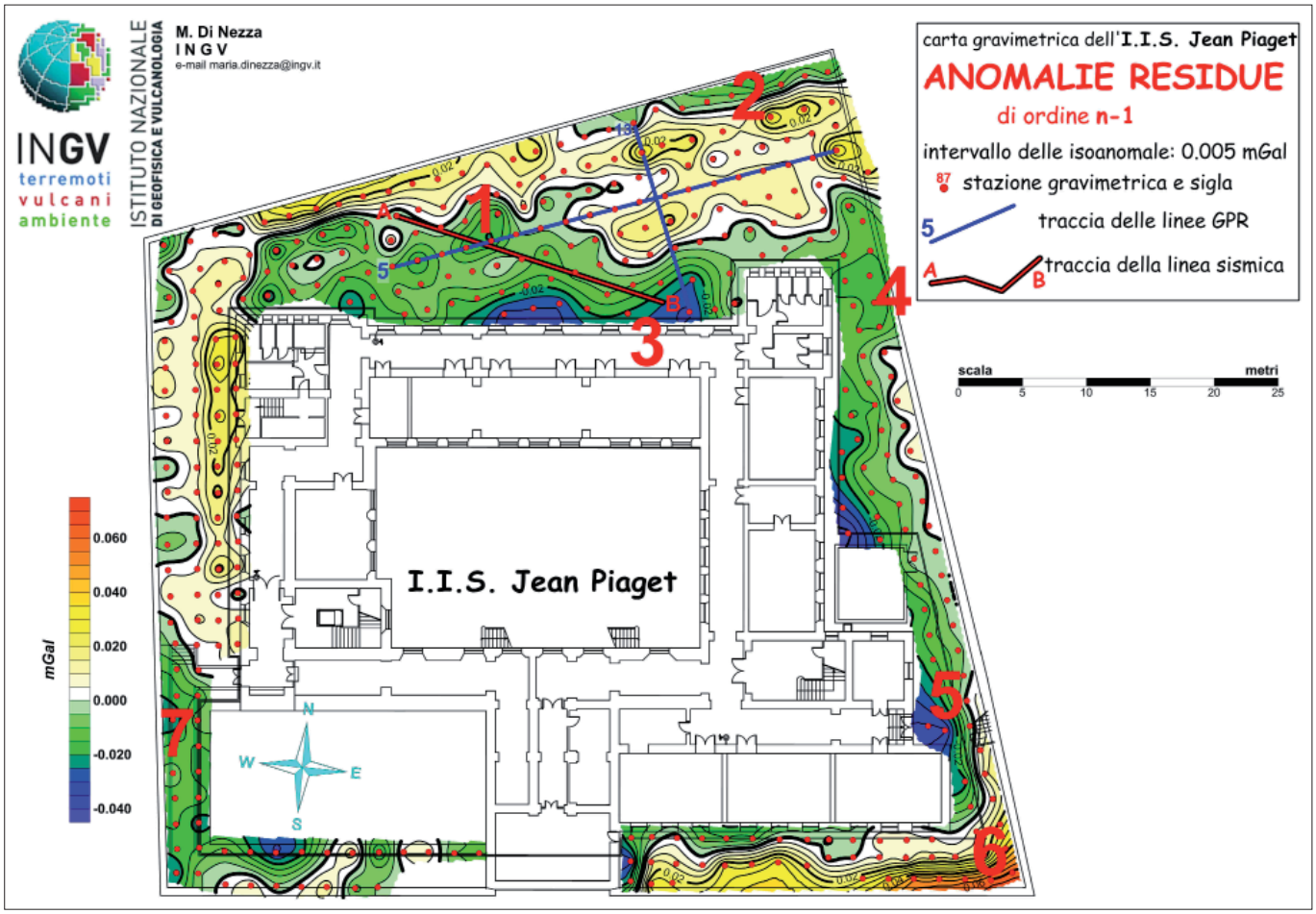


Figura 8 – Schema dell'area test con ubicazione delle singole stazioni e dei tracciati utilizzati per i vari metodi di indagine geofisica. Carta delle Anomalie residue. I punti 1, 2, 3, 4, 5, e 7 sono rappresentati dalla presenza di materiale meno denso

venuto a via Cosimo Ridolfi: qui è possibile osservare un spessore di suolo di circa un metro sovrapposto alla volta della cavità e la discarica di materiale accumulatosi nel corso degli anni.

Dall'analisi dei risultati microgravimetria, simica e GPR mostrati, sarebbe opportuno prendere visione dei diari riferiti al periodo di costruzione della scuola nei primi anni trenta.

Inoltre sarebbe opportuno effettuare dei sondaggi geognostici, con le dovute cautele. Un sondaggio andrebbe ubicato nel punto 1 di *Fig.* 8: in base ai dati geofisici ci sarebbe una cavità parzialmente colmata da riporti. L'altro

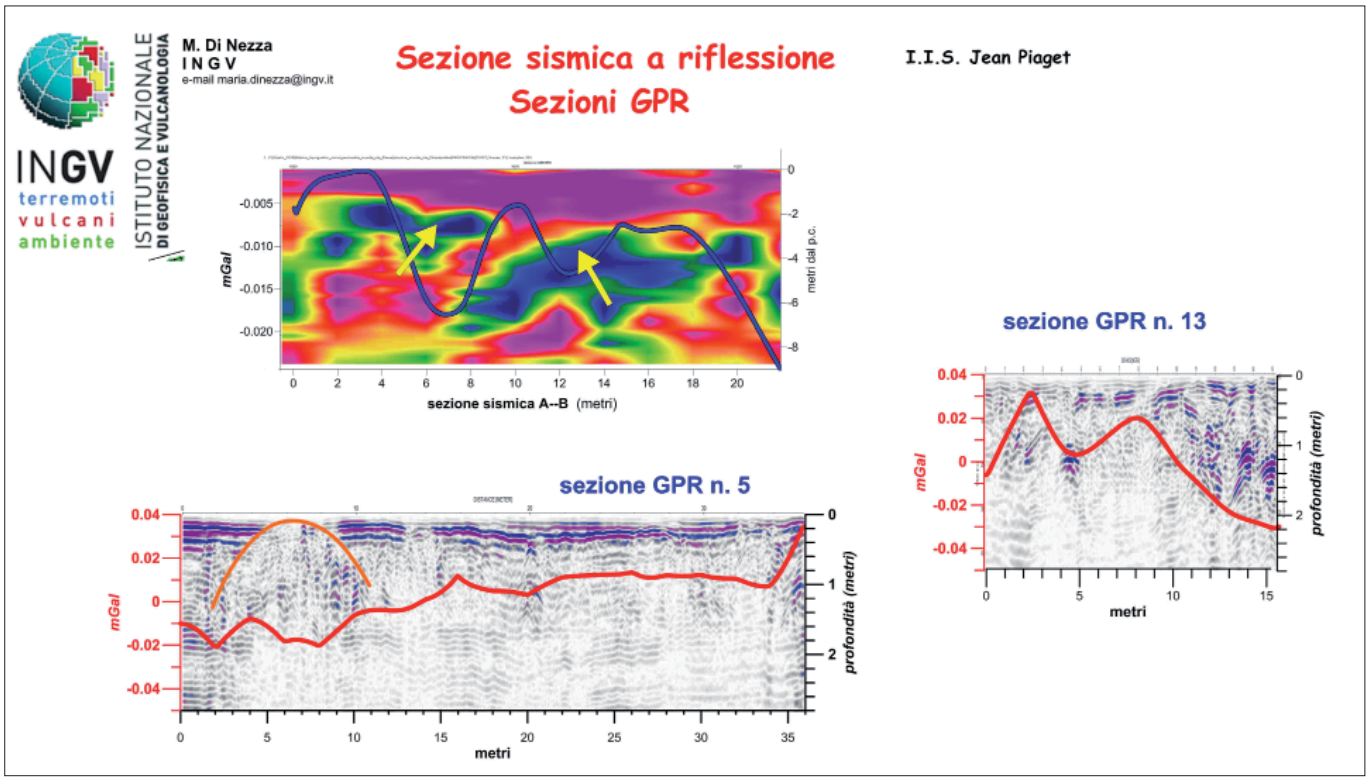


Figura 9 – Sezione congiunta anomalie di gravità e modello gravimetrico, sismica riflessione lungo il profilo A-B e radargramma

sondaggio va ubicato nella zona di massimo gravimetrico vicino al punto 2 al fine di confermare i dati della prospezione microgravimetrica.

CONCLUSIONI

In ambito urbano, quando si eseguono studi geologici, non sempre le campagne di indagini tradizionali, impostate sulla base dei dati ricavati dalla geognostica e dalla geotecnica, riescono ad offrire un quadro esauriente ed esaustivo per comprendere le cause relative al dissesto.

L'assetto geomorfologico attuale della città di Roma (Del Monte *et al*., 2016) è data dalla risultante delle condizioni paleogeografiche prima che fosse fondata Roma stessa, e dalle continue modifiche naturali e/o antropiche che hanno agito sul territorio negli ultimi 3000 anni.

In un contesto urbano, il riconoscimento di eventuali sistemi caveali in profondità non censiti risulta molto complesso soprattutto se le proprietà delle rocce geologiche del sottosuolo sono molto variabili sia in orizzontale che in verticale; inoltre un ruolo determinante lo assume anche la natura dei corpi geologici nonché i loro spessori. Molto spesso in un contesto come il territorio romano si assiste alla presenza anche di depositi antropici ingenti (Ventriglia, 1971, 2002; Conato *et al*., 1980; Corazza e Marra, 1995; Marra e Rosa, 1995a, b) che direttamente o indirettamente possono incidere sul formarsi di fenomeni di sprofondamento.

Il riconoscimento dei fattori predisponenti e delle cause innescanti gli sprofondamenti e la previsione della possibile evoluzione dei fenomeni non può essere in gran parte dei casi effettuato con l'applicazione di una sola metodologia di indagine indiretta, soprattutto in mancanza di dati geognostici del sottosuolo.

L'indagine geofisica realizzata, utilizzando la metodologia georadar, oltre a fornire un'indicazione indiretta dello spessore dei terreni di riporto, ha consentito di indicare la presenza di cavità poste a modesta profondità o di aree caratterizzate da un detensionamento dei terreni imputabile a probabili fenomeni di sifonamento. Naturalmente l'esecuzione di tali profili è scaturita laddove le anomalie gravimetriche indicavano zone a minor densità dei terreni. Una sempre più dettagliata conoscenza della natura dei terreni è stata fornita dalle indagini sismiche che hanno permesso di avere un quadro più dettagliato anche della profondità di indagine.

La natura litologica-stratigrafica e geotecnica dei terreni possono essere evidenziate senza dubbio dalle indagini geognostiche che nelle aree urbane contribuiscono ad evidenziare in maniera inequivocabile il processo di urbanizzazione che costituisce il più importante e significativo processo di trasformazione del territorio.

BIBLIOGRAFIA

Argentieri A., Occhigrossi B.C., Piro M., Rotella G. (2018), *Natural and anthropogenic cavities and sinkholes in Rome metropolitan area: from geological and speleological research to land management,* Rend. Online Soc. Geol. It., 44, pp.104-111, https://doi.org/10.3301/ROL.2018.15.

Bianchi Fasani G., Bozzano F., Cercato M. (2011), *The underground cavity network of south-eastern Rome (Italy): an evolutionary geological model oriented to hazard assessment,* Bull. Eng. Geol. Environ., 70, pp.533-542.

Ciotoli G., Corazza A., Finoia M.G., Nisio S., Serafini R., Succhiarelli C. (2013), *Sinkholes antropogenici nel territorio di Roma Capitale*, Mem. Descr. Carta Geol. d'It. XCIII, pp.143-182.

Ciriaco G., Lombardi G., Mariottini M. (2008), *Pietre e costruito della città di Roma: dall'antichità ai giorni nostri*, Mem. Descr. Carta Geol. Ital., 80(1), pp.273-406.

Conato V., Esu D., Malatesta A., Zarlenga F. (1980), *New data on the Pleistocene of Rome*, Quaternaria, 22, 357-362.

Corazza A., Marra F. (1995), *Carta dello spessore dei terreni di riporto*, In: La geologia di Roma: il centro storico, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 50, tav. 13.

D'Agostino G., Desogus S., Germak A., Origlia C., Quagliotti D., Berrino G., Corrado G., D'Errico V., Ricciardi G. (2008), *The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology*, Ann. Geophys., 51 (1), 39-49.

De Rita D., Funiciello R., Parotto M. (1988), *Carta Geologica del Complesso Vulcanico dei Colli Albani (scala 1:50.000)*, Progetto Finalizzato Geodinamica. CNR, Roma.

De Rossi G.B. (1905), *Le catacombe romane*, Edizione Piazza Grazioli (Palazzo Doria), Roma.

De Vita P., Angrisani A.C., Di Clemente E. (2008), *Engineering geological properties of the Phlegraean pozzolan soil (Campania region, Italy) and effect of the suction on the stability of cut slopes*, Ital. J. Eng. Geol. Env., 2, 5-22.

Del Monte M., D'Orefice M., Luberti G.M., Pica A., Vergari F. (2016), *Geomorphological classification of urban landscapes: the case study of Rome (Italy)*, Journal of maps, 12, no. S1, pp.178–189 http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2016.1187977.

Di Nezza M. (2007), *Struttura e dinamica del distretto vulcanico dei Colli Albani da misure gravimetriche: implicazioni geodinamiche e vulcanologiche,* (PhD Thesis). Università "Sapienza" di Roma.

Fornaseri M., Scherillo A., Ventriglia U. (1963), *La regione vulcanica dei Colli Albani: il Vulcano Laziale*, Cons Naz Ric (CNR), Rome.

Freda C., Gaeta M., Palladino D.M., Trigila R. (1997), *The Villa Senni Eruption (Alban Hills, Central Italy): the role of H2O and CO2 on the magma chamber evolution and on the eruptive scenario*, J. Volcanol. Geotherm. Res., 78, pp.103-120.

Funiciello R., Giordano G. (2008), *La nuova carta geologica di Roma: litostratigrafia e organizzazione stratigrafica,* Mem. Descr. Carta Geol. D'It., 80, pp.39-85.

Funiciello R., Giordano G., Mattei M. (2008), *Carta Geologica del Comune di Roma,* Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 80, Firenze.

Giordano G., De Benedetti A.A., Diana A., Diano G., Gaudioso F., Marasco F., Miceli M., Mollo S., Cas R.A.F., Funiciello R. (2006), *The Colli Albani mafic caldera (Roma, Italy): stratigraphy structure and petrology*, Journ. Volcanol. Geotherm. Res.,155, pp.49–80.

Jackson M., Marra F. (2006), *Roman stone masonry: volcanic foundations of the ancient city*, Am. J. Archeol., 110 (3), pp.403–436.

Karner D.B, Renne P.R. (1998), *40Ar/39Ar geochronology of Roman Volcanic Province tephra in the Tiber River valley: age calibration of middle Pleistocene sea-level changes*. Geol. Soc. Am. Bull.,110, 6, pp.740–747, Boulder.

Karner D.B., Marra F., Renne P.R. (2001), *The history of the Monti Sbatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome*, Journ. Volcanol. Geotherm. Res.,107, pp.185–219.

Lanzini M. (2018), *La geologia e le catacombe romane. Michele Stefano De Rossi (1834-1898), un geologo inventore*, Rend. Online Soc. Geol. It., 44, pp.88-95, https://doi.org/10.3301/ROL.2018.13

Marra F., Rosa C. (1995a), *Stratigrafia ed assetto geologico dell'area romana*, In: La Geologia di Roma, Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia, L, pp.50-118.

Marra F., Rosa C. (1995b), *Carta Geologica del Centri storico di Roma e Carta della Superficie di Letto delle Alluvioni Recenti*, Tavole fuori testo in AA. VV. M.D.C. Geol. d'Italia, Vol. L. Ist. Pol. e Zecca dello Stato, Roma.

Marra F., Karner D.B., Freda C., Gaeta M., Renne P. (2009), *Large mafic eruptions at Alban Hills volcanic district (Central Italy): chronostratigraphy, petrography and eruptive behaviour*, Journ. Volcanol. Geotherm. Res., 179, pp.217–232.

Nisio S., Allevi M., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Lanzini M., Roma M., Paolucci R., Stranieri I., Succhiarelli C. (2017), *Carta delle cavità sotterranee di Roma.*

Othman A. (2005), *Construed geotechnical characteristics of foundation beds by seismic measurements*, J. Geophys. Eng., 2, pp.126–138.

Schuster G., Quintus-Bosz A. (1993) *Wavepath eikonal traveltime inversion: theory*, Geophysics, 58 (9), pp.1314–1323.

Servizio Geologico Nazionale (2008), *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 374 "Roma".*

Tezcan S.S., Keceli A., Ozdemir Z. (2006), *Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity*, J. Geotech. Geol. Eng., 24, pp.203-218.

Trigila R., Agosta E., Currado C., De Benedetti A.A., Freda C., Gaeta M., Palladino D.M., Rosa C. (1995), *Petrology*, In: Trigila R (ed) The volcano of the Alban Hills. Universita` degli Studi di Roma "La Sapienza", Rome, Italy, pp.95-165.

Turker E. (2004), *Computation of ground bearing capacity from shear wave velocity*, In: Bergman, D., Inan, E. (Eds.), Proceedings, Tenth International Symposium on Continuous Models and Discrete Systems 10. Kluwer, Netherlands, pp.173-180.

Ventriglia U. (1971), *Caratteristiche Geotecniche dei terreni della città di Roma*, in Baldi, G. (Ed.), Special Volume: *La Geologia della città di Roma*, Rome, pp.187-225.

Ventriglia U. (2002), *Caratteristiche Geotecniche dei terreni del Comune di Roma*, in Cerbone (Ed.), Special Volume: Geologia del territorio del Comune di Roma, Rome, pp.39-106; pp.701-723.

Nuovi studi sulle necropoli etrusche di Tarquinia (VT) con GPR e Geoelettrica

New studies on the Estruscan Necropolis of Tarquinia (VT) with Resistivity method and GPR

Greta Brancaleoni
E-mail: greta.brancaleoni20@gmail.com

Silvia Castellaro
Università di Bologna
E-mail: silvia.castellaro@unibo.it

Luigi Perricone
Studio di Geologia Rigo Perricone
E-mail: studiorigoperricone@gmail.com

Parole chiave (*key words*): Immagini satellitari (*Satellite images*), GPR (*GPR*), Geoelettrica (*Resistivity Method*)

ABSTRACT

Abbiamo investigato con metodologie geofisiche del tutto non invasive un settore della necropoli etrusca di Monterozzi, Tarquinia (VT). Le tecniche utilizzate, per l'accertamento di camere sepolcrali nel sottosuolo, sono state il GPR e la geoelettrica. Dalla campagna effettuata nel mese di giugno 2016 è emerso che: I) le camere mortuarie, scavate direttamente nella roccia calcarenitica, si possono suddividere in superficiali (profondità maggiore di 2 m e comprendenti un *dromos* di accesso) e profonde (profondità maggiore di 5 m e di dimensioni maggiori rispetto alle prime); II) il metodo GPR permette un'elevata risoluzione delle strutture nascoste a scapito della profondità di investigazione, inoltre è affetto da disturbo proveniente da artefatti antropici posti in superficie; III) il metodo resistivo adottato permette esplorazioni profonde e risulta molto potente nella localizzazione delle cavità sepolte; IV) le strutture archeologiche nel sottosuolo producono sulla superficie topografica delle forme ben riconoscibili per il diverso contenuto in umidità rispetto all'intorno, di ausilio quindi al presente studio è stata l'analisi delle immagini da satellite di Google Earth; V) l'approccio di lavoro che ha combinato le due diverse metodologie sia tra loro sia con le immagini digitali risulta molto vantaggioso ai fini della presente ricerca.

INTRODUZIONE

La necropoli etrusca di Monterozzi, Tarquinia (VT), patrimonio dell'Unesco dal 2004, vanta più di 6000 sepolture funerarie tra cui circa 200 dipinte di inestimabile valore.

Il fascino per l'antico popolo Etrusco e per ciò che ci ha lasciato in eredità ha da sempre suscitato forte interesse, sia in ambito umanistico che scientifico. Per tale motivo, il sito archeologico è stato soggetto a molte fasi di ricerca succedutesi nel tempo dagli inizi del Rinascimento fino ad arrivare ai giorni nostri. I target più ambiti sono da sempre stati le tombe a camera dipinte e le suppellettili sepolcrali di cui disponevano.

Sul ricalco delle prime grandi campagne di esplorazione geofisica, che proprio su questo territorio videro una delle loro prime sperimentazioni a cavallo tra gli anni '50 e 60' del 1900, abbiamo eseguito dei rilevamenti con metodologie geofisiche del tutto non invasive e di ultima generazione. Le indagini sono state realizzate in due lotti assegnatici dalla Soprintendenza dei Beni Culturali dell'Etruria Meridionale. Questi sono ubicati nel settore orientale alle pendici della necropoli Monterozzi, situato ad Est della cittadina di Tarquinia, vicino alla località Pisciarello. L'area assegnata si estende per circa 37000 m^2 ed è compresa tra le famose Tomba degli Auguri (VI secolo a.C.) e Tomba del Pulcinella.

Propriamente, abbiamo applicato i metodi geolettrico e GPR (Ground Penetrating Radar) e la pianificazione delle linee da esplorare si è avvalsa dell'ausilio di immagini da satellite reperite da *Google Earth*, le quali suggeriscono - ad una lettura attenta - diversi segni riconducibili alla presenza di artefatti sotterranei.

Il fine pratico è quello di individuare le strutture archeologiche nascoste nel sottosuolo, ma il vero intento del lavoro è di sperimentare le metodologie che meglio si adattano alla ricerca dei target presenti nel sito specifico. Degno di nota è il fatto che la necropoli per la prima volta venga investigata con una metodologia (GPR) mai utilizzata nel sito specifico e che i dati geoelettrici vengano acquisiti ed elaborati secondo le nuove tecniche tomografiche. L'utilizzo delle metodologie geofisiche non invasive ha permesso l'accertamento di 17 camere sepolte e un numero cospicuo di *dromos* che conducono a probabili cavità nel sottosuolo.

SCOPO E FASI DEL LAVORO

Il lavoro si è concentrato sull'analisi combinata dei risultati ottenuti dalle indagini GPR e di tomografia elettrica, particolarmente nei settori in cui sono stati rinvenuti i più importanti manufatti sepolti. Lo scopo è di definire un metodo che possa condurre ad una buona localizzazione delle camere sepolcrali e ad individuarne le caratteristiche, in vista di un possibile e ampio progetto di ricerca archeologica nel sito.

I vantaggi e gli svantaggi di ciascuna tecnica impiegata saranno evidenziati nell'elaborato. In generale si osserverà che l'applicazione combinata dei due metodi geofisici porta a risultati molto soddisfacenti.

Il lavoro si è svolto nel seguente modo:

i. Una fase preliminare di osservazione e analisi delle immagini satellitari provenienti da *Google Earth*, la quale ha permesso una migliore pianificazione delle linee da indagare con i metodi geofisici;
ii. Impiego della tecnica GPR lungo 5 sezioni che hanno coperto in modo ampio l'area di studio. Ciò ha permesso di individuare immediatamente i settori più interessanti dal punto di vista archeologico;
iii. Utilizzo della metodologia elettrica limitata ai settori in cui il georadar aveva registrato maggiori anomalie nel sottosuolo;
iv Elaborazione e rappresentazione dei risultati ottenuti: per una metodologia i dati sono stati rappresentati in radargrammi per l'altra in tomografie elettriche 2D.
v. Analisi e raffronto dei dati che ha permesso di individuare un metodo virtuoso ai fini del presente lavoro.

FORMAZIONI ARCHEOLOGICHE

Le formazioni archeologiche presenti sono costituite da camere sepolcrali di differente età e tipo, ricavate direttamente nella roccia a diverse profondità (in un intervallo compreso tra 10 e 20 m).

Ai fini del presente lavoro se ne descrivono unicamente tre:

- Il tipo più comune ma anche con il potenziale di interesse maggiore è la "tomba a camera" di tipo classico. Le tombe più antiche sono costituite da un unico loculo dove veniva inumata una sola coppia per poi passare a sistemi più evoluti di camere in cui poteva venire sepolta l'intera famiglia. L'accesso inclinato alla camera "*dromos*" veniva scavato dalla superficie e poi riempito di materiale di riporto.
- Il secondo tipo è la "tomba a camera" di tipo arcaico strutturalmente molto simile al precedente ma di più antica età, più superficiale e con il tetto non ricavato di-

rettamente dalla roccia ma ricoperto con lastre calcaree.
- La "tomba a fossa" costituisce la terza tipologia. Essa veniva scavata verticalmente nella roccia, richiusa con delle lastre calcaree e di norma completamente riempita con terreno e pietrisco.

La maggior parte degli ipogei veniva poi ricoperta in superficie dai tumuli, delimitati da bassi muretti circolari in pietra.

METODOLOGIE APPLICATE

Immagini Satellitari

La fase di pianificazione l'indagine geofisica si è avvalsa dell'ausilio di immagini satellitari reperite dall'applicazione di *Google Earth*.

Dall'osservazione di dette immagini e dallo studio bibliografico dell'area, si desume che il sito è caratterizzato da formazioni archeologiche superficiali. Nello specifico da camere sepolcrali la cui massima profondità raggiunge i 10-15-20 m e da forme tumulari a circa 1-1.5 m dall'attuale piano campagna (p.c.), indicando così il vecchio piano di calpestio. La vicinanza al p.c. delle strutture comporta dei vantaggi: i resti sepolti infatti influiscono sulla distribuzione dell'umidità del terreno e sullo sviluppo della vegetazione (Lerici, 1961).

Dall'osservazione delle immagini, si possono osservare delle forme circolari più chiare sulla superficie topografica. Esse sono espressione dei resti dei tumuli posti ad indicazione del loculo sepolcrale. Si distinguono dall'ambiente circostante grazie al materiale più poroso (materiale detritico costituito da clasti di roccia calcarenitica e/o tufitica) di cui sono costituite e agli ipogei sottostanti che permettono un rapido drenaggio, risultando così aree meno umide.

Le piccole forme rettangolari più scure presenti all'interno dei cerchi sono generalmente dovute alla trincea d'accesso costituita da materiale di riporto più fine e quindi meno poroso e più umido, interessate da un maggiore sviluppo della vegetazione.

Osservando le immagini e la topografia si è tentato di acquisire il dato geofisico là dove il terreno presentava tumuli non troppo ravvicinati, in modo da mirare a ricostruire la tipologia e geometria della formazione archeologica.

Le forme tumulari del terreno non corrispondono esattamente alla posizione delle camere funerarie tuttavia esse possono dare un buon contributo in fase di pianificazione delle indagini (Lerici, 1960).

Non si può definire un piano generale della disposizione dei tumuli: formazioni di grandi dimensioni si trovano a fianco a quelle più piccole a testimonianza che la gerarchia sociale veniva meno nella città dei defunti. Non tutte le zone aride possono essere associate a camere sepolcrali nel sottosuolo.

Metodo Elettrico

La metodologia geoelettrica, sfruttando le differenze delle proprietà elettriche delle rocce, è stata scelta poiché le camere sepolcrali, essendo strutture cave, si prestano bene al riconoscimento per la loro elevata resistività rispetto all'intorno. Inoltre il metodo consente di pianificare le indagini alla profondità più consona per l'intercettazione dei target presenti. Il dato acquisito si può facilmente interpretare grazie alla acquisizione ed inversione di tipo tomografico.

Sono stati acquisiti tre profili elettrici, utilizzando un resistivimetro a 48 canali (*Fig.* 1). È stato scelto un interasse elettrodico di 3 m per garantire un'adeguata profondità di indagine e una buona accuratezza nella determinazione delle variazioni laterali di resistività (risoluzione laterale di circa 1 m).

La configurazione di energizzazione e misure scelta per i tre profili è la Wenner, con equi-distanza interelettrodica di 3 m, in modo tale da raggiungere la massima profondità di 23 m. Il tempo di acquisizione per ciascun profilo è stato di 10 min, mentre il tempo necessario per la preparazione della strumentazione è di circa 40 min per traccia.

Lo strumento utilizzato è un resistivimetro Electra (MoHo srl) a 48 canali composto: da un'unità centrale (2 kg inclusa la batteria), da connettore ad un PC e da un leggero cavo lungo il quale sono disposti piccoli moduli da collegare agli elettrodi. I moduli hanno funzione di immettere corrente e ricevere il segnale, amplificandolo e digitalizzandolo direttamente in corrispondenza degli elettrodi. Il segnale viene trasmesso all'unità centrale in forma digitale. Alcune caratteristiche tecniche sono le seguenti:
- batteria di alimentazione da 12 V interna e ricaricabile;
- conversione analogico/digitale sincrona su tutti i moduli di energizzazione e misura;
- l'unità centrale ha dimensioni 24 x 20 x 8 cm;
- l'energizzazione avviene in corrente alternata a frequenza di 8 Hz per ridurre fenomeni di polarizzazione degli elettrodi;
- la corrente iniettata è stata di 10 mA;
- i moduli hanno dimensioni di 5 x 6 x 2 cm con ingresso commutabile;
- l'impedenza di ingresso è di 100 MΩ su 6 V di dinamica e 100 kΩ su 12 V di dinamica;
- il campionamento è sincrono su tutti i moduli a 256 Hz.
- la trasmissione del dato convertita al modulo centrale e al PC è continua e in tempo reale.

L'acquisizione e il pre-processing dei dati sono stati effettuati con il software Electra Manager 2.3.0 mentre l'inversione è state effettuata col software Res2DInv e ha permesso di visualizzare i dati in immagini a colori con valori 'reali' di resistività e profondità.

L'inversione si ottiene tramite una operazione matematica detta deconvoluzione ai minimi quadrati delle pseudo sezioni.

Metodo elettromagnetico GPR

L'altra metodologia utilizzata in sito è la tecnica GPR (Ground Penetrating Radar) non invasiva che consente di investigare il sottosuolo con maggiore rapidità nella fase di acquisizione del dato rispetto alla geoelettrica, non prevedendo l'utilizzo di fili elettrici collegati al terreno.

È la tecnica che, fra le metodologie geofisiche maggiormente utilizzate, sfrutta un ampio intervallo di frequenze (2 GHz - 20 MHz), di conseguenza la profondità massima di esplorazione varia da pochi cm ad alcune decine di metri. Nel caso specifico si è utilizzata un'antenna da 500 MHz che ha garantito, in funzione delle caratteristiche elettriche del sottosuolo, una profondità massima di 5 m.

La fase di acquisizione è consistita nel trascinare, lungo la superficie topografica, l'antenna schermata da 500 MHz contenente

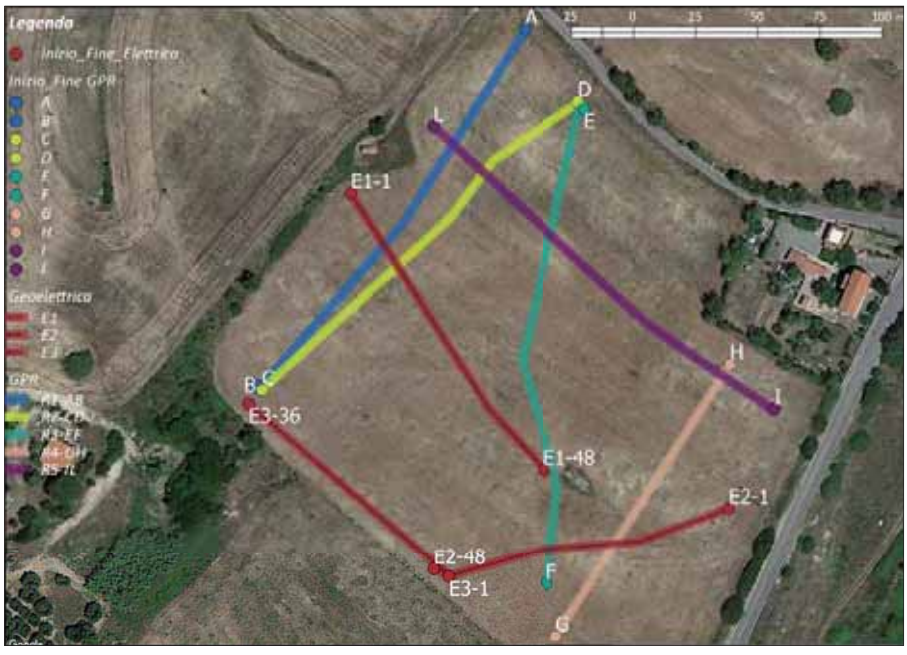


Figura 1 – Mappa che sintetizza l'ubicazione delle strisciate con la tecnica GPR e gli stendimenti geoelettrici.

un'unità trasmittente ed una ricevente, la cui distanza reciproca rimane fissa (offset costante). Il trasmettitore invia brevi impulsi elettromagnetici, ripetuti con continuità, le cui riflessioni vengono captate dal ricevitore. Mediante lo spostamento sul terreno, si acquisiscono i dati relativi ad una sezione radar, la quale viene memorizzata e visualizzata dalla periferica, tipicamente costituita da un personal computer portatile, sotto forma di radargramma.

La risoluzione della tecnica radar nel caso specifico è così calcolata:

- velocità delle onde radio di 1×10^8 m/s calcolata con una permittività elettrica di 6.5;
- frequenza centrale di 5×10^8 Hz ne risulta una di 2×10^{-1} m;
- una larghezza dell'impulso di 2×10^{-9} s^{-1};
- se si pone una distanza del target a profondità 2 m, la risoluzione laterale risulta di 5×10^{-1} m;
- la risoluzione radiale è di 5×10^{-2} m.

Sulla base di quanto ricavato sopra, la metodologia utilizzata riesce nel sito a discriminare target con una distanza reciproca maggiore o uguale di 50 cm, se posti alla stessa profondità. In linea teorica possono essere identificati i riflettori che tra loro sono distanziati di 5 cm o più sulla verticale. Ne consegue che, ai fini dell'individuazione di camere sepolte, la metodologia permette una grande risoluzione delle stesse.

Un vincolo della metodologia nel sito specifico può essere fornito da quelle tipologie di tombe a doppio tetto spiovente per cui l'onda, che viene riflessa, può subire una conversione tale da non poter essere captata dall'antenna ricevente, con il risultato di avere un orizzonte nascosto.

L'indagine è stata effettuata a offset-costante. In questa configurazione le due antenne (sorgente – ricevitore) sono poste a una distanza costante (0.35 m) per tutta la fase di acquisizione. Gli impulsi inviati dall'antenna risultano regolati e controllati da un odometro secondo intervalli di spazio definiti. Questo metodo si adatta bene quando si conducono indagine su linee pressoché rettilinee come in questo caso (Annan, 2009).

Il georadar utilizzato è della serie Zond System con antenna da 500 MHz, costituito da un odometro conta distanza (capace di regolare l'emissione del segnale e a definire la lunghezza del profilo), una batteria di alimentazione, un cavo da 3 m con cui l'antenna risulta collegata all'unità centrale di acquisizione al computer. Il software Prism2 consente la visualizzazione del dato in tempo reale.

Il dispositivo hardware ha le seguenti caratteristiche tecniche fornite dalla casa costruttrice:

- Corrente in ingresso 0.35 A @ 12 V DC via cavo dall'unità di controllo
- Dimensioni: 72x23.5x12 cm
- Peso: 5.2 kg
- Sensibilità del ricevitore: 120mcV
- Guadagno del ricevitore: 10 dB
- Output del trasmettitore: 400 V
- Risoluzione e profondità: 0.5 x 7-10 m

Ad inizio procedura si tara il segnale in base al materiale da indagare. Si è impostato inizialmente un valore di ε, permeabilità elettrica, pari a 5, tipico di una sabbia asciutta.

Il dato GPR acquisito viene rappresentato attraverso un radargramma dove in ascissa viene espressa la distanza percorsa e in ordinata il tempo. Successivamente alla fase di elaborazione verrà effettuata la conversione tempo-profondità. I dati GPR grezzi sono stati analizzati e processati secondo la sequenza indicata:

- *Move-out correction*: operazione che corregge il tempo zero delle singole tracce sulla base dell'offset dell'antenna utilizzata;
- *Background removal*: operazione che elimina il rumore, il quale potrebbe nascondere eventuali segnali reali riflessi; il rumore si presenta nel profilo costituito da linee orizzontali che non variano in intensità e nella posizione nel tempo (Annan, 2009);
- *Time Gain*: per compensare la caduta di ampiezza del segnale con l'aumentare della profondità si applica una funzione gain tempo-dipendente, capace di recuperare l'ampiezza del segnale (Annan, 2009);
- *Ormsby Bandpass*: è un filtro passa banda che lavora lungo la traccia. Esso annulla le basse e le alte frequenze del segnale entro degli intervalli impostati dall'operatore. I parametri immessi sono 60 -140 Hz e 950-1050 Hz (valori ottenuti facendo lo spettro in frequenza dei radargrammi).

Con il metodo *Hyperbola* tarato sulla traccia acquisita, si è ricavato un valore della permeabilità elettrica più consono di 6.5, per i target di natura archeologica.

RISULTATI E CONFRONTO

In questo capitolo vengono descritti e confrontati i dati acquisiti con le due diverse metodologie, GPR e metodo della resistività elettrica, al fine di individuare discontinuità nel sottosuolo riconducibili a camere sepolcrali etrusche. Le informazioni raccolte sono state rappresentate, per la metodologia GPR, in radargrammi divisi ciascuno in progressive da 20 m con step di rappresentazioni di 0.5 m per la maggior parte di essi. Solo nei tratti finali la distanza tra gli step è 1.25 m. La tecnica GPR si presta bene per indagini di target superficiali, restituendo nei primi 5 m una risoluzione, che confrontata con i risultati della metodologia elettrica risulta evidentemente superiore. Gli aspetti positivi che la tecnica radar può apportare alla ricerca di formazioni archeologiche sono i seguenti:

- la velocità insita nel metodo di acquisizione;
- la restituzione del dato in profondità apparente in tempo reale;
- si presta bene all'individuazione di target dalle proprietà altoresistive, proprie delle camere sepolcrali;
- se il bersaglio si trova in una posizione favorevole, esso viene rappresentato molto chiaramente completo di tutte le sue componenti.

Di converso però è soggetto a comuni problemi di disturbo del segnale, derivanti da artefatti antropici che si possono trovare in superficie e dalla presenza della tavola d'acqua, che però nel caso di studio non c'era. Se il terreno si presenta con elevate proprietà conduttive la metodologia risulta affetta da fenomeni di attenuazione del segnale che comporta il mascheramento di eventuali target. Inoltre se nel mezzo investigato c'è la presenza di oggetti di natura differente ma con proprietà elettriche simili, in termini di permittività, essi non possono essere discriminati.

Per ciò che concerne la prospezione geoelettrica:

- i risultati sono rappresentati in tomografie a colori provenienti dalle moderne tecniche di inversione dei dati geofisici;
- si presta bene all'individuazione di cavità presenti nel sottosuolo;
- si aspetta un comportamento elettrico differente da parte delle formazioni archeologiche rispetto al mezzo in cui sono state scavate.

I loculi, in quanto vuoti, dovrebbero rappresentare zone ad elevata resistività rispetto all'intorno, a meno di cedimenti delle volte e relativi tombamenti della cavità. Un vantaggio di questa tecnica è quello di impostare la lunghezza dello stendimento e la spaziatura interelettrodica in riferimento alla profondità e alla risoluzione laterale che si desidera rispetto ai target di interesse. Una limitazione della metodologia potrebbe essere rappresentata dalla risoluzione spaziale dei target individuati.

Il modello geologico del sottosuolo si può schematizzare con la presenza del suolo agricolo, di potenza variabile fra 1.0 e 1.5 m, molto asciutto, costituito da clasti calcarenitici con granulometrie passanti da pochi mm a circa 10 cm di diametro. Questo insiste su banchi sub-orizzontali di calcarenite a grana variabile, per lo più grossolana, intervallata a livelli di calcarenite marnosa. Nelle facies più compatte, ad una profondità compresa tra i 10 e i 20 m, la roccia è stata lavorata per ricavarne loculi sepolcrali.

L'analisi dei radargrammi si è focalizzata su quei settori di maggior interesse ai fini della presente ricerca. In totale le anomalie individuate sono complessivamente 55. Il numero comprende per la maggior parte trincee di accesso, quattro gli oculi sepolcrali e target di dubbia interpretazione.

Le caratteristiche della strumentazione e del materiale hanno permesso di localizzare solo quelle formazioni che si trovano ad una

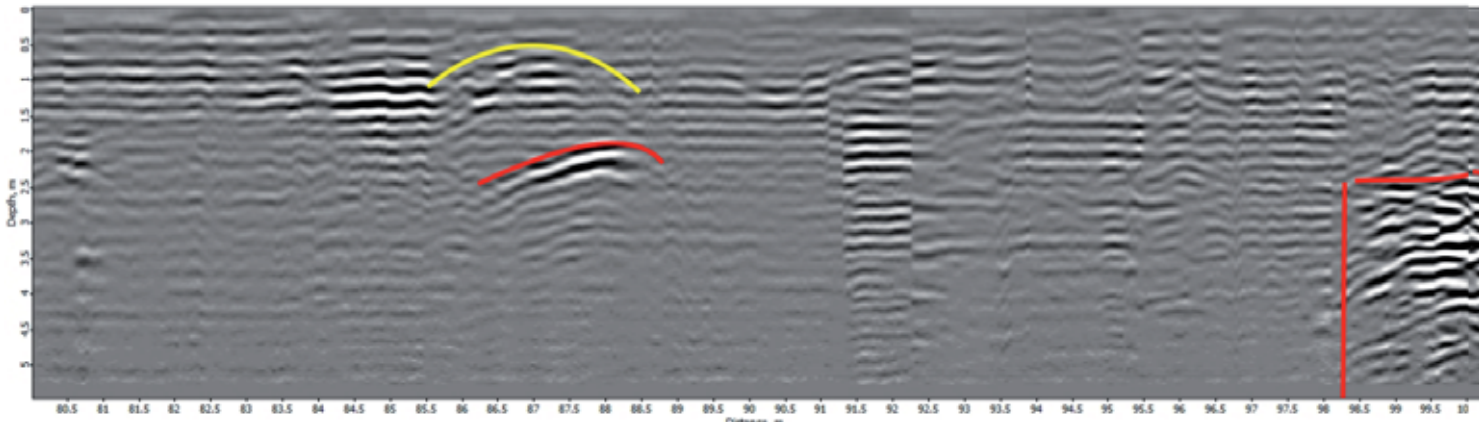


Figura 2 – Radargramma della traccia R1, progressive 80 – 120 m, il target intercettato in sezione longitudinale dalla progressiva 98 alla 110 m è completo di corridoio di accesso (dromos) e camera sepolcrale

profondità compresa tra i 0.5 m e 5 m e distanziate tra loro di 50 cm. La risoluzione del Georadar permette in alcuni casi dei risultati molto soddisfacenti.

Ad esempio nella traccia R1, dalla progressiva 98 m alla 110 m, il target intercettato è rappresentato, graficamente, completo di tutte le sue componenti, ossia *dromos* e camera sepolcrale (*Fig.* 2).

Per ciò che concerne la metodologia geoelettrica, la rappresentazione in tomografie elettriche è di pratica comune in ambito archeologico. Questa può fornire informazioni quantitative sulla variazione verticale e laterale della resistività del mezzo indagato e delle possibili discontinuità causate da strutture archeologiche, in questa sede cavità o trincee d'accesso.

I profili di resistività sono stati collocati nei settori ritenuti più interessanti sulla base dell'osservazione preliminare delle immagini da satellite e dei dati visualizzati in tempo reale durante l'acquisizione dei profili GPR (*Fig.* 1).

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Dalle campagne di ricerca con mezzi diretti (scavi) e indiretti (geofisici) condotte nella necropoli di Tarquinia (VT) nella metà del secolo scorso sappiamo essenzialmente che:

- esistono tre tipologie di camere mortuarie nell'area:
  a. tombe a camera di tipo classico, con trincea d'accesso,
  b. tombe a camera di tipo arcaico molto simili alle prime ma più antiche e superficiali,
  c. tombe a fossa scavate verticalmente nel terreno;
- la profondità massima in cui le sepolture potevano collocarsi è di 10-15 m;
- le dimensioni tipiche delle camere sono attorno ai 5 x 3 x 3 m. I *dromos* si estendono per circa 5 m dal vecchio piano di calpestio fino al loculo in profondità ed hanno un'altezza di circa 2 m;
- i tumuli, a oggi quasi completamente sepolti, potevano costituire anomalie altoresistive nelle indagini geoelettriche;
- interventi di scasso o cedimenti naturali della volta delle sepolture a camera erano molto probabili anche negli anni '50 del secolo scorso.

I primi investigatori del sito (Fondazione Lerici, Politecnico di Milano e Università della Pennsylvania) appurarono che le metodologie geofisiche che avevano portato a migliori risultati erano la prospezione geoelettrica e magnetica. Essi avevano inoltre screditato i fotogrammi aerei per diversi motivi, tra cui quelli insiti nella scala e nella scarsa risoluzione. Tuttavia essi riportarono anche che anomalie visibili a livello del terreno in termini di diversa umidità o vegetazione non erano direttamente riconducibili alle camere sepolcrali ma potevano essere ricondotte ad altri elementi tombali. L'indagine diretta al tempo era effettuata forando il terreno ed inserendo nel foro una telecamera ma per i motivi appena detti forare in corrispondenza delle anomalie da immagine fotografica, senza interpretare le stesse, portava a forare in posti diversi da quelli cercati (la camera sepolcrale).

Le immagini satellitari moderne di *Google Earth* sono state invece molto utili al presente lavoro, sia per la collocazione preliminare delle sezioni di indagine che in fase di interpretazione post-acquisizione dati.

Sul ricalco quindi delle ricerche precedenti, si è adottato anche in questa sede il metodo geoelettrico per i seguenti motivi:

- esso si adatta bene all'accertamento di cavità nel sottosuolo;
- permette di impostare la lunghezza dello stendimento e la spaziatura interelettrodica in riferimento alla profondità e alla risoluzione laterale e verticale che si desidera rispetto ai target di interesse;
- ci si aspetta un comportamento elettrico diverso per diversi tipi di manufatti sepolti;
- l'interpretazione e l'acquisizione dei dati è enormemente semplificata grazie alle moderne tecniche tomografiche.

Oltre al metodo geoelettrico, si è applicata anche la prospezione radar. Questa permette di:

- investigare con più largo respiro l'area oggetto di studio, grazie alla sua veloce applicazione in fase di acquisizione;
- restituire dati con risoluzione molto soddisfacente, a scapito di una limitata profondità di investigazione;
- permette il riconoscimento dettagliato della geometria delle strutture sepolte, se esse si trovano in posizione favorevole rispetto alla direzione di acquisizione.

Non abbiamo impiegato metodi magnetici poiché al giorno d'oggi l'inquinamento elettromagnetico della maggior parte del territorio italiano è tale per cui questi metodi possono essere poco efficaci. In particolare, le zone a noi assegnate per l'indagine dalla Soprintendenza Archeologica del Lazio ed Etruria Meridionale, erano attraversate da tralicci metallici e linee elettriche.

Il lavoro si è svolto preliminarmente studiando con attenzione le immagini satellitari su cui è possibile discriminare forme superficiali. L'area presa in esame infatti mostra zone circolari aride riconducibili a forme tumulari sepolte oppure a zone maggiormente drenate dalla presenza nel sottosuolo di cavità quali sepolture etrusche.

Grazie a questo studio preliminare le linee geofisiche radar sono state condotte in modo da investigare i settori aridi riconosciuti, che coincidono a volte con dei blandi alti topografici. Sono stati investigati 5 profili a configurazione *common offset* con antenna trasmittente di 500 MHz (*Fig.* 1). L'inversione dei dati è stata effettuata inizialmente assumendo un valore di permittività di 5 (poi sostituita in fase di *processing* dei dati con 6.5) e la profondità di indagine raggiunta si è attestata intorno a 5 m. La metodologia radar impiegata ha, in linea teorica, una risoluzione laterale di 50 cm per un target posto a 2 m di profondità.

I settori in cui è stato individuato il numero maggiore di anomalie interessanti con il metodo GPR, sono stati ulteriormente investigati con tre linee elettriche in configurazione Wenner (la più veloce in termini di tempi di acquisizione) con interasse elettrodico di 3 m

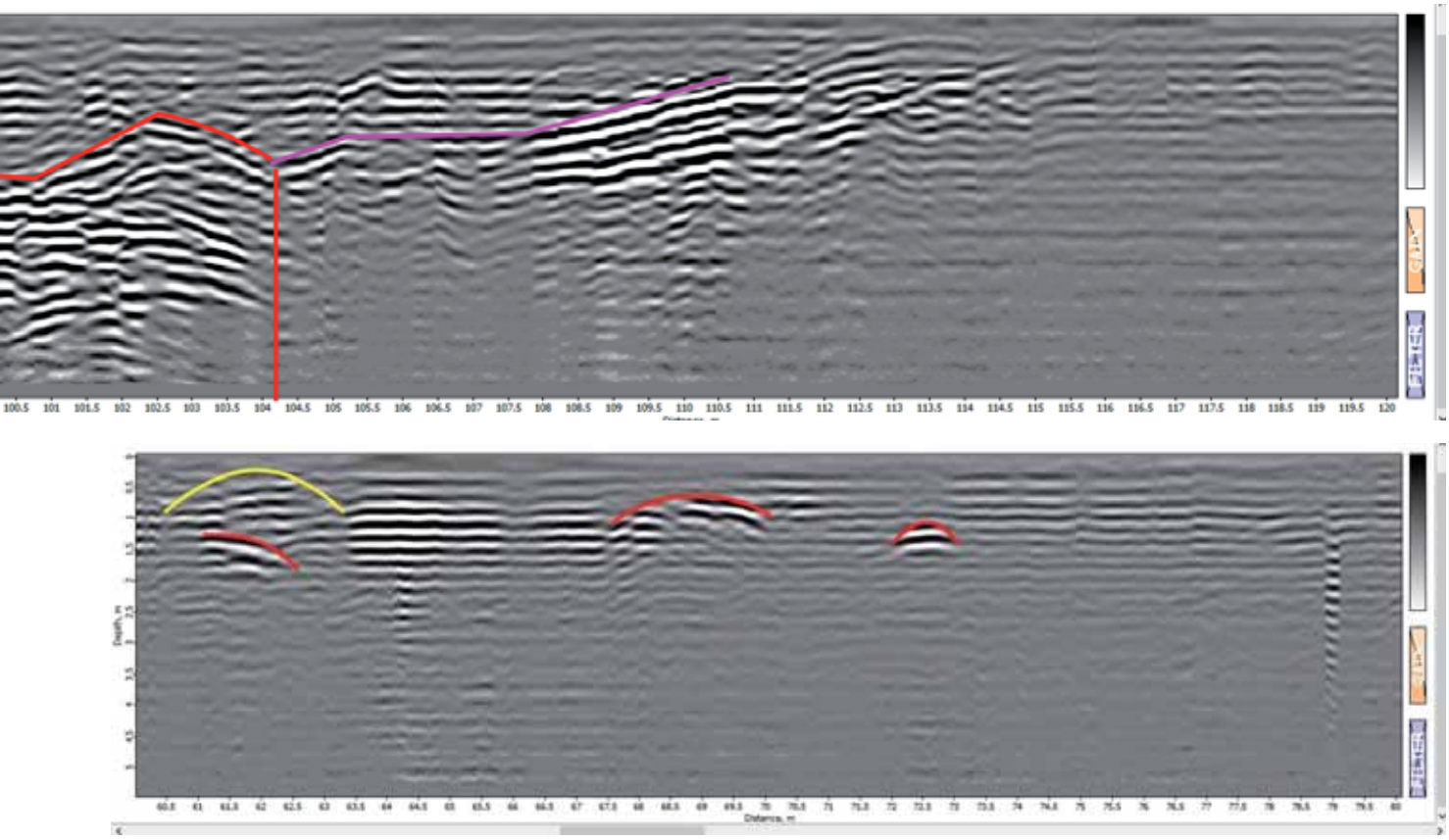


Figura 3 – Sul radargramma si osservano 3 anomalie superficiali. Tutte si presentano con grandi ampiezze, rispetto all'intorno. In progressiva 61.5 m, ad una profondità di 1.5 m da p.c., è presente un orizzonte di riflessione inclinato di circa 13° rispetto all'orizzontale. La riflessione persiste per 1.5 m. Sopra di esso insiste un'iperbole di riflessione più attenuata, probabilmente un deposito di pietrisco, visti i molteplici punti di riflessione

e 48 canali per linea. Ciò ha consentito una profondità di esplorazione superiore ai 20 m e una risoluzione laterale di circa 1 m.

Lungo le linee investigate col GPR (1 km circa) abbiamo interpretato un totale di 55 anomalie, riconducibili a strutture sepolte. Di queste, solo quattro possono essere ricondotte, secondo la nostra interpretazione, a camere sepolcrali (*Figg.* 3 e 4).

La seconda è rappresentata da una blanda iperbole, con centro in progressiva 69 m, che si estende per circa 2.5 m. Ultima ma più intensa riflessione si registra con centro in progressiva 72.5 m, essa è costituita da una più piccola iperbole rispetto alle prime due menzionate. La sua larghezza è di 1 m.Si potrebbe trattare di strutture sepolte superficiali. L'anomalia in giallo per la sua attenuazione rispetto alle altre e la sua posizione più superficiale potrebbe essere identificata come tumulo.

Un aspetto molto vantaggioso della tecnologia radar per un futuro progetto di scavi archeologici è quello di poter discernere l'orientamento dei *dromos* in profondità. La risoluzione della metodologia ha permesso una rappresentazione grafica di tre sepolture, davvero sorprendente. Esse vengono visualizzate complete di tutte le componenti (vano scavato e *dromos*), illustrate in *Fig.* 2. Va segnalato, per completezza, che gli ottimi risultati ottenuti dalla tecnica GPR sono anche legati alle caratteristiche geologiche del sito, costituito da roccia tenera e in assenza di falda superficiale. Se il sito fosse stato coperto da terreni più limosi e saturi, la tecnologia GPR non avrebbe permesso di vedere nessun riflettore.

Il metodo della resistività elettrica su circa 400 m investigati ha accertato 13 anomalie altro-resistive riconducibili a cavità nel sottosuolo.

In linea generale, se prendiamo in considerazione le anomalie registrate con la metodologia radar:

- il vano scavato si identifica con una anomalia profonda (dai 2 fino a 3 m lungo la verticale). L'alto strutturale è discriminato da iperboli di riflessioni di grande ampiezza rispetto all'intorno, pressoché continue. L'interno invece può essere rappresentato o da abbondati punti di riflessione e onde multiple oppure da un'attenuazione del treno d'onda e da una successiva inversio-

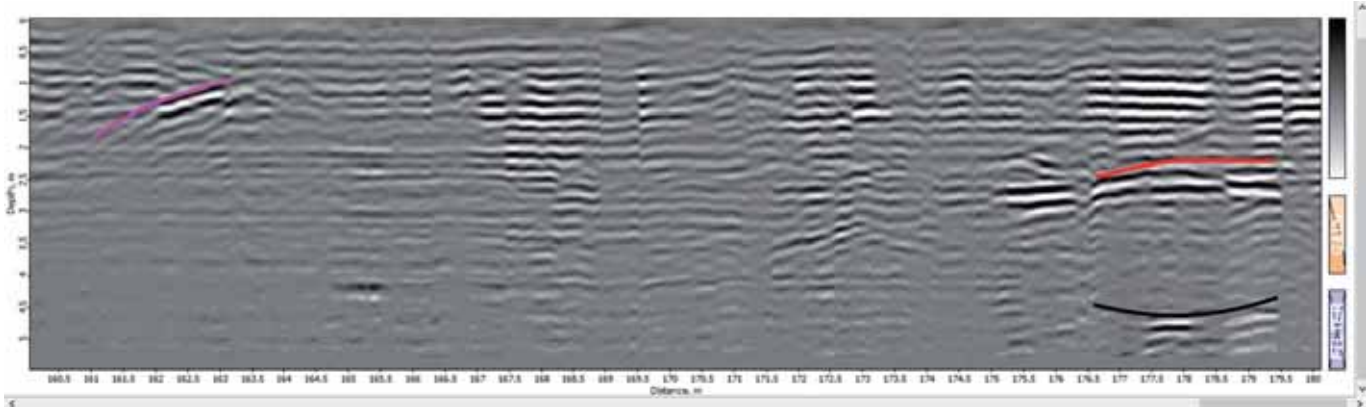
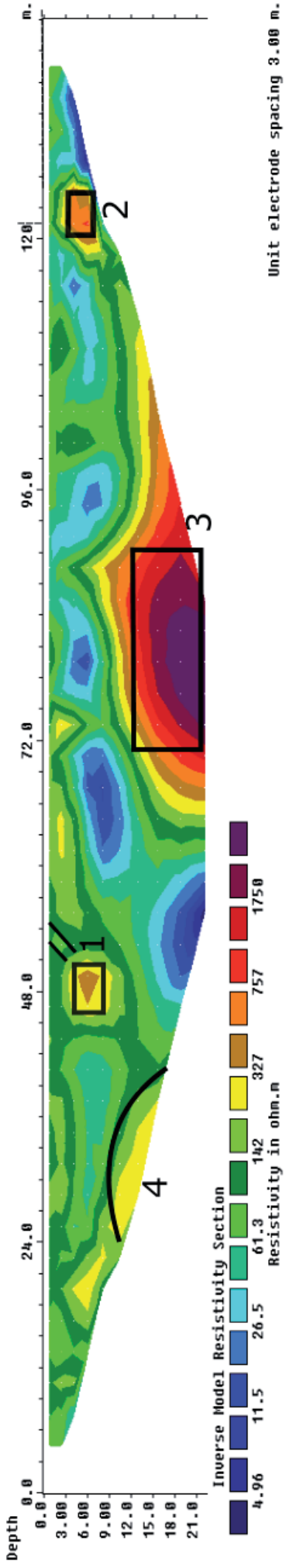


Figura 4 – Si nota un riflettore profondo (2.5 m) con centro in progressiva 175 m persiste sull'orizzontale per 4.5 m, linea rossa. Sottostante a questa anomalia si osserva un'attenuazione del segnale e poi alla profondità di circa 5 m si può apprezzare un'inversione di fase. L'anomalia segnata in rosso potrebbe essere interpretata come l'alto strutturale di un oculo sepolcrale, seguito dalla cavità in cui le onde si attenuano per poi riflettersi in un mezzo meno impedente, da ciò il fenomeno dell'inversione di fase



ne di fase lungo la verticale, per quest'ultimo fenomeno si veda la *Fig.* 4. Le pareti verticali invece vengono interessate da un fenomeno di diffrazione;

- i *dromos* sono evidenziati da riflettori superficiali inclinati da una profondità di circa 1-1.5 m verso il basso. Essi sono caratterizzati da iperboli di grande ampiezza e spazialmente continue. Se la direzione della trincea d'accesso e la direzione di acquisizione sono simili si registrano iperboli inclinate di circa 13°-14° rispetto l'orizzontale. Se le due direzioni differiscono allora si registrano inclinazioni apparenti diverse. Alcune anomalie mostrano addirittura la scalinata della trincea.

L'elettrica non permette una così dettagliata discriminazione degli oggetti presenti nel sottosuolo. Sebbene abbia una risoluzione molto minore in confronto alla tecnica radar, risulta però più potente in termini profondità di indagine, permettendo così anche di vedere la base dei target o anche più sistemi di anomalie sulla stessa verticale. Dove il georadar utilizzato era vincolato da fenomeni di attenuazione delle onde in profondità, la geoelettrica ha rilevato estese anomalie positive di resistività.

Le anomalie in questione si presentano con forme sub ellittiche e caratterizzate da isolinee di resistività con valori crescenti verso il centro (*Fig.* 5).

Per i tre diversi profili effettuati si è registrato un intervallo di valori delle anomalie, riconducibili a camere sepolcrali, tra i 400 e i 20000 Ω·m. Questa variazione nei valori deve imputarsi a differenti condizioni di umidità del mezzo, verificate anche da un rapido sguardo delle immagini satellitari.

Si è appreso con metodologia geoelettrica che le strutture archeologiche risultano sovrapposte lungo la verticale. Si registrano anomalie medio-altoresistive intorno ai 3 m di profondità e anomalie alto-resistive intorno ai 6 m, dove spesso l'anomalia superficiale presenta valori di resistività inferiori rispetto a quella profonda, legati sia alle diverse dimensioni dei vuoti che al diverso livello di umidità negli stessi.

L'uso integrato delle due metodologie geofisiche ha permesso di risolvere alcuni casi di dubbia interpretazione.

Degno di nota è come le camere che presentino cedimenti della volta o legati ad operazioni di scasso siano comunque discriminabili con entrambi i metodi, trattandosi di anomalie generalmente superficiali.

Come già accennato strumento di grande utilità sono state le immagini da satellite. Il *modus operandi* di impostare le linee geofisiche dove si osservavano maggiori forme superficiali è risultato virtuoso. Le due fasce leucocratiche, che a priori si era ipotizzato potessero contenere manufatti sepolti, sono state accertate dalle investigazioni geofisiche e ne consegue che proprio sotto di esse si sono ottenuti dei risultati molto interessanti.

L'utilizzo dei prodotti *Google Earth*, durante la fase di interpretazione delle anomalie superficiali registrate con la tecnica radar, è stato molto vantaggioso soprattutto nel discriminare tumuli e trincee d'accesso.

Una considerazione emersa è che le zone umide, presentando scarsità di target superficiali e proprietà conduttive, potrebbero essere investigate con più successo da metodologie diverse da quelle elettromagnetiche e che riescano a raggiungere profondità maggiori di 5 m.

Un'ultima valutazione si potrebbe condurre in termini di riqualificazione del territorio: si può affermare che i territori del tarquiniese così importanti dal punto di vista archeologico e culturale siano in larga misura abbandonati a sé stessi. Una approfondita ricerca estesa su tutto il territorio può mirare a ricostruire nella sua totalità la necropoli, senza che ulteriori reperti vengano distrutti dal tempo. Una possibile idea sarebbe quella della musealizzazione dei dati geofisici in termini di costruzione di un modello 3D del sottosuolo da esporre in pannelli esplicati in più punti dell'altopiano Monterozzi. Inoltre i pannelli potrebbero essere esposti lungo un possibile percorso *trekking* che colleghi tutti i luoghi di maggior interesse archeologico, che parta dalla necropoli per arrivare al pian della Civita.

In ultimo gli autori del presente articolo concordano l'esito positivo della metodologia messa in campo per il sito di Tarquinia.

Figura 5 – Dalla sezione emergono forti escursioni della resistività elettrica, che presenta valori variabili da pochi a migliaia di Ω·m. Si evidenziano delle piccole anomalie superficiali medio-alto resistive, una in progressiva 48 m e l'altra 120 m. La prima si colloca ad una profondità intorno ai 6 m e scende fino ai 9 m. È caratterizzata da un intervallo di valori di resistività compresi tra 200 e 400 Ω·m. Si può osservare un piccolo settore inclinato meno resistivo (61 Ω·m).La seconda risulta poco più superficiale ma con valori di resistività leggermente maggiori attorno ai 750 Ω·m. L'anomalia n. 3, di forma ellittica, si colloca in progressiva 72 m a una profondità di circa 12 m. È la più grande e presenta valori di resistività intorno alle migliaia di Ω·m. Questi valori risultano molto elevati rispetto all'intorno. L'anomalia si estende per 15 m in orizzontale e 10 m sulla verticale. Il settore delimitato dal tratto nero e segnato con il numero 4 è caratterizzato da resistività intorno ai 300 Ω·m. Siamo tuttavia al bordo della sezione interpretabile, per cui la reale significatività di questa anomalia deve essere soggetta ad ulteriori verifiche

BIBLIOGRAFIA

Annan A. P., (2009), *Ground Penetrating Radar (GPR) Principles,* in Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Ed. Harry M. Jol, Elsevier B.V., (Oxford), pp 4-38.

Lerici C. M. (1961), *Alla scoperta delle civiltà sepolte – I nuovi metodi di prospezione archeologica*, Lerici Editori, (Milano), pp. 415.

Il metodo B&B ottimizzato per la definizione dell'area tributaria dei pilastri in cave sotterranee

The optimized b&b method for the definition of the pillars' tributary area in underground quarries

Giovanni Bruno
DICATECh - Politecnico di Bari
E-mail: giovanni.bruno@poliba.it

Luigi Bobbo
Ingegnere civile - libero professionista

Maria Dolores Fidelibus
DICATECh - Politecnico di Bari

Parole chiave (*key words*): cave sotterranee (*underground quarries*), analisi statistica (*statistical analysis*), aree tributarie dei pilastri (*pillars' tributary areas*)

ABSTRACT

The assessment of the stability of the underground quarry pillars is an operation that involves not few practical and conceptual difficulties.

In fact, it is easily conceivable, how such hypogean environments, especially if they are nowadays abandoned, are locally inaccessible for the purpose of the necessary plano-altimetric topographic survey. In recent years, these operational difficulties are increasingly mitigated by the use of advanced instrumentation such as laser scanners, which, moreover, provide a far more accurate detail than the classic instrumentations.

However, in view of the availability of highly detailed topographic surveys, it is still common practice to use conceptual approaches, both for the definition of the loads on the pillars and for the compression verification formulas of the same, which present a few critical issues.

In this study is proposed a new method, named optimized B&B, for the planimetric reconstruction of the tributary or the influence areas of the quarry pillars, i.e. of the rocky volume above the quarry roof, which are supported by the underlying pillars.

The method is applicable to underground quarries cultivated with the "chambers and pillars" technique and it allows to overcome the limitations and indeterminations of the inter-axis method which, until today, is the most commonly used. The B&B method, borrowing the Thiessen polygons method used in hydrological studies, allows a first reconstruction of the pillars' tributary areas. Subsequently, this reconstruction is optimized, with appropriate statistical techniques, in order to overcome the two main critical issues presented by the inter-axis method: 1) the fact that in the large and irregularly shaped pillars it is possible that the tributary area intersect the pillars; 2) the impossibility to reconstruct the tributary area of the pillars located along the edges of the quarry.

The application of the optimized B&B method to several quarries has allowed to confirm its validity and it is reported, as an example, the case study of a nowadays abandoned quarry of calcarenitic rock located in Puglia in the Municipality of Mottola (TA).

RIASSUNTO

La valutazione della stabilità dei pilastri di cave sotterranee è un'operazione che comporta non poche difficoltà di ordine pratico e concettuale. È facilmente intuibile, infatti, come tali ambienti ipogei, specialmente se ormai abbandonati, siano a luoghi poco accessibili ai fini del necessario rilievo topografico plano-altimetrico. Negli ultimi anni tali difficoltà operative sono sempre più mitigate dall'uso di strumentazioni evolute come il laser-scanner che, tra l'altro, fornisce un dettaglio di gran lunga superiore rispetto alle classiche strumentazioni.

A fronte della disponibilità di rilievi topografici di grande dettaglio, tuttavia, è ancora prassi comune quella di utilizzare approcci concettuali, sia per la definizione dei carichi agenti sui pilastri sia per le formule di verifica a compressione degli stessi, che presentano non poche criticità.

In questo studio si presenta un nuovo metodo, denominato B&B ottimizzato, per la ricostruzione planimetrica delle aree tributarie o d'influenza dei pilastri di cava, cioè delle aree sottese dai volumi di roccia soprastanti il tetto di cava che vengono sostenute dai sottostanti pilastri.

Il metodo è applicabile alle cave sotterranee coltivate con la tecnica a "camere e pilastri" e consente di superare le limitazioni e le indeterminatezze del metodo degli interassi che, ad oggi, è quello più comunemente usato. Il metodo B&B, mutuando il metodo dei poligoni di Thiessen utilizzato negli studi idrologici, consente una prima ricostruzione delle aree tributarie dei pilastri. Successivamente, tale ricostruzione viene ottimizzata, con opportune tecniche su base statistica, al fine di consentire il superamento delle due principali criticità presentate dal metodo degli interassi: 1) il fatto che nei pilastri di grande dimensione areale e forma irregolare è possibile che l'area tributaria intersechi gli stessi; 2) l'impossibilità di ricostruire l'area tributaria dei pilastri ubicati lungo i margini della cava.

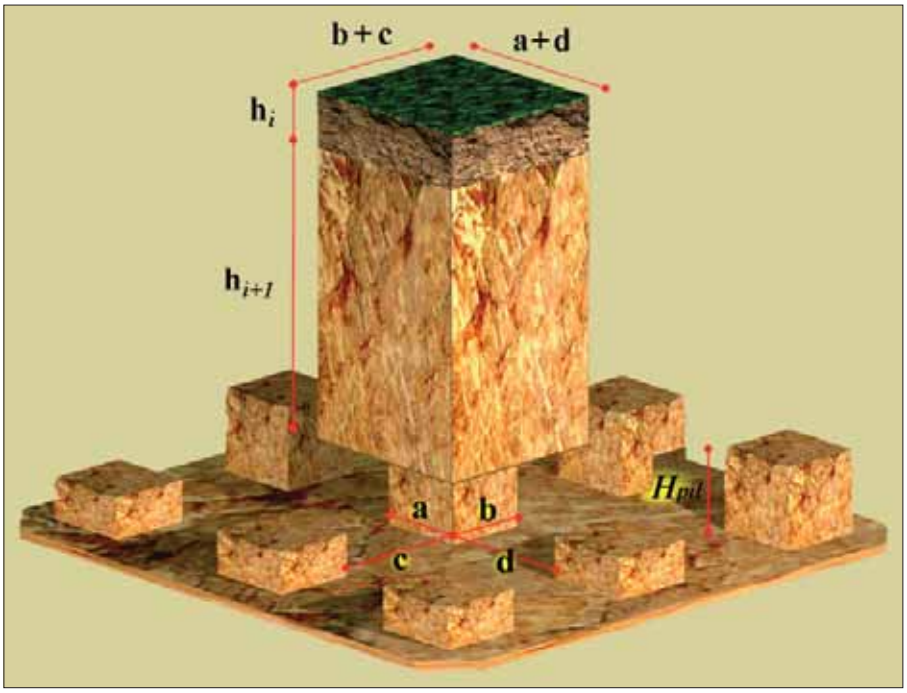


Figura 1 – Spaccato di cava con indicazione dell'area tributaria e dei relativi rapporti dimensionali nel caso di pilastri a sezione quadrata

L'applicazione del metodo a diverse cave ha consentito di validarne la sua bontà e a titolo d'esempio si riporta il caso di studio di una cava dismessa di roccia calcarenitica ubicata in Puglia nel Comune di Mottola (TA).

L'AREA TRIBUTARIA DEI PILASTRI E LA TENSIONE VERTICALE AGENTE SU DI ESSI

Nella valutazione della stabilità di una cava sotterranea, coltivata con la tecnica a "camere e pilastri", a prescindere da fatto che i pilastri siano disposti secondo uno schema regolare di file parallele con pilastri allineati o sfalsati cioè a scacchiera o, come accade più raramente e solo per le cave più antiche, siano disposti in modo casuale, si rende necessaria la definizione della loro area tributaria A_{trib} o d'influenza.

Si tratta cioè di definire, il più delle volte a posteriori nel caso delle cave dismesse, la forma geometrica e le dimensioni del volume di roccia soprastante il tetto di cava che viene sostenuto dal sottostante pilastro la cui sezione A_{pil} è sensibilmente inferiore di quella della sua area tributaria, per effetto dei circostanti vuoti "camere" determinati dal cavamento (*Fig.* 1).

Note che siano la geometria e le dimensioni del pilastro e della sua area tributaria nonché i pesi di volume e i relativi spessori degli orizzonti stratigrafici che gravano sul tetto di cava è possibile, mediante le relazioni [1 ÷ 6], calcolare la tensione verticale totale agente al tetto o alla base dell'i-esimo pilastro.

$A_{pil} = (a_i + b_i)$ Area in sezione trasversale dell'i-esimo pilastro [1]

$A_{trib} = (a_i + d_i) \cdot (b_i + c_i)$ Area tributaria o d'influenza dell'i-esimo pilastro [2]

$\sigma_{vt} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i$ Tensione litostatica verticale al tetto dell'i-esimo pilastro [3]

$\sigma_{vb} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i + \gamma_{pil} \cdot H_{pil}$ Tensione litostatica verticale alla base dell'i-esimo pilastro [4]

$D = \left(\frac{A_{trib}}{A_{efpil}}\right) \cdot [\sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i]$ Tensione totale verticale agente al tetto dell'i-esimo pilastro [5]

$D = \left(\frac{A_{trib}}{A_{efpil}}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i + \left(\frac{A_{pil}}{A_{efpil}}\right) \cdot \gamma_{pil} \cdot H_{pil}$ Tensione totale verticale agente alla base dell'i-esimo pilastro [6]

Dalla relazione [6] si evince chiaramente che la tensione totale verticale agente alla base di un pilastro è proporzionale in modo diretto alla sua area tributaria A_{trib} e inverso all'area del pilastro effettivamente reagente a compressione A_{efpil}. Quest'ultima, ovviamente, è funzione dell'eccentricità del carico verticale agente e_x, e_y e si genera ogni volta che non vi è coincidenza fra il centro di carico dell'area tributaria e il baricentro della sezione del pilastro. Applicando la parzializzazione dell'area reagente, con uno dei noti metodi proposti da Meyerhof G.G. (1953), si avrà che al crescere dell'eccentricità si avrà una conseguente riduzione dell'area del pilastro effettivamente reagente a compressione.

Da quanto detto si ha che anche il fattore di sicurezza a compressione di un generico pilastro, espresso in modo deterministico dalla relazione:

$$F_s = \frac{\sigma_p}{D} \quad [7]$$

dove:

σ_p Resistenza a compressione uniassiale del pilastro

$D = \frac{(A_{trib} \cdot \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \cdot h_i) + (A_{pil} \cdot \gamma_{pil} \cdot H_{pil})}{A_{efpil}}$ Tensione di compressione agente alla base del pilastro

A_{trib} Area tributaria o d'influenza del pilastro

A_{efpil} Area del pilastro che effettivamente reagisce a compressione

sarà funzione non solo del grado di eccentricità del carico agente alla base ma anche della forma ed estensione dell'area tributaria.

Considerato che la sommatoria di tutte le aree tributarie dei pilastri coincide con la superficie totale dell'area di cava, ne consegue che la forma assunta da ciascuna area tributaria dipende in modo esplicito dalla simmetria con la quale i pilastri sono distribuiti sull'intera superficie di cava e, implicitamente, dalla loro forma geometrica e dimensione.

IL METODO DEGLI INTERASSI PER LA DEFINIZIONE DELL'AREA TRIBUTARIA DEI PILASTRI

Nella pratica corrente, per ricostruire l'area tributaria dei pilastri A_{trib} si utilizza in cosiddetto metodo degli interassi. Si tratta di una costruzione grafica che viene realizzata, a partire dalla planimetria della cava, mediante i seguenti steps:

I. Si individuano i baricentri dei pilastri (*Fig.* 2a)
II. Si uniscono i baricentri creando una maglia quadrangolare (*Fig.* 2b)
III. Si individuano i punti medi della maglia e si conducono gli interassi per detti punti (*Fig.* 2c)
IV. Le regioni delimitate dagli interassi costituiscono le aree di influenza di ogni pilastro (*Fig.* 2d)

Il metodo degli interassi, per quanto largamente diffuso e di semplice applicazione, presenta le seguenti limitazioni che ne rendono l'utilizzo se non impossibile poco efficace:

- Le dimensioni e la forma dei pilastri non vengono considerati
- Criticità per definire le aree di influenza dei pilastri con distribuzione planimetrica irregolare
- Impossibilità di definire le aree di influenza dei pilastri lungo il confine della cava

L'applicazione del metodo degli interassi a numerosi casi reali ha permesso di costatare che il metodo risulta sistematicamente inapplicabile ai pilastri ubicati lungo i confini della cava; inoltre, nel caso di cave caratterizzate da pilastri con distribuzione planimetrica irregolare e con grande variabilità dell'area in sezione trasversale A_{pil}, può facilmente capitare che un lato dell'area tributaria intersechi la base del pilastro (*Fig.* 3).

Le criticità illustrate in figura 3 rendono praticamente impossibile effettuare delle verifiche di stabilità, di tipo deterministico e senza l'ausilio di codici di calcolo numerico, facendo uso della relazione [7]. Prescindendo dall'eventuale anomalia dei pilastri intersecati dalle proprie aree tributarie, resta il fatto che il sistema resta indeterminato proprio lungo l'area perimetrale dove, in corrispondenza del passaggio dal tetto alle pareti della cava, tendono a localizzarsi le instabilità dovute a concentrazioni di tensioni nel tetto di cava.

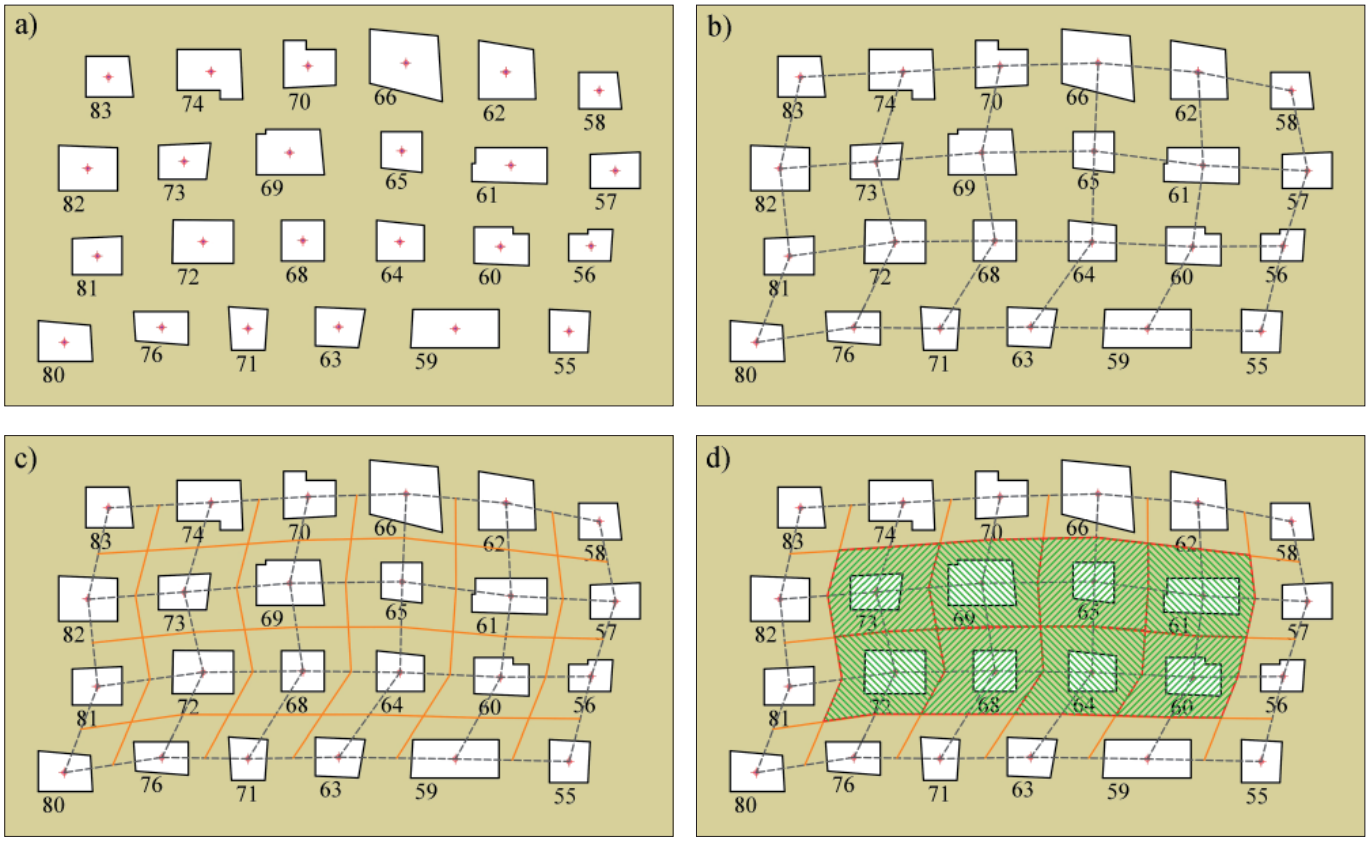


Figura 2 – Fasi di costruzione delle aree tributarie dei pilastri (rigato verde) con il metodo degli interassi

IL METODO B&B OTTIMIZZATO PER LA DEFINIZIONE DELL'AREA TRIBUTARIA DEI PILASTRI

Al fine di superare le criticità presentate dal metodo degli interassi si è messo a punto il metodo B&B ottimizzato che, per ricostruire l'area tributaria dei pilastri A_{trib}, mutua la procedura dei poligoni di Thiessen, utilizzata in idrologia per la costruzione delle aree di afferenza delle stazioni pluviometriche.

Inizialmente, a partire dalla planimetria della cava, vengono ricostruiti graficamente i poligoni di Thiessen che costituiscono le aree tributarie dei pilastri di cava, mediante i seguenti steps:

I. Si individuano i baricentri dei pilastri (*Fig.* 4a)
II. Si collegano i baricentri mediante una maglia triangolare che minimizzi la distanza fra i pilastri (fig. 4b)
III. Si tracciano delle linee normali ai punti medi dei lati dei triangoli della maglia (*Fig.* 4c)
IV. Le regioni delimitate da tali linee costituiscono le aree di influenza di ogni pilastro (*Fig.* 4d)

A parità delle altre condizioni la ripartizione della superficie di cava in aree tributarie è condizionata in larga misura dalle dimensioni e dalla forma e distribuzione dei pilastri che, come accade spesso nelle cave, sono molto variabili. Il metodo B&B, essendo basato su una maglia triangolare, pur essendo versatile e applicabile a qualsiasi disposizione dei pilastri non risolve, se applicato tal quale, il problema dei pilastri ubicati lungo il confine della cava e quello di eventuali pilastri che, a causa della loro posizione e anomala grande sezione trasversale, vengono ad essere intersecati dalla loro area tributaria (*Fig.* 3).

Per ovviare a tali inconvenienti, quindi, sono necessarie un paio di ottimizzazioni degli iniziali poligoni delle aree tributarie; la prima è possibile mediante l'esecuzione di un'analisi statistica del parametro area dei pilastri A_{pil} utilizzando il diagramma a scatola e baffi o "box and whisker plot" proposto da Tukey J. W. (1977). Grazie a quest'analisi è possibile definire l'area limite superata la quale il pilastro può essere considerato anomalo o "outlier". Nel dettaglio, le aree dei pilastri che si collocano oltre il baffo di destra della distribuzione, quelle cioè che soddisfano la relazione:

$$A_{pil} \geq Q_3 + 1.5 \cdot r \qquad [8]$$

dove:

Q1 1° quartile, pari al 25° percentile della distribuzione
Q3 3° quartile, pari al 75° percentile della distribuzione
r = (Q3 - Q1) Range interquartile

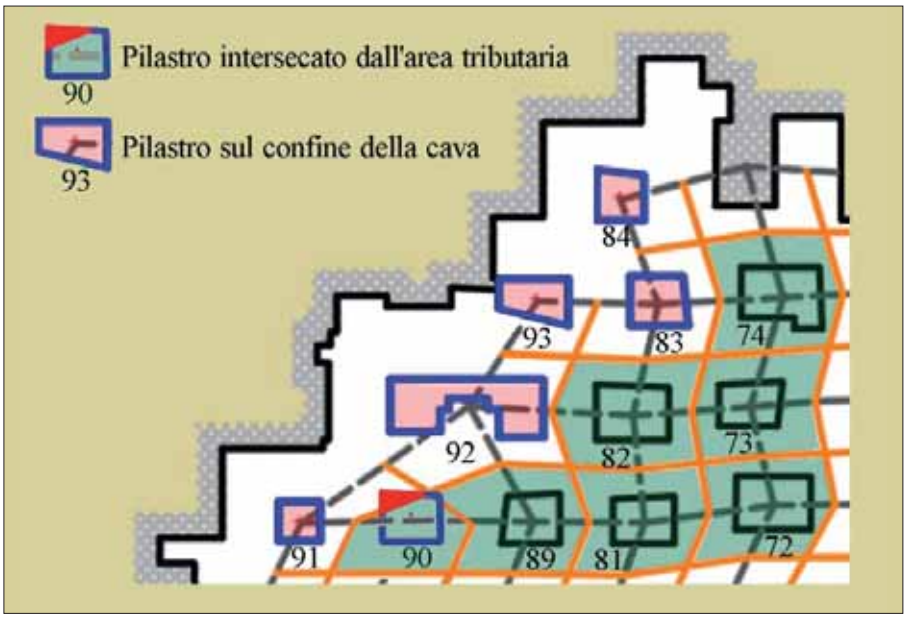


Figura 3 – Esempi di inapplicabilità del metodo degli interassi per la costruzione delle aree tributarie dei pilastri

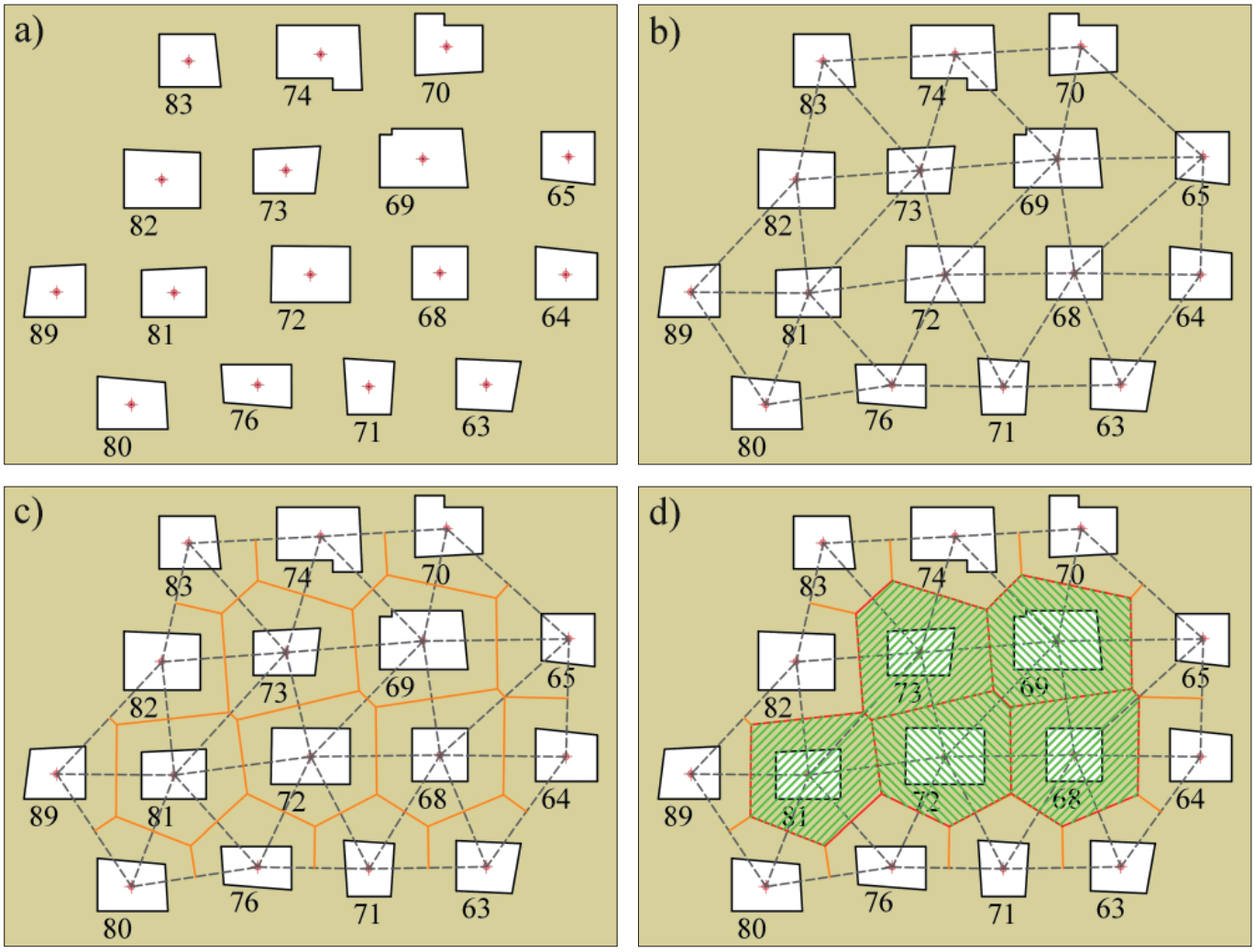


Figura 4 – Fasi di costruzione delle aree tributarie dei pilastri (rigato verde) con il metodo B&B

dovranno essere suddivise in pilastri fittizi, affiancati, di area unitaria (*Fig.* 5).

Per quanto riguarda la scelta del valore di area unitaria, da utilizzare per la suddivisione dei pilastri anomali, si può usare il primo quartile della distribuzione Q_1.

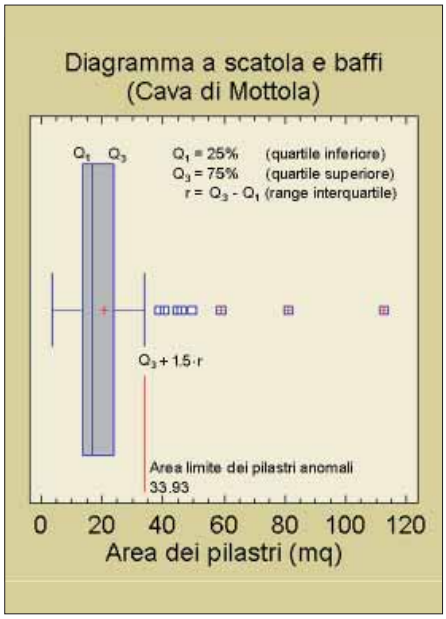


Figura 5 – Analisi statistica a scatola e baffi per il calcolo dell'area limite dei pilastri anomali per la grande sezione e del valore dell'area unitaria per la loro suddivisione: cava dismessa di Via S. Allende, nei pressi dell'ex mattatoio di Mottola (TA)

Si consiglia, tuttavia, di confrontare il valore dell'area unitaria così ottenuta con la dimensione dei pilastri nell'intorno di quello anomalo considerato e, in alternativa, scegliere un valore superiore di area unitaria che non ecceda la mediana (linea blu all'interno della scatola in *Fig.* 5) della distribuzione ottenuta.

Determinata l'area unitaria si suddivide il pilastro anomalo determinando così un certo numero di pilastri fittizi affiancati; quindi, si calcolano i baricentri degli stessi e si procede alla determinazione della nuova area tributaria del pilastro anomalo che sarà data dalla coalescenza delle aree tributarie dei pilastri affiancati (*Fig.* 6).

Questa prima ottimizzazione, oltre ad evitare che l'area tributaria intersechi il pilastro, permette di tenere conto, implicitamente, anche della forma del pilastro anomalo; infatti, la suddivisione in regioni fittizie unitarie determina una distribuzione dei baricentri delle aree fittizie che è funzione del contorno originale del pilastro.

La seconda ottimizzazione del metodo B&B è finalizzata all'eliminazione dell'impossibilità di definire le aree tributarie dei pilastri ubicati lungo il confine della cava. La metodica suggerita è quella di introdurre nella planimetria di cava dei pilastri virtuali o *pilastri specchio*.

Si tratta, il più delle volte, di tenere conto dei pilastri che si trovano già lungo le pareti marginali della cava e che non sono completamente staccati da esse a causa dell'interruzione della coltivazione; in altri casi, più in generale, di immaginare dei pilastri di area simile a quella dei pilastri dei quali si vuole ricostruire l'area tributaria, anche se di diversa forma, specchiati e incassati nella parete prospiciente i pilastri di confine (*Fig.* 7).

Questa metodica, che viene proposta per aggirare l'indeterminazione del sistema, comporta ovviamente un'approssimazione nel calcolo di verifica della stabilità dei pilastri dovuta, principalmente, alla diversa rigidezza che hanno i pilastri reali rispetto a quelli fittizi o specchio. Tale approssimazione, tuttavia, è accettabile se si considera il carattere deterministico delle verifiche a schiacciamento, eseguite utilizzando la formula [7], e il fatto che, comunque, la stessa non tiene in conto la rigidezza meccanica dei pilastri.

APPLICAZIONE DEL METODO B&B OTTIMIZZATO AD UN CASO DI STUDIO REALE

Al fine di testarne l'affidabilità, il metodo B&B ottimizzato è stato applicato in

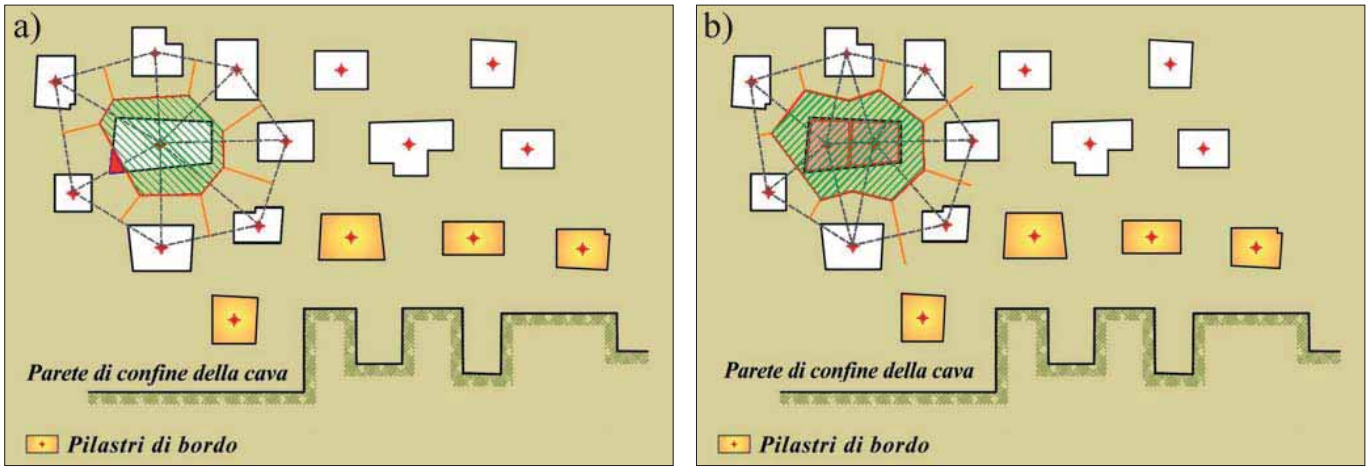


Figura 6 - a) Area tributaria che interseca il pilastro anomalo di grandi dimensioni (prima dell'ottimizzazione); b) Area tributaria del pilastro anomalo di grandi dimensioni (dopo la sua ottimizzazione)

diversi casi reali di cave sotterranee di roccia calcarenitica presenti nella Regione Puglia. Di seguito si riporta il caso della cava, oggi dismessa e abbandonata, ubicata lungo la Via S. Allende, nei pressi dell'ex mattatoio del Comune di Mottola (TA) che è stata scelta per la completezza e l'elevato dettaglio del rilievo topografico plano-altimetrico.

Si tratta di una cava, coltivata con la tecnica a "camere e pilastri" sin dall'inizio del XX secolo, che presenta una pianta con elevate irregolarità nella forma e nella dimensione dei pilastri oltre che nelle altezze. Le rocce cavate appartengono alla Formazione delle "Calcareniti di Gravina" che, in quest'area, sono trasgressive sul substrato calcareo-dolomitico del Cretaceo e soggiacciono ad una copertura di sedimenti di circa 20 m di spessore costituita da un sottile livello (20÷30 cm) di marne compatte di colore bruno-marrone cui seguono, verso l'alto, le argille marnoso-siltose subappennine del Plio-Pleistocene.

La cava è già stata oggetto di diversi lavori di ricerca (Bruno G., Cherubini C., 2002; Bruno G., Cherubini C., 2005; Bruno G. *et al.*, 2007; Bruno G., 2018), che hanno consentito la valutazione e il monitoraggio delle sue condizioni di stabilità sin dal 1988, data del primo rilievo (Cherubini C. *et al.*, 1990). Utilizzando la planimetria della parte accessibile della cava si è proceduto, preliminarmente, alla definizione delle aree tributarie dei pilastri con il metodo degli interassi (*Fig.* 8). Com'è possibile evincere dalla figura, il metodo degli interassi ha fatto emergere tutte le criticità trattate in precedenza. In particolare, per quasi tutti i pilastri ubicati lungo i confini di cava non è stato possibile determinare le aree tributarie e, soprattutto, 11 pilastri di grande dimensione e geometria irregolare risultano intersecati dalle loro aree tributarie.

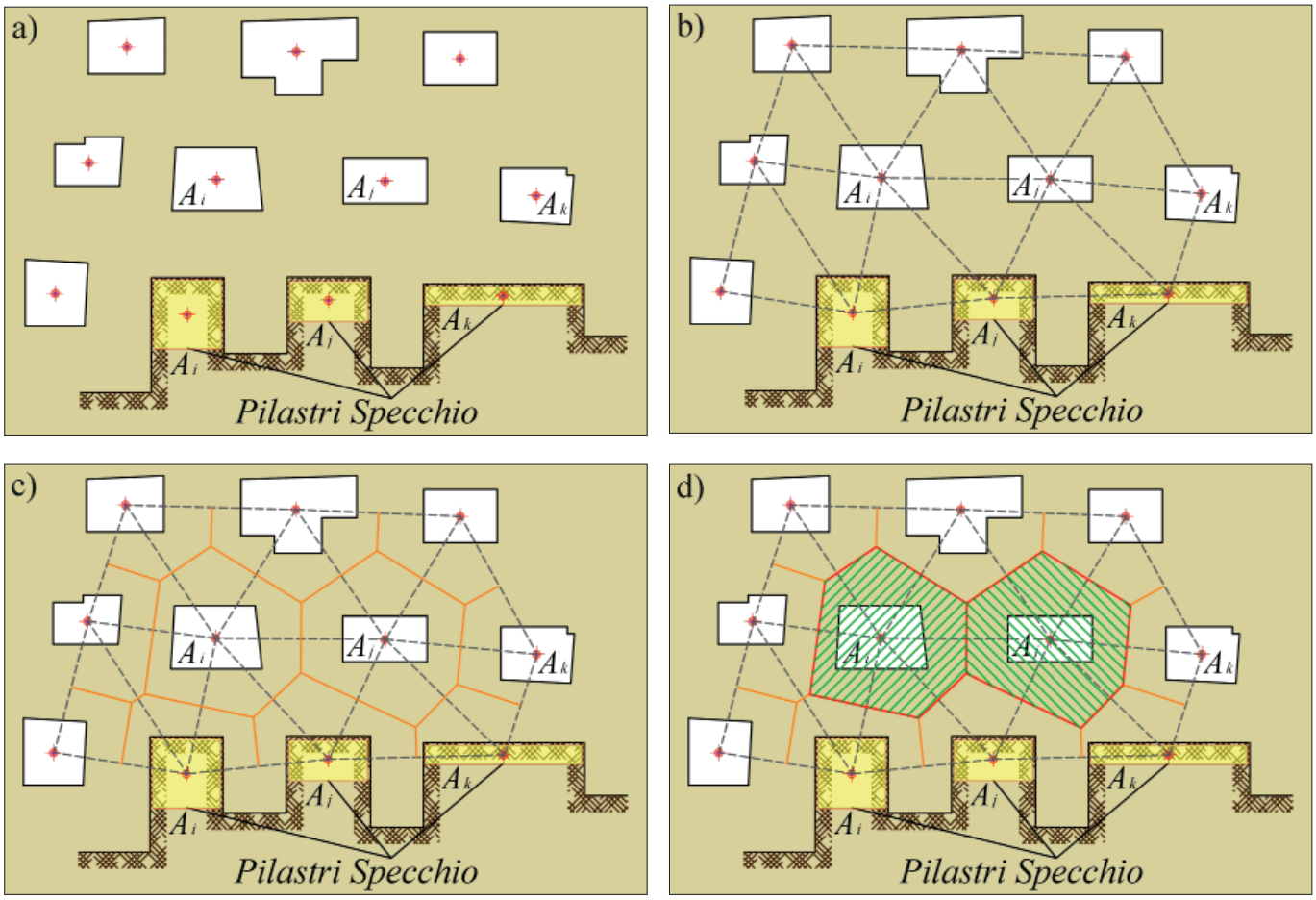


Figura 7 - Fasi di costruzione delle aree tributarie dei pilastri lungo il confine di cava (rigato verde) con il metodo B&B e l'uso dei pilastri specchio



Figura 8 - Cava dismessa nei pressi dell'ex mattatoio di Mottola (TA): aree tributarie dei pilastri ottenute con il metodo degli interassi (in arancione); pilastri di confine con aree tributarie indeterminabili (in rosa); pilastri di grandi dimensioni intersecati dalle aree tributarie (rigato fucsia)

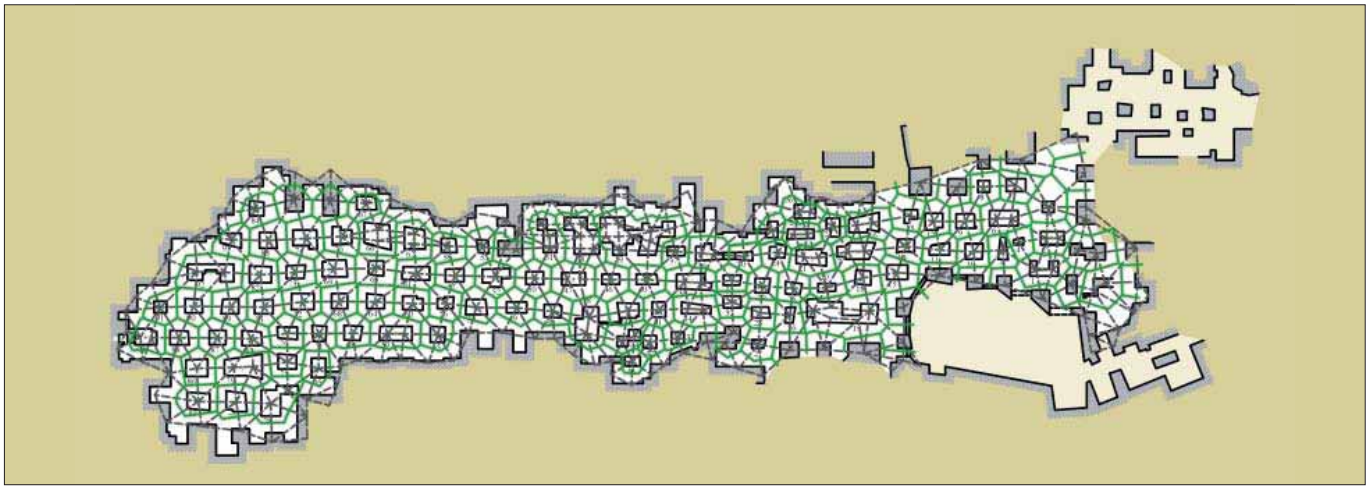


Figura 9 - Cava dismessa nei pressi dell'ex mattatoio di Mottola (TA): aree tributarie dei pilastri ottenute con il metodo B&B ottimizzato (in verde)

Utilizzando la medesima planimetria di cava, si è applicato il metodo B&B che è stato ottimizzato facendo uso della suddivisione in aree unitarie fittizie degli 11 pilastri anomali di grande dimensione e dei *pilastri specchio* lungo le pareti di cava. L'uso del metodo B&B ottimizzato, ha reso possibile la determinazione delle aree tributarie di tutti i pilastri superando tutte le indeterminatezze e incongruenze proprie del metodo degli interassi (*Fig.* 9).

CONCLUSIONI

La definizione delle aree tributarie dei pilastri di una cava sotterranea è un'operazione indispensabile e propedeutica alla valutazione della loro stabilità mediante l'uso di formule deterministiche per il calcolo del F_s.

Nella pratica progettuale, pur disponendo di rilievi topografici dell'area di cava di grande dettaglio, l'uso del metodo degli interassi, diffusamente utilizzato per la definizione delle aree tributarie dei pilastri, determina non poche problematiche e indeterminatezze.

In particolare, tale metodo non consente la definizione delle aree tributarie dei pilastri ubicati lungo i confini di cava e di quelli che, per la loro grande dimensione o irregolare forma geometrica, portano alla ricostruzione di aree tributarie i cui lati intersecano la loro sezione basale. Il metodo B&B ottimizzato consente di superare, con buona approssimazione, tutte queste problematiche.

Per quanto riguarda i pilastri di grande dimensione, mediante un'analisi statistica a scatola e baffi è possibile individuare la presenza di pilastri anomali e definire il valore dell'area unitaria, da utilizzare per la loro suddivisione in pilastri fittizi.

L'applicazione di questa metodica statistica a numerose cave sotterranee ha consentito di fissare la dimensione dell'area unitaria al 1° quartile, cioè al 25° percentile della distribuzione di frequenza di tutte le aree dei pilastri della cava analizzata. Il problema dell'impossibilità di ricostruire le aree tributarie dei pilastri ubicati lungo i confini della cava, invece, è stato superato introducendo dei pilastri immaginari, definiti *pilastri specchio*, le cui dimensioni areali devono essere simili a quelle dei pilastri di cui si vuole ricostruire l'area tributaria.

L'applicazione del metodo B&B ottimizzato a numerose cave sotterranee pugliesi, ha dimostrato la sua affidabilità e in questa sede, a titolo d'esempio, si è riportato il caso di una cava dismessa ubicata nel Comune di Mottola (TA).

BIBLIOGRAFIA

Bruno G., Cherubini C. (2002), *Valutazione della stabilità di cave sotterranee in roccia calcarenitica: analisi comparata di alcune caratteristiche geometriche delle coltivazioni.* Quaderni di Geologia Applicata, 9-2(2002), 119-132.

Bruno G., Cherubini C. (2005), *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia.* Giornale di Geologia Applicata 1 (2005), 33-39, DOI: 10.1474/GGA.2005-01.0-04.0004.

Bruno G, Cherubini C., Vessia G. (2007), *Affidabilità di pilastri in roccia tenera nelle cave in sotterraneo.* Atti del Convegno "Sicurezza nei sistemi complessi", Bari 16-18 ottobre 2007.

Bruno G. (2018), *Il fattore Nshape dei pilastri di cave sotterranee e il loro fattore di sicurezza a compressione desunto da analisi di regressione multivariata.* Atti del Convegno "Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione", Roma 1 dicembre 2017, Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 4/2018, ISSN 1591-5352.

Cherubini C., Ramunni F., Greco A., Del Vecchio F. & Rizzi I. (1990), *Studio geologico-tecnico di una antica cava in sotterraneo in rocce calcarenitiche nel territorio comunale di Mottola (TA).* VII Congresso Nazionale Ordine Geologi, Roma.

Meyerhof G. G. (1953), *The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads.* Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., ICSMGE, Zurich, Svizzera, vol. n. 1, 440-445.

Tukey J. W. (1977), *Exploratory Data Analysis.* Addison-Wesley Publishing Co, Reading, Massachusetts, USA.

Monitoraggio e caratterizzazione idrogeologica di alcuni qanat nelle vicinanze della Città di Yazd (Iran centrale)

Monitoring and hydrogeological characterization of some qanats in the surroundings of Yazd (Central Iran)

Ezio Burri, Università degli Studi L'Aquila, Dip. MESVA; CNR, Istituto di Metodologie Chimiche, Area di Ricerca Roma 1, Italia
E-mail: ezio.burri@univaq.it

Andrea Del Bon, Gruppo di ricerca "Qanat Project", Italia

Angelo Ferrari, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologie Chimiche, Area di Ricerca Roma 1, Roma, Italia

Hossein Ghafori, UNESCO-ICQHS, Yazd, Iran

Ali Asghar Semsar Yazdi, UNESCO-ICQHS, Yazd, Iran

Labbaf Majid Khaneiki, UNESCO-ICQHS, Yazd, Iran

Arnaldo Pierleoni, Università Nicolò Cusano, Roma, Italia

Pietro Ragni, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologie Chimiche, Area di Ricerca Roma 1, Roma, Italia

Parole chiave (*key words*): qanat (*qanat*), risorse idriche sotterranee (*groundwater resources*), gestione (*management*), eredità culturale (*cultural heritage*)

PREMESSA

I qanat dell'Iran centrale, in considerazione della loro tipicità ed interesse culturale, sono stati dichiarati dall'UNESCO "Patrimonio dell'Umanità" nel 2016. Queste antiche opere di drenaggio e adduzione delle risorse idriche sotterranee, rivestono ancora un ruolo fondamentale nella gestione del territorio in diverse parti dell'Iran e in particolare per l'intera Provincia di Yazd. Inoltre, i qanat continuano a costituire un'importante attrazione turistica, che determina la necessità di affrontare le diverse problematiche connesse alla loro fruibilità da parte dei visitatori.

INQUADRAMENTO

Yazd, in passato centro nevralgico per le carovaniere che attraversavano i deserti dell'altopiano iraniano, si trova in una zona fertile situata fra i deserti del Kavir (Dasht-e Kavir) e di Lut (Dasht-e Lut) a circa 1200 m di altitudine, non distante dalla catena montuosa dell'arco vulcanico Sahand-Bazman e dal Shrir Kuh (4075 m). Il millenario adattamento ai mutamenti climatici, le aspre condizioni desertiche, l'assetto geologico e geomorfologico della zona (blocco di Yazd - GHORBANI M., 2013) hanno determinato un elevato ricorso all'utilizzo della tecnologia dei qanat per l'approvvigionamento idrico della città. La loro concentrazione in quest'area è tra le più elevate in Iran. Yazd è una delle città iraniane caratterizzata dal clima più secco, ovvero con una precipitazione media annua di circa 50-60 mm (ZAUDERER J., 1988) e temperature che in estate superano spesso i 45 °C e in inverno possono scendere al di sotto di 0 °C. I rilievi montuosi del Kuh-e Lafel'eh, situati a sud di Yazd, raggiungono quote superiori ai 2400 m e si presentano spesso innevati in inverno. Essi costituiscono la zona di ricarica delle falde acquifere contenute nei massicci carbonatici, nelle conoidi e nei potenti depositi alluvionali vallivi. L'abbondanza di sorgenti in questa area, ha sicuramente suggerito ai "*moqqani*" (tecnici addetti alla costruzione e manutenzione dei qanat) indicazioni sulla presenza di falde acquifere di produttività tale da poterne giustificare la loro captazione ed adduzione in sotterraneo per decine di chilometri verso la cittadina di Mehriz (*Fig.* 1) e poi verso Yazd e Ardakan. Sono presenti anche altri qanat, che intercettano le falde acquifere presenti a sud est di Yazd alle pendici del monte Kuh-e Sedaruk e altri ancora irrigano la fertile vallata di Taft a sud ovest di Yazd (*Fig.* 2).

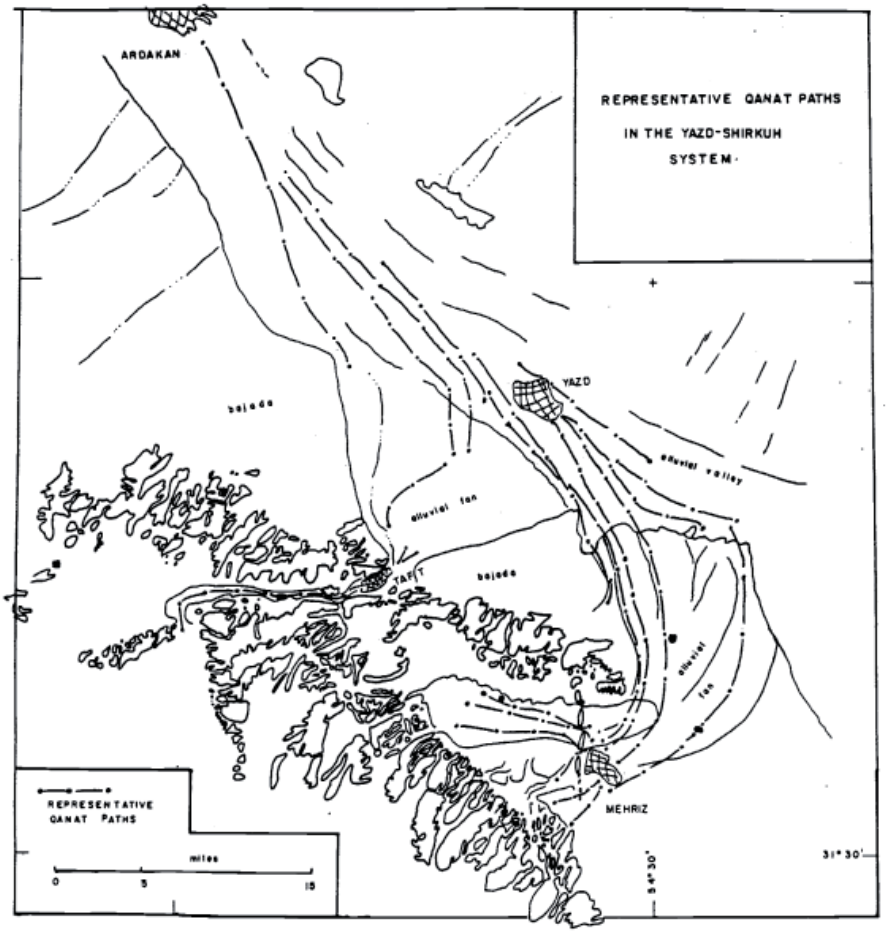


Figura 1 – Ubicazione sviluppo della rete dei qanat nella zona di Yazd

MATERIALI E METODI

Nell'ambito di una intesa del IMC-CNR (Istituto di Metodologie Chimiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche) con il centro UNESCO ICQHS (*International Center on Qanats & Historic Hydraulic Structure*) di Yazd e nella condivisione di uno specifico protocollo di ricerca, è in corso uno studio volto alla caratterizzazione multidisciplinare di queste opere idrauliche, le cui informazioni verranno raccolte e ordinate secondo una scheda sperimentale progettata per il censimento, il monitoraggio e le possibilità di gestione dei numerosi qanat dell'area. A questo proposito si precisa che, in questa fase preliminare, sono state escluse alcune voci specifiche che riguardano la gestione del corpo idrico (a esempio le tipologie di utenze) poiché si è scelto di dare priorità alla ricostruzione del quadro strutturale, piuttosto

Tabella 1 – Prima proposta di scheda di censimento per i qanat di Yazd

SCHEDA DI CENSIMENTO

Settore di identificazione			
Cartografia di riferimento		Numerazione	

Coordinate geografiche

Datum	Latitudine (gg° mm' ss")	Longitudine (gg° mm' ss")	Quota (m s.l.m.)	Nota

Denominazione	
Località (*via o numero civico*)	
Periodo di realizzazione (*certo/presunto*)	
Utilizzo	
Utilizzo attuale	
Sviluppo	
Identificazione di pozzi madre e profondità	

Numero dei pozzi aperti		Numero dei pozzi chiusi	

Tipologia			
Accessibilità (*si/no*)		note	
Tipologia di chiusura (*cancello, recinzione, muratura*)		altro	
Esistenza di vincolo di accesso (*si, no, parziale*)		Tipologia del vincolo (*perenne/temporaneo*)	

Caratteristiche geologiche	

Stato di conservazione generale (*ottimo/buono/mediocre/pessimo/diruto*)		Percorribilità interna (*facile/difficile/impossibile*)	
Staticità (*ottima/buona/mediocre/pessima*)		note	
Pericoli accesso (*sempre/stagionale/imprevedibile/ eccezionale/inesistente*)		note	
Alluvioni interne (*sempre/stagionale/imprevedibile/eccezionale/inesistente*)		note	
Franamenti interni (*sempre/stagionale/imprevedibile/eccezionale/inesistente*)		note	
Altro pericolo (specificare) (*sempre/stagionale/imprevedibile/eccezionale/inesistente*)		note	

Presenza di liquami e/o materiali inquinanti (*si/no*)		note	
Presenza di strutture murarie (*specificare*)			
Presenza di acqua (*si/no/parziale*)		note	
Presenza di parti allagate (*tutta sommersa/uscita sommersa/tutta allegata/allagata in parte*)		note	

Monitoraggio acque sotterranee (*si/no*)		note	
Parametri monitorati (*pH, T, CE, Eh, Altro*)		note	
Misure di portata in alveo (*si/no*)		Portata (L/s)	
Monitoraggio Radon (*si/no*)		note	

Monitoraggio ambientale esterno (*si/no*)		Parametri	
Monitoraggio ambientale interno (*si/no*)		Parametri	

che agli aspetti economici (sicuramente rilevanti e strategici, ma subordinati ai primi per le valutazioni di merito). Il modello di scheda sperimentale trae la sua configurazione da: esperienze maturate nell'ambito degli studi di settore che da tempo vengono condotti, conoscenze acquisite nell'ambito del censimento di specifiche cavità artificiali (come antichi acquedotti e canali di drenaggio molto diffusi in ambito mediterraneo), monitoraggio dei parametri qualitativi e quantitativi delle acque di falda e dei corpi idrici superficiali, nonché dei parametri metereologico-climatici adottati in ambito internazionale.

Riguardo il sistema di catalogazione e identificazione, si è optato per un supporto cartografico di rappresentazione (georiferita) del territorio secondo una maglia di 100 m di lato, in ragione del fatto che in alcune zone la densità dei qanat (e dei loro pozzi/discenderie di accesso e manutenzione) risulta particolarmente

Tabella 1 – First proposal of inventory form for Yazd qanats

INVENTORY FORM

Sector of identification			
Reference cartography		Notation	

Geographic coordinates

Datum	Latitude (gg° mm' ss")	Longitude (gg° mm' ss")	Elevation (m a.s.l.)	Note

Name	
Location (*street or house number*)	

Period of realization (*certain / presumed*)	

Use	
Current use	

Length of the underground system	
Identification of mother wells and depths	

Number of open shafts		Number of closed shafts	

Tipology			
Accessibility (*yes / no*)		note	
Closure type (*gate / fence / masonry*)		other	
Existence of access constraint (*yes / no / partial*)		Type of constraint (*permanent / temporary*)	

Geological characteristics	

General conservation status (excellent/ *good / poor / bad / ruined*)		Internal accessibility *easy / difficult / impossible*)	
Staticity (*excellent / good / poor / bad*)		note	
Access danger (*permanent / seasonal / unpredictable / exceptional / non-existent*)		note	
Underground flooding (*permanent / seasonal / unpredictable / exceptional / non-existent*)		note	
Underground collapses (*permanent / seasonal / unpredictable / exceptional / non-existent*)		note	
Other kind of danger (specify) (*permanent / seasonal / unpredictable / exceptional / non-existent*)		note	

Presence of sewage and/or polluting materials (*yes / no*)		note	
Presence of masonry structures (*specify*)			
Presence of water (*yes / no / partial*)		note	
Presence of flooded sections (all submerged / submerged exit / completely flooded / partially flooded`		note	

Groundwater monitoring (*yes / no*)		note	
Monitored parameters (*pH, T, CE, Eh, other*)		note	
Flow rate measurements (*yes / no*)		Flow rate (L/s)	
Radon monitoring (*yes / no*)		note	

Outdoor environmental monitoring (*yes / no*)		Parameters	
Indoor environmental monitoring (*yes / no*)		Parameters	

elevata. Inoltre, la maglia adottata consente di inserire, anche in un secondo momento, ulteriori sigle identificative, dato che il codice alfanumerico della maglia è strutturato per consentire di riconoscere agevolmente il settore di riferimento. Ciò permette, ad esempio, di svincolarsi momentaneamente dagli aspetti gestionali.

La scheda sarà corredata da una breve guida, volta a precisare ed esemplificare le informazioni richieste. In questa prima fase vengono forniti alcuni dettagli generici per la compilazione, esplicitati in corsivo nella scheda (*Tab.* 1). Inoltre, l'implementazione di un sistema di monitoraggio (eventualmente controllato in remoto) sarà di importanza strategica per valutare le portate dei qanat, definire le aree di ricarica, capire i rapporti tra apporti meteorici e acque sotterranee e per sviluppare un modello concettuale della circolazione idrica sotterranea captata dai qanat.



Figura 2 – Il qanat di Mehriz vicino a Yazd; Mehriz qanat, near Yazd

Per garantire l'usabilità/conformità agli standard di sicurezza di questi sistemi ipogei, il monitoraggio della possibile presenza di radon sarà eseguito sia nelle acque, sia (tenendo conto del significativo sviluppo lineare e areale dei qanat) lungo le gallerie, negli ambienti sotterranei e nelle strutture di servizio/entrata, identificando le zone di maggiore concentrazione, la possibile origine e le azioni di mitigazione più adatte.

CONCLUSIONI

La proposta di scheda di censimento allegata rappresenta, solo, un primo doveroso approccio sperimentale, in quanto sulla base delle esperienze pregresse, è facilmente prevedibile la necessità di adattare, precisare, modificare le voci già considerate, nonché l'adozione di altre ex novo. Infatti, sebbene siano state avviate, nella Provincia di Yazd, alcune iniziative volte a realizzare e caratterizzare sotto vari aspetti i qanat, la peculiarità di queste infrastrutture idrauliche pone continuamente i tecnici addetti e i ricercatori innanzi a nuovi interrogativi e problematiche, che aprono la strada a ulteriori temi di ricerca e di approfondimento.

INTRODUCTION

Considering the specificity and cultural interest of qanats, UNESCO declared them as "Common Heritage of Mankind" in 2016. These ancient underground hydraulic systems still have an important role for the territorial management in several areas of Iran and in particular in the whole Yazd province. Moreover qanats are an important touristic attraction and this arises the need to study the different problems related to their usability for visitors.

FRAMEWORK

In the ancient times, Yazd was an important caravan crossroads, located at the edge of the Iranian plateau deserts. This city lies in a fertile area between the deserts of Kavir (Dasht-e Kavir) and Lut (Dasht-e Lut), approximately 1200 m a.s.l., not far from the mountain chain of the volcanic arch Sahand-Bazman and from the Shrir Kuh (4075 m). The millennial adaptation to climate changes, the severe desert conditions, the geological and geo-morphological setting of the area (Yazd Block, GHORBANI M., 2013) led to a wide implementation of the qanat technology to meet the water demand. The presence of qanat in this area is one of the highest in Iran. Yazd is characterized by a very dry climate; the annual rainfall average is about 50-60 mm (ZAUDERER J., 1988), in summer temperature often exceeds 45 °C, while in winter, it falls below 0 °C.

Kuh-e Lafel'eh mountain chain is located south of Yazd , whose peaks, exceeding 2400 m a.s.l., are covered by snow in winter. These mountains are the recharge area for groundwater flowing trough carbonate rocks, conoids and thick alluvial deposits along valleys. Likely, the presence of several springs in this area, provided "moqqani" (technicians in charge of construction and maintenance of the qanats) information about the presence of valuable aquifers and the chance to tap them in order to supply the towns of Mehriz (Fig. 1), Yazd e Ardakan. There are other qanats exploiting the aquifers South-East of Yazd, along the slopes of Kuh-e Sedaruk mountain, and still others South-West to irrigate the fertile Taft valley (*Fig.* 2).

MATERIALS AND METHODS

UNESCO-ICQHS (International Center on Qanats & Historic Hydraulic Structure) in Yazd and IMC-CNR (Methodological Chemistry Institute - National Research Council) signed a research agreement to implement a multi-disciplinary characterization on these hydraulic systems. The information will be collected and organized according to a specific form studied for the inventory, monitoring and management of the qanats in the study area. During the project start up, some aspects related to qanat management (i.e. types of users/stakeholders) will be excluded, since the reconstruction of the knowledge framework concerning the infrastructures, has been considered more critical than the economic assessment (surely important, but dependent on the previous one).

The form has been prepared on the basis of: experiences resulting from the past sector studies; acquired knowledge in the survey of underground works (like ancient aqueducts and drainage canals/tunnels widespread in the Mediterranean area); qualitative and quantitative monitoring of groundwater and surface water bodies; and meteorological and climate parameters internationally adopted.

As regards the identification and classification system, a (geo-referenced) cartographic support was selected for the territory representation, using a square mesh of 100 m. In fact, qanat density (including their maintenance wells/shafts) is particularly high in some areas. Moreover, this mesh allows to insert, even at a later time, other identification elements, as the mesh alphanumeric code is arranged in order to easily recognize the reference sector. This framework allows to be not linked to management issues.

The form will be supported by a short handbook aimed to clarifying and exemplifying the requested information. At this first stage, some general details regarding the form filling are shown in Italic (*Tab.* 1). The implementation of a monitoring system (possibly remotely controlled) will be of strategic importance in order: to evaluate qanats flow rates; to define their recharge areas; to understand relationships between rainfall/snow and groundwater resources, and to develop a conceptual model regarding the aquifers tapped by qanats.

To ensure the usability/compliance with safety standards of these hypogeum systems, the possible presence of radon will be monitored in water and (taking into account the significant linear and aerial development of qanat systems) along tunnels, in shafts and other underground facilities. In this way, areas of higher concentrations, the possible origin and the suitable mitigation actions will be identified.

CONCLUSIONS

The enclosed suggested inventory form is a first experimental approach. According to previous experiences, the likelihood of modifications, adaptations, clarifications to the items already considered, or to insert new different items can be easily foreseen. Even if, in the Province of Yazd, some activities to characterize the qanats have been undertaken, the peculiarity of these hydraulic systems continues to lead to new questions and problems and consequently to new research topics.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

GHORBANI M. (2013) The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources, Chapter 2 - A Summary of Geology of Iran, Springer Geology, ISBN 978-94-007-5624-3, DOI 10.1007/978-94-007-5625-0, pp. 45-64.

ZAUDERER J. (1988) The Qanats of Yazd, Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, ISSN 0272-6106, pp 97-109.

Gaeta: analisi qualitativa dei fenomeni di instabilità ed interventi per la riqualificazione ambientale della spiaggia di Fontania

Gaeta: Qualitative analysis of the instability phenomena and interventions for the upgrading of the Fontania beach

Ilaria Falconi
Consigliere SIGEA sez. Lazio – Tecnico ISMEA presso il Ministero politiche agricole alimentari, forestali e del turismo
E-mail: ilaria.falconi.greenadvantage@gmail.com

Parole chiave (*key words*): Spiaggia di Fontania (*Fontania beach*), riqualificazione ambientale (*environmental redevelopment*), ingegneria naturalistica (*naturalistic engineering*), inquadramento geologico (*geological*), geomorfologico (*geomorphological*), climatico e vegetazionale (*climatic and vegetational framing*)

INTRODUZIONE

Il lavoro che sto presentando tratta di un progetto di intervento di ingegneria naturalistica sulla Spiaggia di Fontania a Gaeta.

La città di Gaeta è ubicata in provincia di Latina e la sua superficie è di circa 28 km^2. Il suo territorio è limitato ad ovest dal Torrente Pecorane, confine col Comune di Sperlonga, ed a nord-est dal Rio d'Itri, confine con il Comune di Formia e d'Itri. Il territorio di Gaeta fa parte dei Monti Aurunci che giungono fino al mare e formano coste alte.

Ai piedi delle coste alte, non lambite direttamente dal mare, sono presenti spiagge sabbiose molto ampie: S. Agostino, Arenauta, Arianna e Serapo. La costa è molto articolata in quanto i rilievi, arrivando fino al mare, formano promontori separati da spiagge: Monte a Mare, M. Scissura e M. Orlando.

L'evoluzione geomorfologica dell'area è stata ampiamente influenzata dalle oscillazioni del livello del mare, in particolare durante il Quaternario. Sulla costa la notevole acclività è dovuta alla presenza di ripide falesie, spesso impostate in corrispondenza di faglie e fratture.

Il progetto si compone di una parte introduttiva di descrizione del sito di interesse e del territorio circostante, in particolare degli aspetti geomorfologici, nonchè dei rilevanti aspetti storici per la presenza, proprio a ridosso della spiaggia di Fontania, di ben otto grotte risalenti all'epoca romana (il nome Fontania si fa risalire ad un console romano, Gneo Fonteo, che nel I secolo d.C. si stabilì in quei luoghi). Inoltre, sono ancora oggi visibili i resti della grandiosa villa con vasche e piscine comunicanti con il mare aperto.

Il lavoro analizza gli aspetti climatici, vegetazionali e gli aspetti riguardanti l'analisi dei fenomeni di instabilità.

La parte conclusiva tratta degli interventi proposti per il ripristino ambientale, nonché per la necessaria e conseguente messa in sicurezza delle sezioni maggiormente soggette a crolli, frane e smottamenti, ritenuti idonei al recupero di un sito di rilevante importanza turistica, storica e culturale quale è la spiaggia di Fontania.



Figura 1 – La spiaggia di Fontania

LA SPIAGGIA DI FONTANIA

La spiaggia ha forma quasi di falce lunare e fa parte del sistema continuo di piccole e grandi pocket beaches (Arenauta, Ariana, San Vito e San Agostino) che costituiscono le spiagge della riviera di Ponente di Gaeta. Tali spiagge hanno in comune la presenza di faglie orientate prevalentemente in direzione NW-SE e lo sviluppo delle falesie controllato dalla tettonica (*Fig.* 1).

La falesia calcarea borda la spiaggia attuale e la roccia si presenta attraversata da una rete di discontinuità strutturali a direzione sia appenninica che antiappenninica. A causa della stretta correlazione esistente tra le strutture tettoniche e l'evoluzione morfologica dell'area, anche i pendii dei rilievi sono costituiti da versanti strutturali di faglia o di linea di faglia. Il territorio è caratterizzato da una serie di bassi rilievi collinari di forma conica o tronco-conica.

I versanti di tali rilievi sono di tipo strutturale e separati da valli che si sviluppano secondo linee tettoniche locali (principalmente in direzione NW-SE e SW-NE).

La spiaggia di Fontania è costituita da sabbie medio-fini giallastre. La tettonica ha agito piuttosto nettamente in quanto gli strati calcarei risultano pervasi da fratture diverse e con spaziature che talora superano il centimetro, alcune riempite da suolo.

Il sito è stato classificato nell'Area di Pericolo A tra quelle "sottoposte a tutela per pericolo di frana" del Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI). La spiaggia di Fontania è interamente accessibile e fruibile durante tutti i periodi dell'anno.

LE GROTTE

Sul lato Nord della spiaggia si rinviene la prima grotta di epoca romana (F1). La grotta F1 appare con volta a botte, pareti calcaree rivestite in pietra e con tratti di opus reticulatum romano (*Fig.* 2).

Sul lato destro, guardando la grotta di fronte, termina la parte terrigena-vegetale franata dal sentiero e affiorano tutt'intorno banchi e strati calcarei da compatti a fratturati ricoperti in parte da vegetazione spontanea.



Figura 2 – La grotta F1

All'interno della grotta F1 si rinvengono alcune lesioni pseudo-ortogonali alle direttrici delle volte. Inoltre, si riscontrano tracce di percolazione acquifera all'interfaccia tra la roccia in posto e i piedritti murari.

Un fenomeno di dissesto significativo, seppur circoscritto, riguarda l'imbocco della grotta F1 che è stato oggetto di un crollo (1985), come riscontrabile dalle porzioni murarie rimaste a piè d'opera. L'imbocco della grotta F1 si presenta con la sola semiporzione destra in quanto quella sinistra è integralmente mancante a causa del crollo anzidetto e la porzione rimasta è interessata da una lesione di ampiezza centimetrica con sviluppo pseudo-ortogonale alla direttrice della volta. Inoltre, è significativa la presenza di vegetazione insistente all'estradosso dell'imbocco (*Fig.* 3).

Sul lato Sud della spiaggia si evidenziano una serie di ipogei posti sul retro della spiaggia a ventaglio e due grotte (F4 ed F5) tra loro parallele.

Le grotte F4 e F5 presentano pareti cementate in buono stato di conservazione con suolo sabbioso ed erboso. Accanto, a sinistra, un altro vasto ambiente (F6, l'antico Ninfeo).

Attualmente, la grotta F6 è a giorno e semicircolare con tracce di affreschi policromi,



Figura 3 – Imbocco della grotta F1. Le frecce gialle indicano il fenomeno di dissesto presente nella porzione sx



Figura 4 – Le grotte F2 – F3 - F4 - F5 – F6 – F7

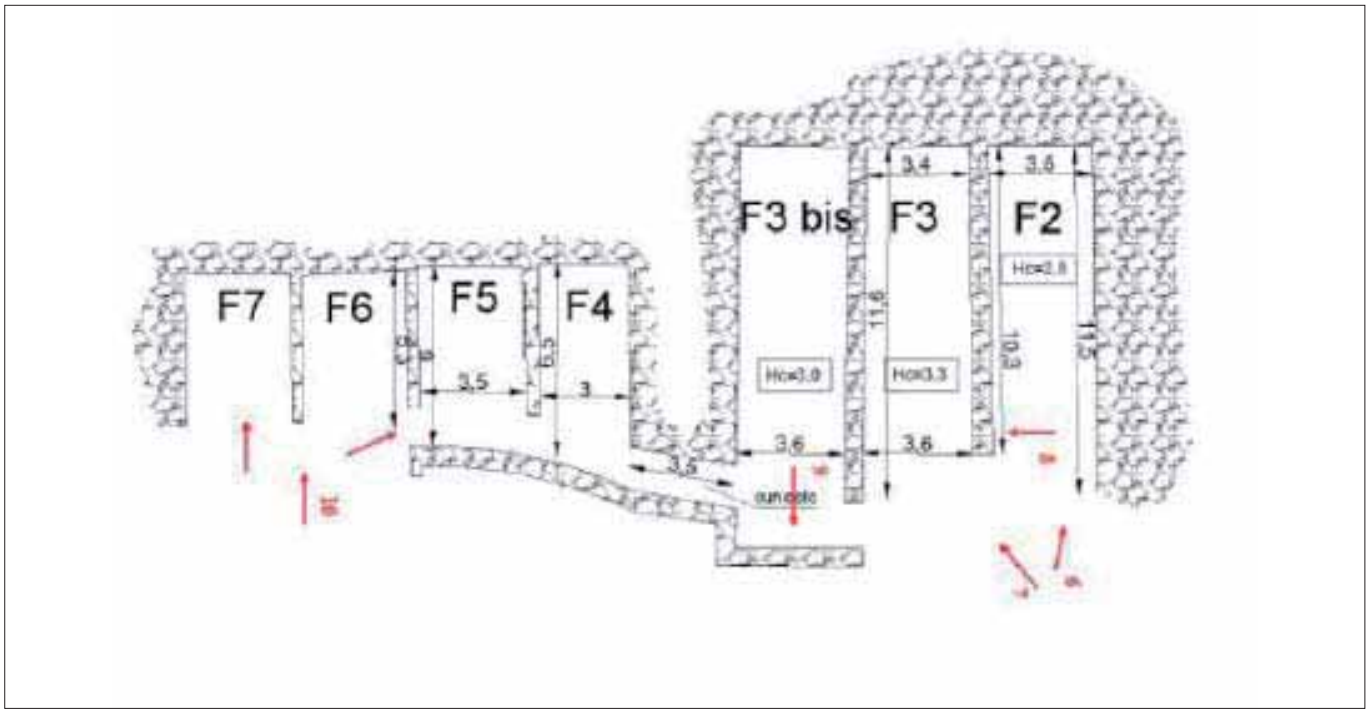


Figura 4a – Le grotte F2 – F3 - F4 - F5 – F6 – F7

pareti in opus reticulatum che si incastonano sulle soprastanti pareti cementate ed in pietra, i vari ordini dei muretti delle gabbionate ed il sentiero, con la palizzata in legno, al di sopra di tutto. La stabilità attuale di F6 appare buona. Al termine della spiaggia, sul lato Sud si rinvengono altri due ambienti ad ingresso unico (F7 e F8).

Tali ambienti sono alti 4 metri e lunghi 10 metri con volte cementate (i resti di tre pilastri centrali), le pareti calcaree e la vegetazione soprastante (*Fig.* 4 e 4a).

Le grotte F7 e F8 si presentano in condizioni di stabilità più che discreta[1]. Al confine del lotto, le pareti rocciose e fratturate si alternano, ancora più a Sud, a opere romane di ambienti ora a giorno, da cui in passato si sono avuti distacchi e crolli di materiale lapideo (come attesta ancora un cartello di attenzione per caduta massi).

La parte mediana del fronte sulla spiaggia è interessato da pareti rocciose ed in pietra con vegetazione spontanea. Inoltre, si nota un ampio canale di scarico che convoglia le acque superficiali provenienti da Sud e da Ovest, quasi di fronte alla proprietà Valente.

In altra proprietà attigua (Duratorre), posta a Nord dell'area, per la parete a partire dal lato dx della grotta F1 verso mare, si nota una fascia di terreno vegetale, che partendo dal ciglio dello stradello pedonale arriva fino alla spiaggia, interessata da arbusti ed alberi cresciuti in modo incontrollato.

Inoltre, le acque di ruscellamento superficiale dei terreni immediatamente a monte e quelle dello stradello stesso confluiscano proprio nella porzione di terreno suddetto.

Tale combinazione di fattori ha fatto sì che in data 17/6/2014 si sia verificato uno smottamento di materiale di riporto dovuto alle forti e persistenti piogge e all'azione destabilizzante della vegetazione. Il cumulo è arrivato sino alla battigia (*Fig.* 5).

Nel dettaglio, gli imbocchi presentano dei fenomeni localizzati di degrado con alcune lesioni di apertura da millimetrica a centimetrica con sviluppo ortogonale alle direttrici delle volte (grotte F1, F2 e F7) e limitate porzioni con avanzata erosione della malta (grotte F6 e F7).

LA FALESIA

Il pendio delle falesie calcaree è costituito da terreno vegetale con presenza di arbusti e alberi a piccolo e medio fusto.

La spiaggia è confinata, nei lembi laterali, da due falesie calcaree di modeste dimensioni.

La falesia calcarea settentrionale (sezione 1 e sezione 2) che borda l'estremità setten-

1 La stabilità delle grotte è stata valutata adoperando il fattore di confidenza FCk e l'analisi bidimensionale. Pertanto, si è realizzato un modello FEM bidimensionale e si è utilizzato il programma di calcolo Sap 2000 V.14 (Bravini A.,2014, *Perizia geologico-tecnica*).



Figura 5 – Proprietà Duratorre. Le frecce rosse indicano le zone interessate da vegetazione cresciuta in maniera incontrollata e dalla confluenza delle acque di ruscellamento

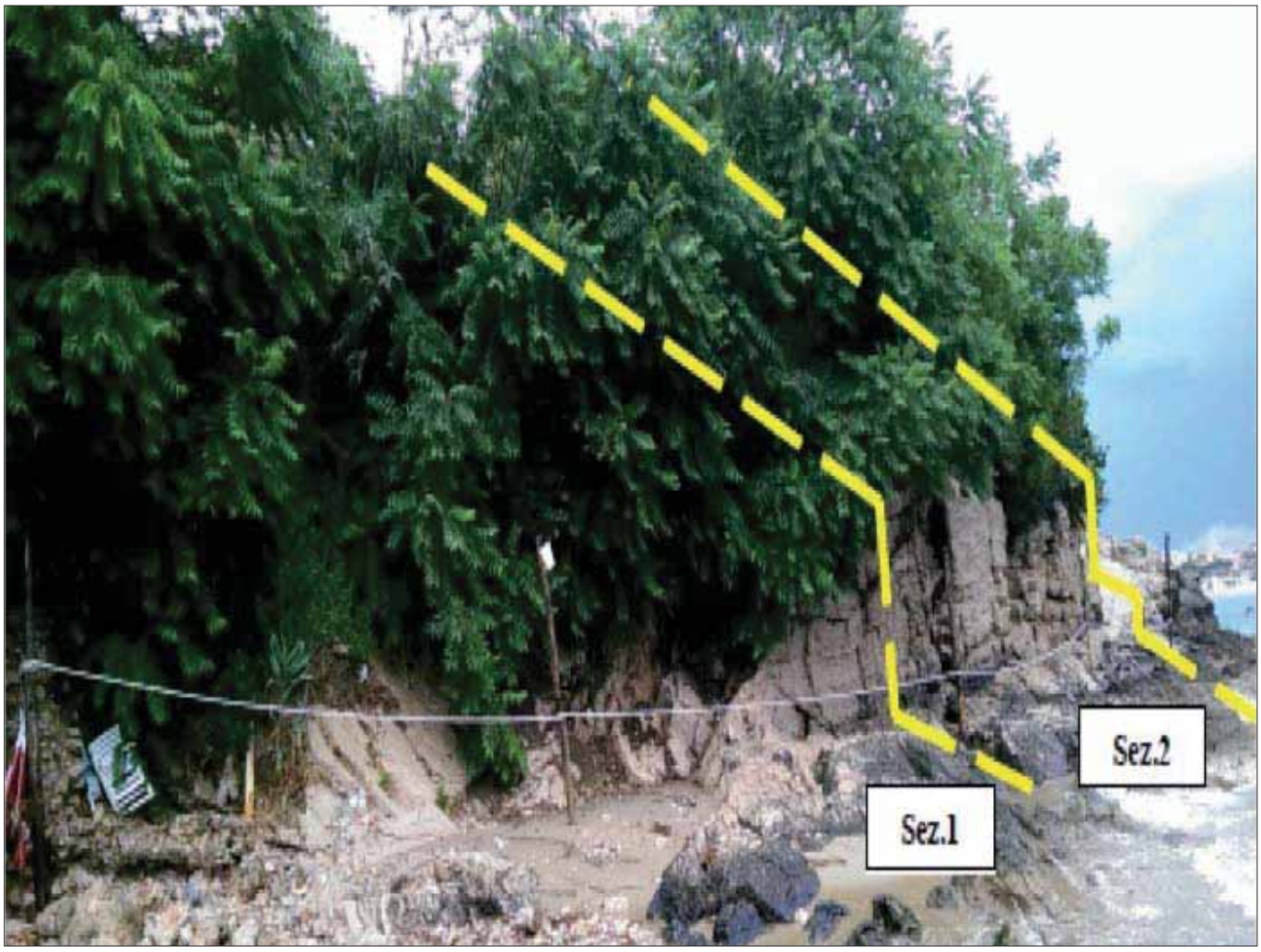


Figura 6 – La falesia settentrionale

trionale della spiaggia di Fontania presenta, partendo dal livello del mare verso monte, una parete sub-verticale di altezza variabile della roccia esposta a partire dal livello medio marino fino ad un massimo di circa 5 metri sul livello del mare (*Fig.* 6).

A monte della "testa" della falesia, il versante è costituito da terreno vegetale con presenza preponderante di arbusti ed alberi a piccolo-medio fusto fino ad arrivare ad una quota di circa 9-10 metri sul livello del mare dove lo stradello pedonale borda l'intera falesia seguendone l'andamento.

Osservando la falesia a partire dal piedritto destro della grotta F1 (la più a settentrione dell'intero sistema di grotte) verso mare, si nota una fascia di terreno vegetale, che partendo dal ciglio dello stradello pedonale arriva fin alla spiaggia, interessata da arbusti ed alberi cresciuti in modo incontrollato.

La falesia calcarea meridionale (sezione 3 borda l'estremità meridionale della spiaggia e presenta un'altezza della roccia esposta di circa 3 metri (*Fig.* 7).

La falesia è bordata da un muro in mattoncini rossi posto alla base con uno "sperone" costituente un relitto di contrafforte posto a circa 6 metri di distanza dal piedritto sx della grotta F7.

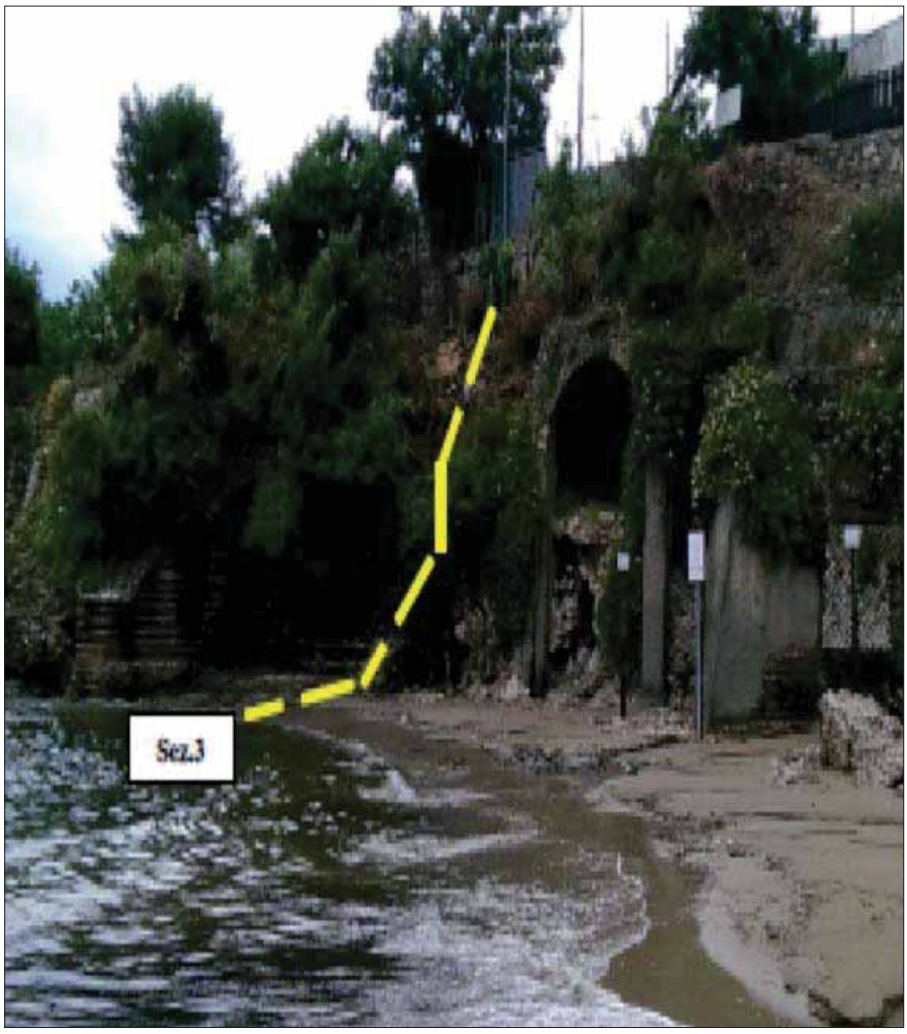


Figura 7 – La falesia meridionale

INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO

L'area in esame è ubicata a W del centro abitato di Gaeta ed è esposta a E. Tale area è mediamente acclive e si trova tra 0 e 18 metri sul livello del mare. I rilievi di questo tratto di costa rappresentano le propaggini costiere del sistema montuoso degli Aurunci.

Il sistema montuoso degli Aurunci è costituito in prevalenza da rocce carbonatiche. Più specificamente, nell'area dell'immediato sottosuolo, è presente una successione di calcari micritici o granulari biancastri di età meso-cenozoica, grigi o avana, in banchi e strati nettamente fratturati, soprattutto lungo l'arco costiero, a cui si alternano a diverse altezze dolomie e calcari dolomitici macro e microcristallini.

Su questi litotipi, modellati e carsificati da eventi quaternari, si trovano in genere lembi di detrito calcareo indurito da cemento secondario di analoga composizione, il cui spessore risulta molto variabile ed assume i valori massimi di circa 2 metri alla base dei versanti.

A Nord sono prevalenti coltri di sabbie rossastre pleistoceniche con livelli e lenti argillose originate da depositi dunari di origine eolica compattati.

La sottostante spiaggia di Fontania è costituita da sabbie medio-fini giallastre.

La tettonica ha agito piuttosto nettamente in quanto gli strati calcarei risultano pervasi da fratture diverse e con spaziature che talora superano il centimetro, alcune riempite da suolo.

INQUADRAMENTO FITOCLIMATICO[2]

Il binomio golfo a sud e monti a nord caratterizza fortemente il clima delle città di Formia e Gaeta. Formia e Gaeta sono riparate dai forti venti di tramontana, ma sono esposte al freddo ed asciutto grecale invernale.

Per il resto le cittadine del golfo risultano sempre protette dalle irruzioni fredde settentrionali.

Non di rado, in autunno, forti celle temporalesche marittime, alimentate dalla superficie marina calda, colpiscono le città di Formia, Gaeta e Terracina esaltate nel loro sviluppo verticale proprio dai M. Aurunci (Formia e Gaeta) e Lepini (Terracina).

Infatti, il numero medio dei temporali nel golfo di Gaeta in un anno è consistente. Il picco della piovosità si verifica nei mesi di novembre e dicembre, mentre un importante decremento delle piogge si fa sentire in genere da metà maggio. Il mese più siccitoso e stabile risulta essere luglio.

La mitezza che contraddistingue le città del golfo fa sì che non si abbiano estremi termici notevoli in nessun senso (le ondate di caldo estive sono mitigate dalle brezze, anche se spesso associate ad elevati tassi di umidità, ed i mesi invernali sono caratterizzati da rare nottate con temperature sotto lo zero).

Gaeta è caratterizzata da un clima mediterraneo avente un Indice ombrotermico sempre inferiore a due anche considerando le eventuali compensazioni che prevedono l'apporto delle precipitazioni dei mesi di giugno e di maggio.

Nell'ambito della regione Mediterranea, il territorio in esame appartiene al termotipo Termo-mediterraneo superiore ed all'ombrotipo umido inferiore-subumido superiore.

LA VEGETAZIONE POTENZIALE

Lo studio del fitoclima è una tappa fondamentale per definire la vegetazione potenziale di una regione in quanto la sua conoscenza permette di comprendere le potenzialità biologiche di un territorio.

Il fitoclima è lo strumento conoscitivo di base indispensabile per pianificare attività importanti quali la riforestazione, la riabilitazione e il recupero ambientale. Lo studio fitoclimatico dovrebbe precedere lo studio

2 Carta fitoclimatica (Blasi C.,1994, *Fitoclimatologia del Lazio*).



Figura 8 – La falesia settentrionale

della vegetazione in modo da raccogliere in un unico sistema logico considerazioni di tipo strutturale, floristico e corologico.

In campo vegetazionale, gli studi di carattere fitoclimatico sono finalizzati alla definizione di aree omogenee e di relazioni tra elementi di natura ecofisiologica ed elementi climatici quali i valori medi ed estremi delle precipitazioni e delle temperature.

Gli studi di fitoclimatologia risultano fondamentali per trovare le relazioni tra gli elementi fisici e i caratteri biologici (specie e comunità) di un territorio.

La vegetazione naturale potenziale è a struttura prevalentemente forestale con boschi di querce dominati da specie sclerofille sempreverdi (Quercus ilex), arbusti della macchia mediterranea (ad es. Euphorbia dendroides e Pistacia lentiscus) e gariga (Rosmarinus officinalis, Anthyllis barba–jovis e Erica multiflora).

LA SERIE DI VEGETAZIONE

L'elemento caratterizzante dell'ambiente è il regime termico mite nel periodo invernale, accompagnato ad una moderata piovosità. Queste condizioni sono favorevoli allo sviluppo di una formazione vegetale composta in netta prevalenza da piante arboree sclerofille, cioè con foglie persistenti, di consistenza coriacea, rinnovate gradualmente ogni anno.

Le essenze forestali sono tipicamente termofile e moderatamente esigenti per quanto concerne l'umidità, pertanto rientrano fra le specie mesofite.

Un elemento costante di questa fitocenosi è la netta prevalenza del leccio, che può arrivare a formare un bosco in purezza comunemente chiamato lecceta. Con il nome scientifico di Quercion ilicis o di Quercetum ilicis si indicano le fitocenosi termofile o termomesofile con larga rappresentanza della specie Quercus ilex a portamento arboreo-arbustivo (Macchia mediterranea) o arboreo (Foresta mediterranea sempreverde).

La serie ginepro coccolone – ginepro fenicio è a portamento arbustivo sempreverde. Il suo ambiente ottimale si rinviene nelle zone costiere.

Il ginepro è una gimnosperma e, come tale, è una pianta con poche esigenze idriche, tale per cui è facile trovarla in luoghi non facilmente popolabili da altre piante (ad esempio le montagne, dove le frequenti gelate rendono l'acqua scarsamente biodisponibile e ambienti mediterranei, dove l'aridità la fa da padrona nei mesi estivi). Ha una fortissima resistenza all'irraggiamento solare, ai venti, alla salsedine e alla siccità.

La macchia a sclerofille colonizza i pendii e le scarpate rocciose. Dal punto di vista fisionomico, la vegetazione è caratterizzata da uno strato arbustivo alto 2,5-4 metri, fitto e spesso impenetrabile, dominato Pistacia lentiscus.

Le comunitaà di gariga di falesie costiere del Mediterraneo occidentale sono dominate da camefite e nanofanerofite.Tali comunità di gariga si sviluppano nei piani bioclimatici termo e mesomediterraneo.

In sintesi:

- Serie del leccio: *Quercion ilicis*;
- Serie del ginepro fenicio e del ginepro coccolone: *Oleo – Ceratonion*;
- Serie del mirto e lentisco: *Myrto – Pistacietum lentisci*;
- Garighe ad Erica multiflora e Rosmarinus officinalis: *Erico multiflorae – Rosmarinetum officinalis*.
- Alberi guida (bosco): *Quercus ilex*, *Ceratonia siliqua* e *Sorbus domestica*.
- Arbusti guida (mantello e cespuglieti): *Pistacia lentiscus*, *Euphorbia dendroides*, *Rhamnus alaternus*, *Erica arborea* ed *Erica multiflora*.

ANALISI QUALITATIVA DEI FENOMENI DI INSTABILITÀ

Nella spiaggia di Fontania si rinvengono numerosi locali sotterranei di epoca romana

Tabella 1 – La flora

*La flora, **attualmente**, presente sulle falesie*	*La flora **che dovrà essere presente***
Capparis spinosa (pianta del cappero)	Anthyllis barba – jovis (barba di Giove)
Sambucus nigra (sambuco)	Chamaerops humilis (palma nana)
Nerium oleander (oleandro)	Euphorbia dendroides (euforbia arborea)
Opuntia ficus – indica (fico d'india)	Pistacia lentiscus (lentisco)
Mirabilis jalapa (bella di notte)	Erica multiflora
Ailanthus altissima (ailanto)	Rosmarinus officinalis (rosmarino)

Tabella 2 – Interventi per la spiaggia di Fontania

SCOPO DELL'INTERVENTO	TIPO DI INTERVENTO NATURALISTICO
Stabilizzazione superficiale	Palizzate vive
Controllo dell'erosione superficiale	Inerbimenti con posa di tappetti erbosi per rivestire i canaletti
Messa in sicurezza fronte roccioso	Gabbionata viva
Difesa caduta rocce nella grotta F1	Bioreti in fibra di cocco
Drenaggio acqua di ruscellamento	Canalette in legname e pietrame
Dissesto all'imbocco delle grotte F1, F6 e F7	Reti metalliche con geosintetici

in pessimo stato di conservazione ed in parte crollati. Inoltre, alcuni sono posti al di sotto delle pertinenze delle ville a tergo della spiaggia ed eventuali crolli ipogei potrebbero determinare il collasso dei fabbricati retrostanti. I litotipi sono costituiti in prevalenza da strati e banchi di roccia calcarea compatta con buone caratteristiche fisico-meccaniche ed una risposta ottimale alle sollecitazioni dinamiche.

I litotipi però risultano fratturati a tal punto da abbassare la qualità delle rocce. La caduta di porzioni di blocchi o cunei costituenti la parete della falesia calcarea è determinato dalla degradazione fisico – meccanica e chimica delle porzioni più superficiali della falesia.

La stabilità della zona è determinata sia dalle dimensioni degli elementi di roccia in movimento contenute rispetto alle dimensioni della falesia e sia dall'altezza modesta delle pareti stesse. Nell'area in esame il distacco eventuale è da limitarsi a piccoli blocchi isolati messi in moto da processi di scivolamento.

A gravare maggiormente sulla suscettibilità di innesco di caduta è il pendio immediatamente a ridosso di entrambe le falesie:

- per la settentrionale gioca un ruolo determinante la vegetazione cresciuta in maniera incontrollata, la pendenza del pendio e la mancanza di idonea canalizzazione delle acque piovane raccolte dallo stradello comunale (*Fig.* 8);
- per quella meridionale vi sono i blocchi distaccati distribuiti sul terreno costituente il pendio naturale dalla pendenza troppo elevata.

INTERVENTI PER LA SPIAGGIA DI FONTANIA

Lo stato della spiaggia di Fontania e del terreno sovrastante le grotte da F2 a F7, non manifesta, attualmente, condizioni di pericolo se non immediatamente circoscritto agli imbocchi delle grotte F1, F6 e F7.

Allo stato attuale, non si reputa esserci immediatezza di crolli o cedimenti delle cavità in oggetto, se non per i punti evidenziati.

La probabilità che si inneschi un fenomeno di caduta di materiale roccioso dal pendio può essere ridotta con il taglio e la rimozione completa della vegetazione presente e piantumazione con vegetazione idonea (Tab. 1).

Gli alberi vengono piantati ove la morfologia e i vincoli connessi alla distanza di sicurezza lo consentono. Le stazioni con caratteristiche morfologiche ed ecologiche difficili (ad esempio le scarpate instabili con suoli poco evoluti o assenti) sono, in genere, poco idonee all'impianto degli alberi che con il loro peso possono creare problemi di instabilità. Gli apparati radicali di diverse specie arboree non sempre possiedono apparati radicali profondi e, quindi, nella progettazione degli interventi di stabilizzazione dei versanti si privilegiano le specie arbustive.

I cespuglieti rappresentano, nel processo di successione, uno stadio dinamico più evoluto rispetto alle comunità erbacee, e con il tempo, se lasciati indisturbati, possono in molti casi evolvere nella formazioni arboree di riferimento.

Gli arbusti pionieri autoctoni possiedono apparati radicali in grado di stabilizzare, in media, fino ad uno spessore di circa 0,3-0,6 metri di substrato.

Inoltre, all'azione stabilizzante va, comunque, aggiunta quella di protezione antierosiva areale tramite inerbimento con le specie erbacee che agiscono tipicamente nei primi decimetri di suolo.

Gli arbusti autoctoni possono essere impiegati sia da soli e sia in abbinamento con i materiali morti negli interventi stabilizzanti e consolidanti.

In ambito mediterraneo vanno tenuti in considerazione i fattori limitanti dovuti alla presenza di un periodo estivo con stress idrico, alla presenza di un periodo di riposo vegetativo più breve di quello delle regioni montane (con conseguente periodo più breve per l'utilizzo delle specie con capacità di riproduzione vegetativa, quali i salici o le tamerici) e la difficile reperibilità delle talee e del materiale vivaistico autoctono, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

L'uso delle specie erbacee per il recupero ambientale è indicata per tutti quei casi in cui è impossibile per ragioni di substrato o pendenza intervenire direttamente con la piantumazione di specie arboree o arbustive.

Nel caso di scarpate o di pendii la composizione del miscuglio di sementi deve essere determinata in base ai valori di pendenza e in considerazione delle composizioni floristiche locali.

La necessità di utilizzare specie autoctone per gli interventi di ingegneria naturalistica è un criterio fondamentale da adottare per riproporre fitocenosi coerenti con la vegetazione autoctona e per scongiurare il pericolo di introduzione di specie esotiche.

Le opere per il controllo dell'erosione superficiale creano condizioni ambientali e di stabilità necessarie all'attecchimento e alla crescita della vegetazione erbacea, arbustiva ed arborea impiantata sulle scarpate e sui pendii in terra.

La copertura vegetale consente un efficace controllo e mitigazione dei fenomeni d'erosione proteggendo il terreno dall'azione aggressiva delle acque meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche.

Le tecniche d'inerbimento hanno un ridotto impatto ambientale (Tab. 2)[3].

Questi sistemi rappresentano una delle soluzioni più indicate nelle zone di particolare pregio ambientale dove occorre garantire oltre all'efficacia tecnico-funzionale anche gli aspetti ecologici, estetico paesaggistici e naturalistici ad esso connessi.

Per la porzione antistante la proprietà Duratorre occorre effettuare idonei interventi di regimazione e canalizzazione a monte, non essendo bastevoli anche quelli presenti.

3 Boccalaro F., 2012, *Difesa delle coste e ingegneria naturalistica.*

BIBLIOGRAFIA

Blasi C. (1994), *Fitoclimatologia del Lazio*, Editore Università La Sapienza e Regione Lazio.

Boccalaro F. (2012), *Difesa delle coste e ingegneria naturalistica*, Collana Sigea di Geologia Ambientale, Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Bravini A. (2014), *Perizia geologico-tecnica integrativa inerente un sito soggetto ad aggiornamento delle condizioni di rischio dell'ambito P.A.I.*, Comune di Gaeta (LT).

GIS e Drone per la gestione emergenziale delle cavità sotterranee

Filippo Massimiliano Gagliano
Docente di geologia applicata - ITS "G. Quarenghi" di Bergamo
E-mail: fmgagliano@gmail.com

GIS & Drone for the emergential management of sinkholes

Parole chiave (*key words*): drone (*drone*), internet degli oggetti (*internet of things*), cavità sotterranea (*sinkhole*), sistema informativo geografico, (*geographic information system*), fotogrammetria (*photogrammetry*), ambienti interni (*indoor environments*)

ABSTRACT IN ITALIANO

I fenomeni da sprofondamento, diffusi in tutto il mondo, possono avere sia origini "naturali" (es. collasso di cavità carsiche) che antropiche (collasso di cavità artificiali abbandonate) rappresentando, spesso, un fattore di grande rischio a causa della loro imprevedibilità. Essi sono presenti in molte regioni d'Italia, interessando contesti geologici e tipologie di terreni anche molto differenti fra loro. L'utilizzo della banca dati georeferenziata dei sinkhole è necessaria per una corretta pianificazione territoriale a supporto della protezione civile. Non basta reperire la singola scheda del sinkhole, occorre studiare la dinamica dello sprofondamento per un preciso monitoraggio e una migliore gestione dell'emergenza. Lo studio propone l'uso combinato di piattaforme GIS e apparecchi a pilotaggio remoto (APR) per migliorare le metodologie di conoscenza e di monitoraggio del territorio in maniera rapida a fini di pianificazione a tutti i livelli. Negli ultimi anni i droni si sono affermati quali protagonisti della ricognizione in "aree calde" come fondamentale supporto informativo alle analisi e operazioni di sorveglianza e di Intelligence. L'utilizzo di piattaforme aeree leggere a pilotaggio remoto riducono i tempi di rilievo in campagna amplificando contestualmente la quantità e tipologia di dati ed informazioni ottenibili ed utilizzabili per analisi e valutazioni analitiche. Di contro, tali missioni ed approcci necessitano un know how interdisciplinare ed in grado di relazionare in un'unica filiera la pianificazione fotogrammetrica aerea, il rilievo a terra con punti di appoggio, l'analisi con strumenti GIS e lo studio e valutazione geologica. Ne consegue che il piano speditivo per la protezione civile è supportato dal rilievo fotografico da DRONE georeferenziato. Il contributo propone un modello per l'integrazione tra i dispostivi di calcolo ed elaborazione (server, pc desktop, notebook), gli strumenti di comunicazione mobili (*smartphone*, *tablet*) e i rilievi tramite droni, in un'ottica di collegamento ai GIS, capace di restituire una rappresentazione con elevato grado di dettaglio, alla scala edilizia. Le soluzioni sono strettamente collegate alla tecnologia di rilievo fotogrammetrico e alla predisposizione del geodatabase; si può scegliere un'analisi real-time o post real-time in ambiente GIS dei video acquisiti da droni UAV che sono in grado di operare senza equipaggio, controllati via rete locale da un operatore situato a terra, e che possono anche essere programmati per eseguire voli automatici.

ABSTRACT IN INGLESE

The collapsing phenomena, spread all over the world, can have both "natural" (ie collapsing of karst cavities) and anthropic (collapse of abandoned artificial cavities) origins, often representing a factor of great risk due to their unpredictability. They are present in many regions of Italy, affecting geological contexts and types of terrain that are also very different from each other. The use of the georeferenced sinkhole database is necessary for proper territorial planning to support civil protection. It is not enough to find the single sinkhole board, it is necessary to study the dynamics of the sinking for a precise monitoring and a better management of the emergency. The study proposes the combined use of GIS platforms and remote piloted equipment (APR) to improve knowledge and territory monitoring methodologies quickly for planning purposes at all levels. In recent years drones have established themselves as protagonists of the recognition in "hot areas" as a fundamental information support for surveillance and intelligence analysis and operations. The use of remote light piloted aerial platforms reduces the duration for the fieldwork reliefs, amplifying at the same time the quantity and type of data and information obtainable and usable for analysis and evaluations. On the other hand, these missions and approaches require interdisciplinary know-how and are able to relate the aerial photogrammetric planning, the ground survey with support points, the analysis with GIS tools and the geological study and assessment in a single supply chain. It follows that the plan for civil protection is supported by the photographic survey by georeferenced DRONE. The contribution proposes a model for the integration between calculation and processing devices (servers, desktop PCs, notebooks), mobile communication tools (smartphones, tablets) and surveys via drones – in order to connect to GIS – able to provide a highly detailed representation, at the building scale. The solutions are closely linked to the photogrammetric survey technology and to the geodatabase setup; thus, a real-time or post-real-time analysis in the GIS environment of the videos acquired by UAV drones can be chosen; these videos are able to operate unmanned, controlled via a local network by an operator located on the ground, and can also be programmed to perform automatic flights.

1. INTRODUZIONE

Sono molti gli studi di tipo archeologico e geologico riguardanti le cavità sotterranee naturali e artificiali; esistono varie difficoltà relative all'attraversamento fisico dei luoghi – in quanto questi sono spesso bui, angusti, stretti e generalmente poco salubri – al trasporto dell'attrezzatura necessaria (metri, rotelle metriche, cannocchiali, distanziometri, tacheometri, teodoliti, bussole, eclimetri, ecc.) per le attività di rilievo all'interno delle cavità, e al possibile rischio da crollo che non va sottovalutato.

Questo contributo valuta la possibilità di ricorrere alla tecnologia per esplorare un ipogeo e documentare in maniera scientifica e storica la fase di rilievo.

Quando una cavità carsica o qualunque sistema sotterraneo è stato completamente o in parte esplorato, la conoscenza che se ne ha è affidata alla memoria visiva degli esploratori, che restituiscono le caratteristiche interne della cavità (misure e lunghezze delle gallerie, profondità dei pozzi, ecc.) in modo approssimato e inesatto.

Le attuali tecnologie di rilevazione, invece, consentono di applicare una metodologia di scientifica che consente di effettuare una descrizione dettagliata delle cavità e rea-

lizzare una agevole interpretazione e lettura della stessa, esatta in termini di ubicazione, dimensioni e morfologia.

In mancanza di un rilievo topografico la conoscenza della grotta esplorata sconta inesattezze dovute a taluni aspetti soggettivi della descrizione, che invece un rilievo scientifico supportato dalla strumentazione qui indicata rende oggettiva e facilmente condivisibile.

Dai primi anni del secolo la geomatica si avvale di tecniche di rilievo digitale agili e pervasive che hanno affiancato la rilevazione satellitare mettendo a disposizione degli utenti, in tempo reale e a costo zero, visualizzazioni bidimensionali a diverse scale e tridimensionali sia aeree sia avvolgenti. L'accesso immediato e libero a queste piattaforme ha determinato un impatto sulla conoscenza e percezione dello spazio, della cui portata complessiva non si è ancora pienamente coscienti, si pensi solo agli usi commerciali della navigazione satellitare, alla ricerca nel settore turistico-ricettivo, alle funzioni di analisi territoriale etc. (Gagliano, 2017).

È in particolare da evidenziare la svolta operata dalla massiccia diffusione dell'uso di Internet quanto alla possibilità di far comunicare dispositivi *Internet of things* o IoT, un neologismo riferito all'estensione di Internet al mondo degli oggetti e dei luoghi concreti.

Gli oggetti connessi possono funzionare come sensori e/o attuatori, essendo in grado di inviare e ricevere dati attraverso la rete. I sistemi IoT si contraddistinguono quanto al potenziale implicito nella comunicazione tra sistemi di controllo automatico *machine-to-machine* in vista del progressivo miglioramento delle le applicazioni in campo territoriale nell'offerta di nuovi servizi (Atzori *et al.*, 2010; Kortuem *et al.*, 2010).

Molte piattaforme IoT sono state introdotte con successo in diversi settori (Suresh *et al.*, 2014); queste si basano su dispositivi tecnologicamente semplici, sensori intelligenti o piccoli attuatori (Ashwini *et al.*, 2016). Altre soluzioni possono richiedere l'uso di dispositivi complessi, quali robot o droni (Schmid *et al.*, 2001) collegati alle reti di comunicazione per la gestione e monitoraggio territoriale e ambientale, ormai diventato un approccio ampiamente utilizzato (Chen *et al.*, 2012; Simoens *et al.*, 2016).

L'evoluzione tecnologica e la riduzione dei costi dei droni stanno favorendo il loro utilizzo nei settori legati al comparto tecnologico industriale e territoriale (Ichihara, 2016; Rice, 2016; Hill, 2014). I principali sistemi sono basati sul telecontrollo dei droni, mentre altri sistemi si avvantaggiano dell'uso congiunto dei droni e di Internet (Erdelj *et al.*, 2017), quest'ultimo vantaggio potrebbe aprire nuovi scenari nelle applicazioni territoriali e ambientali. I droni possono essere utilizzati come sensori "mobile "per ottenere dati in tempo reale sul territorio di rilievo e indagine (Lentilhac, 2010).

Un approccio automatico per la gestione del drone avviene in modo diretto, specificando il piano di volo e/o la destinazione dei punti di controllo; questo funzionamento generalmente richiede meno ''attenzione" o ''lavoro" da parte di un operatore, poiché quest'ultimo ha difficoltà a pilotare contemporaneamente più droni utilizzando piani di volo diversi.

Se da un lato i droni possono essere gestiti come oggetti connessi per inviare e ricevere dati attraverso la rete Internet durante i piani di volo (giacché attraverso il funzionamento del GPS (*Global Positioning System*) essi possono essere pilotati in maniera immediata e semplice a cielo aperto), dall'altro essi si muovono con difficoltà secondo direzioni prestabilite, all'interno di una cavità naturale o artificiale.

Questo contributo propone una piattaforma WebGIS che permette di gestire e monitorare i droni connessi durante le fasi di rilievo fotogrammetrico e video negli ambienti indoor. Il caso oggetto di studio è "Città Alta" di Bergamo (*Fig.* 1) dove sono presenti molte cavità naturali e artificiali (cannoniere, acquedotti, cisterne, rifugi antiaerei) fin ora censite, georeferenziate e in parte rilevate, consultabili dal servizio on line WebGIS: http://www.igisweb.it/sinkhole/webgis/index.html.

2. LO SCENARIO ATTUALE "IOT"

Esiste un'ampia gamma di oggetti collegati e dispositivi elettronici che fanno parte

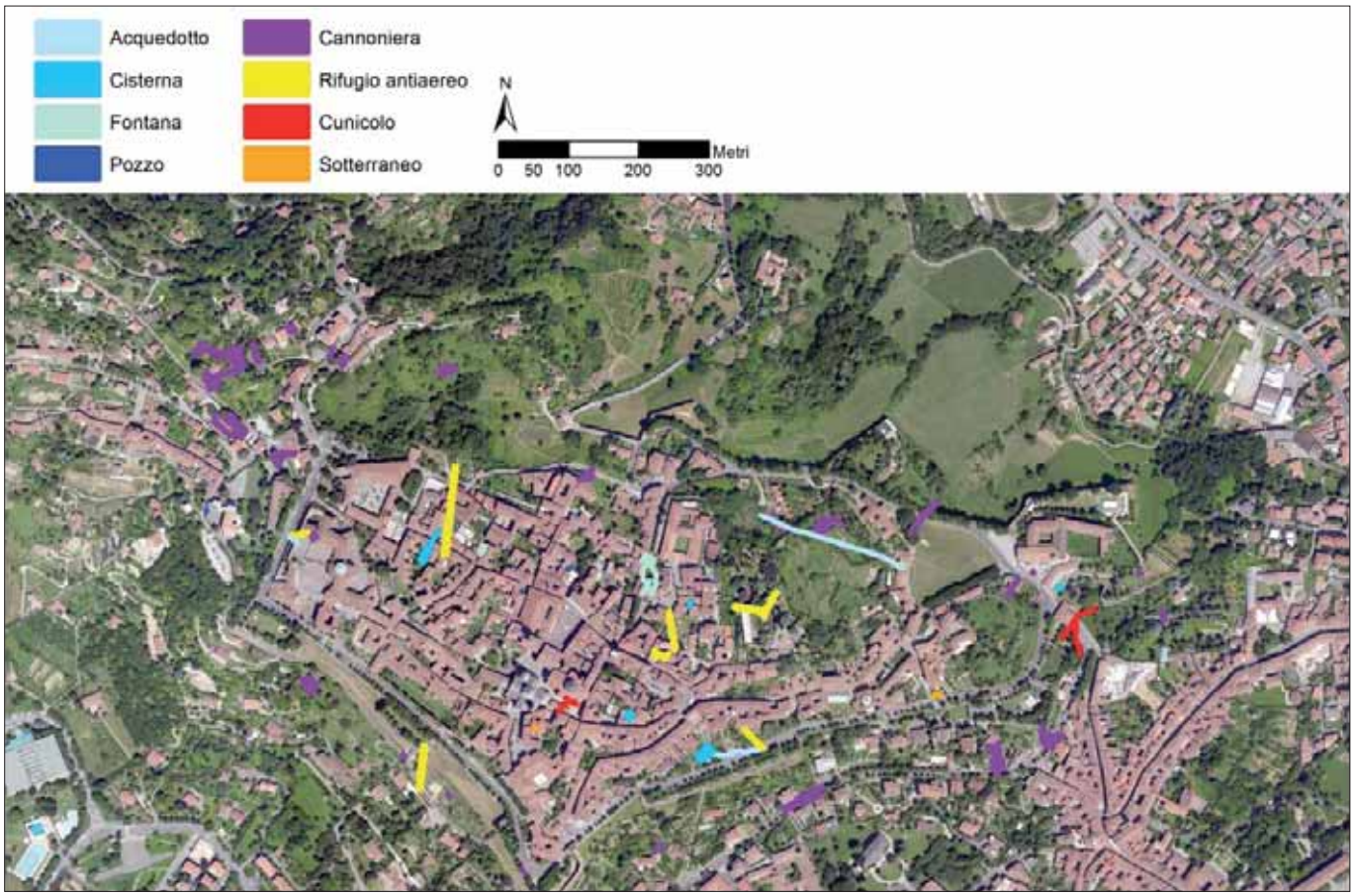


Figura 1 – Cavità artificiali presenti nella Città Alta di Bergamo

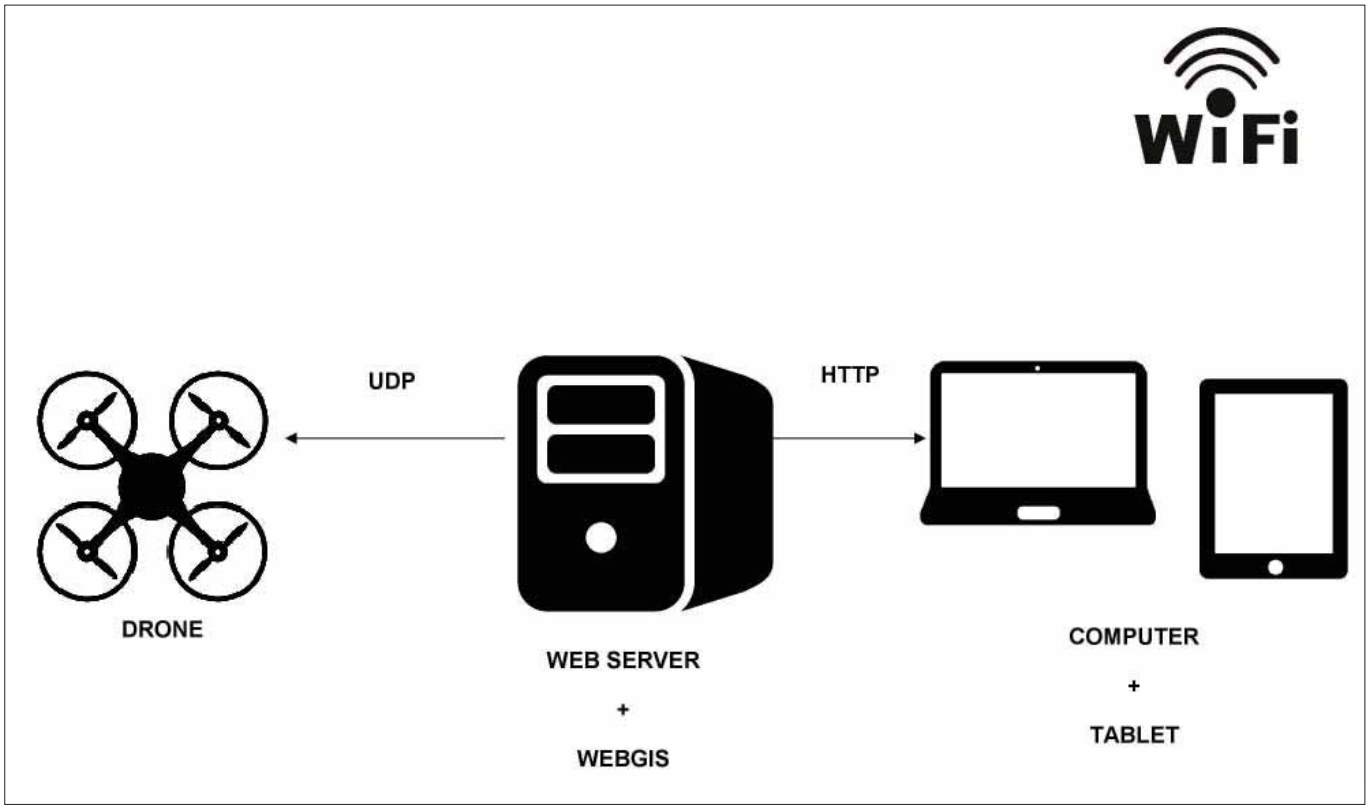


Figura 2 – Architettura logico-informatica della piattaforma

dei sistemi IoT. La maggior parte degli oggetti collegati sono sensori e piccoli dispositivi integrati che solitamente gestiscono dispositivi di controllo e attuatori. Questi tipi di sistemi IoT sono fondamentali nelle applicazioni industriali (Li *et al*., 2017) e nelle *smart city* (Hui *et al*., 2017); oggi, i sistemi IoT non si limitano alla connessione di semplici sensori o attuatori, ma al collegamento con i robot. Non è in realtà una nuova tendenza, alcuni di questi sistemi per il controllo dei robot attraverso Internet sono stati, più di 20 anni fa, sviluppati ed in seguito sostituiti da altri sistemi più complessi e performanti. In molti casi i robot funzionano come sensori e attuatori, adatti per eseguire attività di monitoraggio (Kavya *et al*., 2016; Wang *et al*., 2013), hanno capacità di comunicazione e possiedono una maggiore intelligenza o autonomia rispetto ad altri dispositivi elettronici.

I robot sono stati integrati in molti sistemi IoT, principalmente in ambienti industriali, medici o militari (Turcu *et al*., 2012); molte proposte IoT includono il robot nel sistema come un insieme di servizi per essere utilizzati da altri oggetti connessi, questi servizi sono comunemente correlati al movimento, al rilevamento e all'azione.

L'integrazione di robot nei sistemi IoT permette di utilizzare la comunicazione e la gestione per raggiungere nuovi obiettivi. Alcuni sistemi combinano sensori di robot con reti di sensori esterni per migliorare alcune delle funzionalità del robot (Scholl *et al*., 2013) nel campo della pianificazione territoriale (Wei *et al*., 2011).

Simoens ha sviluppato ricerche nelle applicazioni per migliorare l'accuratezza dei robot per la gestione dell'emergenza dei malati. Quest'ultimo lavoro di ricerca è stato uno dei primi che ha introdotto il termine specifico "*Internet of Robotic*" riferendosi a un aspetto specifico dei sistemi IoT.

Molte altre ricerche sono basate su un'architettura simile, applicata in altri campi, quale ad esempio la protezione civile per la ricerca di persone disperse in caso di disastri. I droni sarebbero considerati come robot mobili in grado di volare, caratteristica determinante per il loro utilizzo in applicazioni particolari.

Oggi i droni sono impiegati in una vasta gamma di attività logistiche, aree di controllo, manutenzioni dell'infrastrutture, produzioni di mappe intelligenti mediante telecamere o sensori.

L'evoluzione tecnologica dell'utilizzo dei droni nell'attività di rilievo non si limita solo a collegare un drone a un'applicazione per gestirla, ma mira al collegamento di più droni a sistemi IoT per una loro gestione simultanea. Attualmente alcuni ricercatori si riferiscono a sistemi indicati ''Internet di Drones" (Hall, 2016) con l'apporto di modelli teorici, non ancora sperimentati, riguardanti questa tipologia.

Molte piattaforme utilizzano i droni connessi in rete tramite Internet come veicoli telecontrollati. Esistono applicazioni commerciali e ricerche di elevato contenuto scientifico per il collegamento dei droni a Internet e per la loro gestione in ambienti esterni.

Invece, la gestione dei rilievi da drone in ambienti interni presenta difficoltà e mancanza di precisione.

I droni si avvalgono di sensori interni dedicati alla navigazione e alla condivisione dei dati con altri sistemi esterni, che si rivelano molto utili nella gestione delle situazioni di pericolo in siti a rischio e in presenza di persone.

Di seguito si propone una nuova piattaforma IoT per la gestione dei droni connessi in ambienti chiusi, nello specifico nelle cavità sotterranee naturali e artificiali. La piattaforma WebGIS proposta gestirà la progettazione dei piani di volo e il trasferimento dei dati da droni.

3. LA PIATTAFORMA WEBGIS&IOT

Il principale obbiettivo di questa piattaforma è di fornire un nuovo approccio per la gestione del drone in ambienti chiusi. Per raggiungere questo obiettivo, la piattaforma è composta dalle seguenti parti:

- Applicazione web appositamente progettata per la gestione del drone in codice *open source*. Le funzioni dell'applicazione sono: definire i piani di volo e la loro comunicazione in tutte le fasi di volo. L'applicazione web deve essere eseguita in un web server posizionato fisicamente vicino al drone, parchè quest'ultima deve essere eseguita sulla stessa rete locale Wi-Fi del drone. Il web server utilizzato è Apache HTTP Server, sviluppato dal National Center for Supercomputing Application dell'Università dell'Illinois: è la piattaforma modulare open source più diffusa al

mondo, in grado di operare su una grande varietà di sistemi operativi.

- Una rete locale Wi-Fi rete per la copertura interna della cavità sotterranea. Il server e il drone devono essere connessi alla stessa rete locale.
- Uno o più droni collegati al server che inviano e ricevono dati. I droni usati devono avere una connessione Wi-Fi e una Application Programming Interface (API) aperta per controllarli attraverso il WebGIS. L'API è un'interfaccia di programmazione che contiene subroutine e protocolli che consentono di inviare i comandi di volo.
- Un'applicazione WebGIS, eseguita dal web server, a cui gli utenti possono accedere in remoto utilizzando tablet o computer per consultare il piano di volo in fase di pianificazione e gli strati informativi territoriali georeferenziati. L'applicazione WebGIS (*OpenLayer*) è sviluppata in codice *open source* in linguaggio *javascript*.

Il drone utilizzato DJI Phantom 4, rientra nella categoria Enac con MTOM (*Maximum Take Off Mass,* peso massimo al decollo) inferiore ai 2,5 kg con tipologia ad ala rotante con quattro rotori, definita quadricottero.

Questa tipologia offre la possibilità di volare in spazi piuttosto ristretti, di poter restare fermi sul luogo e avere una maggiore controllabilità a bassa quota e in superfici dalla morfologia complessa. Il drone è dotato di sensori per acquisire immagini nel visibile e anche multispettrali e nell'infrarosso termico. Le riprese video e fotografiche vengono fatte ad una risoluzione 4K e producono immagini da 12 megapixel. Il dispositivo di controllo remoto del drone consente di pilotare il Phantom 4 (DJI, 2016) entro un raggio di 5 km (3,1 miglia), con pulsanti e selettori in grado di regolare l'esposizione, l'inclinazione della telecamera e l'acquisizione di foto e video. L'autonomia massima per un volo è di circa 30 minuti.

Il server della piattaforma WebGIS deve essere connesso a una rete locale per coprire tutta l'area di volo interna; in alcuni casi è consigliabile l'uso di ripetitori Wi-Fi se la cavità è di dimensioni consistenti. Il server può essere connesso a Internet, in questo caso i *client* possono accedere dall'esterno della cavità, ma nella maggior parte dei casi sarebbe meglio utilizzare solo la rete locale per motivi di sicurezza.

L'operatore può definire e gestire in tempo reale sia il WebGIS che il piano di volo. Per eseguire il piano di volo l'applicazione richiede la posizione iniziale del drone; usando il protocollo UDP (*User Datagram Protocol*) il server invia il messaggio di decollo al drone; dopo questo comando iniziale, il server avvia un flusso di informazioni continuo e costante con il drone, attraverso l'invio di un messaggio ogni secondo contenente comandi multipli per il movimento. Il server inizia ad analizzare il piano di volo e calcola il percorso per raggiungere il primo punto del piano. Questo processo richiede l'invio di messaggi UDP al drone per la modifica dei parametri di rotazione rispetto alla direzione assegnata, velocità, altezza e richieste dei parametri per i sensori (orientamento, distanza, batteria). L'applicazione stima le posizioni successive del drone dall'informazione dell'ultima posizione ottenuta in maniera esatta attraverso la fase di trasmissione dati, facendo più voli e analizzando quali tipi di movimenti sono i più precisi. Combinando tutte le approssimazioni delle posizioni e dei dati dei sensori del drone, il server stima la nuova posizione del drone, che viene mostrata nella mappa interattiva. Il drone esegue tutti i comandi per le rispettive posizioni inviate dal server secondo il piano di volo. Questo processo continua fino a quando il server termina la comunicazione dei comandi del piano di volo, con la possibilità da parte dell'utente di annullare il processo di comunicazione in qualsiasi momento o chiedere al drone di tornare alla posizione iniziale invertendo il piano di volo (*Fig.* 2).

L'operatore può definire la mappa interattiva metrica editando gli oggetti o il perimetro salvandola in formato JSON (*JavaScript Object Notation*) attraverso un linguaggio javascript in maniera semplice e immediata per essere

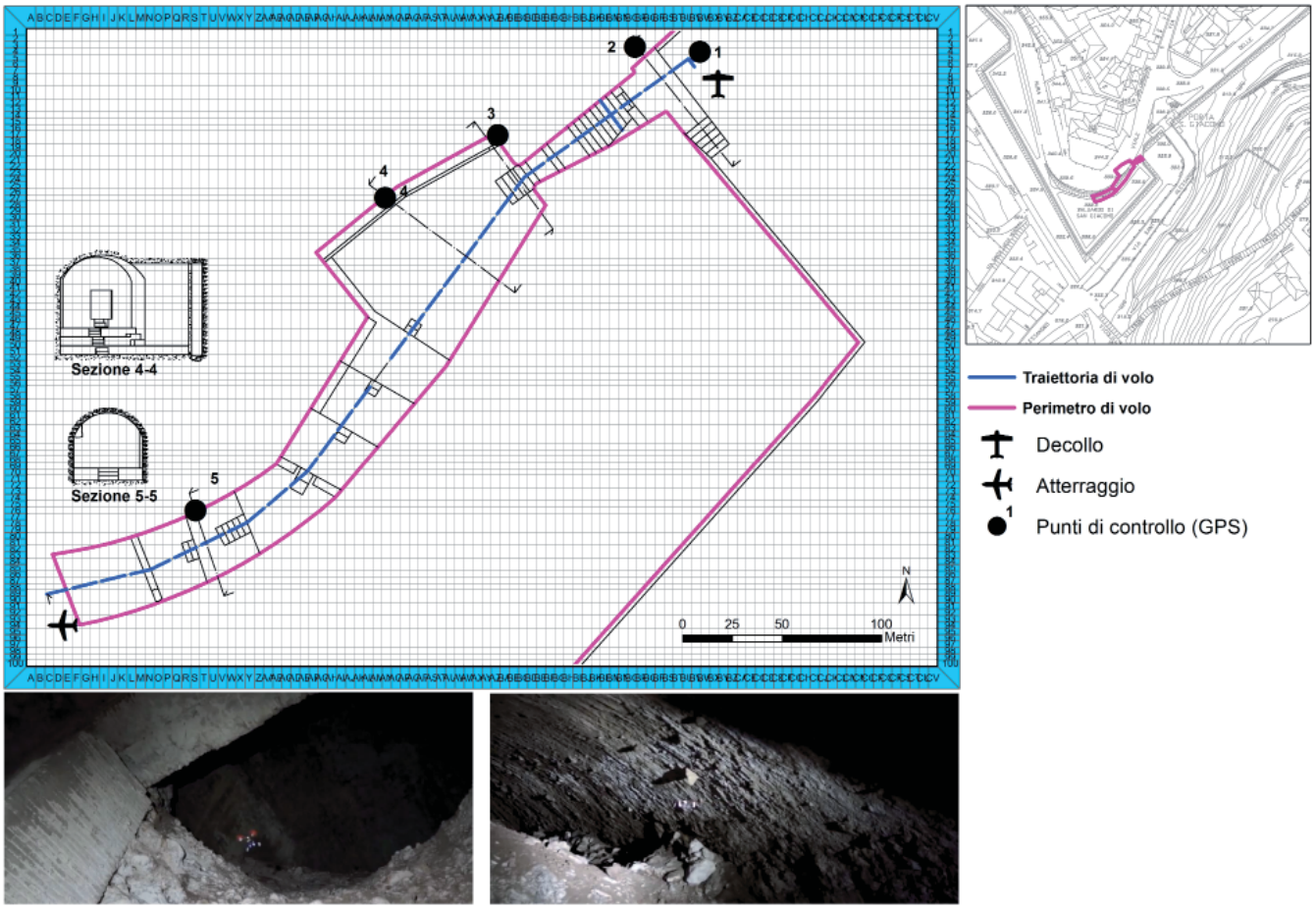


Figura 3 – Piano di volo e fotogrammi da drone della cavità sotterranea cannoniera Porta San Giacomo

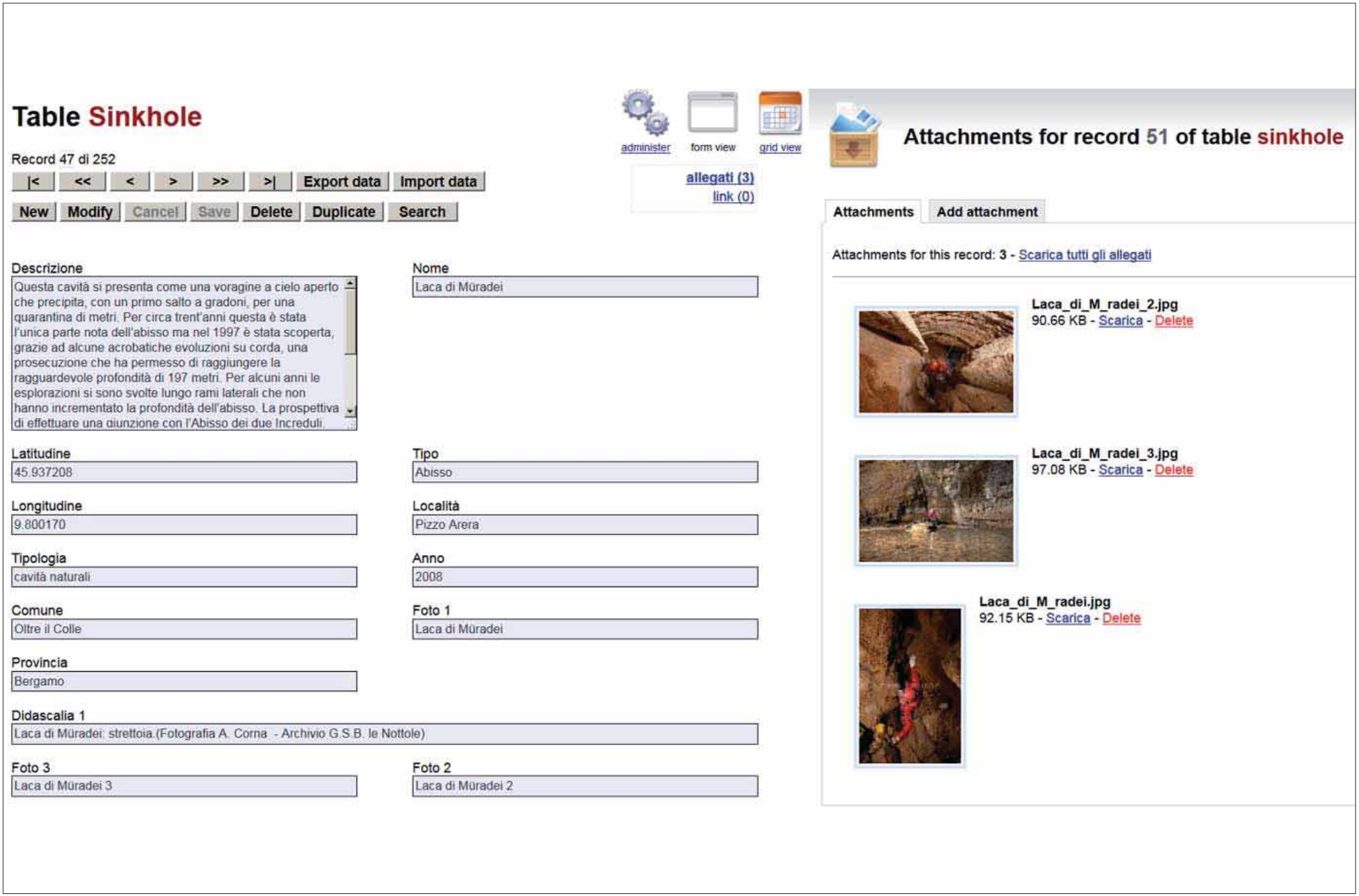


Figura 4 – Geodatabase delle cavità naturali

condivisa con altri utenti. Una volta definita o caricata la mappa, l'utente può definire un piano di volo. Il primo passo è indicare la posizione iniziale del drone. La mappa si basa su una griglia di 50 cm quadrati, che è l'ampiezza minima dello spostamento che il drone può eseguire con precisione: ovviamente la piattaforma consente di modificare questa distanza minima o di utilizzare altri droni con prestazioni migliori (*Fig.* 3).

La connessione tra l'applicazione e il drone viene eseguita attraverso il protocollo di comunicazione dei processi divisi in diagrammi UDP (*User Datagram Protocol*) mentre il drone è controllato dall'operatore mediante l'API. Per l'invio dei messaggi di comando al drone e per eseguire le applicazioni nel web server è richiesta la stessa connessione alla rete Wi-Fi. Il primo messaggio inviato al drone serve a stabilire una connessione, successivamente il drone si collega e l'applicazione invia il comando take-off (comando di volo) al drone. Altri comandi come il decollo includono un messaggio di richiamata in modo che l'applicazione conosce quando il drone è in volo. Una volta avviata la fase del volo l'applicazione inizia ad inviare in modo ordinato una sequenza di comandi per la gestione del volo: *stop, up, land, down, left, forward, backward, clockwise, counterclockwise*.

4. CONCLUSIONI

Il rilievo delle cavità sotterranee, a fronte delle criticità che queste presentano quanto a potenziali cedimenti e nei casi di soccorso alle persone, costituisce un'importante premessa della prevenzione tanto nella gestione delle politiche urbane, quanto in sede di protezione civile.

L'impiego di dispositivi di rilevamento agili ed efficaci come il drone, richiede la formazione di piattaforme informative in grado di gestire le difficoltà implicite di rilevi in spazi a elevata complessità quanto caratteristiche geometriche, materiche e strutturali delle cavità, da cui dipendono le principali criticità quanto a stabilità intrinseca, e a fronte di eventi sismici e pressioni antropiche.

Il contributo proposto intende fornire una piattaforma di comunicazione tra l'operatore e i droni, e tra droni, che assolva alle principali funzioni del rilievo attraverso il coordinamento dei piani di volo dei dispositivi a pilotaggio remoto, che possono essere utilizzati in batteria per rendere più rapide ed efficaci le attività di rilievo specie in situazioni di imminente pericolo.

In particolare, una delle specificità di questa elaborazione è il controllo e coordinamento dei dati attraverso una piattaforma WebGIS che restituisce in tempo reale il rilievo coordinando i dati trasferiti da più droni che operano contemporaneamente anche per sopperire alla loro limitata autonomia.

L'importanza del coordinamento dei rilievi entro piattaforma WebGIS consiste, inoltre, nella possibilità di arricchire la restituzione del rilievo con contenuti multimediali quali foto e video (*Fig.* 4).

Sviluppi futuri, infine, riguardano l'interoperabilità con sensori fissi installati in loco che impiegano schede Arduino, col l'ausilio dei quali, ad esempio, droni dotati di propri sensori dedicati al rilevamento di caratteristiche specifiche, quali luminosità, infrarossi, ambiente, temperatura, suono e movimento (Lee *et al.*, 2016), programmati per il volo automatico, trovano la posizione ottimale in un'area delimitata.

Più in generale, la piattaforma pilota proposta indica con un esempio prototipico, come le nuove tecnologie e metodologie presenti nel settore della fotogrammetria possono dare un contributo all'innovazione delle tecniche per il rilievo *indoor* nell'ambito del rilevamento topografico anche per la gestione delle emergenze a vantaggio della protezione civile quanto a rapidità e precisione nella caratterizzazione delle aree in cui sono presenti numerose cavità sotterranee e quindi a elevata instabilità potenziale.

Un piano di rilevamento delle cavità sotterranee coordinato alla scala territoriale potrebbe, infine, fornire da una parte un significativo supporto informativo ai più generali strumenti di conoscenza della geologia del territorio, dall'altra importanti approfondimenti necessari a realizzare una più efficace visione multi-scalare del problema del rischio geologico.

5. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia per la preziosa collaborazione l'associazione "Gruppo Speleologico Le Nottole" di Bergamo durante la fase di sviluppo della piattaforma.

6. BIBLIOGRAFIA

Ashwini M., Gowrishankar S., Siddaraju (2016), *Internet of things based intelligent monitoring and reporting from agricultural fields*, Int. J. Control Theory Appl. 9 4311-4320.

Atzori L., Iera A., Morabito G. (2010), *The Internet of Things: A survey*, Comput. Netw. 54 2787–2805. http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet..05.010.

Chen Y., Hu H. (2012), *Internet of intelligent things and robot as a service*, Simul. Model. Pract. Theory 1. http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2012.03. 006.

DJI (2016), *Phantom 4*, User manual V1.0, DJI, Shenzhen, Guangdong, China.

Erdelj M., Król M., Natalizio E. (2017), *Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management*, Comput. Netw. 124 (2017) 72-86. http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2017.05.021.

Gagliano F.M. (2017), *Rendering large point cloud in webgis: "nuove tecnologie a supporto del rilievo 3d di Bergamo*, Geomatics workbooks vol. 13. p. 137-151, Politecnico di Milano - Polo Territoriale di Como ISSN 1591-092X.

Hall R.J. (2016), An internet of drones, IEEE Internet Comput. 20 68–73. http://dx.doi.org/10.1109/MIC.2016.59.

Hill D. (2014), *Researchers have high hopes for drone use in transportation*, Civ. Eng. 84 38–39.

Hui T.K.L., Sherratt R.S., Sánchez D.D. (2017), *Major requirements for building smart homes in smart cities based on Internet of Things technologies*, Futur. Gener. Comput. Syst. 76 358–369. http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.10.026.

Ichihara K. (2016), *Technologies and applications in the drone industry*, J. Japan Inst. Electron. Packag. 19 408–415.

Kavya K.V., Suresh K.S., Umamakeswari A. (2016), *A telepresence mobile robot controlling and real time detection using Internet of Things*, Indian J. Sci. Technol. 9. http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i48/108008.

Kortuem G., Kawsar F., Fitton D., Sundramoorthy V. (2010), *Smart objects as building blocks for the Internet of things*, IEEE Internet Comput. 14 44-51. http://dx.doi.org/10.1109/MIC.2009.143.

Lee E. J., Shin S., Ko B., Chang C. (2016), *Early Sinkhole Detection using a Drone-based Thermal Camera and Image Processing*, Infrared Physics & Technology Volume 78, Pages 223-232 https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.08.009

Li F., Hong J., Omala A.A. (2017), *Efficient certificateless access control for industrial Internet of Things*, Futur. Gener. Comput. Syst. 76 285-292. http://dx. doi.org/10.1016/j.future.2016.12.036.

Rice A.B. (2016), *Drone technology as applied to the cement industry*, in: IEEE Cem. Ind. Tech. Conf. doi:10.1109/CITCON.2016.7742662.

Schmid D., Mäule B., Roth I. (2001), *Performance teletests for industrial robots by the internet*, IFAC Proc. 34 147-150. http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)41696-X.

Scholl P.M., El Majoub B., Santini S., Van Laerhoven K. (2013), *Connecting wireless sensor networks to the robot operating system*, Procedia Comput. Sci. 19 1121-1128. http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.158.

Simoens P., Mahieu C., Ongenae F., Backere F.D., Pestel S.D., Nelis J., Turck F.D., Elprama S.A., Kilpi K., Jewell C., Jacobs A. (2016), *Internet of robotic things: Contextaware and personalized interventions of assistive social robots* (short paper), in: Proc.—2016 5th IEEE Int. Conf. Cloud Networking, CloudNet, pp. 204–207. doi:10.1109/CloudNet.2016.27.

Suresh P., Daniel J.V., Parthasarathy V., Aswathy R.H. (2014), *A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment*, in: Int. Conf. Sci. Eng. Manag. Res., ICSEMR 2014, 2014. doi:10.1109/ICSEMR.2014.7043637.

Turcu C., Gaitan V. (2012), *Integrating robots into the Internet of Things*, Int. J. Circuits Syst. Signal Process 6 430-437.

Wang Y.L., Ma Q.S., Wang E.M., Wu X.L., Chen Z.L. (2013), *Design of monitoring system of the household robot based on Internet of Things*, Appl. Mech. Mater. 339 163–166. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.339.163.

Wei L., Yuan G., Dai X. (2011), Path planning based on warehousing intelligent inspection robot in Internet of Things, Adv. Mater. Res. 267 318-21. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.267.318.

Esperienze nell'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto nell'esplorazione, documentazione e monitoraggio di cavità artificiali sotterranee

Experiences in the use of remotely piloted aircraft in exploration, documentation and monitoring of artificial hypogean structures

Mario Mazzoli
Speleologo e speleosubacqueo - General Manager A.S.S.O. - Hypogea Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali
E-mail autore riferimento: maz@assonet.org

Isidoro Bonfà
Geologo - Responsabile Ufficio Programmazione Bonifica Siti Inquinati e Geologia Ambientale di Roma Capitale

Francesco Marsala
Progettista, istruttore ed esaminatore piloti APR - Drone Solution - A.S.S.O.

Parole chiave (*key words*): cavità artificiali (*artificial cavities*), droni (*flying drone*), aeromobili a pilotaggio remoto (*remotely piloted aircraft*), esplorazione (*exploration*), documentazione (*documentation*), rischi (*risks*), opportunità (*opportunities*)

"Quelli che s'innamorano di pratica, sanza scienza, son come 'l nocchiere, ch'entra in navilio sanza timone o bussola, che mai ha certezza dove si vada. Sempre la pratica dev'esser edificata sopra la bona teorica." (Leonardo da Vinci)

RIASSUNTO

Alcune strutture ipogee artificiali possono essere totalmente o parzialmente indagate e documentate grazie all'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto. Alle complessità tecniche legate alla situazione e alla opportunità di avvalersi di piloti specializzati, si aggiunge spesso la necessità di modificare gli apparati ed il software perché il mix tra hardware, software e pilota consenta di incontrare concrete possibilità di successo. L'intervento presenta l'esperienza di un team specializzato in materia e due casi concreti di applicazione.

ABSTRACT

Some artificial hypogean structures can be totally or partially investigated and documented thanks to the use of remotely piloted aircraft. To the technical complexities linked to the situation and the opportunity to make use of specialized pilots, there is often the need to modify the machines, the equipment and the software because the mix between hardware, software and pilot allows to meet concrete possibilities of success. The contribution presents the experience of a specialized team in the field and two concrete cases of application.

DRONI IN CAVITÀ ARTIFICIALI: QUANDO E PERCHÉ

Molte strutture ipogee artificiali presentano aspetti dimensionali, di conformazione e di rischio tali da poter trarre grande vantaggio in fase di ispezione, rilevamento e monitoraggio dall'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto (a.p.r.), altrimenti noti come droni.

Un primo intuitivo ambito di intervento viene dalle cavità caratterizzate dalla presenza di zone inaccessibili che potrebbero essere esplorate e rilevate topograficamente solo affrontando rischi elevati oppure avviando operazioni molto dispendiose, sia dal punto di vista economico che dal protrarsi dei tempi di esecuzione.

Anche in questi casi "sotterranei", l'utilizzo degli a.p.r. trova applicazione nella documentazione di carattere illustrativo o divulgativo oltre che nella più rilevante presa di immagini e filmati professionali da rielaborare in post-acquisizione tramite applicativi topografici, 3d e/o a carattere ingegneristico (*Fig.* 1).

Per i vincoli dettati dalla penetrazione dei segnali radio in zone sotterranee, si presentano anche situazioni in cui il mezzo deve adempiere al ruolo di cargo per la necessità di "sganciare" apparati di trasmissione o di duplicazione di segnale. Situazione, come risulta intuitivo, tutt'altro che semplice.

IMPORTANZA DELL'IMPIEGO PROFESSIONALE DEGLI A.P.R.

Negli ultimi anni il drone si è trasformato, nell'immaginario collettivo, in un simpatico giocattolo alla portata di tutti. Nell'impiego professionale degli a.p.r., per eseguire indagini attendibili e risultati fruibili dalla

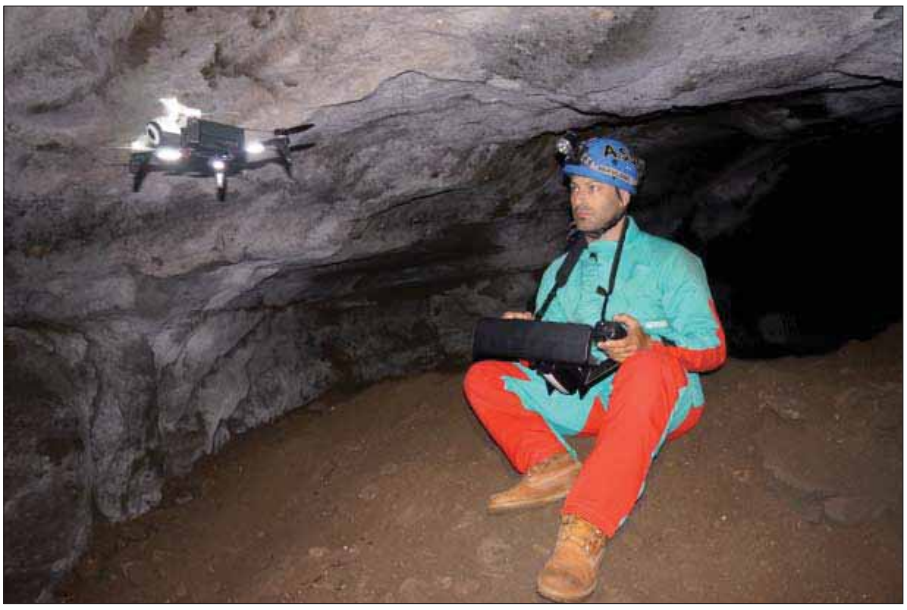


Figura 1 – (Mario Mazzoli – ASSO)
Si decolla per verifiche in una antica cava sotterranea di pozzolana
Take off to verify an ancient underground quarry of pozzolana (volcanic sand)



Figura 2 – (Mario Mazzoli – ASSO)
Rilevamento dello stato di conservazione di alcuni particolari del Duomo di Foligno (PG)
Survey to assess preservation of specific elements of the San Feliciano's Cathedral in Foligno (PG)

comunità tecnico-scientifica, è invece indispensabile calibrare/aggiornare in continuo l'hardware, il software e le capacità del pilota, fattori che spesso devono essere adeguati al progetto in loco, richiedendo competenza e preparazione specifica (*Fig.* 2).

In questo mix, l'esperienza maturata in vari anni di studio e di pratica, ci ha portati a ritenere preponderante, per l'ottenimento di un risultato apprezzabile, la capacità dell'operatore, soprattutto quando l'impiego avviene in ambienti sotterranei angusti. In questi casi la perizia del pilota costituisce il fattore vincente poiché vengono meno alcuni strumenti di ausilio quali, ad esempio, il gps per il mantenimento della posizione o i sensori di prossimità inferiori quando si sorvolano masse liquide.

SPERIMENTARE ADEGUANDO IL DRONE AL PROGETTO DI STUDIO

Ovviamente anche la tecnologia ha il suo peso. Gli apparati sono ormai molto diversi gli uni dagli altri. Si possono pilotare a vista o con all'ausilio di visori 2 o 3D, possono eseguire azioni e rotte predeterminate in zone aperte e da queste tornare al punto di partenza in caso di perdita di segnale, effettuare molteplici operazioni a diverso livello di precisione e con diversi tempi di permanenza in volo.

È quindi ormai disponibile una grande varietà tecnologica ma, evidentemente, un drone progettato per la specifica campagna di studio può avere un valore aggiunto estremamente rilevante, soprattutto in opere sotterranee di origine antropica. In questi ambienti sono infatti presenti ostacoli aggiuntivi a quelli usuali: cadute del segnale radio, disturbi magnetici frequenti, contro flussi di aria generati dal mezzo stesso in ambienti molto piccoli, necessità di aggiungere al dispositivo apparati illuminanti, ecc. (*Fig.* 3)

È proprio per il mix tra tecnologia molto spesso sperimentale ed esperienza del pilota che il sodalizio fra ASSO e Drone Solution ha potuto portare i suoi frutti. Gli oltre dieci anni di esperienza pratica, progettuale e sperimentale nel settore, sono stati determinanti anche per il successo degli interventi condotti in sotterranei di carattere archeologico, geologico e ambientale.

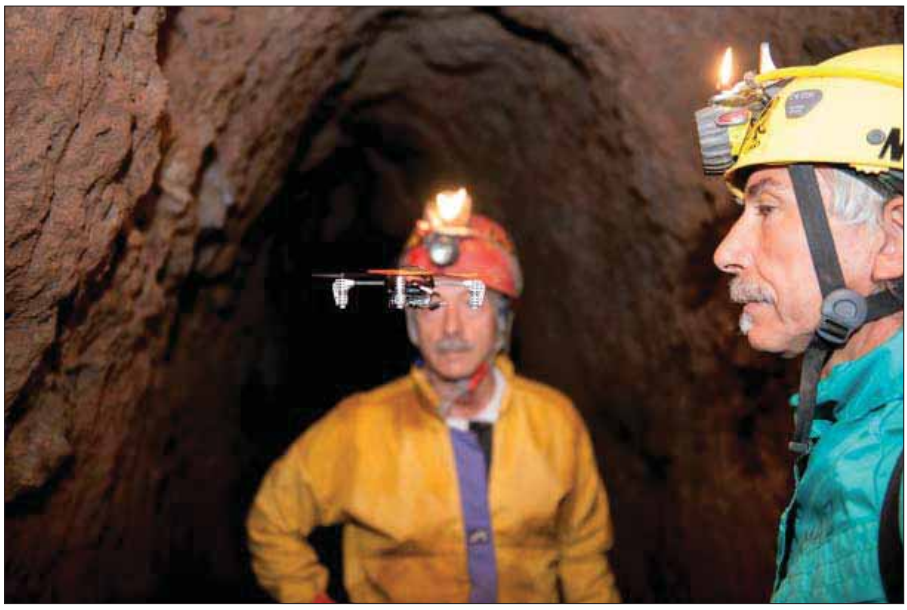


Figura 3 – (Massimo Crescenzi – ASSO)
Il microdrone Bimbo
The Bimbo microdrone

VOLTEGGIANDO NELLE STANZE DI NERONE: IMPIEGO DELL'A.P.R. NELLA *DOMUS AUREA*

Uno dei primi interventi eseguiti dalla nostra equipe multidisciplinare è stato un contributo alla valutazione della condizione delle volte della Domus Aurea (Roma). In particolare, diversi anni fa, si rese necessario ispezionare e documentare lo stato di conservazione delle sottovolte senza far accedere persone nello spazio compreso tra queste e l'interro che occupava gli ambienti (*Fig.* 4).

Si era ancora agli albori dell'impiego di droni e mai era stato tentato un uso in ambienti chiusi e ristretti di inestimabile valore archeologico (Mazzoli, 2014). L'acquisizione delle immagini e dei filmati fu resa possibile integrando un prototipo di a.p.r. apposita-



Figura 4 – (Mario Mazzoli – ASSO)
Controllo di alcune aree interne della Domus Aurea a Roma
Inspection of internal areas, inside Domus Aurea in Rome



Figura 5 – (Mario Mazzoli – ASSO)
Guardare e non toccare…
Look and don't touch...



Figura 6 – (Mario Mazzoli – ASSO)
Quantificazione rilevamento dell'estensione dell'area inquinata
Assessing the extent of polluted area

mente realizzato con una potente luce e, per mantenere le distanze di sicurezza rispetto ai profili della struttura e agli interri con i quali il mezzo non doveva interagire, furono applicati per la prima volta anche dei sonar. Questi vennero però successivamente rimossi per l'effetto "risonanza" che si creava negli ambienti molto ristretti. Si trattava di un dispositivo molto innovativo, ma senza l'esperienza e la competenza del pilota si sarebbe rischiato non solo di non riuscire ad effettuare la verifica, ma anche di perdere il mezzo.

Non dimentichiamo poi l'estrema delicatezza del contesto archeologico a proposito del quale il contenimento del rischio di danneggiare pitture o stucchi è sempre stato in testa a qualsiasi altra priorità di carattere esplorativo e tecnico. Come è noto, infatti, non è infrequente leggere di droni che abbiano causato danni a cose o a persone e ciò non è nemmeno ipotizzabile per chi, come noi, operi sistematicamente in aree e contesti archeologici, talvolta di grande delicatezza e nel costante rispetto per la sicurezza (*Fig.* 5).

SORVOLANDO UN LAGO DI IDROCARBURI: IMPIEGO DEI DRONI IN CAVITÀ A RISCHIO AMBIENTALE

Nel 2016 il nostro intervento è stato richiesto per la verifica di un cospicuo sversamento di materiali inquinanti in una antica cava di pozzolana situata nella zona Sud-Est della Capitale. Smaltimenti illeciti di sostanze oleose avevano creato all'interno del reticolo caveale un vero e proprio lago di idrocarburi che impediva l'ispezione diretta del sito.

Grazie all'impiego di un drone, allestito appositamente per garantire la necessaria illuminazione ed autonomia, è stato possibile visualizzare gli ambienti già in corso di ripresa, dando la possibilità ai responsabili dell'Amministrazione Comunale e agli Organi di Polizia di procedere alla immediata documentazione. Le immagini e le riprese video degli ambienti ipogei hanno anche consentito di comprendere l'estensione delle gallerie interessate dallo sversamento, contribuendo a valutare opportunamente anche l'entità del problema (*Fig.* 6).

Oltre alle difficoltà attese, in corso di ispezione, il pilota ha incontrato ulteriori complessità impreviste come la presenza di lunghe radici filiformi che pendevano dalle volte delle gallerie, il sorvolo di masse liquide che rendeva rischioso utilizzare sensori di prossimità sonar, la scarsa visibilità e l'assorbimento della luce dovuta al colore e alla opacità delle pareti nei settori più lontani dal punto di decollo, o posti dietro l'incrocio delle gallerie. Anche in questo caso le accortezze tecniche e l'ormai lunga esperienza hanno reso possibile un buon risultato senza comportare la perdita del mezzo e di quanto documentato.

CONCLUSIONI

L'esplorazione e la documentazione degli ambienti sotterranei, naturali e artificiali, implicano difficoltà tecniche del tutto peculiari per la presenza di buio assoluto, elevate percentuali di umidità, ecc. I *team* di ricerca, pertanto, sono sempre molto attenti a tutte le innovazioni tecnologiche che possano consentire di ridurre il tempo di permanenza nel sottosuolo e i rischi ad essa correlati garantendo una documentazione topografica e documentale di alto profilo. In particolare nelle cavità artificiali i rischi, sia per gli operatori che per le strutture oggetto di osservazione, aumentano in modo esponenziale rispetto alle esplorazioni condotte in cavità naturali a causa della possibile presenza di fattori inquinanti e gas, alte concentrazioni di CO_2, dimensioni assai ridotte degli ambienti e possibile presenza di manufatti di interesse archeologico.

Per queste ragioni ogni nuovo strumento tecnico utilizzabile nell'esplorazione viene adottato e sperimentato, previo adeguamento delle attrezzature - normalmente progettate per un utilizzo in ambiente esterno - alle tipicità degli ambiti in cui si va ad operare.

Così anche per i droni, che però ancor più di altri strumenti richiedono adattamenti costanti che consentano: possibilità di recupero, particolare illuminazione, telecamere e fotocamere di precisione con peso limitato per essere trasportati da prototipi molto più piccoli rispetto a quelli utilizzati in esterno.

L'esperienza che il nostro gruppo di lavoro ha maturato negli anni è del tutto innovativa e solo recentemente si stanno sviluppando altre esperienze negli ambiti speleologici: un caso fra tutti l'esplorazione recentemente condotta dai colleghi del team La Venta e dell'associazione Boegan di Trieste in collaborazione con l'astronauta dell'ESA Luca Parmitano in una grotta siciliana. Per tale ragione non esistono ancora specifiche fonti bibliografiche di riferimento. Tuttavia a beneficio di chi volesse acquisire una documentazione sugli impieghi a nostro avviso più interessanti degli ultimi due anni vengono nel seguito elencati alcuni testi di riferimento.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (2018), *Progetto ALIRHYS Identificazione delle risorse hydriques sotterranee* ISBN:978-88-98878-10-9, p. 21. Riferimenti Internet: www.polito.it/ALIRHYS.

Bissetta R. (2016), *Sistema automatico di localizzazione e avvistamento escursionisti in aree remote montane* in Il Soccorso Alpino Speleo Soccorso n. 64 pp. 22-23.

Calantropio A. (2017), *L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica*. Tesi di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città, Politecnico di Torino dip.to Architettura e Design, anno accademico 2016-2017, relatori Prof.ssa Antonia Spanò &Arch. Filiberto Chiabrando.

Francfort S., (2015), *L'exploration de galeries difficiles d'acces grace à des drones volants*. Speleo Club de Touraine CDS 37.

Goldoni M. (2017), *Sicilia: esplorare con un drone* in Echi sotterranei, Montagne 360 Luglio 2017.

Ischia Geotermia Srl (2017), *Rilievo delle condizioni di stabilità di 2 versanti rocciosi nella zona occidentale del Monte Epomeo nel territorio comunale di Serrara Fontana (NA) sull'isola d'Ischia* in Progetto impianto pilota geotermico "Serrara Fontana" nel comune di Serrara Fontana nell'isola d'Ischia (NA).

Mazzoli M. (2014), *Droni che volano sulla storia* in Archeologia Viva n. 165, pp. 72-73.

Oppizzi N. (2016), *Indagine multidisciplinare su cavità carsiche*. TermoIndagini Sagl.

Sanzo Sanchez A. (2018), *Polidrone. Plan de negocio de un dron modular y multipropósito fabricado por MDF*, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales. Programma di interscambio con Politecnico di Torino, Tutor Dr. Salvatore Brischetto.

Esplorazione e documentazione di cavità artificiali sommerse: rischi, cautele esplorative, procedure consolidate in ambito speleo subacqueo

Exploration and documentation of submerged artificial cavities: risks, exploratory precautions, consolidated procedures in underwater caving

Mario Mazzoli
General Manager A.S.S.O. - Hypogea Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali - Scuola Nazionale Speleologia Subacquea Società Speleologica Italiana - Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana
E-mail autore riferimento: maz@assonet.org

Carla Galeazzi
Egeria Centro Ricerche Sotterranee - Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana

Marco Vitelli
Presidente A.S.S.O. – Hypogea Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali - Scuola Nazionale Speleologia Subacquea Società Speleologica Italiana - Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana

Parole chiave (*key words*): cavità artificiali sommerse (*submerged artificial cavities*), speleosubacquea (*cave diving*), rischi (*risks*), inquinamento (*pollution*)

RIASSUNTO

Le strutture ipogee di approvvigionamento idrico, cave, sistemi di difesa, miniere, sepolture, magazzini, vie di fuga o altre aree sotterranee, possono essere totalmente o parzialmente allagate sia per loro natura intrinseca, sia per modificazioni del contesto che ne hanno mutato, nel corso del tempo, struttura e funzione originaria precludendo l'accesso. L'esplorazione, documentazione, monitoraggio e classificazione di strutture sommerse richiede necessariamente il supporto di subacquei per reperire informazioni diversamente non accessibili. È per questo che dopo una prima immersione esplorativa è fondamentale portare fuori dall'acqua dati e immagini, anche se la cattiva visibilità impedisce molto spesso la realizzazione di foto e filmati "accettabili". Considerato che, nella maggior parte dei casi, le strutture artificiali sommerse hanno perso la loro funzione primaria e la condizione di allagamento è dovuta ad abbandono con conseguente rischio di degrado strutturale e ambientale, è bene che le competenze subacquee siano di carattere specialistico. Un'immersione in questi ambienti, oltre a difficoltà di carattere tecnico, può presentare infatti elevati rischi biologici. Questi sono i principali motivi per i quali, nonostante le scarse profondità, la progressione subacquea in cavità artificiali richiede sempre estrema attenzione, esperienza specifica di immersioni in ambienti chiusi e talvolta l'utilizzo di complesse attrezzature per la protezione dello speleo subacqueo, l'impiego delle quali non sempre è compatibile con le condizioni logistiche ed ambientali del luogo. Non ci si deve quindi far condizionare dalla bassa profondità dell'acqua e dalla apparente banalità di immersioni in ambienti di dimensioni contenute. Per uno speleo subacqueo queste esplorazioni, dal punto di vista tecnico, sono molto meno impegnative di una immersione in grotta, ma potrebbero nascondere una serie di insidie non usuali per chi è abituato ad immergersi esclusivamente in cavità naturali. Il contributo è finalizzato ad analizzare le problematiche più frequenti nelle esplorazioni speleo subacquee in cavità artificiali e a fornire elementi esperienziali ed informazioni su strumenti tecnici, procedure e precauzioni da adottare.

ABSTRACT

The exploration and study of hypogeal structures used to supply water or used as quarries, defence systems, mines, tombs, storerooms or escape routes often requires the support of specialized cave divers. In such cases the aim of the immersion is to obtain information which would otherwise not be accessible; it is for this reason that during a first fact-finding "dive" it is essential to bring to the surface data and images, even when the quality of the photos and videos is not very good because of the murkiness of the water. In most cases submerged hypogeal structures have lost their main function and abandonment is the cause of their being flooded. This results in the risk of structural and environmental decay. Therefore, a dive can present not only technical difficulties but also high biological risks. This is one of the main reasons why, even though the water may be shallow, there are specific requirements that need to be complied with, in order to safely undertake an underwater exploration in an artificial cavity. These requirements include the need for great attention, specific experience in immersions in closed spaces and often the use of complicated equipment for the protection of the diver, which, however, may not be compatible with the logistical and environmental conditions of the space.

***

Chi si occupa di cavità artificiali è abituato a confrontarsi con molteplici difficoltà che si incontrano nell'esplorazione: limiti all'accesso, possibili crolli, fattori inquinanti, interri, norme imposte per i lavori in ambienti confinati e, talvolta, la rilevante presenza di acqua. Per superare quest'ultimo ostacolo entrano in gioco gli speleo subacquei, per i quali gli ambiti esplorativi sono normalmente costituiti dalle grotte naturali, dalle sorgenti carsiche e da relitti di navi, piuttosto che dai sotterranei artificiali (*Fig.* 1).

L'esplorazione di grotte naturali richiede lunghi avvicinamenti e il superamento di pozzi e strettoie prima di effettuare le immersioni, talvolta prolungate e profonde. L'esplorazione di sorgenti carsiche, altrettanto complessa, presenta sempre un interessante potenziale esplorativo ed evidenti vantaggi logistici. Da diversi anni oltre alle grotte e alle sorgenti gli speleo subacquei si sono dedicati anche all'esplorazione di relitti di navi: si tratta di indagini di grande interesse sia per i risvolti storici ed emotivi che queste immersioni riservano, sia per il fatto che, in termini tecnici e di rischio, le similitudini che esistono tra l'addentrarsi in una grotta sommersa e una stiva di nave affondata sono molte. Anche all'interno di un relitto non è possibile risalire sulla verticale, si è quasi sempre costretti ad uscire da dove si sia entrati, occorrono preparazione e attrezzature specialistiche, sono presenti rischi connessi alla visibilità, ai crolli, alla presenza di zone anguste, alla densità di ostacoli, ad aggrovigliamenti della sagola e ad altre cautele nella immersione.

Una considerazione che per noi è sempre stata evidente e che, da alcuni anni, è condivisa anche dalla comunità subacquea in genere. Come sappiamo per operare in



Figura 1 – (Ph Attilio Eusebio - SNSS)
Nella risorgenza di Su Gologone in Sardegna
Inside the Su Gologone spring in Sardegna

ambienti sommersi chiusi, rispetto alla pratica di immersioni effettuate nelle cosiddette acque libere come il mare e i laghi, va considerata una rilevante differenza di approccio e di assetto mentale che oggi non è più circoscritta alla sola comunità speleosubacquea. Si tratta della consapevolezza che quando si esplorano ambienti ostili la sicurezza di poter arretrare ed uscire da dove si sia entrati è direttamente dipendente dal complesso delle operazioni poste in essere prima di entrare e durante la fase di penetrazione. È quindi per le caratteristiche comuni a queste immersioni e per le analogie con gli ambienti chiusi già citati (grotte, sorgenti, relitti…) (*Fig.* 2) che possiamo aggiungere agli ambiti esplorativi propri della speleo subacquea anche le cavità artificiali sommerse, parlando in questo specifico caso di contesti sommersi confinati.

Le esplorazioni speleo subacquee in cavità artificiali sono finalizzate al rilevamento di antichi pozzi, cisterne, tratti di acquedotti, emissari di laghi, miniere abbandonate e altri ambienti sommersi che interessano prevalentemente per i risvolti costruttivi e per lo studio sulla genesi di utilizzo, oltre che per la possibilità di rinvenire oggetti appartenenti alla struttura, informazioni su chi l'abbia frequentata oppure finiti lì per le cause più disparate. Possono anche interessare i contenuti archeologici e biologici che richiedono verifiche e prelievi per lo studio dei suoli, dei sedimenti, del corredo concrezionale o di eventuali resti di origine antropica e altre tracce umane.

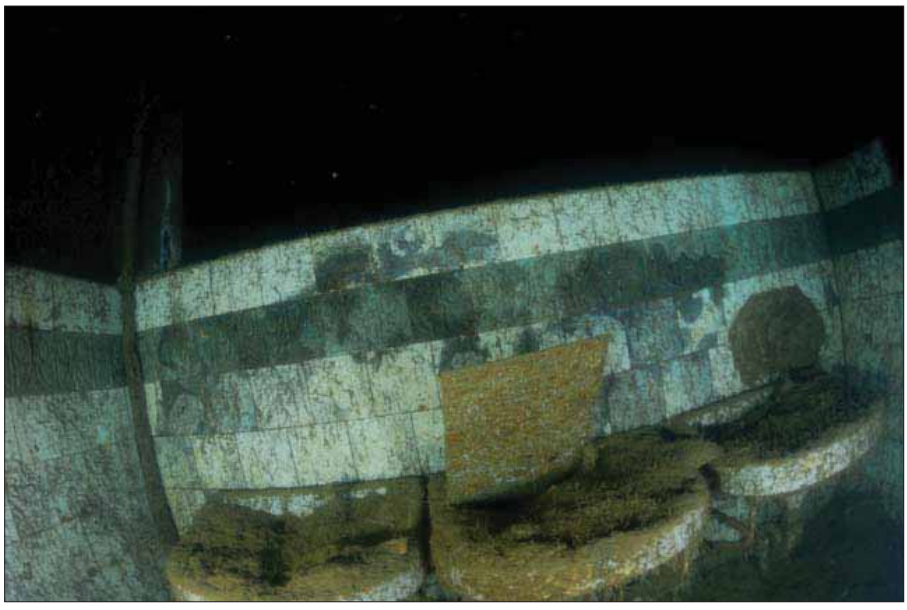


Figura 2 – (Ph Gennaro Ciavarella - ASSO)
Particolare dell'interno della nave ospedale Po, affondata nel 1941 nella baia di Valona in Albania, esplorata da team ASSO.
Inside the wreck of the Po hospital ship that sank in 1941 in the Valona bay and explored by ASSO.

Le cautele proprie delle immersioni speleo subacquee possono, in prima istanza apparire eccessive quando si tratta di esplorare cavità artificiali. Sembra esagerato che per immergersi in una cisterna profonda cinque metri occorrano tecniche ed attrezzature specialistiche. Non va però dimenticato che la pratica speleo subacquea resta di fatto una attività rischiosa ed è quindi il costante compromesso tra il contenimento del rischio e il progresso della conoscenza a condizionare il complesso delle attività esplorative. La sfida al perseguimento di tale bilanciamento è presente anche nel caso delle cavità artificiali che, tranne le opere minerarie che presentano sviluppi importanti, raramente hanno profondità rilevanti o estensioni chilometriche ma possono ugualmente presentare inconvenienti del tutto peculiari.

L'esperienza ci insegna che ogni immersione è diversa dalle altre e che, di volta in



Figura 3 – (Ph Stefano Barbaresi - ASSO)
Middle cistern at Villa dei Quintili in Roma: after inspection and removal of water and mud, the electric pump is now being cooled
La cisterna mediana della Villa dei Quintili a Roma: dopo la rimozione di acqua e fango, si raffredda manualmente la pompa ormai emersa

volta, è necessario adattare le tecniche e le cautele alla configurazione strutturale della cavità artificiale e al contesto specifico. Il costante tentativo dello speleo subacqueo di portare con sé tutti gli apparati di respirazione e sicurezza, comprese le ridondanze, cercando nel contempo di limitare al minimo indispensabile la somma delle attrezzature da introdurre in ambienti piccoli come le cavità artificiali, spesso si traduce in un compromesso irrealizzabile. Ecco perché, per le aree artificiali sommerse, si valuta spesso l'alternativa dello svuotamento.

Anche in questo caso, oltre a tenere conto degli aspetti legati alla tutela del bene e ad eventuali preventivi campionamenti utili alla ricerca scientifica, devono essere valutate le caratteristiche della struttura sulla quale si va ad operare e pianificati attentamente gli interventi da eseguire. Si considera la distanza e il dislivello da superare per stabilire le caratteristiche delle pompe necessarie; si controllano rigorosamente le pompe elettriche e i relativi cavi; va preso atto che le pompe a scoppio fanno rumore, vibrano e scaricano gas di combustione in ambienti spesso ristretti. Prima di attivare la procedura è necessario anche verificare che il punto in cui si riverseranno le acque di svuotamento risulti idoneo quantitativamente e qualitativamente. Altrimenti potrebbe trasformarsi in sversamento o immissione non autorizzata di fattori inquinanti. Chi si trova ad affrontare una situazione del genere deve considerare che, nonostante spesso ci si muova in contesti ambientali tutt'altro che incontaminati, si può perdere una enorme quantità di tempo per identificare su chi ricade la responsabilità di rilasciare l'autorizzare allo scarico in fogna del contenuto liquido estratto da manufatti sotterranei (*Fig.* 3).

Quando si valuta uno svuotamento, inoltre, è bene prendere in considerazione anche il deposito che resterà in sito. Dotando il puntale dell'idrovora o della sorbona - un aspiratore utilizzato negli scavi archeologici subacquei - di una griglia di protezione è possibile evitare di aspirare inavvertitamente materiali solidi ma il fango va asportato in massima parte, soprattutto se si tratta di strati consistenti. Nei casi in cui lo strato di acqua sovrastante il sedimento sia praticabile, invece, si preferisce mantenere il sito sommerso perché in tal modo l'immersione resta fattibile, anche se complessa, mentre diverrebbe impossibile procedere in una morsa fangosa semiliquida e profonda. Uno svuotamento frettoloso potrebbe complicare la situazione in quanto il sedimento rimasto dopo l'asportazione dell'acqua tenderà, con il tempo, ad asciugarsi e a solidificarsi e potrà essere rimosso solo a prezzo di grandi fatiche e non più dopo che si sia trasformato in uno strato duro e compatto.

Come si diceva, raramente la profondità costituisce un problema nel contesto delle ricerche in cavità artificiali, mentre le difficoltà principali vengono dalla qualità delle acque, sia in termini di visibilità che di carico inquinante.

La visibilità viene frequentemente limitata o impedita dalla sospensione già presente, oppure da quella che si solleva durante la progressione quasi sempre ravvicinata al fondo o alle pareti a causa delle scarse profondità. Nel progredire si presta usualmente la massima attenzione a non sollevare fango o limo, ma gli spazi spesso angusti e i depositi frequentemente impalpabili rendono quasi sempre vani tali sforzi.

Oltre ad ostacolare la progressione, la scarsa visibilità complica enormemente le attività di documentazione e di rilevamento. In alcuni casi siamo stati costretti ad inserire, con non pochi problemi, dei diaframmi di acqua pulita tra noi e l'area da disegnare o fotografare (*Fig.* 4). In due casi si è impiegato un tubo Ruoff. Si tratta di un tubo rigido con fori in linea ad un centimetro di distanza uno dall'altro, nel quale viene immessa acqua chiara a pressione la cui fuoriuscita crea un velo trasparente tra chi rileva e l'oggetto da rilevare. In un altro caso, per delle foto, abbiamo interposto un tronco di piramide in plexiglass pieno di acqua chiara, ma con risultati mediocri.

In aggiunta ai rischi condivisi con chi non si immerge, come i crolli e le frane, questo tipo di attività comporta rischi aggiuntivi dati dall'accumulo di detriti, da ostruzioni naturali successive alla realizzazione del manufatto, dalla presenza di gas irrespirabili che pos-



Figura 4 – (Photo Stefano De Giovanni - SSS)
The detachment of mud and rubble from the upper layers
Le bolle emesse dal subacqueo fanno precipitare fango e detriti impedendo la visibilità



Figura 5 – (Photo Igli Pustina - SD)
Skotinia cave in Argirocaster (Albania) and its old aqueduct fallen into disuse
La gotta di Skotinia ad Gjirokastrës in Albania e il suo vecchio grande acquedotto oggi dismesso



Figura 6 – (Photo Mario Mazzoli - ASSO)
Starting for a dive into the ancient emissary of Lake Albano - Roma
Ci si immerge nell'emissario del Lago Albano - Roma

sono trovarsi oltre un sifone, dall'affanno e dall'inquinamento delle acque.

Per quanto riguarda l'accumulo di materiali e detriti valgono le regole del buon senso e quanto si fa normalmente in aree asciutte o emerse e nelle progressioni subacquee in ambienti naturali: non si smuovono cumuli precari e non si forza il passaggio in zone dove uno smottamento potrebbe precludere il rientro. Teniamo a mente che pinneggiando, oltre a sollevare fango, spostiamo anche una massa d'acqua il cui movimento potrebbe far crollare materiali sospesi o porzioni del manufatto che versano in stato precario, soprattutto quando si opera in presenza di strutture lignee.

Quando ci si immerge utilizzando apparati a circuito aperto, il classico sistema di bombole ad aria ed erogatore, come nella gran parte degli interventi effettuati in cavità artificiali, va ricordato anche che le nostre bolle potrebbero provocare il distacco di fango e detriti dagli strati superiori (*Fig*. 5).

Tra i detriti e i materiali più pericolosi vanno annoverati fili e cavi, spesso in ferro, i residui plastici e quelli metallici. Da qui la necessità, non intuitiva per chi non sia uno speleo subacqueo, di avere sempre con sé un valido tronchesino da elettricista a portata di mano. Sono anni che suggeriamo questo impiego anche a subacquei che frequentano acque libere, ricordando loro che questo banale attrezzo è utilizzabile con una sola mano senza necessità di tenere con l'altra ciò che si deve tagliare, che riesce a tranciare cavi metallici, radici, reti ed altri materiali assicurando una via d'uscita in situazioni d'emergenza che possono verificarsi anche nelle immersioni in mare, fiume o lago. Per le caratteristiche proprie di molte aree artificiali sommerse, non è da escludere che un groviglio possa generarsi con la nostra sagola guida e quindi, anche in questi ambienti, ci si può trovare in situazioni nelle quali si rivelano indispensabili le tecniche di "disgaggio".

Attenzione va anche posta rispetto alla possibilità di andare in affanno a causa dell'impiego di muta stagna e sottomuta in acque con temperature più elevate rispetto a quelle attese, alla visibilità nulla, ai percorsi insidiosi e ad altri eventi che possono crearne i presupposti anche a basse profondità.

Altro elemento da non sottostimare mai è la possibilità di imbattersi in aree sature di gas nocivi o, più frequentemente, ad alta concentrazione di anidride carbonica. Lo speleo subacqueo è più soggetto di altri a tali rischi per la possibilità di emergere - durante l'esplorazione - in zone isolate dal contesto generale nelle quali possono essere presenti gas o rarefazione di ossigeno sia per assenza di ventilazione, che per la presenza di materia organica vegetale in marcescenza, scarichi civili o industriali, attività termale o vulcani-

ca. Questo è il motivo per il quale, molto più frequentemente di quanto si faccia nelle grotte o nelle sorgenti, è fondamentale continuare a respirare dal rebreather - una apparecchiatura per la respirazione subacquea indipendente dall'ambiente circostante a circuito completamente chiuso o semichiuso - o dagli erogatori collegati alle bombole fino a quando le misurazioni dei gas non indichino parametri accettabili. Tenendo bene a mente che i rilevatori non identificano tutti i gas, ma misurano quelli che ci siamo preparati a campionare.

Tutte le problematiche tecniche ed i rischi accennati passano però in secondo piano rispetto al fattore che può condizionare in modo preponderante le ricerche in ambienti ipogei di origine antropica: l'inquinamento (*Fig.* 6). Cunicoli, pozzi e altri ambienti sotterranei sono frequentemente destinazione di scarichi diretti e indiretti di acque reflue e rifiuti di diverso genere. In alcuni casi la condizione ambientale è talmente evidente da non necessitare di ulteriori approfondimenti. All'inquinamento indotto da insediamenti urbani e industriali, attività agricole, trascinamento per eventi atmosferici, sversamento da sistemi fognari inidonei o non manutenuti e ad altre cause manifeste possono aggiungersi purtroppo fonti più subdole e sconosciute.

Un imprescindibile supporto preliminare alle esplorazioni speleo subacquee è dato pertanto dalle analisi delle acque. Analisi chimico-fisiche, biologiche, tossicologiche e batteriologiche sulla cui affidabilità incidono i luoghi e le modalità di campionamento oltre alla costante taratura (obbligatoria per legge) degli strumenti del laboratorio che le esegue. In genere si valutano i parametri organolettici come odore, sapore, colore e torbidità e quelli chimico-fisici: ph, conducibilità, temperatura, durezza ed altri. Nel nostro ambito specifico però questi vanno accompagnati a quelli riguardanti sostanze indesiderabili o tossiche (nitrati, ferro, ammoniaca, arsenico, piombo, antiparassitari, ecc.) e ad esami microbiologici (coliformi, streptococchi fecali, ecc.). Mentre non sono molte le sostanze chimiche che possono dar luogo ad intossicazioni acute, ad eccezione di casi relativi a contaminazioni massicce, il rischio prevalente è dovuto ai contaminanti microbiologici tra i quali, tra le forme batteriche più pericolose, si conta il virus dell'epatite A.

Un altro aspetto da monitorare, anche quando le acque si presentano entro limiti di accettabile sicurezza, è quello relativo al sollevamento dei fanghi che può avvenire anche solo pinneggiando. La sospensione conseguente potrebbe generare il contatto con eventuali inquinanti contenuti nel sedimento. Questi sono i motivi per i quali in acque a sospetto di inquinamento, e conseguentemente in modo sistematico in aree urbane, è opportuno effettuare sempre analisi preventive. Nel caso in cui vengano confermati rischi infettivi, non resta che optare per il prosciugamento dell'area sommersa o, in subordine, procedere ad immersioni con attrezzature che evitino al subacqueo qualsiasi contatto diretto con l'acqua. In caso di prosciugamento, come si è accennato, le acque inquinate vanno trattate coerentemente alle previste modalità di smaltimento ma vanno anche adottate procedure che consentano la protezione degli operatori e la disinfezione di pompe, manichette ed abbigliamento (Fig. 7).

Anche le immersioni con attrezzature che impediscono il contatto del subacqueo con l'acqua richiedono l'utilizzo di apparati complessi, un livello di preparazione tecnica molto specialistica ed un impianto logistico non sempre compatibile con la situazione e con i nostri standard di ridondanza. Si utilizzano attrezzature da lavoro: mute stagne specifiche e caschi talvolta collegati alla centrale di distribuzione tramite un "cordone ombelicale" che trasporta la miscela di respirazione e i segnali audio e video. In questi casi una bombola posizionata sulle spalle del sub assicura la riserva per la respirazione di emergenza, mentre il collegamento con la workstation di controllo e erogazione consente a chi è fuori di dialogare con lo speleo subacqueo e di ricevere le immagini della telecamera. Risulta evidente come questo tipo di apparato non consenta libertà di movimento e come il cavo ombelicale ostacoli la progressione, conseguentemente non è quasi mai consigliabile superare distanze superiori ai 100/150 metri. In aggiunta, queste operazioni prevedono la protezione anche degli assistenti di superficie e una lunga procedura di disinfezione degli apparati e delle attrezzature.

Resta fermo il fatto che, a prescindere dalla modalità con la quale si effettua questo genere di immersioni, andrebbe considerata l'opportunità di vaccinarsi almeno seguendo profilassi antitetanica, antitifica e il vaccino per l'epatite A.

Nei casi di acque inquinate con visibilità accettabile, possono essere condotte ispezioni tramite veicoli filoguidati o telecamere di diverso genere. In pozzi e cisterne i risultati

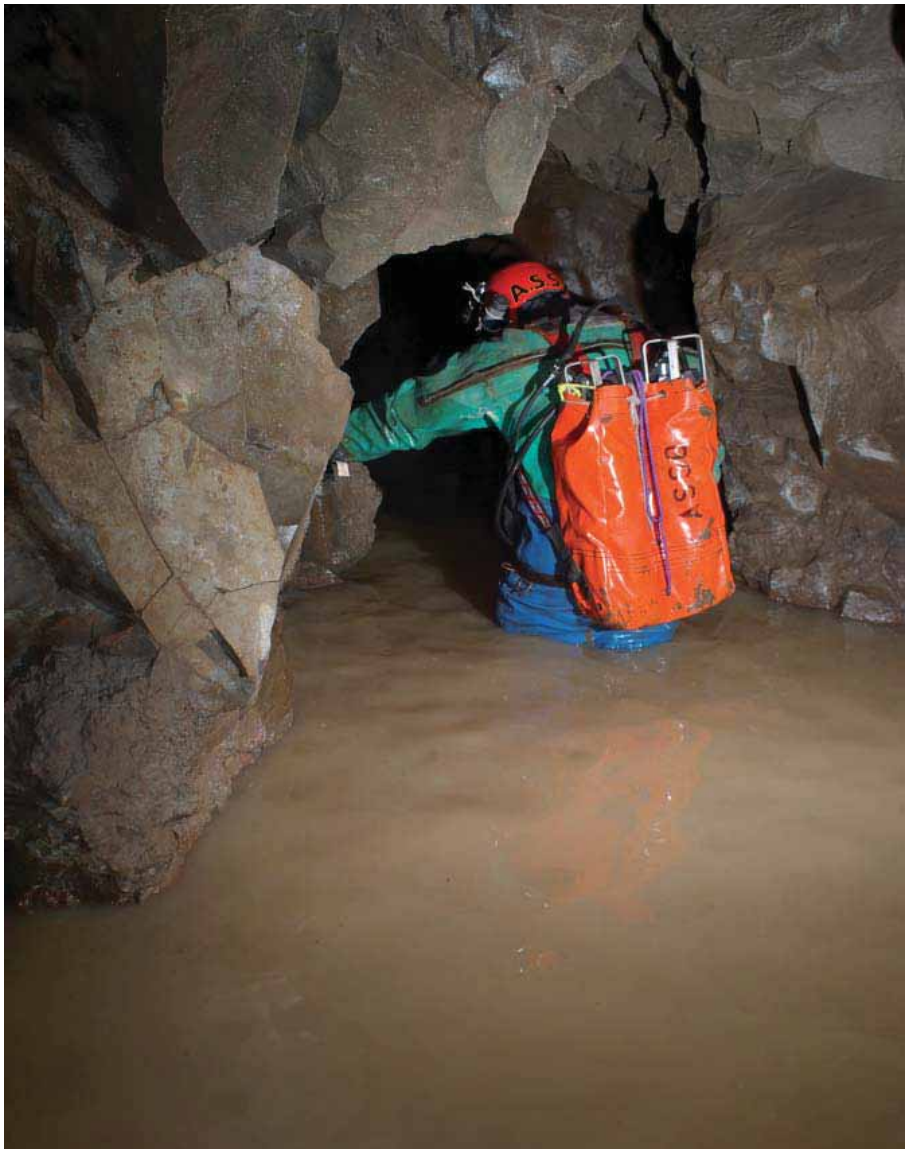


Figura 7 – (Photo Mario Mazzoli - ASSO)
Getting ready to dive in the end portion of an ancient aqueduct near Grottaferrata - Roma
Ci si avvia verso il punto di immersione in un antico acquedotto a Grottaferrata - Roma



Figura 8 – (Photo Marco Vitelli - ASSO)
Survey in the ancient emissary of Lake Albano.
Si effettuano rilevamenti all'interno dell'antico emissario sotterraneo del Lago Albano

sono mediamente buoni mentre più raramente queste attrezzature sono impiegate con profitto nei cunicoli dove possono rimanere bloccate costringendo lo speleo subacqueo ad immergersi per recuperarle. Per quanto riguarda le telecamere da pozzo, sono rare e impegnative quelle dotate di cavi video di lunghezza rilevante (ad es. 150 metri) talvolta necessarie nelle ispezioni di pozzi profondi di miniere allagate.

CONCLUSIONI

Le immersioni hanno il fine di studiare, indagare, verificare, monitorare ed esplorare. Gli speleo subacquei sono continuamente posti di fronte a situazioni non previste dai manuali ma il livello di sicurezza può essere garantito applicando standard internazionali e criteri generali di prevenzione e di tutela. Le immersioni speleo subacquee, oltre tutto, superano i limiti delle immersioni sportive e possono essere facilmente codificate come professionali.

Conseguentemente i responsabili dell'attività devono attestare di possedere essi stessi specifiche competenze, di aver provveduto ad una adeguata formazione degli operatori e ad effettuare costante addestramento e specifica sorveglianza sanitaria. Anche nel raro caso in cui un magistrato dovesse considerare un'attività del genere come sportiva, vanno sempre fatti i conti con la cosiddetta *posizione di garanzia* ricoperta da chi organizza o dai più esperti. Questa garanzia sotto il punto di vista giuridico si esplicita attraverso tutte quelle "posizioni", ricoperte nell'organizzazione o nel corso dell'esplorazione, che derivano da uno speciale rapporto di protezione, educazione, controllo e di custodia del bene tutelato. In questo caso il bene tutelato è la salute o la vita del subacqueo ed è questo il motivo per il quale a chi ricopre tale posizione è attribuita una responsabilità sia civile che penale. Anche per gli aspetti legali è quindi importante essere in condizione di dimostrare che c'è stata preventiva attenzione al contenimento di tutti i possibili rischi. In sintesi: il lavoratore, il volontario o l'esploratore deve effettuare immersioni solo dopo opportuna preparazione ed è consapevole che nel corso delle esplorazioni potrebbe andare incontro a infortuni o patologie causate da agenti fisici e meccanici, biologici o chimici. Conseguentemente, anche dal punto di vista giuridico, è fondamentale individuare un sistema di responsabilità e funzioni legate all'organizzazione delle immersioni e al loro corretto svolgimento. Tutto ciò attraverso la preventiva valutazione del rischio, l'individuazione delle misure di prevenzione e protezione degli operatori che si immergono e di tutti coloro che li supportano e li coadiuvano.

Verificare in immersione come si presenti il manufatto, sommerso o parzialmente sommerso, oggetto dell'esplorazione e della documentazione (*Fig.* 8) può essere interessante e talvolta risolutivo ma, per le attenzioni richieste e le limitazioni illustrate, è consigliato di farsi assistere da speleosubacquei di comprovata esperienza.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (1992), *NSS Cave Diving Manual*, Edit Joe Prosser and H.V. Grey.

AA.VV. (2008), *Cave Diving - Cave Diving Group Manual*, Cave Diving Group. AA.VV., *Info Plongée,* Commission Plongée Souterraine FFS, Federation Francaise de Speleologie.

Bozanic J.E. (2006), *Mastering rebreathers,* Blackfishtek.

Broussolle B., Meliet J.L. (2006), *Phisiologie ed médicine de la Plongée,* Ellipses.

Casati L. (2007), *Manuale di Speleologia Subacquea,* editoriale Olympia.

Eusebio A., Fancello L., Minciotti G. (2010), *Soccorso speleosubacqueo, storia, tecniche, procedure,* Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico.

Exley S. (1986), *Basic cave diving,* Brand New Fifth Edition.

Fancello L. (2010), *Dispense didattiche corsi base di speleologia subacquea,* Scuola Nazionale di Speleologia Subacquea - Società Speleologica Italiana.

Fileccia A. (1996), *Speleologia Subacquea,* Vallardi editore.

Gilliam B., Mount T. (1998), *Mixed Gas Diving,* North Eastern Divers.

Juvenspan H., Thomas C. (1992), *Plonger aux Melanges,* Edition Eau Noire.

Manil J.F. (2001), *La Plongée Fond de Trou,* Librairie Speleo.

Mazzoli M. (2015), *Exploration and documentation of underwater artificial cavities.* Atti Congresso Internazionale di Speleologia in Cavità Artificiali Hypogea 2015, Roma.

Palmer R. (1994), *An introduction to Technical Diving,* Underwater World Publications.

Vasseur F. (2013), *Manuel technique de plongèe souterraine,* Ulmer.

Verdier C. (2001), *Plongée profonde et plongée technique,* Amphora.

Consolidamento di cavità e monitoraggio rupe di Orvieto

Cavity strenghtening and monitoring of the Orvieto cliff

Pierfranco Ventura
Già Ass. Ord. Tecnica delle Costruzioni, Professore Incaricato di Statica e poi di Geotecnica e Fondazioni presso la Facoltà di Architettura, Dip. Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università Sapienza, Roma
E-mail: pierfranco.ventura@uniroma1.it

Parole chiave (*key words*): consolidamento cavità (*cavity strengthening*), analisi a ritroso sismica (*seismic back analysis*), nuove misure coesione (*new in situ tests cohesion*)

ABSTRACT

The Orvieto cliff is affected, especially at the base, by numerous cavities made as tuff quarries and as agricultural warehouses until becoming anti-aircraft shelters during the bombing. This paper describes the strenghtening of the cavity under Via Carducci which caused the collapse of the road and the upper high walls of tuff on the edge of the cliff, giving rise to the tender competition for the static interventions of all the rough sections of the cliff. The cavity was shaped like a sub-horizontal tunnel, perpendicular to the wall of the cliff and had layers of pozzolana very degraded by alteration: these layers were not shored causing collapse. We describe the interaction of the closure of the cavity, through pozzolana and lime and top loading injections, with the reconstruction of the collapsed wall and the access road to the city, restoring the vegetation and the original landscape The monitoring, of the horizontal operating movements of the new wall allowed to reconstruct, with the back analysis of the thrusts, the pozzolana cohesion before degradation and the seismic level that guard. Furthermore the paper describes new types of in-situ tests to measure the cohesion or also the resistance of mortars and concretes or rocks.

SOMMARIO

La rupe di Orvieto è interessata, specie alla base, da numerose cavità realizzate come cave di tufo e come magazzini agricoli fino a divenire rifugi antiaerei durante i bombardamenti. Si descrive il consolidamento della cavità sotto Via Carducci che provocò il crollo della strada e dei soprastanti alti muri in tufo sul ciglio della rupe, dando luogo all'appalto concorso per gli interventi statici di tutti i tratti dissestati della rupe.

La cavità era assimilabile a una galleria suborizzontale, perpendicolare alla parete della rupe e presentava strati di pozzolana molto degradati per alterazione: tali strati non essendo puntellati causarono il crollo. Si descrive l'interazione della chiusura della cavità, tramite pozzolana e calce e iniezioni sommitali di messa in carico, con la ricostruzione del muro crollato e della strada di accesso alla città, ripristinando inoltre la vegetazione e il paesaggio originario. Il monitoraggio, tramite dime traguardate, degli spostamenti orizzontali in esercizio del nuovo muro ha permesso di ricostruire, con le analisi a ritroso delle spinte, la coesione della pozzolana prima del degrado e il livello sismico che presidia. Si descrivono in merito anche nuovi tipi di misure in sito per rilevare la coesione da cementazione o la resistenza di malte, di conglomerati o di rocce.

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

La rupe di Orvieto è caratterizzata da una piattaforma tufacea formatasi dall'eruzione dei vulcani Vulsini e successivamente modellata dai fiumi come è tipico di tanti altri suggestivi abitati etruschi limitrofi.

La *Fig*. 1a mostra la carta geologica che fu messa a disposizione dalla Regione Umbria (Conversini et al.,1978) per l'appalto concorso riguardante il consolidamento della rupe, la cui aggiudicazione fu preceduta dall'esposizione al pubblico nel teatro Mancinelli di tutti i 23 progetti concorrenti, prassi decisamente da conservare.

Il tufo giace sul complesso fluvio-lacustre dell'Albornoz, sede della falda acquifera che si attinge nel pozzo di San Patrizio, e sull'estesa formazione di base delle argille azzurre plio-pleistoceniche sovraconsolidate, di deposizione marina, che si estendono fino alla zona di Roma.

Le pareti subverticali della rupe sono interessate dal quadro fessurativo corticale di *Fig*. 1c, caratterizzato principalmente da due famiglie di fratture orientate come riportato nel reticolo di Schmidt. Tali lesioni sono innescate specie dallo scalzamento dei detriti, al piede della rupe, indotto da frane.

La *Fig*. 1b mostra la riduzione della resistenza dei tufi dell'ordine del 20% in presenza dell'umidità indotta dalle piogge, resistenza invece elevata in profondità come riscontrato con prove di trazione in sito sui tiranti pretesi di ancoraggio da 45 tonnellate, usati poi per ripristinare l'assetto tensionale statico al posto dei detriti scalzati al piede della parete alta fino a 25m.

Le caratteristiche geotecniche delle argille sovraconsolidate di base sono risultate in pieno accordo con quelle di Roma, a conferma dell'appartenenza alla stessa formazione marina basale.

2. I DISSESTI DELLE CAVITÀ DELLA CONFALONIERA

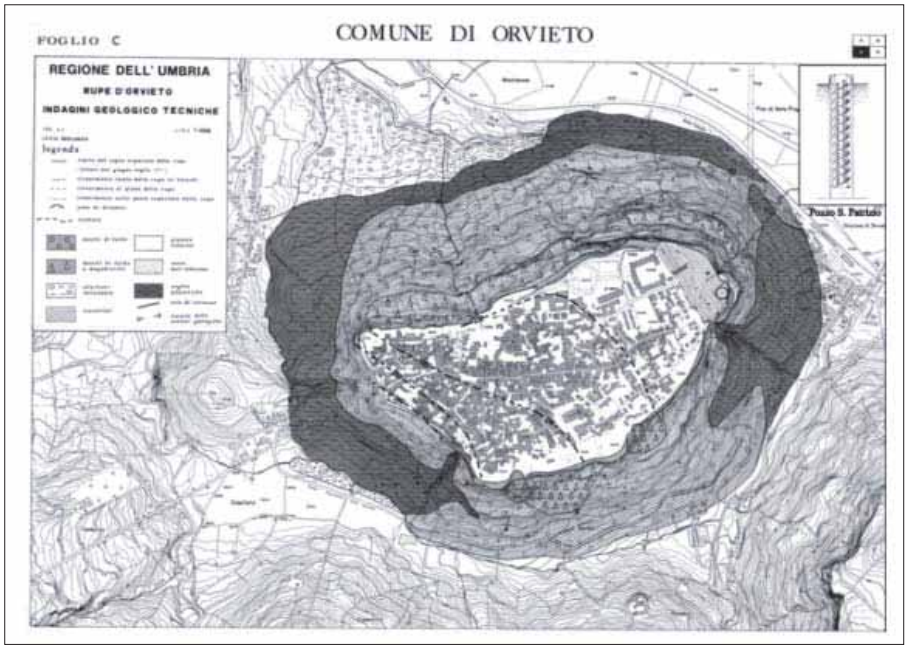
La rupe presenta a nord la località Confaloniera vicino al pozzo di San Patrizio e alla funicolare che brillantemente funzionava a contrappesi idraulici, ed è sede di Via Carducci unico accesso settentrionale alla città.

La strada fu completamente interrotta da un esteso crollo che interessò anche un alto muro di sottoscarpa in muratura tufacea, *Fig*. 2a, realizzato come tanti altri lungo il perimetro, per regolarizzare e sostenere il ciglio della rupe.

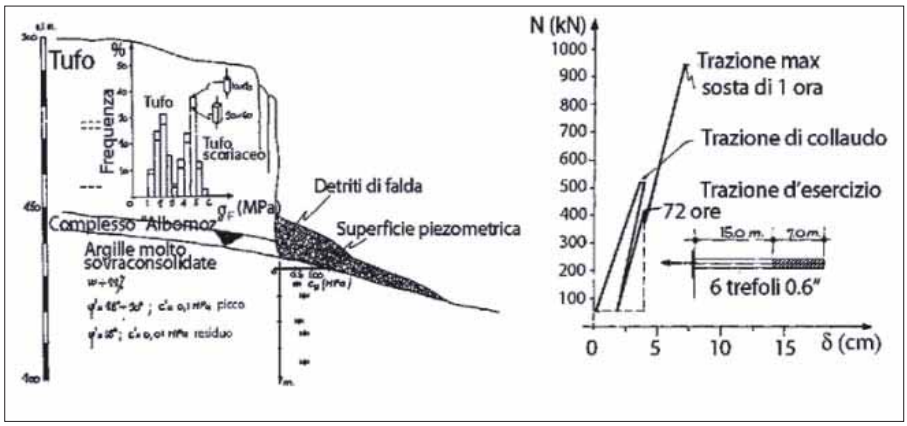
Tali dissesti, *Fig*. 2c, furono causati dal crollo delle pareti di un reticolo di gallerie parietali scavate sotto la strada per coltivare la pozzolana e poi abbandonate senza puntellature per cui il degrado da alterazione ha innescato le perdite di resistenza per mancanza di coesione (par.3). Rimase in posto in particolare il tratto di muro, costituito da muratura in blocchi di tufo locale grezzamente squadrati, alto 11 m e con base sul ciglio della rupe di 1,4 m spessore, naturalmente ben minore di quello di muri che sostengono terrapieni privi di coesione e in presenza di acquiferi (*Fig*. 2b).

Il consolidamento è iniziato con la chiusura delle gallerie tramite riempimento con pozzolana stabilizzata a calce idraulica e con iniezioni sommitali alle cavità per ripristinare lo stato tensionale litostatico originario.Si è realizzata poi un'opera di sostegno in c.a. rivestita in tufo (*Fig*. 3) articolata in modo anche da costituire una sella a ponte sopra le cavità per ripristinare la sede stradale e l'altezza variabile dei muri crollati, passante dai 6,0 m ai predetti 11,0 m. Tale altezza nel tratto successivo contraffortato raggiunge i 20 m rimasti intatti lungo la strada umbro-casentinese, a dimostrazione dell'immensa perizia delle maestranze che realizzavano la muratura e la protezione della coesione della pozzolana.

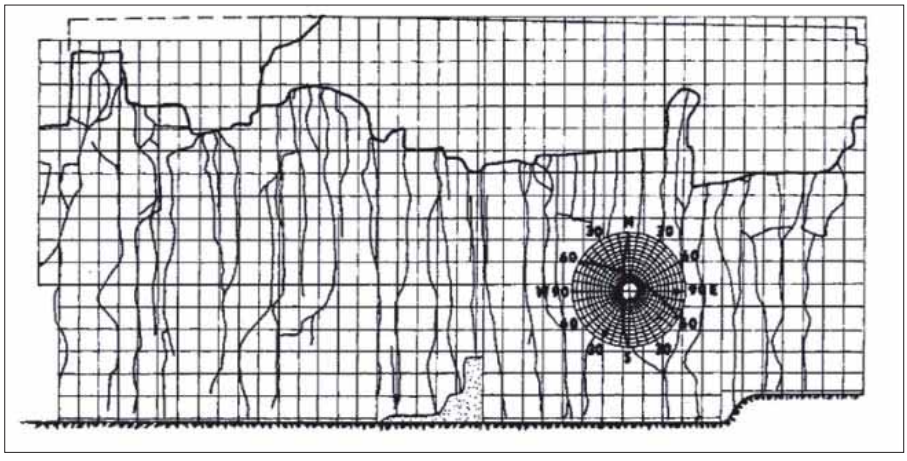
Il ripristino della vegetazione lungo le pendici ha consentito il rapido ripristino anche del paesaggio.



a)



b)



c)

Figura 1 – a) Carta geologica di Orvieto (Regione Umbria); b) Caratteristiche geotecniche e prova su un tirante preteso; c) Quadro fessurativo tipo della parete tufacea e reticolo di Schmidt delle due principali famiglie di fratture

Le *Fig.* 3 descrivono i tipici consolidamenti delle rocce fratturate che furono studiati tramite: prove in sito basate su confronti sistematici fra le raccomandazioni internazionali allora vigenti (AICAP 1981); prove di tiro su ancoraggi nei sondaggi geognostici (Ventura 1983); monitoraggi con barre estensimetriche; verifiche pseudostatiche grafiche (fig. 3c) del tratto di rupe corticale da consolidare con il reticolo di chiodature e di tiranti pretesi al piede (Cestelli Guidi et al.,1983).

Ciò come fu proposto nel progetto del 1979 e realizzato con l'inaugurazione del cantiere da parte del Presidente Sandro Pertini.

3. IL MONITORAGGIO DEL CONSOLIDAMENTO E L'ANALISI A RITROSO STATICA E SISMICA

La messa in carico delle cavità è stata controllata con iniezioni ripetute a rifiuto e che nella *Fig.* 2 non vanno confuse con micropali di fondazione.

Particolarmente istruttivo è stato poi il monitoraggio dello spostamento massimo orizzontale del muro in c.a. durante il rinterro, effettuato traguardando delle dime sfalsate ubicate alla sommità.

I dati di spinta di un terrapieno privo di coesione e asciutto furono desunti a ritroso dallo spostamento orizzontale in esercizio (SLE) δ_h misurato alla sommità h della una parete incastrata di spessore d e modulo E_c fondata su un semispazio elastico $E_t >> 0$, da cui:

$$\gamma K_a \approx \delta_h \left[\frac{30 E_c J_c}{b h^5} \right] \approx \delta_h \left[\frac{5}{2} \frac{E_c d^3}{h^5} \right]$$

Il muro in c.a. rinterrato è alto 7,2 m, con d = 0,65 m senza 5 cm di copriferro, b = 1,0 m unitario e momento d'inerzia J = 0,023 m^4, per cui in base a E_c misurato su provini cilindrici e per δ_h = 6 mm di freccia elastica è risultato γK_a = 0,4 t/m^3.

Analisi a ritroso valgono poi specialmente per la stima della coesione alla base dei muri in zona sismica, in buon accordo con il reale percorso delle tensioni (Ventura 1987).

Lo stato limite ultimo (SLU) a scorrimento (GEO), dando per verificato il taglio alla base della parete in c.a. (STR), per non maggiorare il peso $G_E = G$ del muro in presenza di K_{aE} anziché K_a, dalla storica chiusura grafica del poligono delle forze limite, necessita di una riduzione della spinta tramite una coesione di presidio sul piano di posa asciutto pari a:

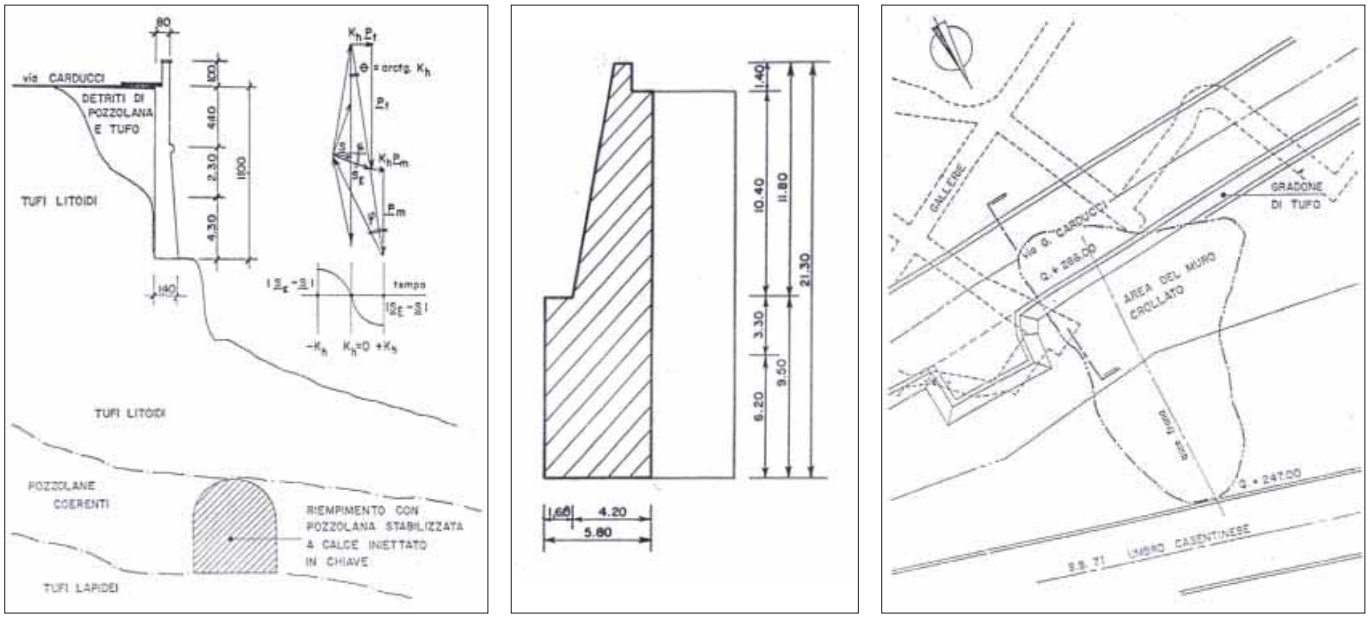
$$c \approx \gamma h \left[\frac{3}{4} \frac{K_a}{K_{aE}} (tg\varphi - \frac{a_{gh}}{g}) - tg\varphi) \right]$$

in assenza di spostamenti orizzontali di primo distacco alla base.

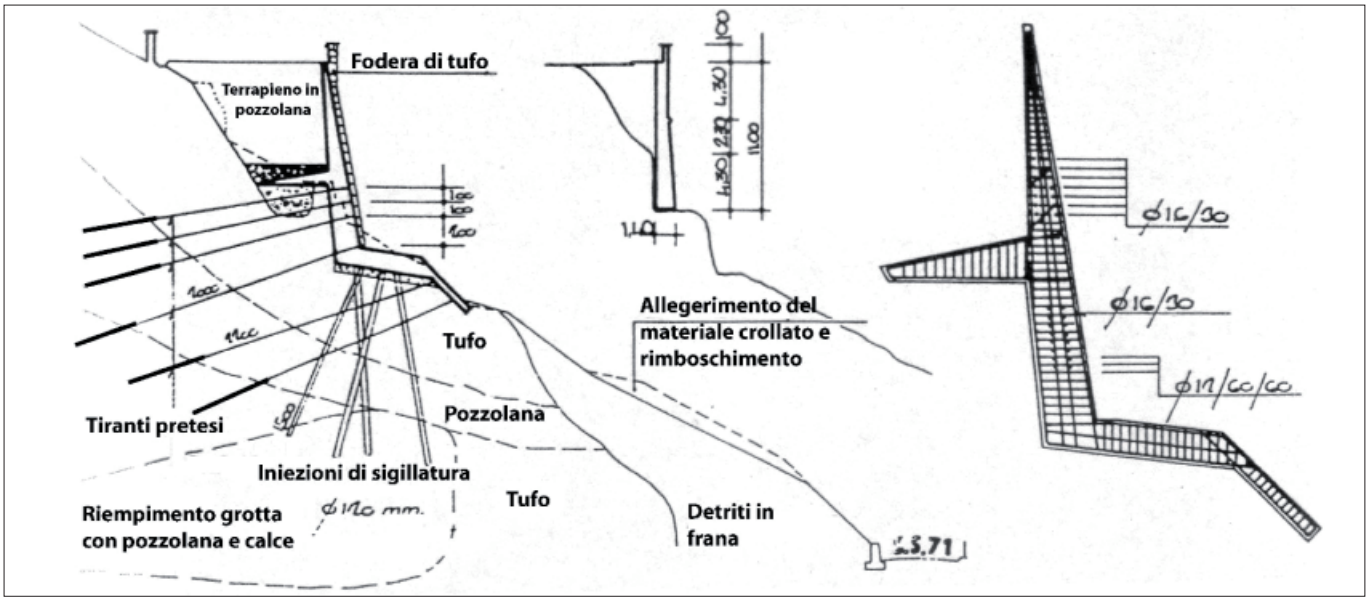
Analisi analoghe in presenza di terreni saturi consentono anche di valutare la "preziosa" coesione non drenata c_u unica resistenza alle azioni sismiche, essendo l'attrito $\phi_u = 0$.

La possibilità di spostamenti orizzontali rigidi durante i terremoti come noto peraltro consente di ridurre le spinte sismiche (Callisto e Aversa 2008).

Tali valutazioni consentono di utilizzare muri storici anteriori alle norme tecniche come una sorta di grandi indicatori degli eventi



a) b) c)



d)

Figura 2 – a) Cavità per la coltivazione della pozzolana che hanno provocato il crollo dei muri della Confaloniera, analisi grafica pseudostatica; b) Confronto con le dimensioni di un muro di sostegno di terrapieni privi di coesione; c) Planimetria del crollo; d) Consolidamento tramite riempimento delle cavità e realizzazione di una nuova opera di sostegno a sella anche per il ripristino della sede stradale

sismici, in modo da caratterizzare sia la massima spinta consentita S_{aE}, anziché statica S_a, sia i tempi di ritorno in base alla durata storica.

A tal proposito nella *Fig.* 2a è riportata la chiusura grafica del poligono delle forze agenti sul muro non crollato e l'analoga chiusura pseudostatica per accelerazione sismica normalizzata $k_h = a_g/g$; peraltro Orvieto in passato non era considerata zona sismica.

Gli alti muri sui cigli della rupe non sarebbero verificati con le spinte sismiche in assenza di coesione del terreno, infatti ad esempio per $k_h = 0{,}15$, con il predetto $\gamma K_a = 0{,}4$ t/m^3 si desume una coesione $c \div 5$ t/m^2 = 50 kPa del tipo cementazione ($c >> 0$).

La conservazione di tale coesione ha evitato gravi crolli dei muri come in tanti altri casi non degradati dall'incuria e dalla totale mancanza di manutenzione e soprattutto di disciplinamento delle acque e regolarizzazione dei deflussi.

4. MISURA DELLA RESISTENZA PER COESIONE DA CEMENTAZIONE

In base alle precedenti valutazioni indirette è importante anche la misura diretta del grado di cementazione specie per esaminare il grado di sicurezza di cavità esistenti.

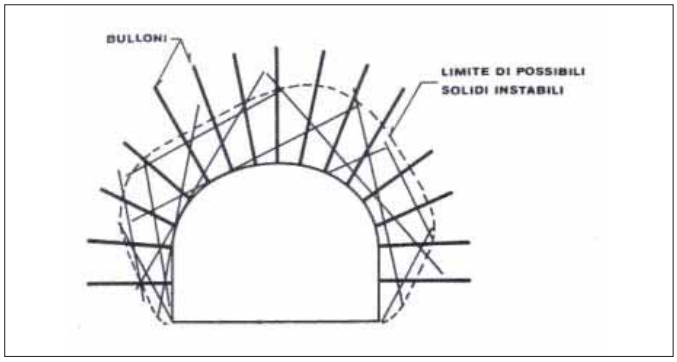
La prima prova più semplice è come noto quella dello *slaking test* che con l'immersione in acqua dei campioni evidenzia se si è in presenza di rocce cosiddette "tenere".

Se la cementazione è in grado di mantenere il comportamento monolitico, come per le murature, si ritarda molto l'innesco del degrado ciclico durante un sisma, specie in quanto tutti i delicati effetti del periodo di risonanza coinvolgono il *rocking* rigido complessivo e non il *tilting* deformativo (nel caso di un edificio il periodo non dipende dal numero di piani).

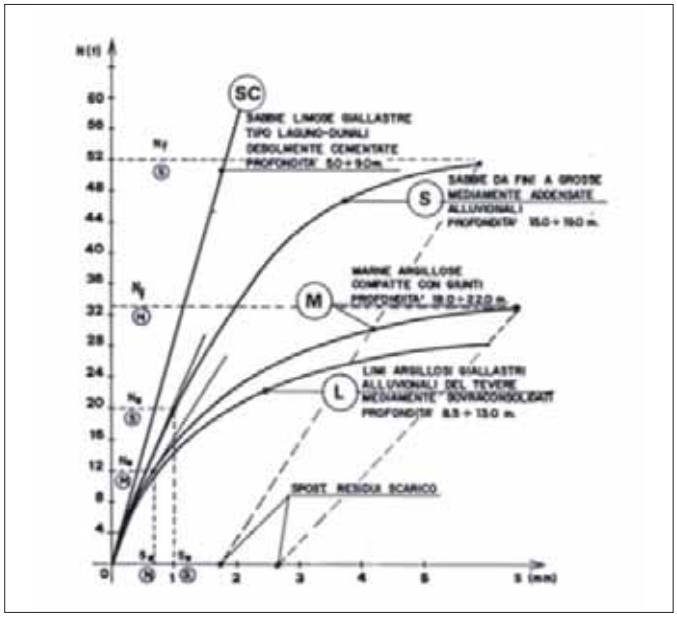
Altre prove classiche sono quelle di taglio e trazione, tipo prova brasiliana o a flessione.

La *Fig.* 4 illustra poi delle attrezzature specifiche, ideate dallo scrivente, per la misura in sito della resistenza sia di pareti in trincee d'ispezione geologica sia di provini di malta in murature esistenti (Ventura e Sorrentino 2005), non trascurandone la coesione.

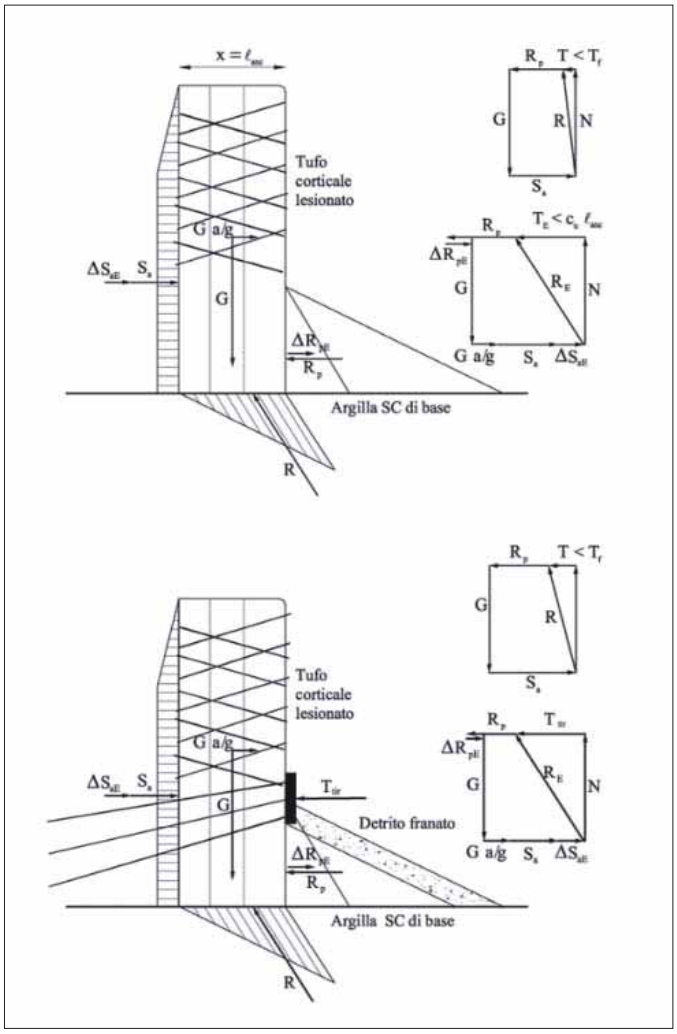
La *Fig.* 4a mostra l'inserimento di un particolare perno a espansione lungo *l* in un foro calibrato e ben pulito che si fa aderire al foro per dilatazione radiale che viene controllata con un calibro fino al 5% del diametro *2r*. Successivamente la dilatazione è bloccata in modo da sottoporre il perno a torsione con la



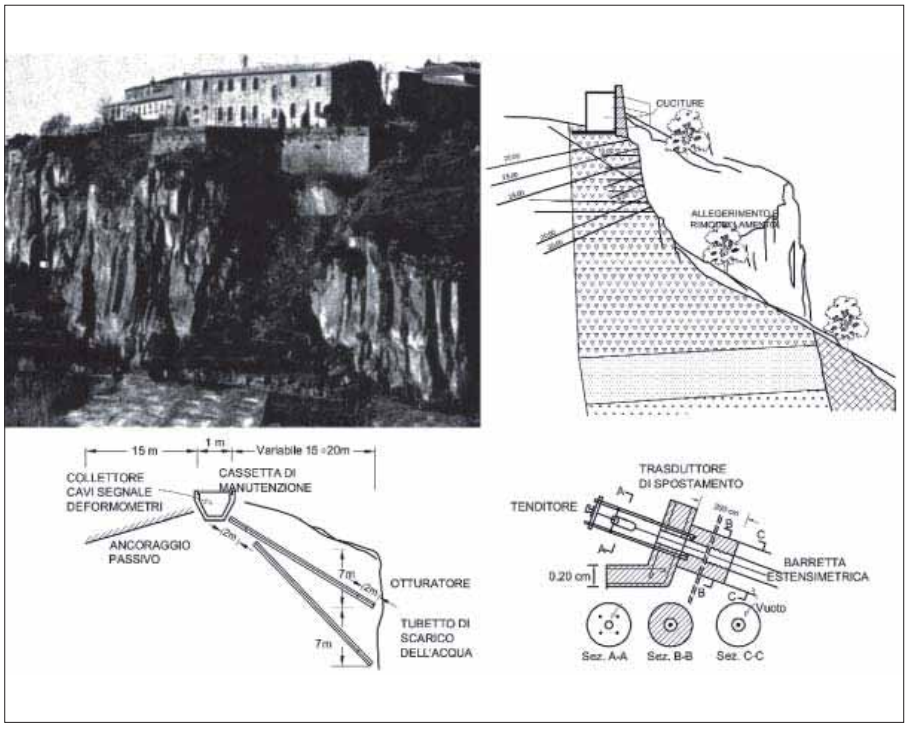
a)



b)



c)



d)

Figura 3 – a) consolidamento di una cavità tramite bulloni; b) prove di trazione su tiranti in foro e in sondaggi geognostici; c) analisi grafica pseudostatica del tratto tufaceo corticale della rupe di Orvieto; d) consolidamento e monitoraggio estensimetrico tipo della parete fratturata

chiave dinamometrica e misurare il momento di rottura M_t dal quale si può desumere, da un numero di prove significativo, la tensione tangenziale media di aderenza:

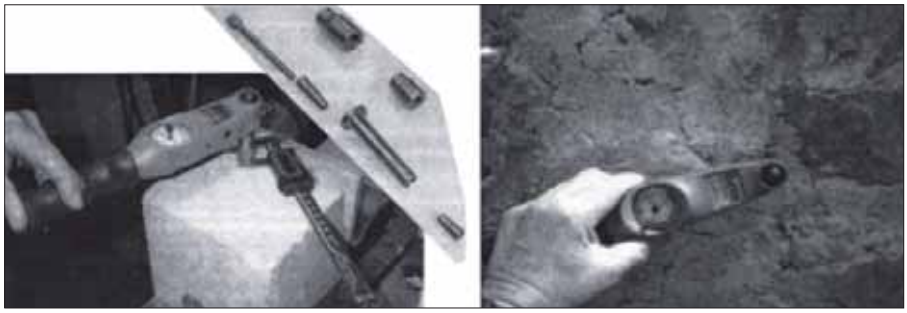
$$\tau_{max} = f_v = \frac{M_t}{2\pi r\left[e/(e-1)\right]\ell_e r} = \frac{M_t}{3{,}67\ell_e r^2} \quad \leftarrow \ell_e(\ell-\ell_e) \approx \frac{G_{anc}}{E_{malta}} r^2 \leftarrow \ell - \ell_e \approx 3r$$

naturalmente la coesione è strettamente correlata a tale tensione, essendo $\sigma_{radiale} \sim 0$.

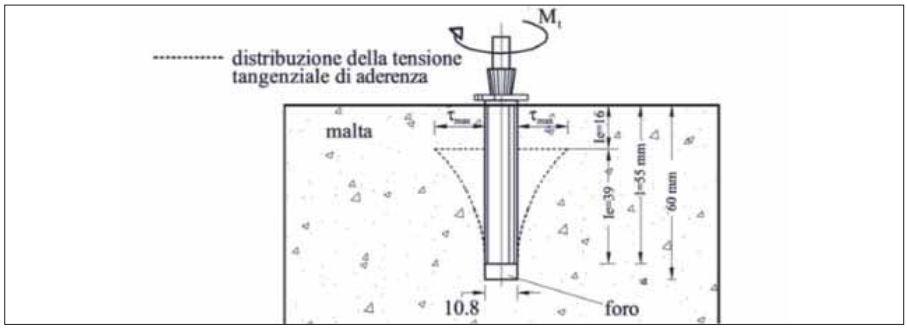
La *Fig.* 4c mostra un altro apparecchio con due coltelli (B > 3D inerti conglomerato o ÷ 20 mm per malte o rocce tenere non alterate superficialmente) che vanno inseriti in preintagli fatti con il frullino, in modo simile all'inserimento dei martinetti piatti, ma invece comandati ciclicamente fino a rottura, di tipo *push in.*

La distribuzione delle reazioni solo tangenziali τ_{cf} fino a rottura s'instaura lungo superfici di scorrimento circolari simili sia in fase elastica, tipo Fadum (1948), che plastica, tipo Fellenius (1936), e pertanto con percorsi delle tensioni ben più regolari di quelle "imbutiformi" delle prove *pull out* ($\sigma_{radiale} \neq 0$), con conseguenti misure meno disperse.

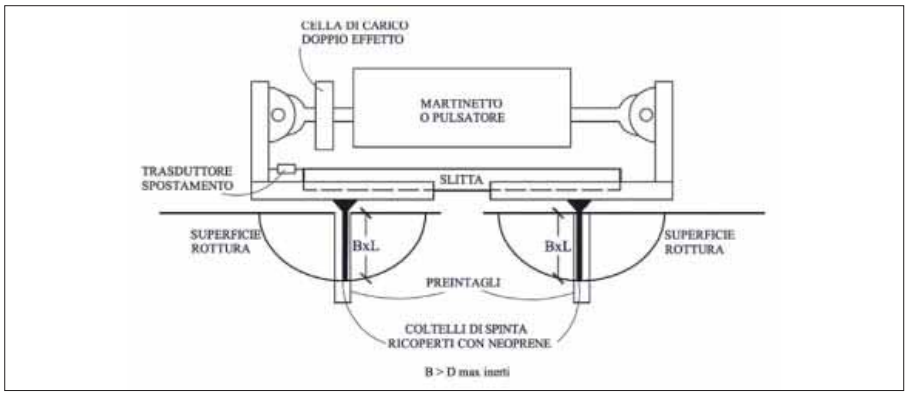
Analogamente la resistenza a compressione R_{ck}, a seconda della normativa NTC2018 o passate a partire dal D.M.1972, si desume a ritroso dalla resistenza a taglio - trazione:



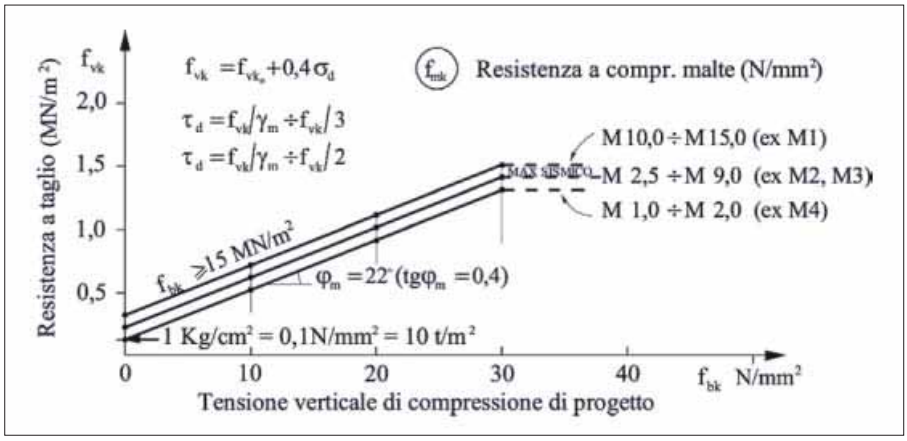
a)



b)



c)



d)

Figura 4 – Misura della resistenza tangenziale in sito: a) perno a espansione calibrata di esercizio e a rottura per torsione misurata con chiave dinamometrica; b) stato tensionale perimetrale al perno c) coltelli inseriti in preintagli per rottura ciclica cilindrica; d) resistenza a taglio delle malte secondo la normativa EC6 sulle murature

$$\tau_{cf} \div N_f / 2\,\pi B\,L \approx f_{ctk} = 0{,}30\sqrt[3]{(0{,}83R_{ck})^2}\ (N/mm^2) \approx \eta\tau_{camm} \approx 3(4+\tfrac{R_{ck}-150}{75})\ (kg/cm^2)$$

La prova, agendo con il martinetto nei 2 versi, impegna 2+2 provini semicilindrici fornendo valori medi, subito in coppia, e impiegabili per misurare in sito con precisione la resistenza del calcestruzzo, specie nei casi dubbi di ricorso alla demolizione, o di rocce tenere.

A titolo di riferimento per le rocce tenere, nella *Fig.* 4d sono riportati i valori della resistenza a taglio anche delle malte in base alle norme EC6 e NTC2018 sulle murature. Le prove migliorano la valutazione preventiva riguardante il rapporto costi/sicurezza negli interventi di consolidamento, contribuendo al successivo controllo dell'efficacia degli interventi con il monitoraggio.

5. CONCLUSIONI

Lo studio della stabilità delle cavità può essere ben coadiuvato dalla analisi a ritroso degli stati limiti di esercizio e ultimi, tarati sulle azioni massime pseudostatiche consentite, che permettono di risalire alla resistenza delle pareti specie per coesione, come illustrato per il consolidamento di un crollo che ha interessato la rupe di Orvieto.

La coesione viene dedotta anche dalle verifiche "a posteriori" dei muri in vera grandezza, tarate sulle misure di spostamenti per controllare l'efficacia del consolidamento.

Oltre all'analisi a ritroso per valutare "a priori" la sicurezza dell'esistente si propone anche la misura diretta della resistenza a taglio, in assenza di sforzo normale, per desumere la coesione ricorrendo a nuovi tipi di prove in sito con percorso dovuto solo alle tensioni tangenziali calibrate presso il Laboratorio Materiali della Facoltà di Architettura di Roma.

BIBLIOGRAFIA

AICAP (1993), Commissione Raccomandazioni, *Ancoraggi nei terreni e nelle rocce,* 1ª Ed. Convegno di Cosenza 1981, 2ª Ed. Conv. di Bari 1983, 3ª Ed. Convegno di Spoleto 1993.

Callisto L., Aversa S. (2008), *Dimensionamento di opere di sostegno soggette ad azioni sismiche,* M.I.R., Opere Geotecniche in Condizioni Sismiche, Bologna, Patron Editore.

Cestelli Guidi C., Croci G., Ventura P. (1983), *The Stability of the Orvieto Rock*, International Congress on Rock Mechanics, Melbourne 10-15 April.

Conversini P., Lupi S., Martini E., Pialli G., Sabatini P. (1978), *Rupe di Orvieto – Indagini Geologico tecniche,* Quaderni Regione Umbria.

Hanna T. H.(1986), *Anchor in tension,* Elservier.

Ribacchi R., Tommasi P. (2018), *Analisi dei Dissesti della Rupe di Orvieto,* Orvieto e Todi città del divenire, Edizione Quasar.

Ventura P. (1985), *Back analysis of soil parameter from anchor tests,* Proceedings 11th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Balkema, San Francisco.

Ventura P. (1987), *Analisi pseudostatica di un'antica opera di sostegno in muratura,* III Congr. Naz. di Ingegneria Sismica, protezione dei Beni Architettonici, Roma 29 set-2 ott.

Ventura P. (1988), *Analisi di prove su tiranti nei terreni*, Atti Gruppo Nazionale di Coordinamento per gli studi di Ingegneria Geotecnica CNR, Convegno Monselice, 5 - 6 ottobre.

Ventura P., Sorrentino L. (2005), *New in situ torsional test to asses masonery mortar shear strength,* Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Roma Architettura 1. IX Jornadas. Congreso Chileno de Sismologia e Ingenieria Antisismica, Universidad de Conception N° A14-06 8-13 Nov.

Ventura P. (2017), *Ruolo del criteri di sicurezza,* Rivista Lacquaonline.

Ventura P. (2019), *Fondazioni*: *vol. I Modellazioni statiche e sismiche strutture-terreni, vol. II Applicazioni statiche e sismiche strutture-terreni,* 2ª edizione; 1ª edizione 2011, Hoepli, Milano.

Analisi di stabilità e progetto esecutivo per la messa in sicurezza di aggrottati nell'area urbana di Ragusa Ibla

Michele Zocco
Geologo, libero professionista

Cristina Licitra
Ingegnere, libero professionista

Analysis and design for anthropogenic cavity safety in the Ragusa Hibla urban area

Parole chiave (*key words*): Cavità antropiche (*anthropogenic cavity*), analisi di stabilità (*stability analysis*), sicurezza (*safety*)

RIASSUNTO

Le cavità in esame ricadono nel centro storico di Ragusa Ibla, nella Sicilia sud-orientale. L'origine di queste cavità è riconducibile ad attività antropiche, con un uso di tipo sepolcrale già in epoca preistorica, per essere poi adattate ad abitazioni troglodítiche in epoca araba, con insediamenti abitativi che arrivano fino all'ultimo dopoguerra. Le cavità sono spesso poste pochi metri al di sotto di abitazioni ed infrastrutture urbane, con altezze di pochi metri e superfici di qualche decina di mq. Le analisi di stabilità ed il dimensionamento geotecnico degli interventi di consolidamento, sono stati effettuati in conformità alle disposizioni delle N.T.C.08. Lo studio dello stato tensionale dell'ammasso roccioso interessato dalle cavità e le verifiche di stabilità dei volumi rocciosi all'intorno delle relative sezioni critiche, sono state sviluppate con modellazione ad "Elementi di contorno" (Boundary Element Method), bidimensionali ed elasto-plastici. Per un ulteriore riscontro al metodo (B.E.M.) sono state applicate le metodologie di Obert L. Duvall W.I. Merril R.H. e di Terzaghi. Dalle verifiche effettuate sono stati evidenziati possibili fenomeni localizzati di crollo di elementi lapidei dalla volta. Per la messa in sicurezza degli aggrottati è stata prevista la realizzazione di chiodature in volta e sul fronte esterno.

ABSTRACT

The caves under consideration are located into the historical centre of Ragusa Ibla, in southeastern Sicily. These anthropogenic cavity, just few metres under houses and urban infrastructure, have heights of a few meters and surfaces of some tens of square meters. Their origin can be traced back to sepulchral use since prehistoric times, to be then adapted to Troglodyte dwellings in Arab period, with human settlements that arrived until the second world war. The stability analysis were carried out in accordance with the provisions of N.T.C. 08. The study of stress state of the rock mass affected by cavities and stability checks Rocky around volumes of its sections, were developed with modeling to "outline" (Boundary Element Method), two-dimensional elasto-plastic and, considering the stresses on multiple critical sections. For a further feedback to method (B.E.M.) the Obert l. Duvall W.I. Merril R.H. and Terzaghi methodologies have been applied. Checks carried out have shown possible localized phenomena of collapse of stone blocks and wedges from the vault. It was planned to build soil nails in the roof and on the external front, for the safety of the caves.



Figura 1 – Immagine satellitare da Google Earth, Sicilia sudorientale



Figura 2 – Immagine satellitare da Google Earth, area urbana di Ragusa Ibla

1. MODELLAZIONE GEOLOGICA

Le caratteristiche litostratigrafiche dell'area in cui ricadono gli aggrottati studiati sono schematizzabili con la presenza di alternanze di strati calcarenitici e calcarenitico-marnosi, riferibili stratigraficamente alla Formazione Ragusa. L'ammasso roccioso è interessato da sistemi di giunti sub-verticali di origine tensionale e singenetica.

Lo spessore complessivo della formazione risulta di circa 200 m. Le unità stratigrafiche profonde sono anch'esse caratterizzate da litologie di natura carbonatica. Dal punto di vista idrogeologico, data la profondità della superficie piezometrica, posta a circa -30 m dal piano campagna, non si evidenziano fenomeni di interazione tra la falda acquifera e gli aggrottati.



Figura 3 – Stralcio Carta Geologica da PRG di Ragusa

VITA DELLA STRUTTURA

Vita nominale	V_N	100	[anni]
Classe d'uso	C_U	IV	
Vita di riferimento	V_R	200	[anni]

CARATTERISTICHE SISMICHE TERRENO

Topografia		T4
Coeff. topografico	S_T	1,4
Categoria suolo		A

2) MODELLAZIONE SISMICA

In funzione dei caratteri morfologici, geologico-stratigrafici, e geofisici che caratterizzano il sito in esame, è stata individuata la categoria topografica e di sottosuolo, con i valori dei parametri di risposta sismica locale riportati in tabella.

	SL	P_{VR}	T_R	a_g	F_o	T_C^*	S	Tb	T_C	T_D	F_v	a_{max}	a_{max}/g
sle	Operatività	81%	120	**0,917**	**2,388**	**0,305**	1,400	0,102	0,305	1,967	0,976	1,284	0,131
sle	**Danno**	63%	201	**1,310**	**2,321**	**0,330**	1,400	0,110	0,330	2,124	1,134	1,834	0,187
slu	**Salv. Vita**	10%	1898	**4,256**	**2,345**	**0,515**	1,400	0,172	0,515	3,302	2,065	5,958	0,608
slu	Collasso	5%	2475	**4,866**	**2,337**	**0,539**	1,400	0,180	0,539	3,546	2,200	6,812	0,695

Figura 4 – Parametri di risposta sismica locale

3. MODELLAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso è stata effettuata applicando il criterio di Hoek-Brown, attraverso l'utilizzo del software RockLab.

Per il volume corticale "instabile" sono stati determinati i seguenti valori di coesione drenata ed attrito: $c_k = 0{,}05$ MPa $Phi_k = 35°$. Per il substrato roccioso "integro" risulta: $c_k = 0{,}200$ MPa $Phi_k = 40°$.



Figura 5 – Panoramica del versante interessato dalle cavità in esame



Figura 6 – Prospetto frontale G1-G2



Figura 7 – Interno grotta G1 (vista interna da NE a SW)



Figura 8 – Interno grotta G2 (lato SE-SW)

4. MODELLAZIONE GEOSTRUTTURALE

I rilievi geostrutturali e geomeccanici sono stati effettuati lungo le pareti delle cavità e del fronte roccioso, secondo le procedure indicate dall'I.S.R.M, riportando le discontinuità presenti nell'ambito del volume significativo sulle proiezioni stereografiche equi angolari di Wulff, attraverso l'utilizzo del programma Stereonet (*Fig.* 10).

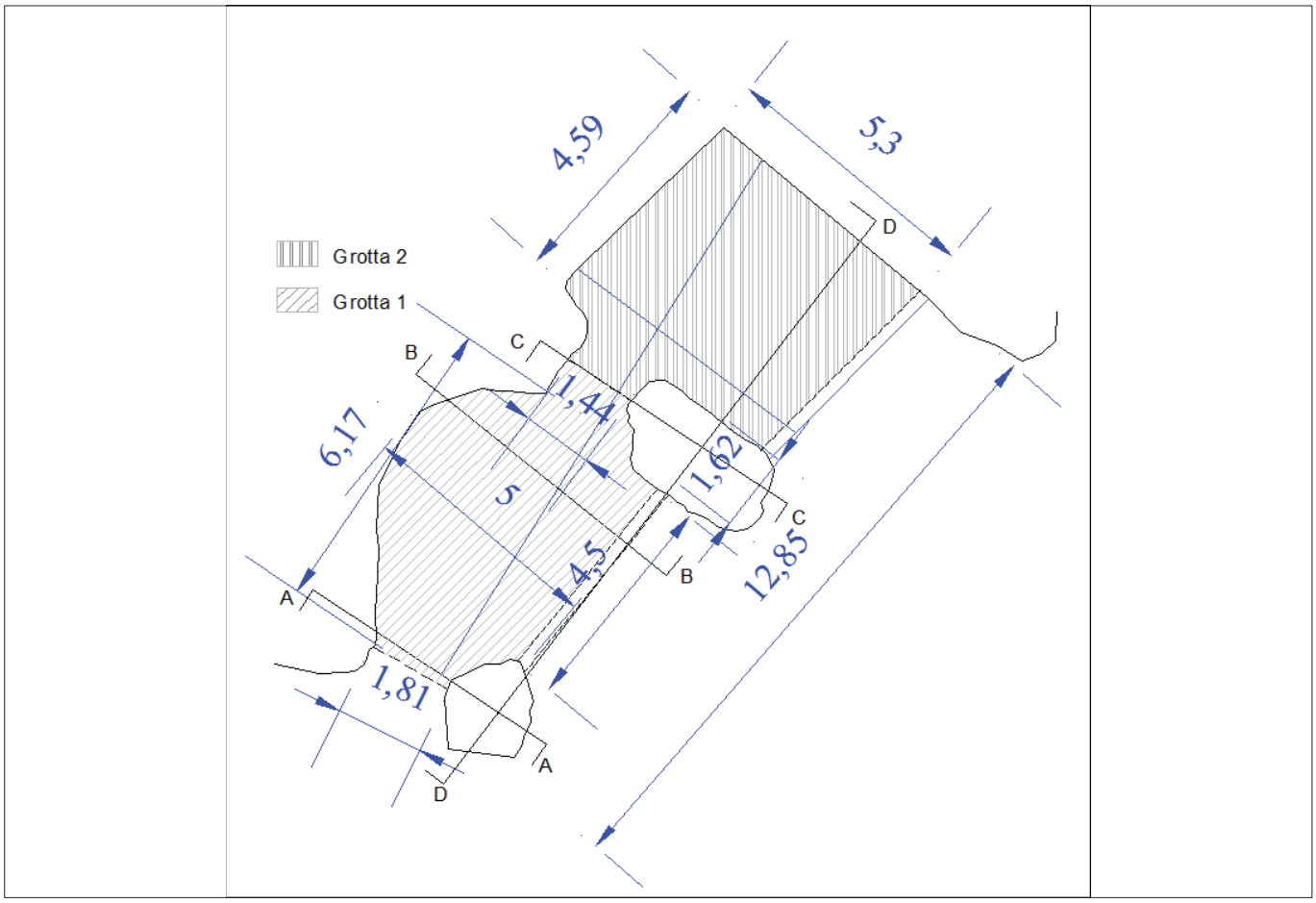


Figura 9 – Pianta aggrottato G1-G2

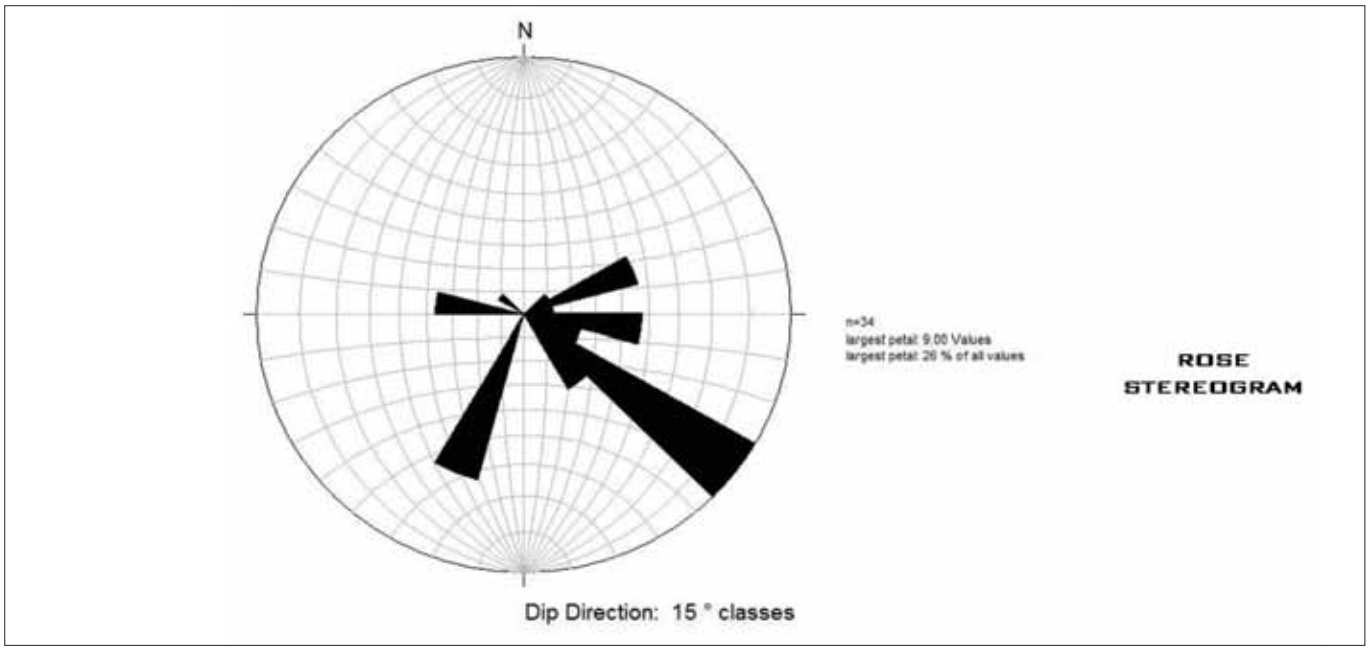


Figura 10 – Stereogramma a rosa delle direzioni di immersione dei giunti.

5. VERIFICA ALLA STABILITA' LOCALIZZATA (TEST DI MARKLAND)

L'analisi speditiva delle condizioni di stabilità locale delle calotte sono state effettuate attraverso l'applicazione del test di Markland, con la schematizzazione delle discontinuità presenti nell'ammasso roccioso su un diagramma equatoriale di Wulff.

L'applicazione del criterio di Markland ha evidenziato la possibile formazione di cunei lapidei instabili, con potenziali fenomeni di distacco dalla callotta. Ciò è evidenziato in particolare dalla presenza di aree chiuse che comprendono il centro del diagramma di Wulff, definite da un numero di giunti n°Ji ≥ 3, come avviene per l'area (a) in giallo. Le condizioni di potenziale instabilità localizzata lungo i "piedritti" sono evidenziate dall'intersezione di n°Ji ≥ 2, condizione (b), all'interno di uno dei due semicerchi, ottenuti dall'intersezione dell'asse della galleria con il cono d'attrito.

6. VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE DELLE SEZIONI CRITICHE

Le verifiche di stabilità globale sono state effettuate con i seguenti metodi:

- (Examine 2Dv8 di Rocscience), con modellazione ad "Elementi di contorno" (Boundary Element Method);
- Obert L. Duvall W.I. Merril R.H.;
- Terzaghi.

6.1 Boundary element method

Le verifiche di stabilità dei volumi rocciosi all'intorno delle sezioni critiche, sono state effettuate in conformità alle disposizioni di cui al § 6.7 "Opere in sotterraneo" D.M. 14-01-2008. Le verifiche di stabilità sono state sviluppate con l'impiego del software dedicato "Examine 2Dv8", fornito da Rocscience, calcolando le tensioni e le deformazioni intorno alla sezione, con un modello ad "elementi di contorno" (Boundary Element Method) bidimensionali ed elasto-plastici, secondo il criterio di rottura di Hoek & Brown).

È bene precisare che il modello tensionale bidimensionale, può essere utilizzato per l'analisi delle sollecitazioni e degli spostamenti nell'ammasso roccioso circostante una cavità, dove la dimensione dell'asse longitudinale è molto più grande di quelle trasversali. In questo caso le sollecitazioni e gli spostamenti in un piano perpendicolare all'asse della cavità non sono influenzati dalle caratteristiche alle estremità dello scavo, a condizione che queste siano abbastanza distanti. In una "camera" sotterranea con pianta "equidimensionale" l'effetto perimetrale non può essere trascurato. In questo caso sarebbe più opportuno effettuare una analisi tridimensionale delle sollecitazioni e degli spostamenti nella massa rocciosa circostante, tuttavia è possibile semplificare il problema e ricondurlo all'analisi bidimensionale considerando le sollecitazioni su più sezioni critiche, identificate sulla base di dati geometrici, geomeccanici, geostrutturali ed idraulici, rilevati accuratamente in sito. Si riportano di seguito i grafici di elaborazione più rappresentativi, con le principali assunzioni di calcolo, dove le sezioni di verifica considerate corrispondono alle condizioni generali più sfavorevoli. I valori di riferimento della rigidezza normale (kn), della rigidezza trasversale (ks) e del coefficiente di stress orizzontale k, sono stati determinati attraverso l'applicazione della procedura proposta da Ameneh F. Dardashti, Rasoul Ajalloeian (2012).

L'entità dei parametri di rigidezza normale (kn) e trasversale (ks) e del coefficiente di stress orizzontale, sono stati calcolati in funzione dei moduli di deformazione e di elasticità, dei coefficienti di poisson e della spaziatura media dei giunti presenti nell'ammasso roccioso all'intorno delle cavità (Ameneh F. Dardashti, Rasoul A. 2012).

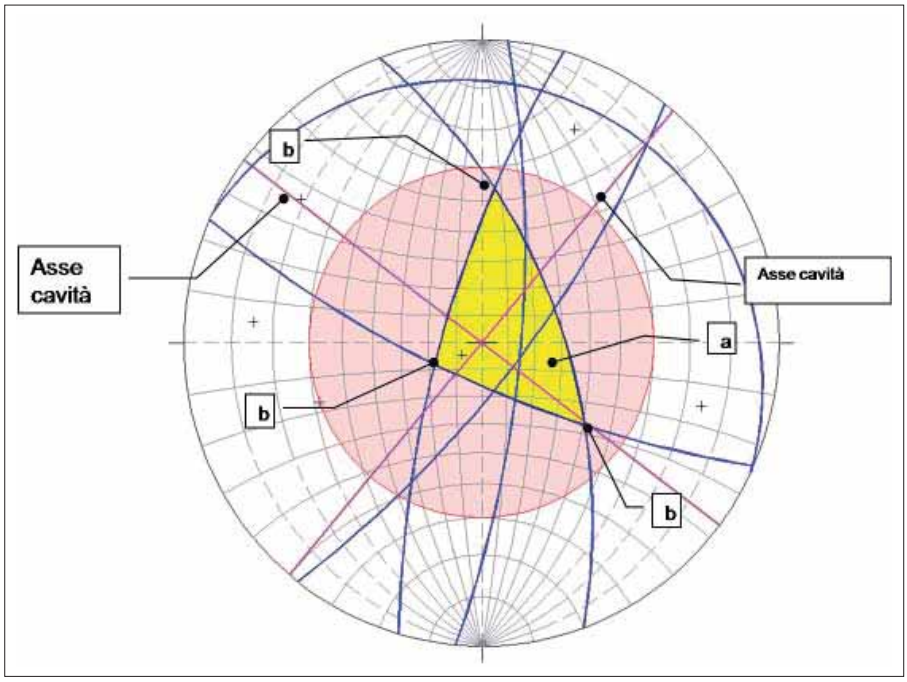


Figura 11 – Stereogramma di Wulff per il test di Markland



Figura 12 – Volta grotta G1, cunei instabili

6.1.2 Applicazione della metodologia B.E.M.

Nell'analisi del fattore di resistenza "Strength Factor" le tonalità arancio-rossastre (S.F.< 1) indicano che le condizioni di stress superano la resistenza del materiale; nel caso in esame i fenomeni di stress in calotta coinvolgono spessori medi di roccia fratturata variabili da »1,20 m (G1) a » 2,00 (G2).

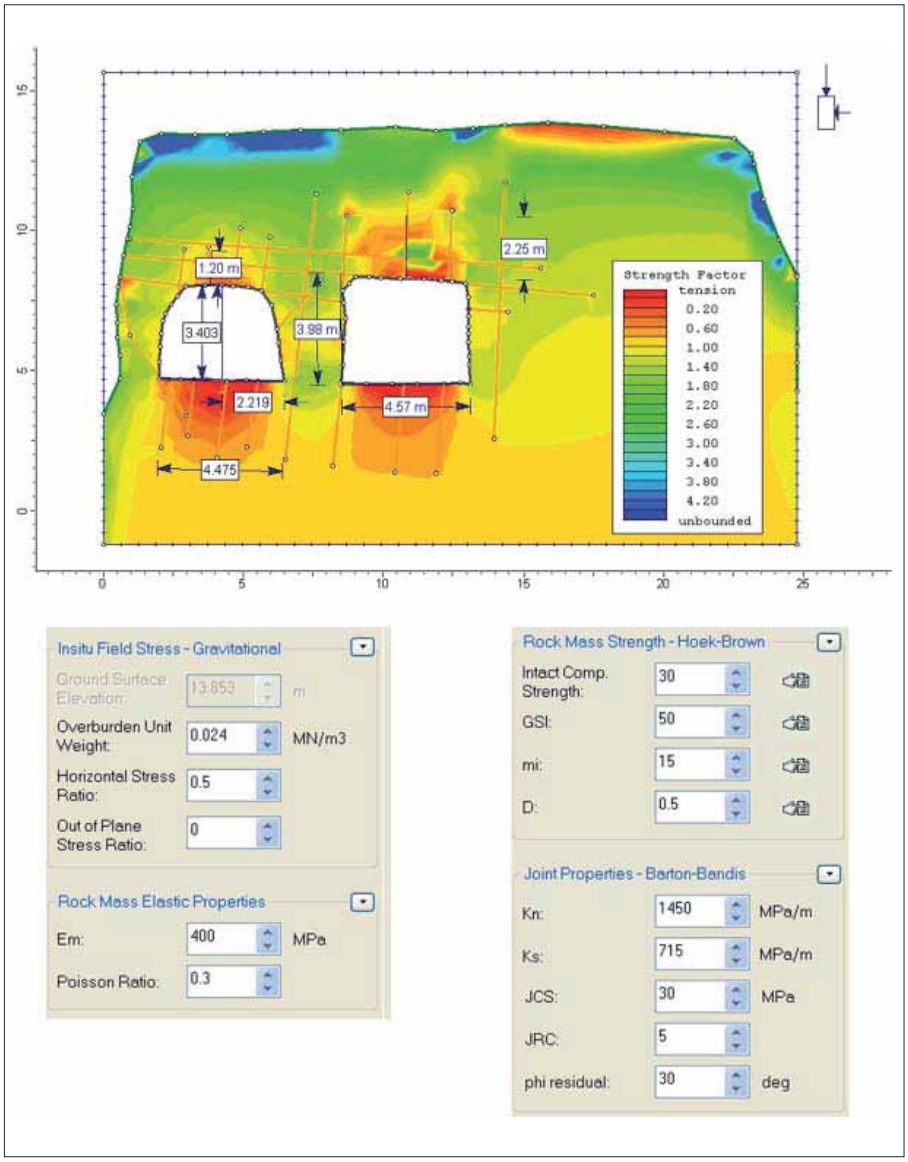


Figura 13 – Strength Factor per la sezione D-D

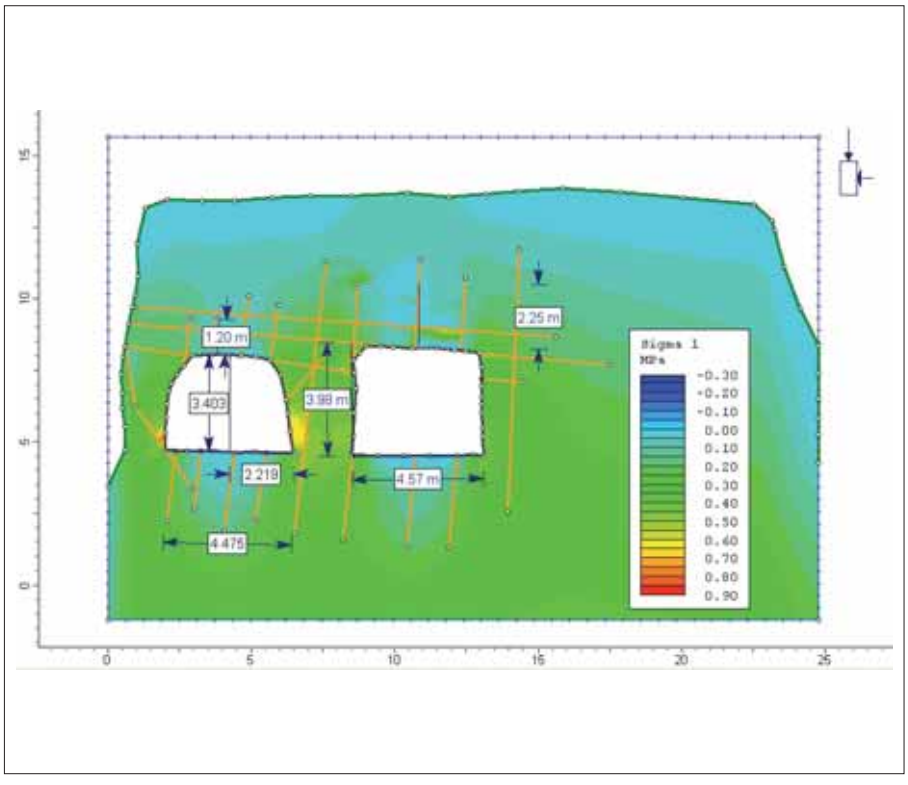


Figura 14 – s1 per la sezione D-D

Per quanto riguarda le condizioni di carico nell'intorno della cavità, si evidenziano valori medi di Q ≈ 0,60 MPa, con punte massime di Q ≈ 0,80 Mpa, alla base delle pareti della grotta (G1). Le pressioni massime sono comunque inferiori al carico di rottura della roccia integra pari a Q ≈ 30 MPa, misurato in sito. Le tonalità variabili dall'azzurro al rosso indicano valori di pressione crescente. I valori ottenuti, risultano confermati dalle verifiche effettuate sulle altre sezioni A-A, B-B, C,C.

7. APPLICAZIONE DEL METODO DI "OBERT L. DUVALL W.I. MERRIL R.H."

Una ulteriore verifica delle condizioni di equilibrio dell'ammasso roccioso all'intorno delle cavità in esame è stata effettuata attraverso l'applicazione del metodo di "OBERT L. DUVALL W.I. MERRIL R.H." (Design of underground openings in competent rock, U.S. Bureau of Mines, Bull.587, 1960). In questo caso, il campo tensionale è definito da una tensione principale verticale Sv = gH e da una tensione principale orizzontale Sh = kSv, dove il fattore k dipende dal coefficiente di poisson μ della roccia, dal modulo di elasticità dell'ammasso roccioso E_m, dal modulo di elasticità della roccia integra E, dalla profondità H della cavità e dalla storia geologica e tettonica dell'area. In generale k può variare tra 0 e 1, tuttavia, in aree con terreni plastici, o con tensioni tettoniche residue k può essere maggiore di 1. Lo stato tensionale nell'intorno della cavità è schematizzabile con una serie di "fasce" concentriche alla cavità, ciascuna delle quali sostiene la pressione totale trasmessa dalla fascia esterna contigua, fino alla fascia più interna al bordo della cavità, dove la tensione maggiore è sempre quella tangenziale s_q. Al fine di determinare la tensione tangenziale s_q al contorno, la geometria della cavità è stata assimilata ad uno dei due casi di seguito riportati in figura 15, dove l'asse (a) e l'asse (b) sono proiettati su un sistema di coordinate polari.

Al bordo dello scavo, la tensione più elevata è generalmente quella tangenziale s_q, la tensione di taglio è una frazione di s_q, mentre la tensione radiale è nulla. L'equilibrio dello scavo è espresso dal rapporto tra s_q e la resistenza della roccia.

Nel caso in esame (Sez.D-D), il campo tensionale è riconducibile alla tipologia di sezioni con rapporto a/b =2. L'andamento generale delle tensioni tangenziali nei punti di contorno di una cavità tipo, con coordinate polari del campo tensionale Θ= 0 e Θ= 90, è schematizzabile secondo la tabella sotto riportata.

Per la grotta G1 risultano valori delle tensioni tangenziali $s_\theta 0° \approx$ 0,7 MPa e $s_\theta 90° \approx$ 0,08 MPa. I valori di $s_\theta 0°$ sono inferiori al carico di rottura della roccia in sito JCS ≈ 30 MPa.

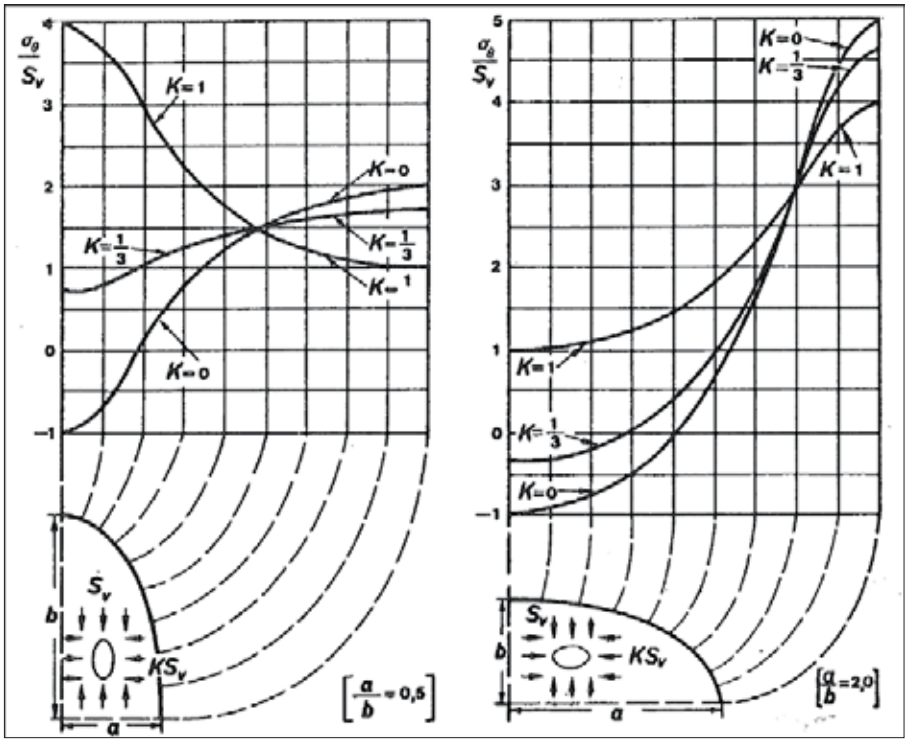


Figura 15 – Campi tensionali secondo OBERT L. DUVALL W.I. MERRIL R.H (Ippolito, ISEDI, 1985).

k	Θ	a/b = 0,25	a/b = 0,50	a/b = 2,00	a/b = 4,00
0	0° 90°	1,5 Sv -1 Sv	2 Sv -1 Sv	5 Sv -1 Sv	9 Sv -1 Sv
1/3	0° 90°	1,17 Sv 2 Sv	1,67 Sv 0,67 Sv	4,67 Sv -0,33 Sv	8,67 Sv -0,5 Sv
1	0° 90°	0,5 Sv 8 Sv	1 Sv 4 Sv	4 Sv 1 Sv	8 Sv 0,5 Sv

Figura 16 - Andamento delle tensioni tangenziali sq per i tre campi tensionali k= 0 - 1/3 - 1 (Ippolito, ISEDI, 1985).

Per la grotta G2 i valori di s_θ alla coordinata polare $\Theta = 0$, $s_\theta \approx 0{,}65$ MPa, risultano ancora inferiori al carico di rottura della roccia JCS ≈ 30 MPa rilevato in sito. In definitiva dal rapporto tra le tensioni tangenziali presenti al contorno della cavità e la resistenza a rottura della roccia in sito, non si evidenziano condizioni critiche di carico alla base delle pareti delle grotte G1 e G2.

8. APPLICAZIONE DEL METODO DI TERZAGHI

Secondo la classificazione di Terzaghi, le condizioni del substrato roccioso interessato dalle cavità G1 e G2, rientrano nell'ambito delle rocce massicce, moderatamente fratturate (Massive moderately jointed rocks). Considerato che gli strati non sono molto spessi e si presentano da moderatamente a molto fratturati si è generata una volta naturale di scarico che trasferisce su un anello periferico più interno il peso delle rocce sovrastanti, per cui il carico effettivamente gravante sulla calotta della cavità è rappresentato soltanto dal peso delle rocce decompresse e rilasciate. La roccia della volta è suddivisa in blocchi disgiunti con discontinuità vuote o riempite di materiale proveniente dall'alterazione esterna della roccia stessa. Sono presenti fratture e lesioni capillari, i singoli blocchi sono ancora intimamente e reciprocamente incastrati tra loro, qualunque sia l'orientamento dei piani di frattura, hanno una limitata possibilità di movimento. Secondo il criterio di Terzaghi, il valore più elevato del carico gravante sulla calotta può essere ammesso pari al peso di uno spessore di roccia H_{ult} = 0,25 B - 0,35 B+Ht. Le spinte laterali sui fianchi della cavità sono trascurabili, tuttavia possono verificarsi fenomeni di decompressione corticale in corrispondenza della volta, con distacco di elementi litoidi cuneiformi. Dato che la cavità si trova permanentemente al di sopra del livello di falda i valori delle altezze di carico possono essere ridotti del 50%. Al di sopra dello spessore H=1,5 B+Ht lo stato tensionale dei terreni rimane praticamente indisturbato, le forze d'attrito trasferiscono la maggior parte del peso del ricoprimento (di altezza H_0) sul materiale situato ai fianchi della cavità.

Dove:

D = altezza della "volta di terra" implicata nell'effetto d'arco";
B1 = larghezza della "volta di terra" (per j ≈36° B1= B+Ht);
W_A = peso del cuneo di terra a.b.c;
W_B = peso del prisma di terra b.c.d.e (se di altezza Hp) o b.c.d'.e' (se di altezza Hult) che come sovraccarico si aggiunge a W_A nel generare la spinta laterale su a-b;
W_C = peso del prisma di terra b-b e-e (se di al tezza Hp) o b-b e'-e' (se di altezza Hult) che determina il carico verticale gravante in calotta;
Hult = spessore di terreno gravante sulla volta al termine del processo di assestamento dei terreni. Il carico verticale gravante sulla calotta è dato dal peso del volume di roccia compreso nell'area a-c-d-e. La spinta laterale (P), per unità di lunghezza della cavità, è pari alla componente orizzontale del peso del cuneo di roccia a-b-c, tenuto conto della resistenza di attrito. Se l'inclinazione sull'orizzontale b degli strati è inferiore o pari all'angolo di attrito Phi, la spinta è nulla o trascurabile.

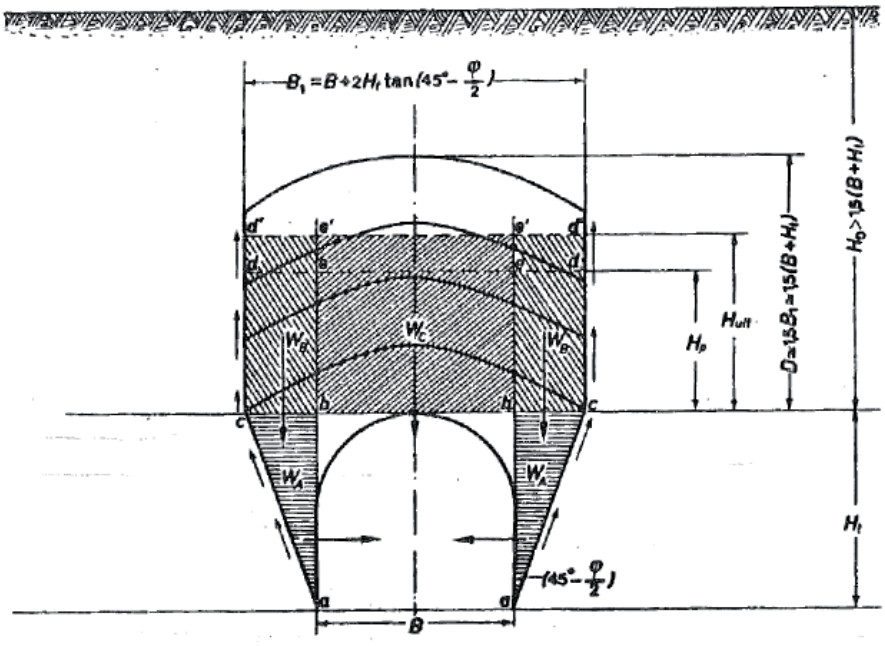


Figura 17 – Schema dei carichi agenti su una cavità poco profonda nel caso di rocce da moderatamente a molto fessurate (Ippolito, ISEDI, 1985)

VERIFICHE DI STABILITA' TUNNEL METODO DI TERZAGHI		GROTTA G1				
B	Base della cavità	4,5	m			
0.5 B		2,3	m			
H	Altezza della cavità	3,3	m			
φ	Angolo di attrito dell'ammasso roccioso	35	gradi			
	45-φ/2	27,5				
		0,5	rad			
B1	Larghezza della "volta di carico"	7,9	m	B1=B+2H*tan(45*φ/2)		
0.5 B1		4,0	m			
H_{ult}	Spessore della roccia gravante in calotta	**1,4**	m	S = 0,5*[0,35 (B+Ht)]		
γ	Peso di volume della roccia	22,0	kN/m^3			
Vc	Volume di roccia gravante in calotta	5,0	m^3			
F	Forza peso in calotta (striscia di larghezza unitaria)	**110,0**	kN	11	T	
Pc	Pressione gravante in calotta	0,03	MPa	$Pc = \gamma$ Hult		
λa	Coeff. Di spinta attiva	0,27		$\lambda a = \tan^2(45-\varphi/2)$		
Va	Volume di roccia gravante alla base (a)	8,0	m^3			
Pa	Pressione alla base del cuneo laterale	0,03	MPa	$Pa = \gamma \lambda a$ (H+Hult)		
Pb	Pressione complessiva alla base della parete	0,04	MPa	Pb = Pa+(0,5Pc)		
JCS	Carico di rottura monoassiale	31,0	MPa			

Figura 18 – Tabella di calcolo Metodo di Terzaghi Grotta G1

VERIFICHE DI STABILITA' TUNNEL METODO DI TERZAGHI		GROTTA G2				
B	Base della cavità	4,6	m			
0.5 B		2,3	m			
H	Altezza della cavità	3,8	m			
φ	Angolo di attrito dell'ammasso roccioso	35	gradi			
	45-φ/2	27,5				
		0,5	rad			
B1	Larghezza della "volta di carico"	8,6	m	B1=B+2H*tan(45*φ/2)		
0.5 B1		4,3	m			
H_{ult}	Spessore della roccia gravante in calotta	**1,5**	m	S = 0,5*[0,35 (B+Ht)]		
γ	Peso di volume della roccia	22,0	kN/m^3			
Vc	Volume di roccia gravante in calotta	8,0	m^3			
F	Forza peso in calotta (striscia di larghezza unitaria)	**176,0**	kN	18	T	
Pc	Pressione gravante in calotta	0,03	MPa	$Pc = \gamma$ Hult		
λa	Coeff. Di spinta attiva	0,27		$\lambda a = \tan^2(45-\varphi/2)$		
Va	Volume di roccia gravante alla base (a)	7,0	m^3			
Pa	Pressione alla base del cuneo laterale	0,031	MPa	$Pa = \gamma \lambda a$ (H+Hult)		
Pb	Pressione complessiva alla base della parete	0,05	MPa	Pb = Pa+(0,5Pc)		
JCS	Carico di rottura monoassiale	31,0	MPa			

Figura 19 – Tabella di calcolo Metodo di Terzaghi, Grotta G2

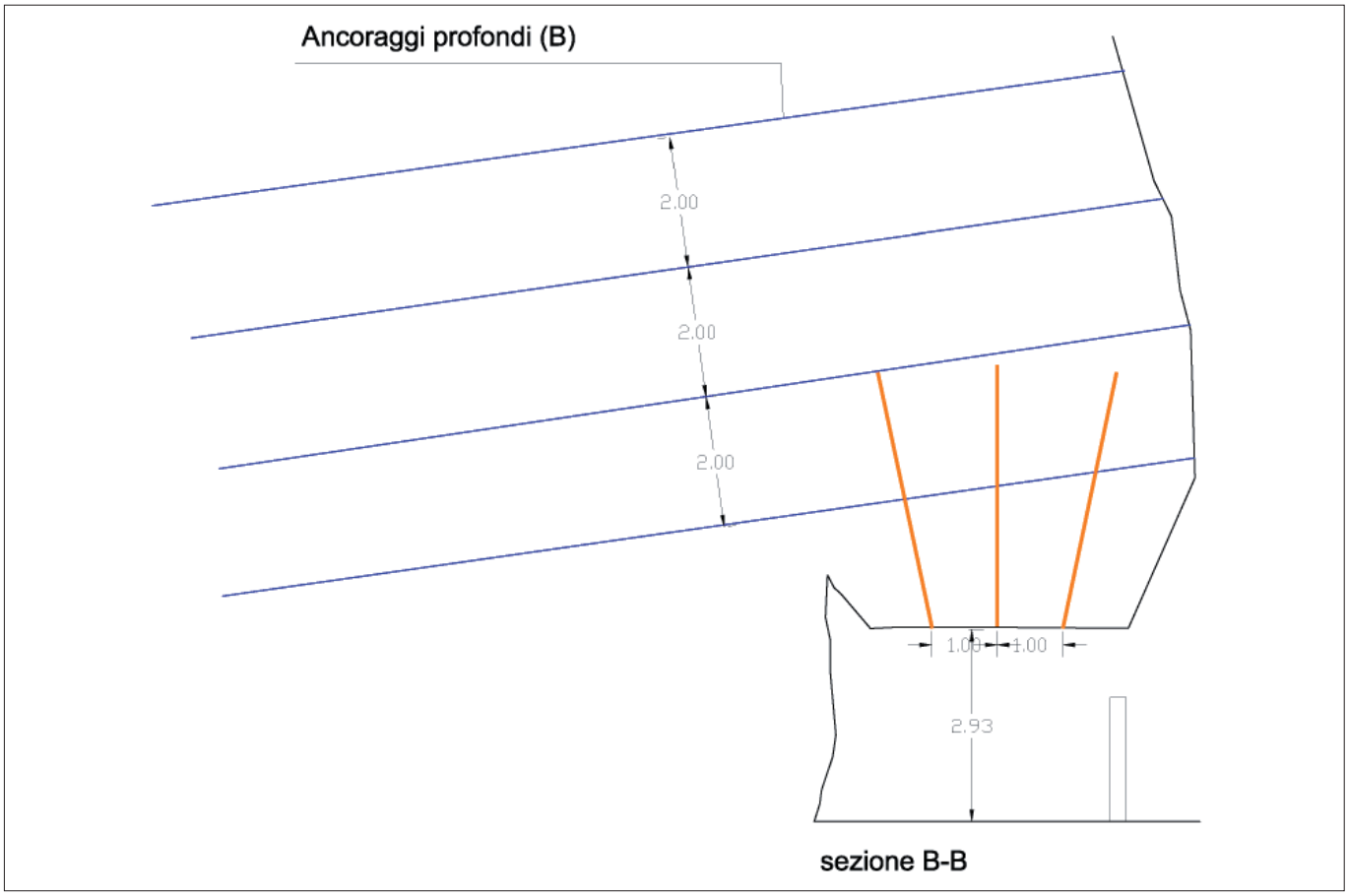


Figura 20 – Schema progettuale per il consolidamento delle grotte G1 e G2

Le pressioni agenti in calotta ed alla base delle cavità, risultano in linea di massima confrontabili con quelle ottenute con i metodi precedenti.

9. CRITERI GENERALI DI PROGETTO E VERIFICHE DI SICUREZZA

In definitiva le verifiche effettuate hanno evidenziato come i principali meccanismi di disturbo delle condizioni di stabilità dell'aggrottato possono essere attribuiti a fenomeni di tipo tensionale. Non si evidenziano infatti meccanismi significativi di alterazione chimico-fisica della roccia, riconducibili a risalita capillare o al particolare microclima interno. L'analisi delle condizioni generali di equilibrio ha evidenziato delle criticità localizzate prevalentemente in calotta, tuttavia, data la collocazione superficiale della cavità nell'ambito del versante roccioso e la conseguente asimmetria del campo tensionale, risultano evidenti anche fenomeni di decompressione localizzati sulle pareti esterne. In sede di progettazione esecutiva, per la messa in sicurezza delle due cavità in esame, sono stati previsti interventi preliminari di disgaggio "leggero" di modesti elementi rocciosi in incipienti condizioni di distacco e/o crollo, con successivo rafforzamento corticale di tipo attivo in calotta e sul fronte esterno, da effettuare attraverso la realizzazione di ancoraggi, con apposite barre in acciaio ad alta resistenza e ad aderenza migliorata, cementate nell'ammasso roccioso stabile, fornite di un sistema di placcaggio, con dadi e piastre metalliche di ripartizione, il tutto in conformità con le NTC 2008. Considerato il carattere divulgativo della presente relazione, si omettono i tabulati di calcolo relativi alle verifiche agli stati limite SLV Geo e Str dei sistemi di ancoraggio ed i dettagli grafici di progetto, per i quali si rimanda al progetto esecutivo, già approvato dal genio civile di Ragusa.

BIBLIOGRAFIA

Ameneh F. Dardashti, Rasoul Ajalloeian, Open Journal of Geology, 2012, 2, 148-157 doi:10.4236/ojg.2012.23015 Published Online July 2012 (http://www.SciRP.org/journal/ojg) "Numerical Analyses of Seepage from Behesht Abad Dam Foundation" Geology Department, The University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Barla G. (1976), *Meccanica delle rocce*. CLUT, Torino.

Barla G. & Sca Via C. (1987), *Analisi di stabilità di pendii in roccia in presenza di sisma ed in condizioni tridimensionali*. Riv. It. Geotec., 2l(1),5-24.

Bieniawski, Z.T. (1998), *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley: New York.

Clerici A., Grifflni L. & Pozzi R. (1988), *Procedura per l'esecuzione di rilievi strutturali geomeccanici di dettaglio su ammassi rocciosi a comportamento rigido*. Geologia Tecnica. 3/88, 21-31.

Crouch, S.L. and Starfield, A.M. (1983), *Boundary element methods in solid mechanics*. George Allen & Unwin, London

Ercoli L. (1981), *Metodo normalizzato per la descrizione delle discontinuità negli ammassi rocciosi*. Riv. It. Geotec .. 15(3).209-214.

Hoek, E. & Brown, E.T. (2002), Hoek and Brown failure criterion 2002 edition (online). Available: http://www.rocscience.com.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002), Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267-271.

Ippolito F., Nicotera P., Lucini P., Civita M., De Riso R. (1985), *Geologia tecnica*. ISEDI Petrini editore, Torino.

ISRM - International Society of Rock Mechanìcs - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1981), *Rock Characterization Testing and Monitoring. Suggested Methods*. Brown E.T. (Editor). Pergamon Press.

ISRM - International Society of Rock Mechanics - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1978), *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, 15. n.6. 319-368.

Markland J.T. (1972), *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected*. Imperial College Rock Mechanics Research Report, 19.

Priest S.D. (1985), *Hemispherical projection methods in Rock Mechanics*. Imperial College of Science and Technology, London SW7. George Allen & Unwin

Sheory, P.R. (1994), *A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock*. (In: Examine2D - In situ and induced stresses).

Terzaghi K., (1946), *Introduction to tunnel geology*, in: Proctor R.V. White T.L., *Rock Tunnelling with steel supports*, Commercial shearing and stamping co Youngston.

Via Bulgarini 125, 00019 Tivoli (Roma)
+39 340 5236660
info@fralerighe.it
www.fralerighe.it

FRALERIGHE BOOK FARM

EDITORIA | WEB | MULTIMEDIA

Fralerighe Book Farm è un service editoriale che mette competenza e professionalità al servizio di chi pubblica e scrive. Per gli editori e per gli autori, **Fralerighe Book Farm** è specializzato nella cura redazionale dei testi, con l'obiettivo di mettere la tecnologia a disposizione del libro, seguendo tutta la filiera di lavorazione testuale e grafica della stampa e del digitale sfruttando al meglio le potenzialità di ciascun supporto, dall'editing all'impaginazione, senza tralasciare la correzione di bozze e la traduzione.

La **redazione** e l'**ufficio grafico** offrono i seguenti servizi sia per volumi sia per riviste:

- Progettazione e impaginazione di libri, riviste, cataloghi di qualsiasi formato e tipologia. Servizi per le case editrici, definizione linea editoriale, estensioni multimediali di libri cartacei, ideazione e impostazione grafica, redazione dei contenuti
- Realizzazione ebook professionali pronti per essere pubblicati, acquistati e letti
- Web design, sviluppo siti internet, portali, blog, e-commerce
- Creazione di logo/branding, corporate identity, restyling di loghi e siti internet, creazione di layout landing page
- Soluzioni web, consulenza tecnica, gestione dominio
- Creazione e gestione di newsletter
- Ideazione e realizzazione di campagne promozionali, email marketing, bannering, brochure, flyers, spot pubblicitari
- Comunicazione digitale e Social Media Strategy per la creazione, la crescita e la cura della community e del pubblico di riferimento dell'azienda
- Servizi SEO, posizionamento nei motori di ricerca

FRALERIGHE EDIZIONI

"LA MACCHINA TECNOLOGICAMENTE PIÙ EFFICIENTE CHE L'UOMO ABBIA MAI INVENTATO È IL LIBRO" [NORTHROP FRYE]

Fralerighe Edizioni è una casa editrice indipendente, interculturale e sociale che vuole essere laboratorio di incontri e di sperimentazione per contribuire alla costruzione di una società plurale equa e positiva. Nasce valorizzando le nuove forme di pubblicazione tra la carta e il digitale, dal libro tradizionale a quello formativo denominato mediabook. La linea editoriale è caratterizzata da argomenti di rilevanza sociale attraverso le collane dedicate:

- Fralerighe eBook
- GiraMondo
- LabCult
- Luoghi Tradizioni Relazioni
- MeltingPot
- Poesia
- Narrativa
- Teatro
- Guide Geoarcheologiche d'Italia

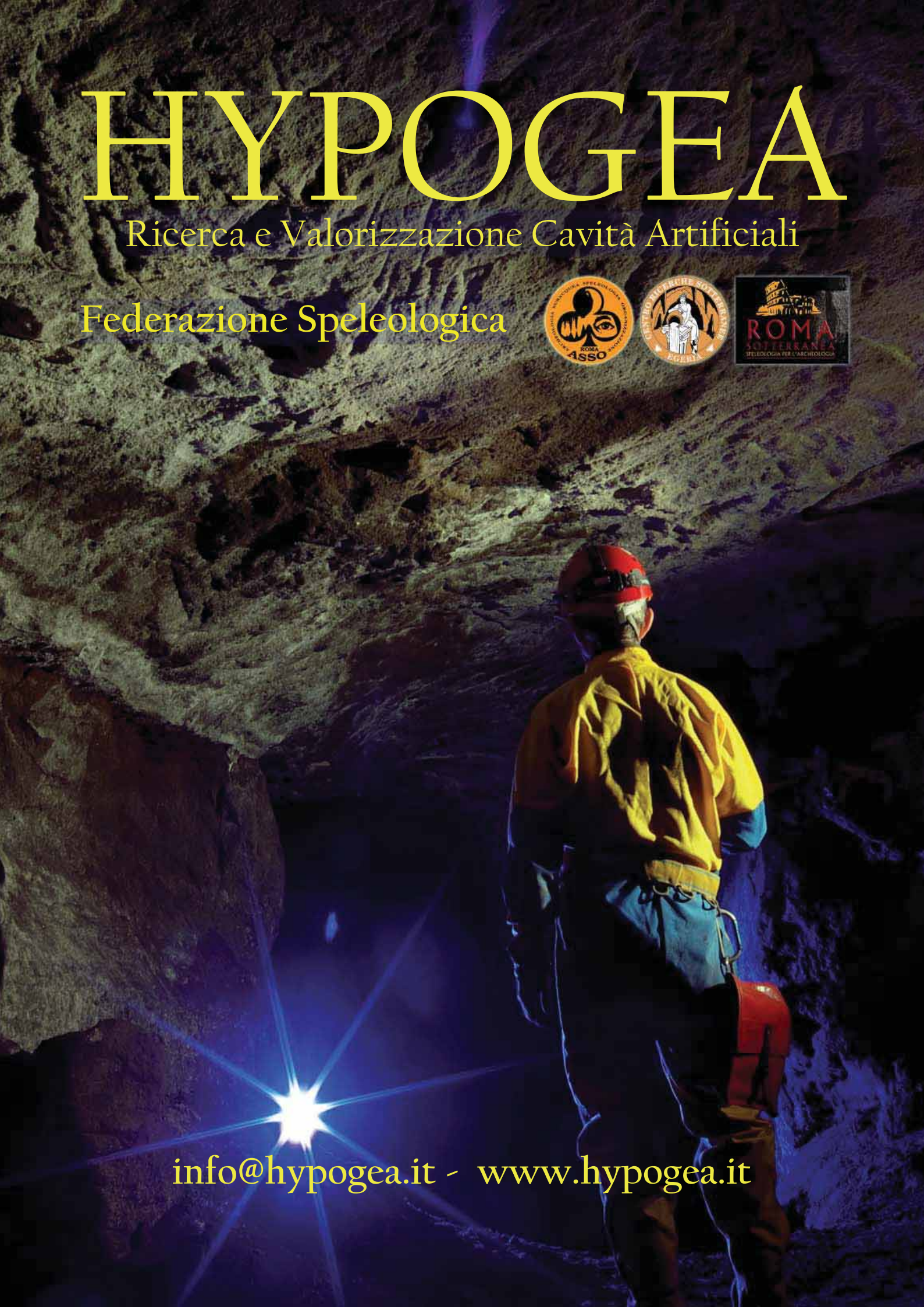
SESSIONE D

VALORIZZAZIONE E FRUIZIONE

HYPOGEA

Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali

Federazione Speleologica



info@hypogea.it - www.hypogea.it

Pollino UNESCO Geoparco Mondiale. Valorizzazione e tutela di una cavità antropica, identificata quale geosito

Luigi Bloise
Parco Nazionale del Pollino/ Geopark Manager
Ufficio Pollino UNESCO Geoparco Mondiale.
E-mail: luigi.bloise@parcopollino.gov.it

Egidio Calabrese
Parco Nazionale del Pollino/ Ufficio Pollino UNESCO Geoparco Mondiale.
E-mail: egidio.calabrese@parcopollino.gov.it

Pollino UNESCO Global Geopark. Valorisation and protection of an cave identified as geosite

Parole chiave (*key words*): Geodiversità (*Geodiversity*), Geoparchi (*Geoparks*), Geositi (*Geosites*)

RIASSUNTO

Dal Settembre 2015 tutto il territorio del Parco Nazionale del Pollino è entrato a far parte della rete Europea e Globale dei Geoparchi (EGN/GGN), riconosciuta quale Programma Internazionale delle Geoscienze e dei Geoparchi dell'UNESCO – Pollino UNESCO Geoparco Globale. Gli UNESCO Global Geoparks sono aree geografiche singole, delimitate da un unico confine continuo, dove i siti e i paesaggi di valore geologico internazionale sono gestiti secondo un approccio integrato per quanto concerne la tutela, l'educazione e lo sviluppo sostenibile. Un UGG (Unesco Global Geopark) valorizza il patrimonio geologico locale, in stretta connessione con il patrimonio naturale e culturale presente nella medesima area. Tra i 69 geositi individuati nel Pollino UNESCO Geoparco Globale vi è la Grotta del Romito, che rappresenta uno dei più importanti giacimenti preistorici dell'Italia meridionale. L'importanza del sito, nell'ambito delle documentazioni preistoriche, è legata all'imponenza della stratigrafia, alla ricchezza delle evidenze archeologiche e alle potenzialità d'informazioni per la ricostruzione dell'ambiente e delle attività delle comunità che abitarono il sito alla fine del Paleolitico, nel Mesolitico, e, occasionalmente, durante il Neolitico. I siti di un UNESCO Geoparco Globale devono esse collegati in rete e beneficiare di misure di protezione e gestione. Per quanto concerne specificatamente la Grotta del Romito, la protezione è attuata mediante un accesso controllato e pagamento di biglietto d'ingresso. Inoltre l'azione congiunta del Comune di Papasidero e del Pollino Geoparco Globale UNESCO, e l'attività scientifica condotta sulla stessa, dal Museo e Istituto fiorentino di Preistoria di Firenze, mira a valorizzare sempre più l'interessante sito ed il territorio limitrofo.

ABSTRACT

In year 2015, the Pollino National Park, has joined in the net Unesco Global Geopark (UGC). Among the main tasks of the Geopark is the enhancement of the local geological heritage, in close connection with the natural and cultural heritage present in the same area. Among the 69 geosites identified in the UNESCO Pollino Global Geopark there is the Grotta del Romito, which is one of the most important prehistoric deposits in southern Italy. The importance of the site, in the context of prehistoric documentation, is linked to the imposing stratigraphy, the wealth of archaeological evidence and the potential for information for the reconstruction of the environment and the activities of the communities that inhabited the site at the end of the Paleolithic, in the Mesolithic, and occasionally during the Neolithic.

1. PREMESSA

Il Parco Nazionale del Pollino, situato al confine tra Basilicata e Calabria (*Fig.* 1), comprende 56 comuni ed è costituito da diversi massicci montuosi che si innalzano fino alle quote più elevate dell'Appennino meridionale, con cime al di sopra dei 2000 m, di cui la più alta è Serra Dolcedorme con 2267 metri s.l.m.

Dal Settembre 2015 tutto il territorio del Parco Nazionale del Pollino è entrato a far parte della rete Europea e Globale dei Geoparchi (EGN/GGN), riconosciuta quale Programma Internazionale delle Geoscienze e dei Geoparchi dell'UNESCO – Pollino UNESCO Geoparco Globale.

La rete EGN/GGN, come sancito a seguito dell'assemblea Generale dell'UNESCO, tenutasi il 9-10 Novembre 2015, è divenuta Progetto Prioritario dell'UNESCO, per cui il territorio del Parco Nazionale del Pollino ha acquisito la denominazione di UNESCO Global Geopark e può fregiarsi dell'importante simbolo del "tempietto".

Gli UNESCO Global Geoparks sono aree geografiche singole, delimitate da un unico confine continuo, dove i siti e i paesaggi di valore geologico internazionale sono gestiti secondo un approccio integrato per quanto concerne la tutela, l'educazione e lo sviluppo sostenibile.



Figura 1 – Localizzazione geografica

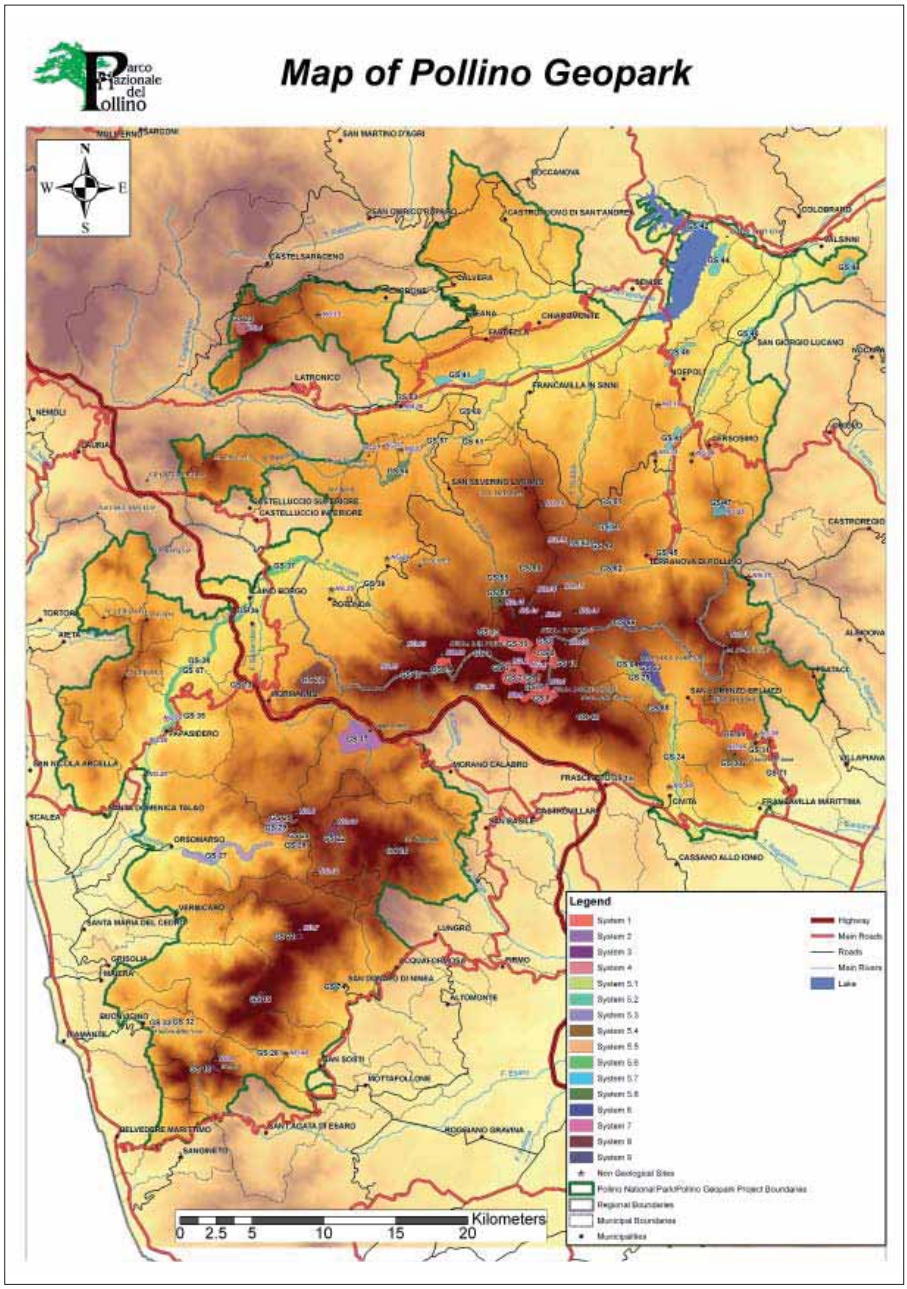


Figura 2 – Mappa Geositi

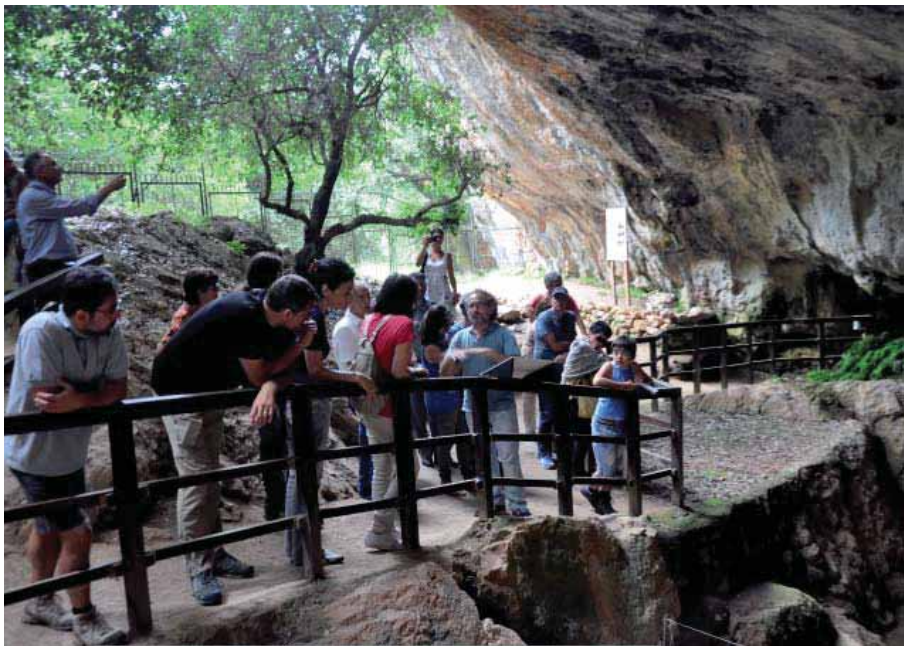


Figura 3 – Ingresso Grotta del Romito

Un UGG (Unesco Global Geopark) valorizza il patrimonio geologico locale, in stretta connessione con il patrimonio naturale e culturale presente nella medesima area, per accrescere la consapevolezza e la comprensione di alcuni dei fattori chiave che la società sta affrontando oggigiorno a livello globale, quali l'uso sostenibile delle risorse del nostro pianeta, la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici e la riduzione dell'impatto dei disastri naturali.

2. PARCO NAZIONALE DEL POLLINO/ GEOPARCO MONDIALE UNESCO

Il territorio del Pollino, Geoparco Mondiale UNESCO, salvaguarda uno degli ambienti più straordinari del patrimonio naturale italiano, caratterizzato da una grande diversità paesaggistica e dalla presenza d'interessanti realtà storico-culturali.

Caratteristica principale dell'ambiente Pollino è la sua straordinaria geodiversità. L'evoluzione geologico-geomorfologica del territorio ha rappresentato il primo e fondamentale punto di partenza su cui poi, si è impostata e sviluppata l'enorme ed eccezionale biodiversità. La grande varietà geologica e geomorfologica presente nel Geoparco, distribuita su un territorio di grande estensione, ha fatto ritenere utile suddividere i 69 geositi (singole peculiarità geologiche) individuati, raggruppandoli per forme geologico-geomorfologiche simili e aree geografiche omogenee (sistemi). Tale metodo ha permesso di correlare meglio i geositi, con le peculiarità non geologiche presenti su un territorio, molto vario e diversificato.

In definitiva in ognuno dei 9 sistemi territoriali (*Fig* 2) individuati, sono anche indicate le peculiarità non geologiche correlate ai geositi localizzati nel sistema stesso, nonché i vari livelli di protezione, relativamente alle normative vigenti sul territorio (Bloise *et al.*, 2015).

3. LA GROTTA DEL ROMITO

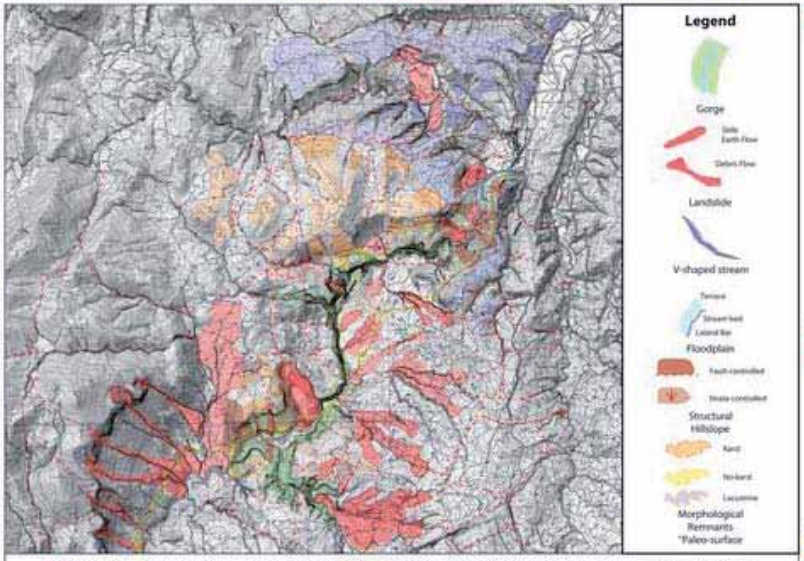
Tra i 69 geositi individuati vi è la Grotta del Romito (*Fig.* 3), che si apre in un'ampia incisione valliva lungo le pendici sud-occidentali del sistema montuoso del Pollino, nel territorio del comune di Papasidero (CS). Essa rappresenta uno dei più importanti giacimenti preistorici dell'Italia meridionale. L'importanza del sito, nell'ambito delle documentazioni preistoriche, è legata all'imponenza della stratigrafia, alla ricchezza delle evidenze archeologiche e alle potenzialità d'informazioni per la ricostruzione dell'ambiente e delle attività delle comunità che abitarono il sito alla fine del Paleolitico, nel Mesolitico, e, occasionalmente, durante il Neolitico.

Il potente deposito archeologico di circa 7 metri di spessore, contiene una sequenza stratigrafica relativa ad una lunga fase di abitazione del sito durante il Paleolitico

POLLINO GEOPARK PROJECT

Valle del Fiume Lao

The River Lao Valley



Elaborazione cartografica a cura di Dott. A Cestari, elaborazione geomorfologica a cura di prof. D. Guida

VALLE DEL FIUME LAO

Il Lao è un breve ma importante fiume a corso perenne del versante tirrenico della Calabria; nasce in Basilicata, da una delle cime più alte del massiccio del Pollino (Serra del Prete, 2181 metri), con il nome di Mercure ed entrando nel territorio calabrese, prende il nome Lao. Da questo punto, copioso di acque tutto l'anno, entra in una spettacolare gola (profonda circa 200 metri) scorrendo estremamente incassato per svariati chilometri. Il tratto che scorre incassato attraversa i comuni di Laino Borgo e Papasidero ed è compreso nel perimetro del Parco Nazionale del Pollino, della Riserva Naturale Valle del Lao e della ZPS Pollino e Orsomarso Le Gole del Lao rappresentano una forra caratterizzata da rocce carbonatiche cretaciche e di calcareniti miocenici trasgressive sui quali poggiano i depositi flyscioidi. Su tali formazioni sono sovrascorse l'Unità del Frido e le dolomie del Trias superiore dell'Unità di Verbicaro. Probabilmente coinvolti nel Pliocene è nel Quaternario da rilevanti eventi neotettonici che hanno indotto nelle masse carbonatiche una intensa fessurazione e fratturazione, al punto da obliterare nella formazione calcarea la originaria stratificazione e da individuare una struttura pseudoscistosa" in cui predominano fratture subverticali. La forra del Fiume Lao è costituita, quindi, in gran parte da calcari afferenti all'Unità del Pollino del Cretacico superiore a rudiste e da calcari trasgressivi del Miocene inferiore identificabili con la Formazione di Cerchiara. Seguono, in apparente continuità, i depositi flyscioidi del Miocene inferiore ed identificabili con la Formazione del Bifurto. Su quest'ultime poi sono sovrascorse l'Unità del Frido e le dolomie del Trias superiore a Megalodon.

THE RIVER LAO VALLEY

The Lao is a short but important perennial river in the course of the Tyrrhenian coast of Calabria; born in Basilicata, one of the highest peaks of the Pollino massif (Serra del Prete, 2181 meters), with the name of Mercure and entering the territory of Calabria, named Lao. From this point, abundant water throughout the year, enters a spectacular gorge (200 meters deep) flowing extremely recessed for several kilometers. The stretch that runs through the towns of grossed Laino Borgo and Papasidero and is included in the scope of the Pollino National Park, Nature Reserve Valley Lao and the ZPS Pollino and Orsomarso. The gorges of the Lao are characterized by carbonate rocks of the retaceous and Miocene limestones which underlie the transgressive flyscioidi deposits. Towering over these formations are the Frido Unit and the Upper Triassic Unit Verbicaro of the dolomites. Probably involved in the Pliocene is in the Quaternary by significant events neotettonici which led the masses carbonate intense cracking and fracturing, to the point of obliteration in the limestone formation the original stratification and identify a structure pseudoscistosa "with predominant subvertical fractures. The gorge of the River Lao consists, therefore, largely limestones pertaining to the Unity Pollino Upper Cretaceous rudist and transgressive limestones of the Miocene identifiable with the formation Cerchiara. Follow, in apparent continuity, deposits flyscioidi the Miocene and identifiable with the formation of Bifurto. Over the images then are overthrust Unity Frido and dolomites of the Upper Triassic to Megalodon.

Geosito CENTRO STORICO ABBANDONATO DI LAINO CASTELLO

Centro storico suggestivo abbandonato che sorge su un altura rocciosa originata dai processi erosivi del F. lao e culminante nel castello feudale. Il centro storico di Laino Castello ricade nel settore SW del bacino del Mercure, dove affiorano diffusamente conglomerati fluvio-lacustri del medio-alto Pleistocene. Tali depositi sono rappresentati da sedimenti clastici grossolani in maggior misura e, subordinatamente da sedimenti più fini, derivanti dalla disgregazione ed alterazione fisica dei sottostanti termini calcareo-dolomitici. Si tratta di livelli di ghiaie più o meno grossolane, a luoghi cementate, quasi sempre clasto-sostenuti, anche se talora è possibile osservare livelli caratterizzati da componenti clastiche più fini che fungono da matrice. La natura litologica di tali sedimenti è quasi esclusivamente calcarea, con litotipi riferibili in massima parte alle facies carbonatiche mesozoiche dei rilievi marginali del bacino.

Geosito ABANDONED HISTORICAL CENTER OF LAINO CASTELLO

The charming old town that is abandoned on a rocky height, originated from the erosion of F. Lau and culminated at the feudal castle. The historic center of Laino Castello falls in SW basin Mercure, where outcrops extensively conglomerates fluvial-lacustrine upper-middle Pleistocene. These deposits are represented by coarse clastic sediments to a greater extent and, subject to finer sediments, resulting from disintegration and physical alteration of the terms underlying limestone-dolomite. These levels of more or less coarse gravel, cemented to places, almost always clast-supported, though sometimes it is possible to observe levels characterized by finer clastic components that act as matrix. The lithological nature of these sediments is almost exclusively limestone rock types with related mostly to the Mesozoic carbonate facies of the reliefs marginal basin.

Geosito GROTTA DEL ROMITO

Geologicamente la Grotta del Romito è costituita da formazioni calcaree del Mesozoico. Si tratta di calcari ben stratificati che vanno dal grigio – chiaro al grigio - scuro, mostranti occasionali intercalazioni di argilliti foglietate rossastre. Sono presenti calciruditi e calcareniti, calcari ricristallizzati e calcari dolomitici. Contengono una microfauna scarsa, tra cui Orbitolina conoidea GRASS, alghe calcaree e frammenti di macrofossili. Queste rocce presentano un'elevata resistenza all'erosione, ad eccezione delle zone intensamente tettonizzate ed hanno un permeabilità elevata che tende ad aumentare sensibilmente nelle zone di maggiore fatturazione. I processi genetici che hanno dato origine alla grotta risultano essere, data la natura calcarea della roccia, di tipo carsico. Nella grotta sono stati ritrovati resti archeologici risalenti al Paleolitico superiore contenente una delle più antiche testimonianze dell'arte preistorica in Italia. Il ritrovamento di grosse quantità di ossidiana fa ipotizzare che la grotta fosse anticamente una base intermedia per il commercio dell'ossidiana tra Tirreno e ionio. La cavità è situata in località Nuppolara, nel Comune di Papasidero e testimonia la presenza dell'uomo nella Calabria settentrionale a partire da circa 20.000 anni fa. La grotta è formata da due sale che si estendono per circa 20 m e dal riparo che si estende per altri 34 m. Durante gli scavi condotti nel 1961, all'interno della Grotta, sono state ritrovate alcune incisioni rupestri: la più importante è rappresentata da un graffito di 1,2 m che raffigura un bovide (Bos Primigenius) datato 10.800 a.c.

Geosyte THE ROMITO CAVE

Geologically, the Cave of Romito is made up of Mesozoic limestone formations. It is made up of well-stratified limestones ranging from gray - light gray - dark, showing occasional signs of reddish shale layers. There are calciruditi and calcareniti, recrystallized limestone and dolomitic limestone. It contains a a few microfauna, calcareous algae and fragments of macrofossils. These rocks have a high resistance to erosion, with the exception of areas that have been intensively tectonised, and they have a high permeability which tends to increase significantly in the areas of increased fracturing. The limestone rock, or karst of the area, eroded and formed the cave. In the cave were found archaeological remains dating back to the Palaeolithic perod, containing one of the oldest examples of prehistoric art in Italy. The discovery of large quantities of obsidian suggests that the cave was once a base for the obsidian trade between the Tyrrhenian and Ionian. The cavity is located in the district of Nuppolare, in the municipality of Papasidero and testifies to the presence of humans in Northern Calabria from about 20,000 years ago. The cave consists of two rooms that stretch for about 20 m from the shelter that extends for 34 m. During the excavations carried out in 1961 within the cave, several rock carvings were found, the most important is a 1.2 m carving depicting an bovid (Bos primigenius) dated at 10.800 BC.

FLORA E FAUNA

Flora: presenza di arbusti come l'eufor, esemplari pensili di leccio e roverella.
Interessante gli esempi di leccette in località Arioso di Mormanno e la Lecceta presso Papasidero.

Fauna: rettili (natrice dal collare e cervone) e Lontra.

FLORA AND FAUNA

Flora: the presence of shrubs such as Eufor and hamging specimens of holm oak and oak.
Interesting examples of holm oak woods in the area named Arioso in the territory of the Municipality of Mormanno and holm oak woods in Papasidero.

Wildlife: reptiles and otter.

REGOLAMENTO D'USO DEL SITO

- E' vietato l'abbandono anche temporaneo di rifiuti;
- E' vietato produrre rumori di disturbo alla quiete naturale;
- E' vietata l'asportazione e la raccolta di campioni di roccia e/o di minerali e di ogni specie vegetale.

REGULATION USE OF THE SITE

- It is forbidden, even temporary, drump trash;
- It is forbidden to produce noise of natural nuisance;
- It is forbidden to removal and collection sample rocks and/or minerals and each plant species.

Parco Nazionale del Pollino

Figura 4 – Tabellonistica geositi e peculiarità non geologiche



Figura 5 – Attività turistiche presenti nell'area – Rafting F. Lao

superiore e il Mesolitico, da circa 24.000 a 9.000 anni orsono, ed è sormontata da livelli relativi ad una sporadica frequentazione nel Neolitico. Oltre ai manufatti in pietra e in osso relativi alle attività quotidiane e ai resti della fauna cacciata per procurarsi il cibo, gli scavi hanno messo in luce, sino ad oggi, sette sepolture (due con due inumati, per un totale di nove individui) e alcuni manufatti decorati che rientrano nella produzione artistica mobiliare tardopaleolitica, tra i quali emergono due punte di zagaglia in osso e oggetti simbolici associati al rito funerario.

Le numerose informazioni ricavate dagli studi naturalistici, consentono oggi di ricostruire anche la fisionomia dell'ambiente ai tempi dell'insediamento umano e di evidenziare, nel rapporto uomo/ambiente, una grande sapienza ambientale di quelle comunità paleolitiche, che erano bene integrate nel territorio e che ne utilizzavano tutte le risorse disponibili.

Il primo ingresso dell'uomo nella grotta risale a circa 24.000 anni fa, nell'ambito del Gravettiano, una cultura del Paleolitico superiore che interessa tutta l'Europa, con un carattere fortemente cosmopolita, diffusa sino al sud della nostra penisola. Prima di questo momento la grotta non era abitabile, poiché vi scorreva un corso d'acqua che ha depositato sulla roccia di base uno strato di sabbie. Negli ultimi millenni del Gravettiano, sino a 20.000 anni orsono e nei primi millenni della fase successiva, l'Epigravettiano, la presenza dell'uomo è stata saltuaria, in quanto la grotta risentiva del clima umido e di periodici episodi di scorrimento di acque, che rendevano difficoltoso o impossibile uno stanziamento umano.

Durante il Tardoglaciale, da circa 17.000-15.000, la frequentazione umana della grotta si intensificò. Il forte livello di antropizzazione dei sedimenti è indicativo di una presenza continua di gruppi di cacciatori, sino alla fine dell'Epigravettiano (10.000 anni da oggi) – grandi strutture di combustione, aree di macellazione, fitte dispersioni di manufatti, impianti funerari sono le tracce archeologiche di questo insediamento prolungato, che fanno della Grotta del Romito un archivio ricco e prezioso per la conoscenza del tardo Paleolitico italiano. La dettagliata scansione stratigrafica, soprattutto nell'arco di tempo tra 14 e 10.000 anni da oggi (Epigravettiano finale), costituiscono un patrimonio al momento unico per la ricostruzione dei modi di vita dei cacciatori-raccoglitori della fine del Paleolitico (Martini *et al*., 2016).

4. TUTELA E VALORIZZAZIONE

La maggior parte dei siti presenti nel territorio di un Geoparco deve appartenere al patrimonio geologico, ma il loro interesse può anche essere archeologico, naturalistico, storico o culturale.

I siti di un UNESCO Geoparco Globale devono esse collegati in rete e beneficiare di misure di protezione e gestione. I Geoparchi, con un approccio olistico delle risorse che sono presenti nel territorio, devono lavorare per la protezione e gestione del patrimonio geologico, per l'educazione ambientale rivolta allo sviluppo sostenibile.

La tutela dei geositi e di tutto il territorio del Parco Nazionale del Pollino, **è** fatta attraverso un sistema di protezione che vede sovrapporsi all'interno del territorio del Parco diverse forme di tutela che, nel corso degli anni, si sono sovrapposte:

- Un Parco Nazionale (Parco Nazionale del Pollino) istituito con D.P.R. 15/11/1993 coincidente con l'area del Geoparco;
- 2 ZPS (Zona di Protezione Speciale), che includono tutto il territorio del Geoparco, istituite ai sensi della Direttiva Comunitaria 79/409/CEE;
- 38 SIC (Sito di Importanza Comunitaria) istituite ai sensi della Direttiva Comunitaria 92/43/CEE;

Il Geoparco inoltre, poiché area Parco, è soggetto anche al D.Lgs. 42/04 "Codice dei beni culturali e del paesaggio", in quanto "Area tutelata per legge", ai sensi dell'art. 142 c.1 lett. f) del Decreto stesso;

Nello specifico, inoltre, la protezione della Grotta del Romito è attuata mediante un accesso controllato e pagamento di biglietto d'ingresso. L'azione congiunta del Comune di Papasidero e del Pollino Geoparco Globale UNESCO, e l'attività scientifica condotta sulla stessa dal Museo e Istituto fiorentino di Preistoria di Firenze, mira a valorizzare sempre più l'interessante sito ed il territorio limitrofo.

Infatti, per l'area sono state realizzate diverse azioni per la valorizzazione del sito/geosito, quali – la stampa di guide turistico-scientifiche in doppia lingua (Italiano/Inglese), la realizzazione di specifica tabellonistica, che descrive le peculiarità geologiche e ambientali del sistema di riferimento, l'ideazione di specifici percorsi turistici che contemplano la visita dei geositi presenti nella stessa area(*Fig*. 4). e delle attività turistiche ad essi connessi (*Fig*. 5)

BIBLIOGRAFIA

Bloise L.,Calabrese E. (2015), *Parco Nazionale del Pollino – geositi, patrimonio naturale e culturale.*

Bloise L.,Calabrese E. (2016), *8° Workshop dei Geoparchi Globali Unesco in Italia Tutela, valorizzazione e gestione della geodiversità.*

Martini F., Lo Vetro D. (2016), *Vita quotidiana, riti e arte a Grotta del Romito – storia dei cacciatori-raccoglitori della fine del Paleolitico in Calabria.*

Tutelare e valorizzare il sottosuolo. La ricostruzione 3D della miniera di grotta della "Buca della Faina di Poggio all'Aione" (Regione Toscana)

Protection and enhancement of the underground - 3D model of the "Buca della Faina di Poggio all'Aione" cave-mine (Tuscany)

Debora Brocchini
Parchi Val di Cornia S.p.A, Piombino

Luca Deravignone
Gruppo Speleologico Maremmano CAI Grosseto

Emilio Poggetti
Gruppo Speleologico Maremmano CAI Grosseto

E-mail referente: brocchini@parchivaldicornia.it

Parole chiave (*key words*): Campiglia Marittima (*Campiglia Marittima*), minerali metalliferi (*metal ores*), Etruschi (*Etruscan*), Medioevo (*Middle Ages*), miniera di grotta (*cave mine*), tutela (*protection*), valorizzazione (*development*), fotogrammetria 3D (*3D photogrammetry*)

RIASSUNTO

Il territorio del Parco Archeominerario di San Silvestro (Campiglia Marittima - LI) rappresenta il nucleo storicamente più importante del distretto minerario del Campigliese. Nel Parco sono visibili molte tracce dell'attività mineraria sviluppatasi alla ricerca di minerali di rame, piombo ed argento. Le attività minerarie sono iniziate in forma organizzata a partire dall'epoca etrusca e sono continuate, anche se a fasi alterne, fino al 1979, quando l'ultima miniera ha chiuso definitivamente.

Nel Parco sono presenti anche miniere di grotta, cavità carsiche naturali proseguite ed ampliate dall'attività di ricerca ed estrazione dei minerali metalliferi effettuata in epoca preindustriale. Speleologi, archeologi e geologi sono stati coinvolti in una nuova fase di lavori mirata a favorire l'accessibilità di questi siti di grande importanza scientifica e storica. Grazie a questo lavoro di equipe sono stati per ora prodotti un rilevo 3D ed un video realizzati nella miniera di grotta antica di "Buca della Faina di Poggio all'Aione" con la tecnica della fotogrammetria. Si tratta di un primo step di un lavoro complesso, che sta proseguendo con il rilievo di miniere di grotta non ancora studiate. L'acquisizione di nuovi dati relativi al periodo preindustriale consentirà di approfondire la conoscenza della storia mineraria del territorio del Campigliese, con un sicuro ritorno di carattere sia scientifico che divulgativo.

ABSTRACT

The Archaeological Mines Park of San Silvestro is part of the Campiglia mining area and represents its most important historical core. The main characteristic of the Park is the richness of mining activity traces towards copper, lead and silver minerals. The mining activity started during the Etruscan period and continued until 1979, when the last mine was closed.

In the Campigliese area are present also "cave-mines', karst cavities enlarged and deepened by the action of ancient miners, who searched metalliferous minerals. The accessibility of ancient mining works is difficult and this represents a limit in the enhancement and protection of these sites. Speleologists, archaeologists and geologists have been involved in making a project to let everyone discover the most ancient underground mines. A 3D model and a video were realized with the photogrammetric technique. This is a first step of a complex work, which is continuing with the survey of cave mines that have not yet been studied. The acquisition of new data related to the pre-industrial period will allow to deepen the knowledge of the mining history of the Campigliese territory, with a sure return of both scientific and educational character.

INTRODUZIONE

Il Parco Archeominerario di San Silvestro è situato in Toscana, in provincia di Livorno, nel comune di Campiglia Marittima e fa parte del Sistema dei Parchi e Musei della Val di Cornia (*Fig.* 1), gestito dalla Parchi Val di Cornia SpA, società partecipata dei cinque comuni dell'area. Con un'estensione di 450 ettari, di cui circa 270 gestiti ed attrezzati per la visita, comprende al suo interno il nucleo storico più significativo del distretto minerario del Campigliese. L'idea del Parco è nata dalla ricerca avviata nel 1984 dal Dipartimento di Archeologia Medievale dell'Università di Siena, in collaborazione con l'amministrazione comunale di Campiglia Marittima e numerosi dipartimenti universitari europei. La ricerca si è concentrata inizialmente sullo scavo archeologico di Rocca San Silvestro, villaggio medievale abitato dall'inizio dell'anno Mille fino alla seconda metà del 1300 dai minatori a servizio dei conti della Gherardesca. La ricerca si è successivamente allargata all'intero territorio di competenza del castello, con l'obiettivo di valorizzare non un singolo monumento ma un intero paesaggio storico (Francovich, 1993). Il progetto è diventato quindi multidisciplinare, andando a richiedere competenze di carattere non solo archeologico, ma anche geologico, naturalistico ed architettonico. È stato svolto uno studio di dettaglio del territorio e sono stati individuati e descritti 250 siti di interesse per la ricostruzione della storia mineraria di quest'area (*Fig.* 2). Queste informazioni sono state fondamentali per la redazione del masterplan del Parco e per la progettazione dei suoi servizi. Uno studio molto importante è stato condotto sulle miniere di età preindustriale, grazie ad una equipe di lavoro formata da archeologi e da speleologi (Cascone, 1993, Casini, 1993). Sono stati definiti 4 grandi momenti di sfruttamento delle risorse minerarie del territorio – una prima fase estrattiva nel periodo etrusco, una seconda nel Medioevo, una terza nel XVI secolo e l'ultima nel XIX e XX secolo. La "Buca della Faina di Poggio all'Aione", oggetto di questo lavoro, è una delle miniere di grotta antiche rilevate e descritte nell'ambito di questi primi studi.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

La geologia dell'area del Campigliese è caratterizzata dalla presenza di un nucleo di formazioni carbonatico-silicatiche appartenenti al dominio toscano, da formazioni silicee appartenenti al dominio ligure, sovrascorse sui terreni della Serie Toscana e da rocce magmatiche plioceniche, sia intrusive che effusive (*Fig.* 3).

Le formazioni di facies toscana che affiorano più diffusamente sono i calcari (Calcare



Figura 1 – Posizione del Parco Archeominerario di San Silvestro

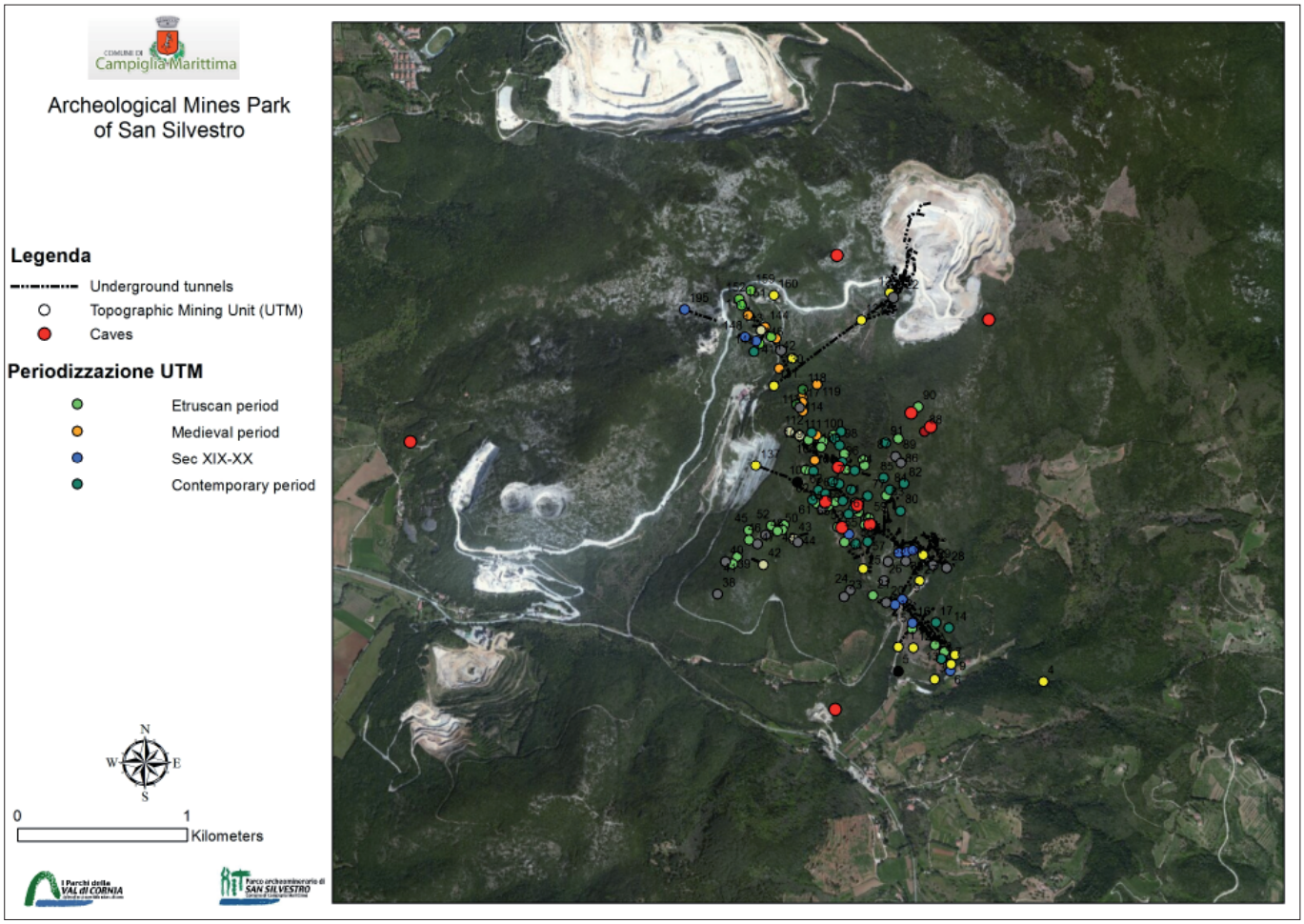


Figura 2 – Carta delle cavità naturali ed artificiali del Parco Archeominerario di San Silvestro

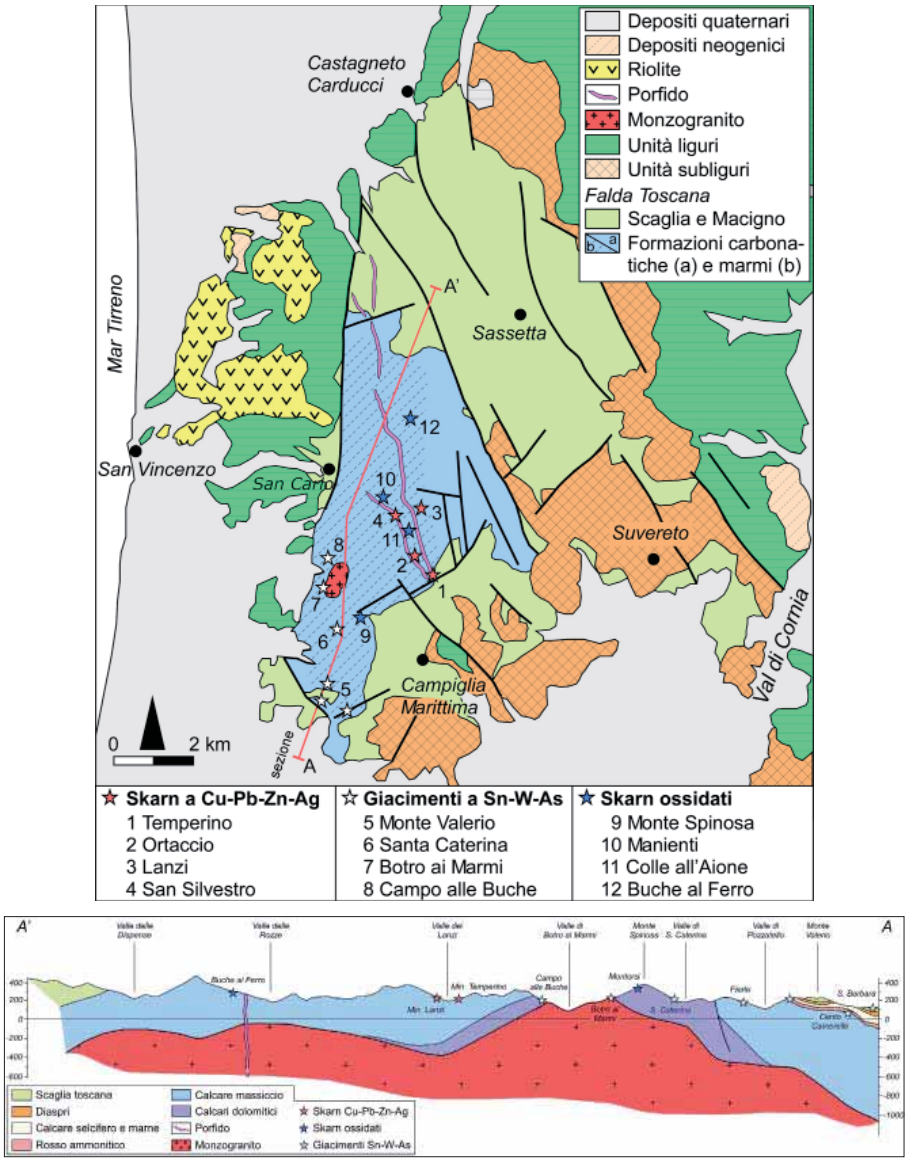


Figura 3 – Schema geologico dell'area del Campigliese e relativa sezione (da Dini et al., 2013, modificato)

Massiccio, Rosso Ammonitico, Calcare Selcifero) sui quali vanno in copertura le formazioni siliceo-marnose delle Marne a Posidonia, Diaspri, Scaglia Toscana e Macigno. I terreni di facies ligure sono rappresentati dalle argille scagliose, che affiorano al bordo del nucleo carbonatico. Le rocce magmatiche plioceniche sono costituite dal granito di Botro ai Marmi, dai dicchi porfirici a chimismo granitico e monzonitico femico di Campiglia Marittima (porfido giallo e porfido verde) e dalle Rioliti di San Vincenzo. Affioramenti di skarn sono presenti nelle valli del Temperino, dei Lanzi, dei Manienti ed in prossimità dell'affioramento del granito di Botro ai Marmi (Costantini *et al.*, 1993). La tettonica è caratterizzata dalla presenza di un *horst* asimmetrico culminante nell'area di Campiglia Marittima, bordato ad ovest da un gradino ribassato verso il Tirreno, delimitato da faglie trascorrenti destre ad alto angolo e con orientazione N-S. Il lato orientale dell'*horst* è delimitato da faglie trascorrenti destre con orientazione NW-SE parzialmente riattivate come faglie normali (Acocella *et al.*, 2000; Rossetti *et al.*, 2000).

L'area del Campigliese è inserita all'interno della Provincia Magmatica Toscana (PMT). La PMT comprende una serie di centri caratterizzati dalla presenza di rocce plutoniche, vulcaniche e subvulcaniche che si sono messe in posto durante i processi estensionali che hanno interessato l'Appennino Settentrionale; l'età di questi centri decresce procedendo da W verso E e varia dagli 8-7 Ma agli 0,2 Ma. La tettonica rigida distensiva mio-pliocenica ha giocato un ruolo determinante nella messa in posto dei filoni di porfido e delle lave di San Vincenzo. I filoni si allungano lungo le principali direttrici delle faglie dirette mio-plioceniche, cioè in direzione N-S e NW-SE e le lave di San Vincenzo affiorano solo nel settore ribassato dalla faglia ad andamento N-S che borda l'*horst* dal lato occidentale (Costantini *et al.*, 1993).

Il monzogranito di Botro ai Marmi affiora nella parte meridionale dell'*horst* di Campiglia Marittima, in corrispondenza di un cambio di orientazione delle faglie che bordano il lato occidentale. Si è messo in posto circa 5,7 milioni di anni fa (Borsi *et al.*, 1967) e si estende in profondità fino ad almeno 1000 m al di sotto dell'area di Monte Valerio, dove è stato intercettato da un sondaggio (Rodolico, 1945). Attorno al granito è presente un'areola termometamorfica, costituita da marmi formatisi a spese dei calcari triassici e giurassici della facies toscana.

Differenti interpretazioni sui rapporti temporali fra il granito, i porfidi granitico e monzonitico femico e lo skarn sono state ipotizzate da numerosi autori (Rodolico, 1931, Bertolani, 1958, Barberi *et al.*, 1967, Corsini & Tanelli, 1974, Tanelli *et al.* 1993). L'ipotesi pregressa più accettata è quella che prevede che la formazione dei complessi di skarn dell'area sia legata ad una circolazione di fluidi idrotermali arricchiti in elementi metallici attivatasi alla fine del processo di messa in posto dei magmi. Tali fluidi avrebbero causato estesi processi di alterazione idrotermale nelle rocce magmatiche e processi di dissoluzione nei marmi, con successiva precipitazione di solfuri, ossidi, silicati di Ca, Fe, Mg, Mn negli spazi prodotti dalla dissoluzione stessa.

Sulla base di nuovi studi di dettaglio, Dini *et al.* (2013) e Vezzoni *et al.* (2016) affermano invece che la circolazione di fluidi idrotermali legati al magma granitico sia responsabile della formazione degli skarn a Zn-Pb-Ag. La mineralizzazione a Zn-Pb-Cu-Ag degli skarn dell'area del Temperino viene interpretata da questi autori come successiva e geneticamente legata alla circolazione di fluidi correlati a magmi a chimismo più basico, risaliti lungo il sistema di faglie e cristallizzati sotto forma di filoni di porfido femico (porfido verde). Successivamente si sono messi in posto i filoni a chimismo più acido (porfidi gialli), che tagliano i precedenti. I prodotti effusivi a chimismo riolitico affioranti nell'area di San Vincenzo rappresentano la fase conclusiva dell'attività magmatica nel Campigliese (età ^{40}Ar-^{39}Ar su sanidino di 4.38±0.04 Ma; Feldstein *et al.*, 1994).

Lo skarn dell'area del Temperino è formato essenzialmente da hedenbergite e ilvaite, oltre che da quarzo, calcite, epidoto e johannsenite. I minerali metalliferi interessanti per lo sfruttamento economico sono la calcopirite, solfuro di rame e ferro, la galena argentifera, solfuro di piombo ed argento e la sfalerite, solfuro di zinco.

La circolazione di fluidi idrotermali legata ai vari processi magmatici ha amplificato il fenomeno del carsismo, che interessa particolarmente il calcare massiccio, affiorante diffusamente nell'area. Numerose grotte naturali sono per tale motivo caratterizzate dalla prossimità con i giacimenti mineralizzati a solfuri e possono essere definite "miniere di grotta", data la loro peculiare natura di cavità carsiche naturali, esplorate ed ampliate artificialmente in varie epoche per la ricerca di

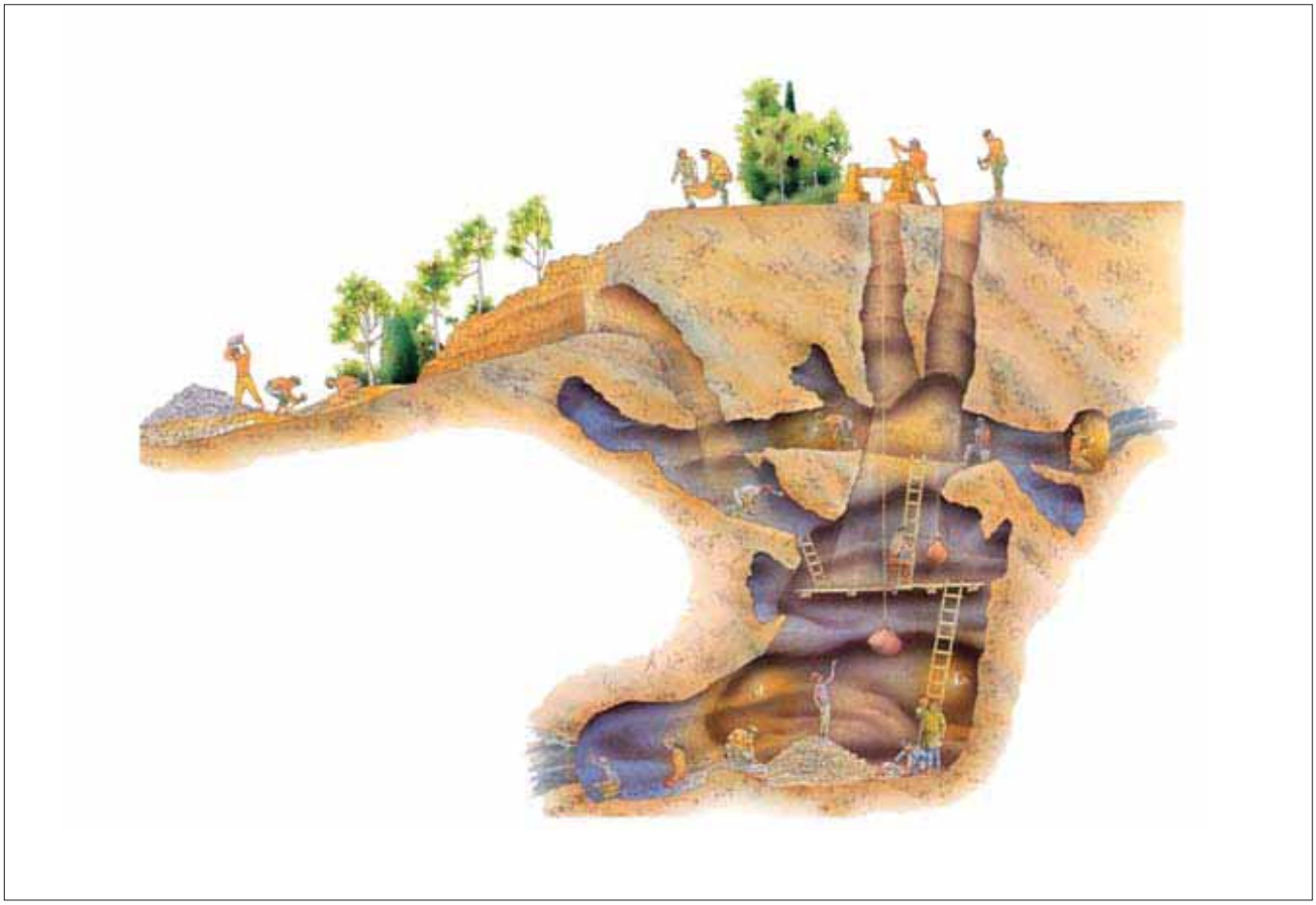


Figura 4 – Ipotesi ricostruttiva delle attività nella miniera medievale dei Manienti. Illustrazione Inklink, Firenze

minerali metalliferi (Cascone e Casini, 2001; Casini, 2001).

LO SFRUTTAMENTO MINERARIO DEL TERRITORIO

Lo sfruttamento dei giacimenti metalliferi nell'area in esame è stato attivo già a partire dall'Età del rame (fine del III millennio a.C.), come attestato dai ritrovamenti di scorie e forni fusori nell'entroterra di San Vincenzo (*Fig.* 3, area di San Carlo). Il contesto di questi ritrovamenti di grande interesse è stato purtroppo completamente cancellato dal progredire dei lavori della cava Solvay attiva nell'area. I risultati degli studi condotti anche recentemente sui reperti di San Carlo sono descritti in Fedeli e Galimberti (2016). La tipologia di forni ritrovati ed il chimismo delle scorie indica che per l'estrazione del rame fossero usati a quel tempo i minerali ossidati presenti nella parte più alta del giacimento, il cosiddetto "cappellaccio". Il "capellaccio" è stato indicatore delle aree nelle quali sviluppare le ricerche minerarie anche nel periodo etrusco e medioevale. I pozzi minerari antichi sono stati infatti scavati preferibilmente nella parte superficiale del giacimento, utilizzando la tecnica "a seguire il filone" e realizzando così scavi stretti ed irregolari, che sono stati ampliati nelle aree dove avveniva l'estrazione dei minerali metalliferi. Non era inusuale che i minatori antichi sfruttassero le cavità carsiche come accessi preferenziali al sotterraneo, proseguendo lo scavo delle stesse in maniera artificiale alla ricerca dei filoni metalliferi (*Fig.* 4). A metà del 1500 i minatori tirolesi inviati nell'area del Campigliese da Cosimo I dei Medici alla ricerca di argento, preferirono aprire cave a cielo aperto per la ricerca e lo sfruttamento della galena argentifera. A partire dal 1800 gli scavi minerari furono organizzati su più livelli collegati da pozzi e furono scavate gallerie minerarie per uno sviluppo lineare di circa 30 km. Grazie agli studi più recenti ed all'attività mineraria furono definite con chiarezza le caratteristiche del giacimento – un limitato sviluppo verticale, minerali di ganga silicatici ed una concentrazione di metalli piuttosto bassa, stimata come media nell'ultimo periodo di attività all'1,5% per il rame, al 2,5% per il piombo e al 3,5% per lo zinco. L'argento della galena era stimato come contenuto massimo intorno ai 2000 g/t. Queste caratteristiche del giacimento fanno comprendere il motivo del suo sfruttamento discontinuo anche in epoca moderna. L'ultima



Figura 5 – La Rocca di San Silvestro



Figura 6 – La parte ottocentesca della galleria del Temperino



Figura 7 – L'interno della galleria Lanzi-Temperino



Figura 8 – La sala dei compressori nel Museo delle Macchine, area di Pozzo Earle nel Parco Archeominerario di San Silvestro

fase di attività mineraria nel Campigliese si è conclusa nel 1979, con la definitiva chiusura della miniera del Temperino. Ulteriori sondaggi sono stati svolti all'inizio degli anni '80 con risultati deludenti e la concessione è stata chiusa nel 1991.

Gli scavi minerari preindustriali, sebbene talvolta tagliati dalle coltivazioni minerarie moderne, non sono stati completamente cancellati. Ad oggi nel territorio sono ancora visibili decine di tracce relative ad operazioni minerarie etrusche, medievali e moderne (Semplici, 2011), molte delle quali ricadono all'interno del Parco Archeominerario di San Silvestro (*Fig.* 2).

In venti anni di vita sono stati tanti gli interventi volti a tutelare e rendere sicuri e fruibili al

pubblico gli oltre 270 ettari del Parco, le sue emergenze monumentali ed i siti minerari sotterranei – il recupero del villaggio medievale di Rocca San Silvestro (*Fig.* 5), l'allestimento del museo archeologico e mineralogico e della galleria del Temperino (*Fig.* 6), il recupero degli edifici storici di Palazzo Gowett e Villa Lanzi e infine, nel 2006, il recupero della galleria "diretta Lanzi-Temperino" (*Fig.* 7) e delle strutture del Pozzo Earle, simbolo della fase più recente della miniera, destinate ad ospitare il museo delle macchine minerarie e della storia sociale dei minatori (Guideri, 2008) (*Fig.* 8). Le altre testimonianze materiali più difficilmente accessibili sono state comunque rilevate e descritte. Per quanto concerne la tutela di questi siti, solo due delle grotte di miniera antiche censite nel territorio del Campigliese sono state in passato sottoposte a vincolo archeologico. Nel 2004 il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio ha introdotto i siti minerari di interesse storico od etnoantropologico tra i beni culturali (D.lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 Parte seconda, art. 10, comma 4, lett. H) e previsto lo strumento della verifica di interesse culturale per richiederne la tutela. In considerazione dell'unicità dei siti minerari antichi e della loro vulnerabilità, il Comune di Campiglia Marittima ha redatto, in collaborazione con la Parchi Val di Cornia SpA, la documentazione per l'avvio del procedimento di verifica dell'interesse culturale per un gran numero di siti minerari ricadenti in terreni pubblici all'interno del Parco Archeominerario di San Silvestro. Il procedimento è attualmente in corso di valutazione da parte dei competenti organi del Ministero.

LA RICOSTRUZIONE 3D DELLA MINIERA DI GROTTA DI "BUCA DELLA FAINA DI POGGIO ALL'AIONE" COME STRUMENTO PER LA VALORIZZAZIONE DEL SOTTOSUOLO MINERARIO.

Nel Parco Archeominerario di San Silvestro è stata recentemente avviata una nuova fase di

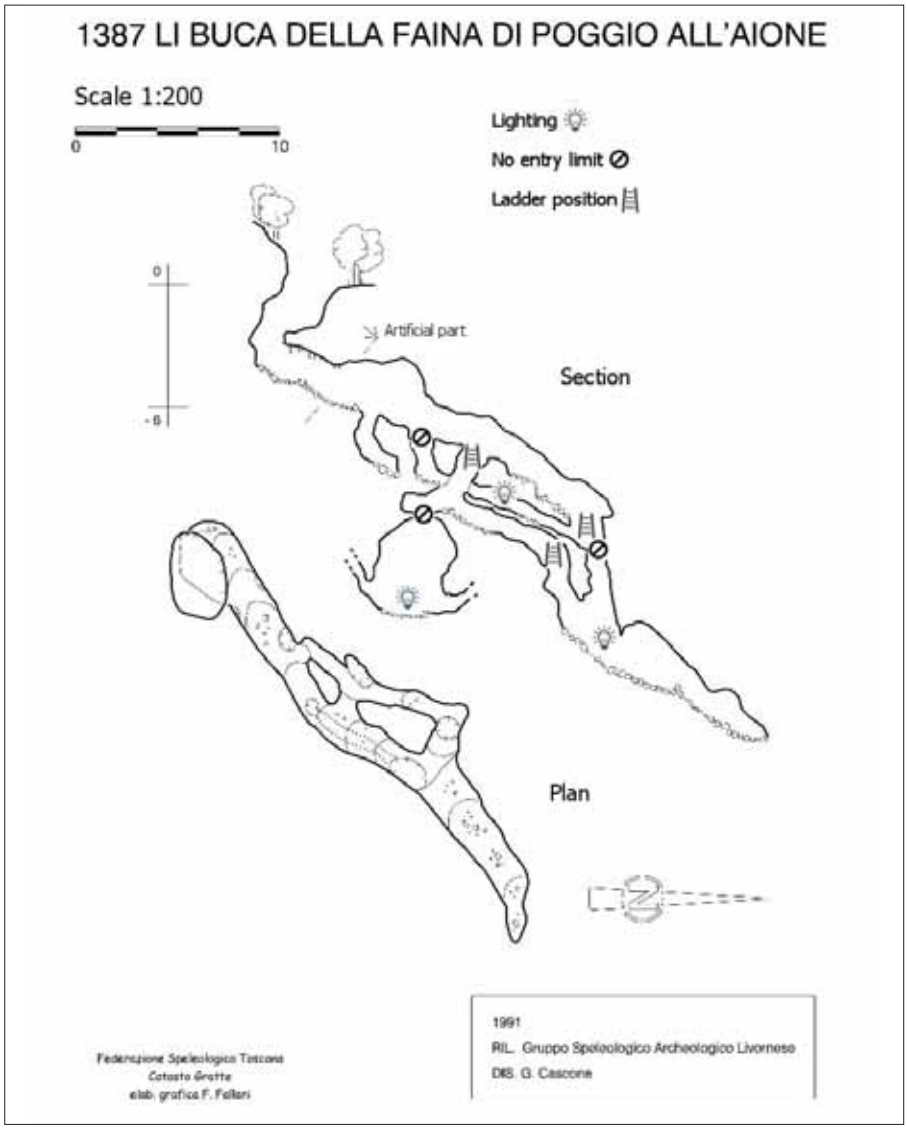


Figura 9 – Il rilievo della "Buca della Faina di Poggio all'Aione", eseguito dal Gruppo Archeologico Speleologico Livornese

attività volte a favorire la tutela e la valorizzazione delle tracce minerarie antiche più difficilmente accessibili. Nello specifico le attività previste riguardano la realizzazione di nuove campagne fotografiche, ricostruzioni tridimensionali e video dei contesti più interessanti dal punto di vista geologico, minerario ed archeologico. È inoltre in programma la messa in sicurezza, con strutture a basso impatto, delle miniere di grotta più facilmente accessibili, per consentire l'ingresso di piccoli gruppi di visitatori.

Una di queste è la "Buca della Faina di Poggio all'Aione", miniera di grotta antica (*Fig.* 9).

Lo scavo di questa miniera è collocato storicamente nel periodo etrusco, utilizzando come elemento datante il metodo di coltivazione mineraria. Lo scavo è' stato iniziato a cielo aperto e proseguito per circa 3 metri, per poi seguire la mineralizzazione in sotterraneo. L'imbocco del pozzo segue le masse limonitiche del cappellaccio, è di forma irregolare, vagamente quadrangolare, con dimensioni di circa 3 metri per 4 e profondità di circa 5 metri; la galleria che si sviluppa a partire dal pozzo prosegue in leggera pendenza in direzione N20° per circa 20 metri di lunghezza e 1,60 metri di altezza, per poi approfondirsi ulteriormente. Lungo la galleria si aprono i pozzi ed i vani di coltivazione che mettono in comunicazione il livello della galleria principale con altri due livelli inferiori. Su tutte le pareti sono visibili le tracce dei vari strumenti metallici usati per l'estrazione dei minerali – si tratta di punteruoli e picchi a punta conica grande e piccola e a punta piramidale grande e piccola, utilizzati dai minatori antichi con l'ausilio di mazzette.

La "Buca della Faina di Poggio all'Aione" rappresenta quindi di un contesto estremamente interessante per far comprendere lo sviluppo delle tecniche minerarie in epoca antica, sia per le limitate dimensioni dello scavo, sia perché l'accessibilità ai vuoti di coltivazione è possibile con accompagnamento di personale speleologico e dotazione di semplici dispositivi di protezione individuale. Queste caratteristiche sono state giudicate ideali anche per la realizzazione di una ricostruzione tridimensionale della Buca, rilevando l'intera cavità in maniera totalmente non invasiva, grazie al metodo della fotogrammetria. Questo metodo si basa infatti sull'acquisizione di foto da diversi punti di vista, che possano fornire le basi per la generazione di un modello di profondità tramite algoritmi di triangolazione. In questa miniera di grotta, come in altre dell'area, l'utilizzo di un classico laser scanner sarebbe stato estremamente difficoltoso, date le dimensioni di questo tipo di strumenti, in genere non adatti al trasporto in pozzi e gallerie stretti e tortuosi, che spesso presentano tratti verticali e diametri inferiori al metro.

È da considerare che gli attuali laser scanner portatili in commercio sono in grado di rilevare una cavità con un maggior grado di precisione. Un esperimento in tal senso è stato effettuato proprio alla "Buca della Faina di Poggio all'Aione" dal Politecnico di Torino (Brocchini *et al.*, 2017), rivelandosi

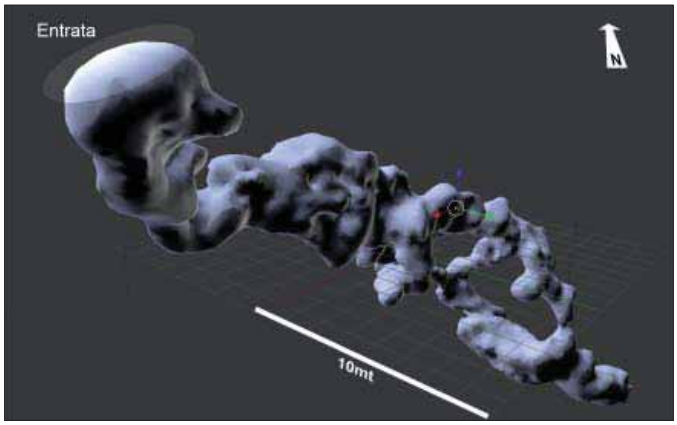


Figura 10 – Modello 3D della "Buca della Faina di Poggio all'Aione"

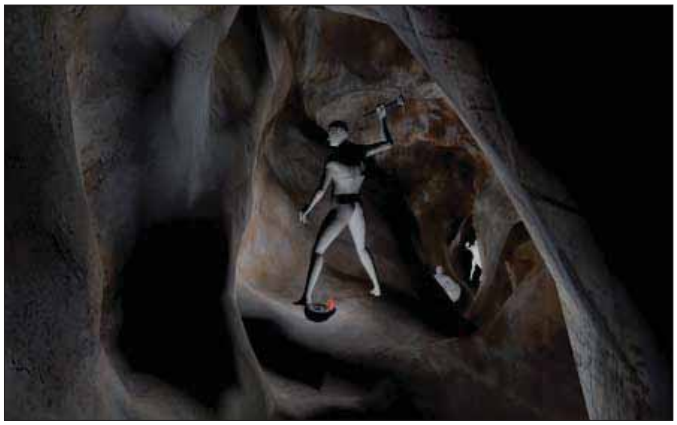


Figura 11 – Rendering *del video di "Buca della Faina di Poggio all'Aione"*

un approccio di indubbia utilità per il mondo della ricerca o all'interno di attività specializzate ad alto *budget*. Tuttavia, il costo per l'utilizzo di tali strumentazioni si può rivelare un ostacolo per realtà minerarie e/o museali di dimensioni medio/piccole che mirino alla valorizzazione del proprio patrimonio con prodotti multimediali basati sulla ricostruzione tridimensionale. Va tenuto inoltre in considerazione che il rilievo di miniere di grotta come quelle presenti nel Parco di San Silvestro necessita di reperire operatori con appropriate conoscenze speleologiche e quindi in grado di muoversi agevolmente in contesti ipogei.

La campagna di raccolta dei dati relativi alla "Buca della Faina di Poggio all'Aione" è iniziata con un paio di uscite, volte ad acquisire una conoscenza approfondita della miniera di grotta e delle eventuali problematiche da affrontare in fase di rilievo. Una volta individuata la migliore strategia di percorrenza della cavità, sono state realizzate due campagne fotografiche, durante ciascuna delle quali sono state raccolte circa 600 foto, poi processate con il software fotogrammetrico Agisoft PhotoScan ©.

I dati elaborati hanno consentito di sviluppare un primo modello 3D (*Fig.* 10) ed un video che mostra lo sviluppo interno della miniera di grotta. Nel modello così ottenuto sono state collocate riproduzioni di figure umane, ed è stato generato un nuovo video con l'intento di mostrare le corrette proporzioni della cavità e le possibili tecniche di estrazione e modalità d'uso minerario di epoca antica (*Fig.* 11). Il video è visibile all'indirizzo https://vimeo.com/203847047 e sul canale Youtube di Parchi Val di Cornia (www.parchivaldicornia.it).

Il modello 3D acquisito può essere ulteriormente elaborato in modo da perfezionare il video già prodotto e permettere una sorta di "visita virtuale" della miniera di grotta per attività di tipo didattico e divulgativo. Tutto il materiale multimediale, video e modello tridimensionale sono pensati anche per essere condivisi online consentendo ai visitatori, sia direttamente sul territorio, che in modalità remoto, di comprendere lo sviluppo dell'attività mineraria nelle varie epoche storiche ed apprezzare il valore culturale dei siti tutelati dal Parco ma non ancora visitabili.

CONCLUSIONI

La tutela e la valorizzazione di contesti sotterranei di interesse culturale, come la miniera di grotta della "Buca della Faina di Poggio all'Aione", dipendono anche dalla loro accessibilità, sia fisica che culturale. Questo lavoro vuole presentare i primi risultati di una nuova collaborazione che sta mettendo in campo varie professionalità. Lo scopo è quello di rendere accessibile il grande patrimonio minerario preindustriale presente nel sottosuolo del Parco Archeominerario di San Silvestro. La realizzazione di un rilievo 3D e di un video che consenta di effettuare una visita virtuale della miniera antica della "Buca della Faina di Poggio all'Aione" rappresenta solo un primo step di un lavoro più ampio che vuole andare ad aggiornare ed implementare i dati sulle miniere preindustriali presenti nel territorio, raccolti al momento della realizzazione del progetto del Parco.

Dare maggiore visibilità a questi tipi di contesti che presentano difficoltà di accesso talvolta insuperabili per i più, ha il doppio scopo di divulgare in maniera più completa la storia mineraria del territorio e di salvaguardare queste tracce dal degrado e dalla loro possibile scomparsa. Solo due delle grotte di miniera antiche censite nel territorio del Campigliese sono state infatti sottoposte a vincolo archeologico. Le altre numerose tracce legate ad una attività estrattiva che si è sviluppata nell'arco di due millenni sono state descritte e censite, ma sono invisibili per la maggior parte delle persone. In passato alcuni siti di grande interesse archeologico-minerario sono già stati cancellati dalle attività estrattive che insistono sul territorio. È stato quindi avviato da parte del Comune di Campiglia Marittima, in collaborazione con Parchi Val di Cornia SpA, un procedimento per la verifica dell' interesse culturale dei siti minerari antichi ricadenti all'interno del perimetro del Parco Archeominerario, procedimento ancora in corso. Riteniamo infine che anche una maggiore consapevolezza del grande pubblico sul valore culturale dei contesti minerari preindustriali presenti nel Campigliese possa indubbiamente aiutare nell'innescare un processo che ne favorisca la tutela.

BIBLIOGRAFIA

Acocella V., Rossetti F., Faccenna C., Funiciello R., Lazzarotto A. (2000), *Strike-slip faulting and pluton emplacement in Southern Tuscany – the Campiglia Marittima case.* Bollettino Società Geologica Italiana, 119(10) – 517-528.

Barberi F., Innocenti. F., Mazzuoli R. (1967), *Contributo alla conoscenza chimico-petrologica e magmatologica delle rocce intrusive, vulcaniche e filoniane del Campigliese (Toscana).* Mem. Soc. Geol. It., 6, 643-681.

Bertolani (1958), *Osservazioni sulle mineralizzazioni metallifere del Campigliese (Livorno).* Per. Mineral., 27, 311-344.

Borsi S., Ferrara G., Tongiorgi E. (1967), *Determinazione con il metodo K/Ar delle età delle rocce magmatiche della Toscana.* Bollettino Società Geologica Italiana, 86, 403-411.

Brocchini D., Chiabrando F., Colucci E., Sammartano G., Spanò A., Teppati Losè L., Villa A. (2017), *The Geomatics Contribution for the Valorisation Project in the Rocca of San Silvestro Landscape Site.* ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5/W1, 2017, pp. 495-502.

Cascone, G. (1993), *La zona speleologica del Massiccio del Monte Calvi. Primo contributo alla sua conoscenza.* Quad. Mus. Stor. Nat. di Livorno, 183-212.

Cascone G., Casini A. (2001), *Un contributo alla definizione della metodologia di studio e di rilevamento delle attività minerarie di età preindustriale – il caso di Campiglia Marittima (LI).* In – *Atti del VII Convegno della Federazione Speleologica Toscana,* Gavorrano, pp. 111-138.

Casini A. (1993), *Archeologia di un territorio minerario – i Monti di Campiglia.* Quad. Mus. Stor. Nat. di Livorno, 303-314.

Casini A. (2001), *La miniera del Temperino. Percorso didattico.* Ed. Parchi Val di Cornia Piombino.

Corsini F., Tanelli G. (1974), *Analisi alla microsonda elettronica delle blende del giacimento della valle del Temperino (Campiglia Marittima, Toscana).* Rendiconti della Società italiana di mineralogia e petrologia, Vol. 30, pp. 205-221.

Costantini A., Lazzarotto A., Maccanelli A., Mazzanti A., Sandrelli F., Tavarnelli E. (1993), *Geologia della provincia di Livorno a Sud del Fiume Cecina.* Quad. Mus. Stor. Nat. di Livorno, 1-164.

Dini A., Vezzoni S., Rocchi S. (2013), *Geologia e minerogenesi – evoluzione del pensiero scientifico nel Campigliese.* Rivista Mineralogica Italiana 1/2013, 21-27.

Fedeli F., Galimberti A. (a cura di) (2016), *Metalli e metallurghi della preistoria. L'insediamento Eneolitico di San Carlo – Cava Solvay*, Tagete Edizioni, Pontedera.

Feldstein S. N., Halliday A. N., Davies G. R., Hall C. M. (1994), *Isotope and chemical microsampling – Constraints on the history of an S-type rhyolite, San Vincenzo, Tuscany, Italy.* Geochimica et Cosmochimica Acta, 58, 2, 943-958.

Francovich R. (a cura di) (1993), *Le ragioni di un parco alle radici dell'archeologia mineraria. Le miniere di Campiglia Marittima nelle pagine dei naturalisti e dei geologi dell'Ottocento.* Marsilio Editori, Venezia.

Guideri S. (2008), *Il Sistema dei Parchi della Val di Cornia e il Parco Archeominerario di San Silvestro (1996-2006)*, in Bailly-Maitre M.c., Jourdaine-Annequin C., Clermont-Joly M. (a cura di), *Archéologie et paysages des mines anciennes, de la fouille au musée*, Paris 2008, pp. 187-195.

Guideri S., Brocchini D., Scuffiotti A. (2013), *Il Parco Archeominerario di San Silvestro. Un progetto per la tutela e la valorizzazione.* Rivista Mineralogica Italiana 1/2013, 93-98.

Rossetti F., Faccenna C., Acocella V., Funiciello R., Jolivet L., Salvini F. (2000), *Pluton emplacement in the Northern Tyrrhenian area, Italy.* Geological Society, Special pubblication, 174 – 55-77

Rodolico F. (1931), *Ricerche sulle rocce eruttive recenti della Toscana. Le rocce del Campigliese.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., 41, 197-254

Rodolico F. (1945), *Ragguagli sul granito del Campigliese.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., 41, 197-254.

Semplici A. (2011), *Bianca e sfolgorante appare la Rocca – Guida al Parco Archeominerario di San Silvestro.* Ed. Parchi Val di Cornia Piombino.

Tanelli G., Morelli F., Benvenuti M. (1993), *I minerali del Campigliese – Beni ambientali, culturali e industriali.* Bollettino della Società Geologica Italiana, 112 – 715-728.

Vezzoni S., Dini A., Rocchi S. (2016), *Reverse telescoping in a distal skarn system (Campiglia Marittima, Italy).* Ore Geology Review, 77, 176-193.

La città di Shahrood (Iran nord-orientale) e il suo approvvigionamento idrico tramite i qanat

The town of Shahrood (north-eastern Iran) and its water supply through the qanats

Ezio Burri [(1)], Andrea Del Bon[(2)], Doulati Ardejani Faramarz[(3)], Angelo Ferrari[(4)], Karami Gholam Hossein[(5)], Pietro Ragni[(4)]

(1) Università di L'Aquila, Dip. MESVA; CNR, Istituto di Metodologie Chimiche, Area di Ricerca Roma 1, Roma, Italia
(2) Gruppo di ricerca "Qanat Project", Italia
(3) Scuola di Tecnica Mineraria, Collegio di Ingegneria, Università di Teheran, Iran;
(4) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologie Chimiche, Area della Ricerca Roma 1, Roma, Italia
(5) Università Tecnologica di Shahrood, Facoltà di Scienze della Terra, Shahrood, Iran;

E-mail: burri@univaq.it

Parole chiave (*key words*): qanat *(qanat)*, risorse idriche sotterranee *(groundwater resources),* approvvigionamento idrico *(water supply),* monitoraggio *(monitoring)*, indagini di campo *(survey).*

RIASSUNTO

La città di Shahrood è ubicata nel settore settentrionale del deserto del Kavir (ad un'altitudine di 1345 m s.l.m.) lungo il tracciato di una delle Vie della Seta, nella regione di Semnan, Iran nord-orientale (*Fig.* 1). Sebbene l'approvvigionamento idrico sia garantito da un moderno sistema di pozzi e di acquedotti, sino al recente passato tale funzione era svolta da un complesso sistema di qanat, in parte ancora efficiente, in grado di soddisfare i fabbisogni di oltre un terzo dei circa 210'000 abitanti della cittadina. Data l'importanza strategica di questa risorsa idrica, essa è monitorata costantemente dalle Autorità locali e sono quindi disponibili dati e pubblicazioni. Nel presente articolo vengono illustrate le indagini preliminari svolte, in collaborazione con l'Università Tecnologica di Shahrood, per identificare le linee principali di sviluppo della ricerca da svolgere, riguardanti sia l'opera idraulica in senso stretto, sia il contesto socio-economico e culturale.

INQUADRAMENTO

La città di Shahrood è ubicata nel settore settentrionale del deserto del Kavir (ad un'altitudine di 1345 m s.l.m.) lungo il tracciato di una delle Vie della Seta, nella regione di Semnan, nell'Iran nord-orientale (*Fig.* 1).

Nel passato, in quest'area, l'approvvigionamento idrico veniva svolto tramite un complesso sistema di qanat. L'assetto attuale del qanat è rappresentato in (*Fig.* 2). Il tracciato, lungo complessivamente 25 km (*Fig.* 2a), è suddiviso nella zona di captazione nei due rami di Tash e Mojen, lunghi rispettivamente 3,5 e 2 km; successivamente questi due rami di adduzione, seguendo la valle, confluiscono in un'unica galleria, che dirigendosi prima verso est e poi verso sud giunge in posizione sopraelevata rispetto alla cittadina di Shahrood. In (*Fig.* 2b) sono rappresentati in sezione lo schema di captazione delle acque sotterranee e gli elementi caratteristici del qanat (pozzo madre, pozzi di accesso, gallerie suborizzontali e punto di recapito).

Questa opera sotterranea è state realizzata interamente a mano, procedendo dalla zona di recapito delle acque verso quella di captazione (*Fig.* 2c), interconnettendo diverse decine di pozzi verticali. La zona di captazione è stata precedentemente individuata mediante uno o più pozzi esplorativi, divenuti poi i "pozzi madre".

Attualmente un lungo tratto della galleria del qanat di Shahrood (a partire da circa

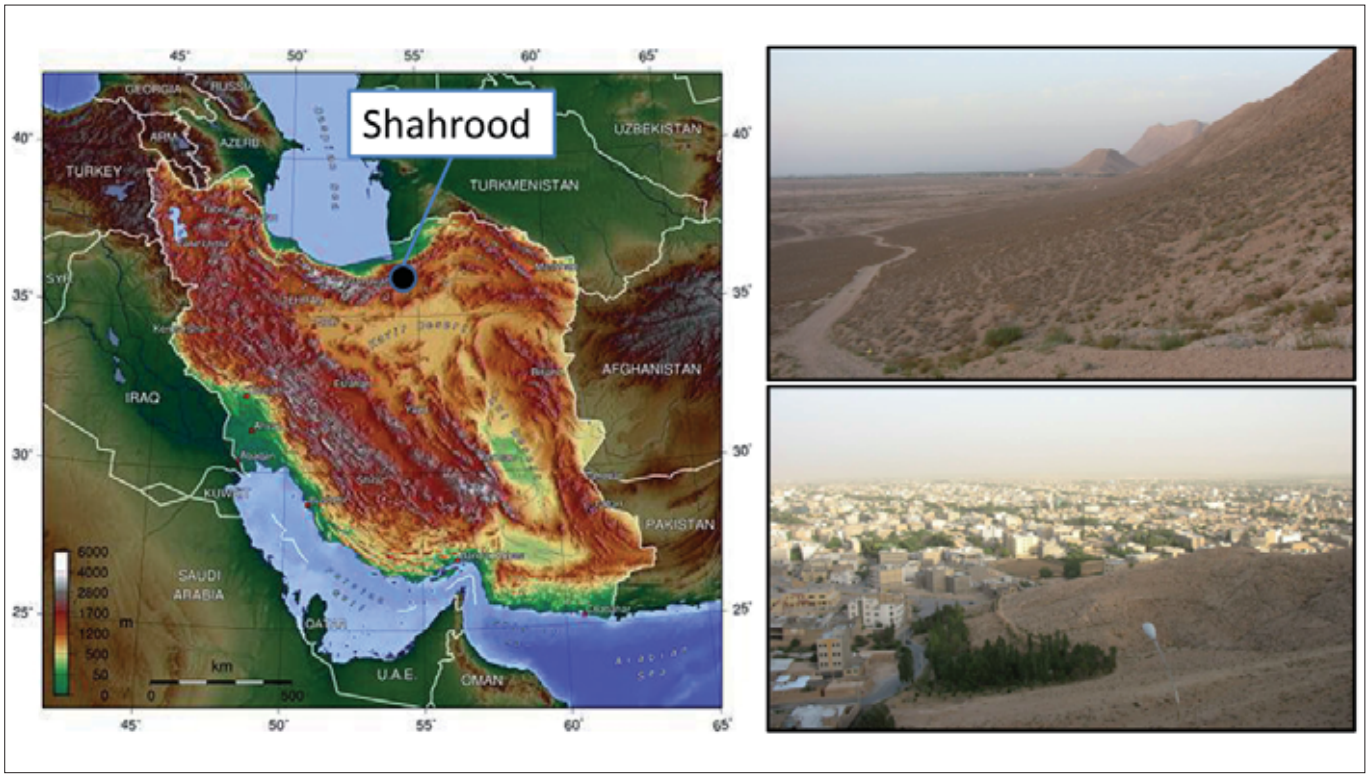


Figura 1 – Ubicazione della cittadina di Shahrood (o Shahrud) e panorami della città e dei suoi dintorni.
Location of the town of Shahrood (or Shahrud) and sigths of the city and surroundings (Fonte/Source – https://en.wikipedia.org/wiki/Geography_of_Iran)

4,5 km dalla confluenza) è stato intubato per ovviare a problemi di stabilità e mettere in sicurezza l'infrastruttura (*Fig.* 3a).

L'opera idraulica è stata ricavata all'interno dei depositi alluvionali ed eluvio-colluviali vallivi, tranne le ultime centinaia di metri ricavati nel calcare. Dell'*outlet* del qanat è stata conservata la struttura a pettine originaria destinata a parcellizzare gli adacquamenti (*Fig.* 3b). Le acque sotterranee Le acqua sotterranee, una volta venute a giorno, sono indirizzate all'impianto di potabilizzazione, prima dell'immissione nell'acquedotto di distribu-

dizadeh H.,2003) e diverse informazioni georiferite sul tracciato del qanat. Facendo riferimento a quanto riportato in Kazemi (2004), le acque del qanat hanno conducibilità elettrica (CE) variabile, compresa tra 530 e 610 uS/cm – i minimi si registrano nel periodo compreso tra maggio ed agosto, mentre i massimi tra gennaio e marzo. Questa anomala variazione della conducibilità elettrica è giustificata dal ricorso, durante il periodo estivo, all'integrazione delle portate naturali del qanat con quelle provenienti da quattro pozzi (ubicati lungo il tratto terminale dell'opera idraulica

carica. Il valore del pH si attesta intorno ad 8,00 e non mostra variazioni correlabili alle stagioni. Si tratta di acque marcatamente carbonato-calciche (durezza: 180-190 mg/L). L'area di studio è stata soggetta anche ad importanti periodi siccitosi (come quello pluriennale 2000-2003), che hanno destato notevole preoccupazione nella popolazione e nelle Autorità.

A fronte di precipitazioni medie annue di circa 150 mm, le analisi delle serie storiche hanno evidenziato per l'area di Shahrood un sostanziale equilibrio nel periodo 1951-2009, mentre nelle limitrofe zone di Semnan e

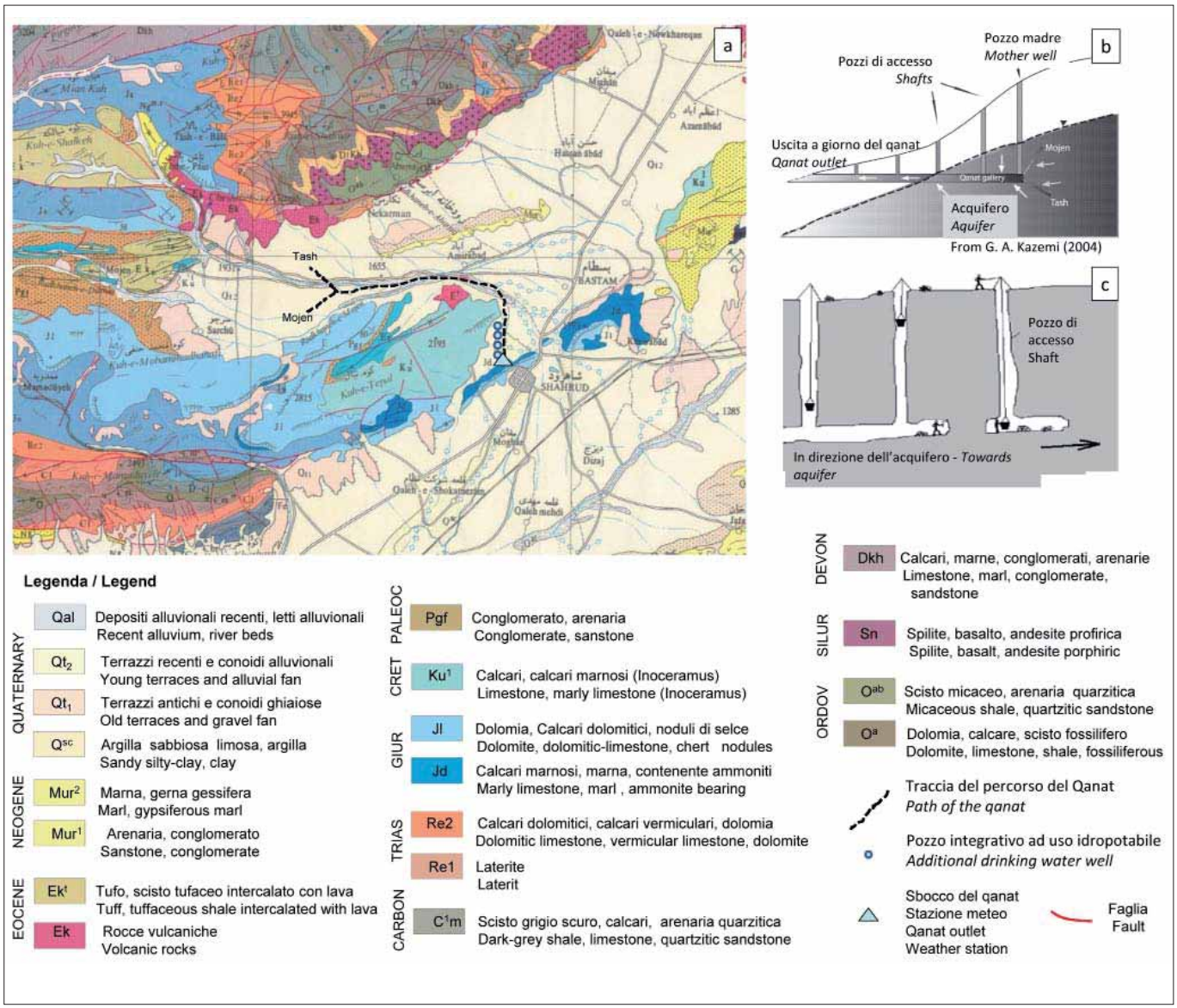


Figura 2 – Schema di approvvigionamento idrico del qanat – a) traccia del percorso su base geologica; b) sezione schematica del sistema di captazione; c) tecnica di realizzazione dei qanat. Qanat water supply system scheme – a) geological map path path; b) schematic section of the water supply system; c) construction method of a qanat

zione cittadino. La portata media addotta è di circa 120 L/s. Le eccedenze stagionali sono utilizzate a fini ricreativi (parco cittadino).

Data l'importanza strategica di questa risorsa idrica, essa è monitorata costantemente dalle Autorità locali. Sono quindi disponibili dati e pubblicazioni riguardanti il chimismo delle acque, le sue variazioni stagionali e analisi sui trend delle precipitazioni in anni passati (Kazemi G.A.,2003; Kazemi G.A., Meh-

sotterranea). Le differenze tra acque prelevate dai pozzi trivellati (in dolomie e calcari) e quelle naturali del qanat sono riconducibili alla maggiore distanza percorsa da queste ultime e anche dai differenti terreni attraversati (depositi alluvionali).

La temperatura dell'acqua all'uscita del qanat varia tra 17 °C in gennaio e 27°C in luglio, risultando ben correlabile alle temperature dell'aria registrate nelle presumibili zone di ri-

Beyarjomand (a ovest e ad est rispettivamente) i trend riferiti agli stessi periodi si sono dimostrati marcatamente negativi (Modarres R. e Sarhadi A., 2009). Tali osservazioni, inducono a supporre che congiuntamente alle possibili variazioni climatiche, gli episodi "siccitosi" degli ultimi anni possano in realtà configurarsi come crisi idriche, ovvero in un mutato ed accresciuto fabbisogno idrico non soddisfacìbile dalle reali disponibilità delle risorse.

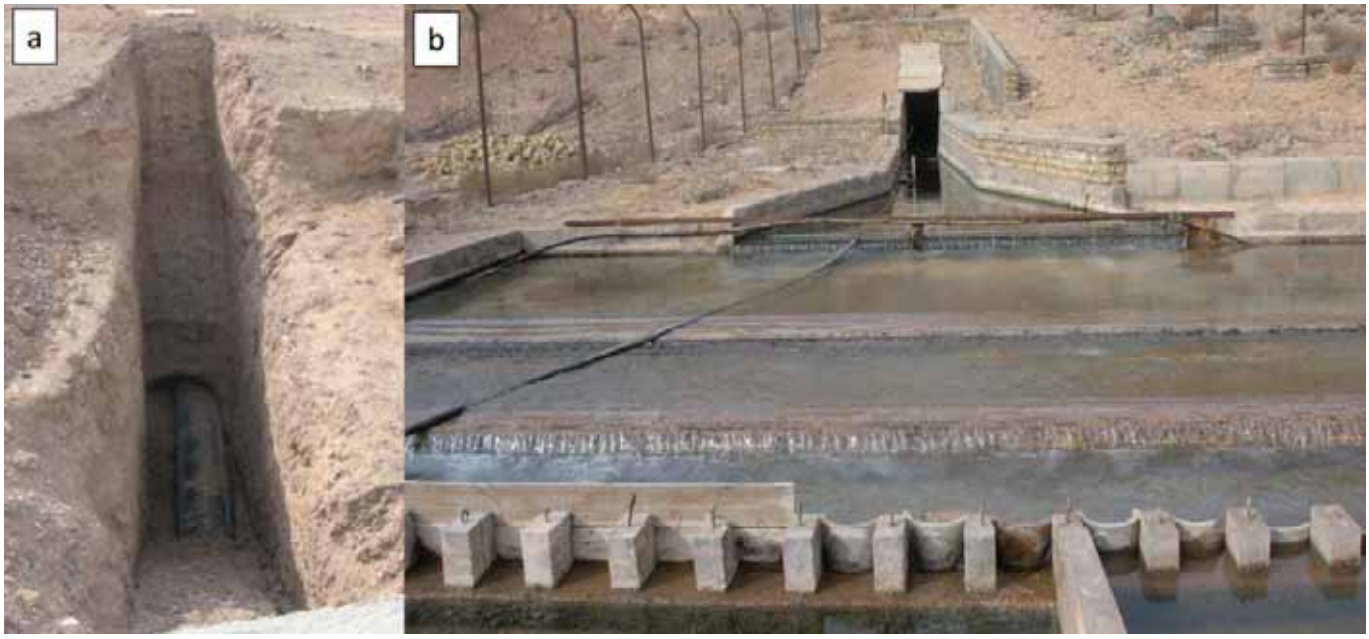


Figura 3 – Dettagli costruttivi del qanat di Shahrood – a) tratto intubato lungo il tunnel del qanat; b) termine del canale sotterraneo con struttura a pettine per la ridistribuzione degli adacquamenti (oggi in disuso).
Constructive details of Shahrood qanat – a) conduct within the qanat tunnel; b) the outlet and the comb structure for water redistribution (now in disuse)

In tale contesto, risulta strategica la necessità di caratterizzare quantitativamente e qualitativamente le risorse idriche utilizzabili.

In effetti, come messo bene in evidenza da Aidary K., Kazemi G.A. (2014), il sempre più frequente ricorso a pozzi trivellati ha messo in crisi le risorse idriche sotterranee presenti nell'area di Shahrood, determinando cospicui abbassamenti del livello di falda (circa 10 metri nel periodo 1993-2009), con conseguente peggioramento delle caratteristiche qualitative delle acque, usate principalmente per fini agricoli e domestici.

MATERIALI E METODI

L'approccio utilizzato durante questa prima campagna conoscitiva è stato quello di cercare ricavare quante più informazioni possibili, riguardanti sia l'opera idraulica in senso stretto, sia il contesto socio-economico e culturale.

Riguardo l'aspetto tecnico ci si è prefissati di definire un modello idrogeologico concettuale di dettaglio, identificare le aree di ricarica, porre le basi per una soddisfacente valutazione del bilancio idrico (quantificazione degli afflussi e deflussi del sistema) e di giustificare alcune variazioni importanti nel chimismo delle acque.

Per questo, con il permesso delle Autorità, sono state intraprese alcune attività che hanno previsto l'installazione di una centralina per la rilevazione di dati meteo-climatici in prossimità dell'impianto di potabilizzazione (ovvero ad alcune decine di metri dall'outlet del qanat) e un rilievo preliminare dei territori attraversati dai condotti sotterranei al fine di evidenziarne eventuali criticità. Inoltre, sono state eseguite le prime misure delle concentrazioni di radon nelle acque addotte. Contestualmente sono stata effettuate diverse interviste con Autorità, personale tecnico e alcuni portatori di interesse con la finalità di approfondire le tematiche connesse all'utilizzo del qanat e delle sue acque.

RISULTATI

I sopralluoghi condotti hanno permesso di identificare come probabili zone di ricarica, i rilievi carbonatici presenti a nord di Shahrood e le coltri alluvionali presenti alle loro pendici. Sono stati identificati alcuni siti in cui ubicare stazioni meteo-climatiche e di monitoraggio delle acque (abitati di Tash e Mojen). Nelle zone attraversate dal qanat sono presenti altre strutture idrauliche analoghe, il cui sviluppo è stato realizzato a profondità differenti e secondo diverse direttrici, con l'intento di drenare più efficacemente possibile la circolazione

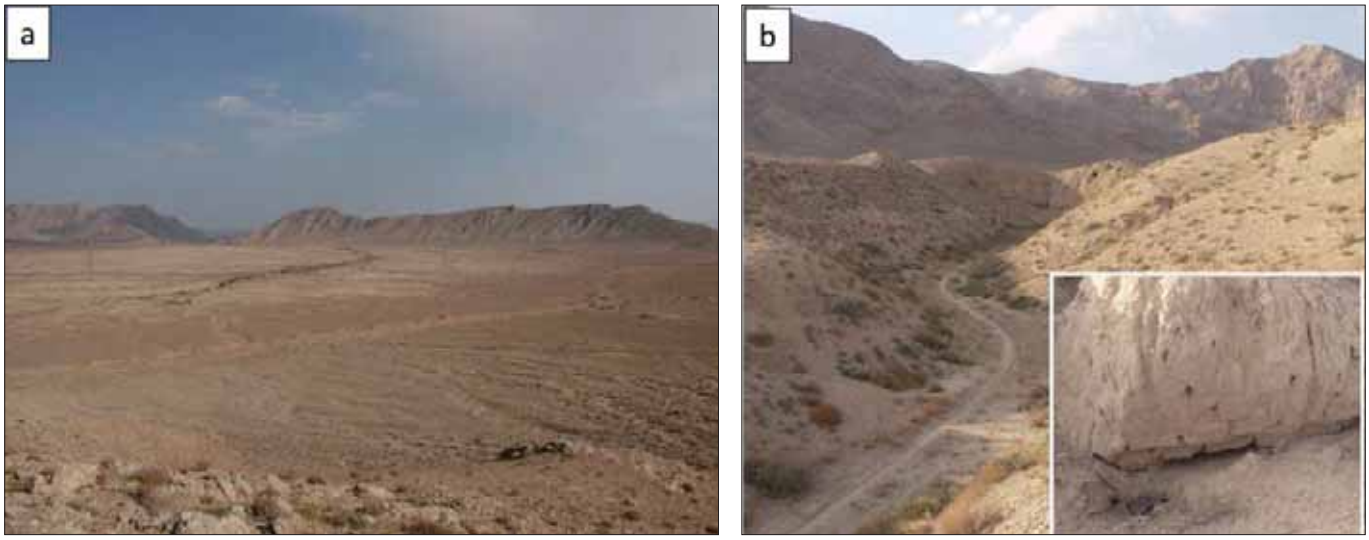


Figura 4 – Valle secondaria attraversata dal qanat di Shahrood: a) qanat abbandonati e destinati ad uso irriguo, diretti verso la piana di Shahrood; b) resti dell'edificio in adobe destinato al controllo delle opere di captazione sotterranee.
Secondary valley crossed by the Shahrood qanat: a) abandoned qanats digged for irrigation purposes, directed towards the plain of Shahrood; b) remains of the adobe building probably used to control of the underground water works

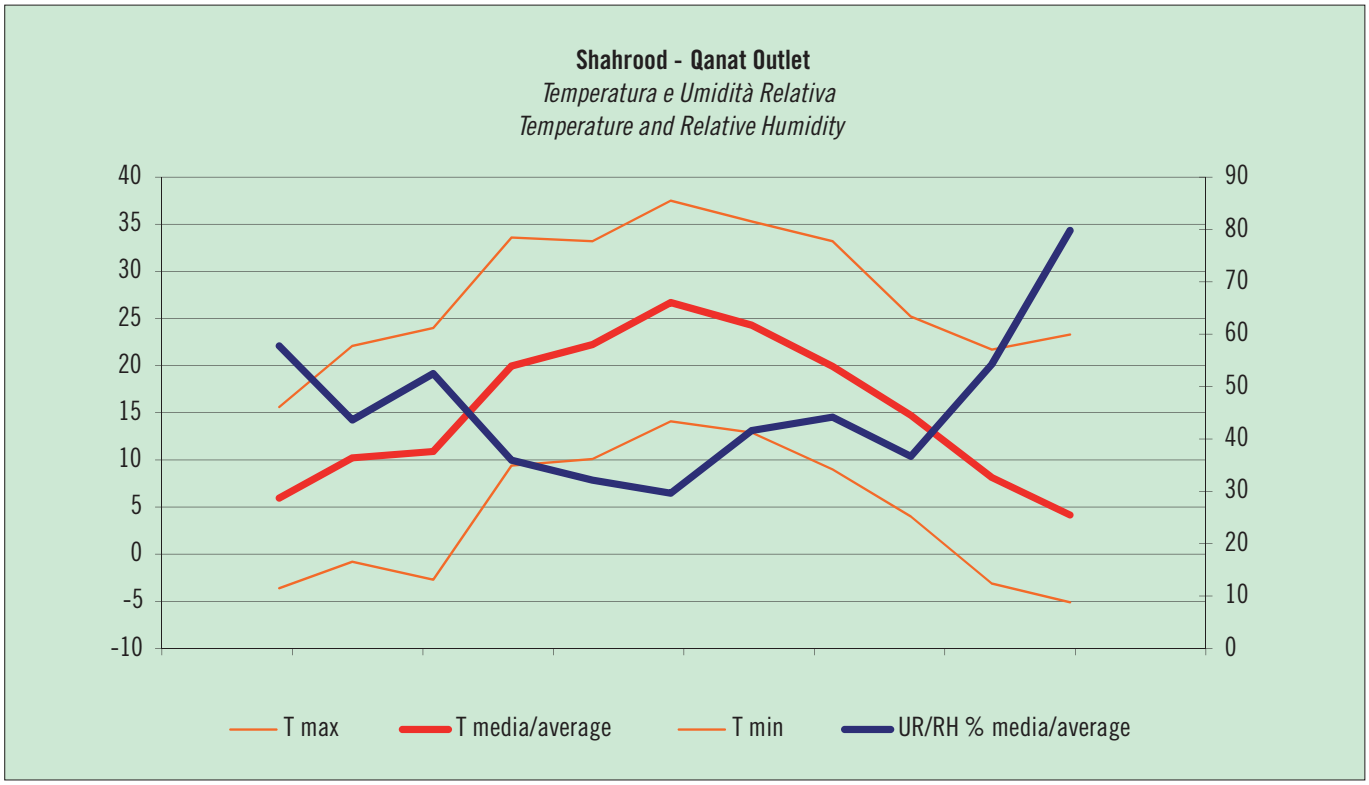


Figura 5 – Diagramma delle temperature mensili (T massima, media e minima) e dell'umidità relativa media (UR%) per l'anno 2009.
Plot of monthly temperatures (T maximum, average and minimum) and average relative humidity (RH%) for the year 2009.

idrica sotterranea. In particolare nell'ultima parte del percorso del qanat, nel tratto in cui esce dalla valle principale dirigendosi in una secondaria, si osservano numerose altre strutture di adduzione idrica sotterranea, trasversali all'andamento del citato qanat, che si dirigono verso una incisione morfologica presente nel rilievo calcareo che separa tale valle da quella in cui si è sviluppata la cittadina di Shahrood (*Fig.* 4a). Tali strutture ipogee erano probabilmente destinate principalmente all'approvvigionamento agricolo. La rilevanza di tale sistema, attualmente abbandonato, era tale da giustificare la presenza di un ampio edificio in *adobe* destinato probabilmente al controllo degli shaft dei diversi rami di qanat presenti (*Fig.* 4b).

L'importanza strategica di questa valle secondaria è testimoniata, anche oggi, dalla presenza dei citati quattro pozzi trivellati, i cui prelievi sono destinati ad integrare le portate addotte dal qanat di Shahrood nei periodi più siccitosi. I valori di concentrazione di radon nelle acque del qanat (5,8 Bq/L) sono risultati di gran lunga inferiori alla soglia di attenzione consigliata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (100 Bq/litro). Le misure speditive dei parametri chimico-fisici delle acque effettuate in corrispondenza dell'outlet del qanat si sono dimostrate in buon accordo con quelle presenti in letteratura (periodo-gennaio 2009; temperatura 23°C, CE 474 uS/cm, pH 8,10). In merito alle prime valutazioni riguardanti i parametri climatici, in *Fig.* 5 è riportato il diagramma delle acquisizioni di temperatura ed umidità relativa registrate dalla stazione meteo posizionata in corrispondenza dell'outlet del qanat per l'anno 2009. Si osserva come le temperature massime (corrispondenti ai minimi di umidità) si raggiungano in luglio, mentre il periodo più freddo ed umido sia quello di dicembre-febbraio. Anche le escursioni termiche sono rilevanti.

Le interviste svolte hanno confermato che il consistente ricorso, negli ultimi decenni, a pozzi trivellati, ha messo in crisi i vecchi sistemi di drenaggio ipogei sub-orizzontali. Inoltre, gli incontri tenutisi con le Autorità locali hanno permesso di prefigurare collaborazioni per l'ottimizzazione dell'uso delle acque sotterranee a fini potabili ed irrigui.

CONCLUSIONI

Le indagini preliminari svolte hanno consentito di identificare le linee principali di sviluppo della ricerca da svolgere in collaborazione con l'Università Tecnologica di Shahrood. Tra le priorità vanno annoverate il monitoraggio in continuo delle portate del qanat (almeno in corrispondenza del suo outlet), l'installazione di almeno una stazione meteo-climatica nella zona di Tash-Mojen. In tale contesto vanno anche inquadrate le iniziative, in itinere, volte alla valorizzazione culturale di quest'opera idraulica.

***

INTRODUCTION

Shahrood is a city located on the northern border of Kavir desert (altitude 1345 m a.s.l.), along one of the main Silk Road paths, in the North-West of Iran, within the Province of Semnan (*Fig.* 1).

Although, nowadays, water is supplied by a modern system of drilled wells and aqueducts, in the recent past, it was ensured by a complex qanat system; a part of it is still working and supplies more than one third of Shahrood water demand (about 210˙000 inhabitants).

SETTING

The current layout of the qanat is shown in *Fig.* 2. The track (*Fig.* 2a), 25 km long, starts in the catchment area with two branches, named Tash and Mojen (respectively 3.5 and 2 km). These two branches, following the valley, join into a single tunnel, which first is directed to east and then turns to south, reaching the upper part of the town of Shahrood. *Fig.* 2b shows a cross-section of the groundwater drainage system and the characteristic elements of the qanat (i.e. mother well, access shafts, sub-horizontal tunnels and outlet). This underground work was carried out entirely by hand, proceeding from the water supplied area to the catchment area (*Fig.* 2c), interconnecting several dozens of vertical wells. The catchment area was previously identified by one or more exploration wells, which later have been used as "mother wells".

Currently, a long section of the Shahrood qanat tunnel (about 4.5 km from the confluence of the two branches) has been piped to overcome stability problems and to secure the infrastructure (*Fig.* 3a).

The hydraulic system was digged through alluvial and eluvio-colluvial deposits along

the valley, while the final part of the qanat crosses limestone rocks. At the qanat outlet, the original comb-like structure has been preserved, it was used to split water flow among different users (*Fig*. 3b). Today, water, downstream the outlet, is diverted to the drinking water treatment plant, before entering urban pipelines. Seasonal surpluses are used for recreational purposes (municipality park).

Because of its strategic importance, qanat water is constantly monitored by local Authorities. Therefore, data and publications concerning water chemistry, its seasonal variations and analysis of precipitation trends in past years (KAZEMI G.A., 2003; KAZEMI G.A., MEHDIZADEH H., 2003) and various georeferenced information on the qanat path are available.

Referring to Kazemi (2004), qanat water has variable electrical conductivity (EC), between 530 and 610 uS/cm: minimum values are recorded between May and August, while the maximums occur between January and March. This EC anomaly is justified by the recourse, during summer, to four drilled wells which withdrawals supplement the qanat natural outflows. These wells are located along the ending section of the tunnel. The chemical differences between water pumped from wells (tapping dolomite and limestone aquifer) and the qanat one can be traced back to the greater distance traveled by the latter and also by the different soil/rocks crossed (alluvial deposits).

Water temperature at the qanat outlet varies between 17 °C in January and 27° C in July, showing a good correlation with air temperatures recorded in the conceivable recharge areas. The pH average value is about 8.00 and does not show seasonal changes. Qanat water is characterized by a high carbonate-calcium content (hardness: 180-190 mg/L).

The study area has also been prone to important drought events (such as the multi-year 2000-2003 one), which have caused considerable concern among the population and the Authorities. With an average annual rainfall of 150 mm, historical series analysis has showed a substantial equilibrium in the area of Shahrood during the period 1951-2009, while in the neighboring areas of Semnan and Beyarjomand (to the west and to the east respectively) the trends, referring to the same periods, proved to be markedly negative (MODARRES R. and SARHADI A., 2009). These observations lead us to suppose that, together with the possible climatic variations, the "drought" events of recent years may actually be considered as water crises, i.e. an increase in water demand not satisfied by the actual water resources availability.

In this context, the need to quantitatively and qualitatively characterize water resources is basic and strategic.

In fact, as evidenced by AIDARY K., KAZEMI G.A. (2014), the increasingly use of drilled wells (mainly used for agricultural and domestic purposes) has led groundwater resources in the area of Shahrood into overexploitation, causing a considerable drop in water table levels (about 10 meters in the period 1993-2009), with consequent worsening of water quality characteristics.

MATERIALS AND METHODS

The approach used during this first survey was to gather as much information as possible, concerning both the hydraulic work and the socio-economic and cultural context.

Regarding the technical aspects, we aim to define a detailed conceptual hydrogeological model, identifying recharge areas, laying the foundations for a good water balance assessment (quantification of the system inflows and outflows) and to justify some important changes observed in qanat water chemistry.

For these reasons, with the permission of the Authorities, some activities have been undertaken: the installation of a weather station for the collection of meteorological and climatic data, located near the water treatment plant (i.e. near the qanat outlet); a preliminary survey of the territories crossed by the qanat tunnels in order to highlight critical issues. Furthermore, first measurements of radon concentrations in the supplied water were carried out. At the same time, several interviews were performed with Authorities, technicians and some stakeholders aimed at improving the knowledge related to the use of qanat and its water.

RESULTS

The survey has allowed to identify, as probable areas of recharge, the limestone mountain range located north of Shahrood and the alluvial deposits at their foothills. Some sites have been identified as possible locations to place weather-climatic stations and/or water monitoring stations (villages of Tash and Mojen). In the areas crossed by the qanat, there are some similar hydraulic structures, realized at different depths and along other directions in order to drain underground water as efficiently as possible. Along the last section of the qanat, where it exits from the main valley and enters a secondary one, it is possible to see several shafts, transversally oriented with respect to the main qanat, converging toward a morphological notch in the limestone reliefs, that divides this valley from the plain where Shahrood lies (*Fig*. 4a). These qanats were probably digged for agricultural purposes. The importance of this system, now abandoned, is justified by the presence of a large adobe building, probably erected to control the mentioned shafts and qanats (*Fig*. 4b). The secondary valley is still of strategic relevance, since the aforementioned drilled wells have been made to supplement qanat outflows during dry and drought periods.

Radon concentration values in qanat water (5,8 Bq/L) have been found to be far below the warning threshold recommended by the World Health Organization (100 Bq/L).

The water chemical-physical parameters measured at its outlet showed a good correlation with those ones reported in literature (period: January 2009, temperature 23 ° C, EC 474 uS / cm, pH 8,10). As regards, first evaluations of climatic parameters, the plot of temperature (T) and relative humidity (RH%), recorded by the weather station located at the qanat outlet is shown in *Fig*. 5. The maximum temperatures (corresponding to minimum humidity values) are reached in July, while the coldest and humid period is December-February. The thermal excursions are also relevant.

The carried out interviews have confirmed that the considerable recourse, in recent decades, to drilled wells, has undermined the old sub-horizontal hypogeum drainage systems. The meetings with the local Authorities have allowed to prefigure collaborations for the optimization of groundwater use for drinking and irrigation purposes.

CONCLUSIONS

The preliminary investigations carried out have allowed to identify some main research lines to be developed in collaboration with the University of Technology of Shahrood. Priorities include the continuous monitoring of the qanat discharge rates (at least at its outlet) and the installation of one or more weather stations in the Tash-Mojen area. In this context the ongoing initiatives aimed at the cultural enhancement of this hydraulic work must also be framed.

BIBLIOGRAFIA

AIDARY K., KAZEMI G.A. (2014), *Quantifying changes in groundwater level and chemistry in Shahrood, northeastern Iran.* Hydrogeology Journal (2014) 22 – 469–480. DOI 10.1007/s10040-013-1042-8

KAZEMI G.A. (2004), *Temporal changes in the physical properties and chemical composition of the municipal water supply of Shahrood, northeastern Iran.* Hydrogeol. J., 12, 723-734.

KAZEMI G.A., MEHDIZADEH H. (2003), *Trend, characteristics and Chemical composition of atmospheric precipitation at Shahrood, Northeast Iran.* In – Abstracts of the 33rd General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), July 2003, Sapporo, Japan.

MODARRES R. & SARHADI A. (2009), *Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century.* Journal of Geophysical Research, VOL. 114, D03101, doi:10.1029/2008JD010707

Gli ipogei in Puglia tra conservazione e innovazione

Apulian Hypogea between preservation and innovation

Antonella Calderazzi
Dipartimento di Ingegneria Civile e dell'Architettura, Politecnico di Bari

Rosa Pagliarulo
CNR, Istituto di Ricerca Protezione Idrogeologica, Bari

Parole chiave (*key words*): Ipogei (*Hypogea*); insediamenti rupestri (*rocky habitat*); morfologia del territorio (*geomorphological features*); salvaguardia (*preservation*); innovazione (*innovation*)

ABSTRACT

Nell'ambito delle tematiche relative alla progettazione del sottosuolo, oggetto anche di un PRIN (Programmi di Ricerca di Interesse Nazionale) sono state individuate le linee guida per il recupero e la valorizzazione degli ipogei sia urbani che extraurbani ed è stato possibile formulare modelli di sperimentazione progettuale tenendo conto di tutte le variabili al contorno dovute alla complessità dei siti.

Le forme del paesaggio pugliese sono variabili e disegnano un composito panorama geografico nel cui ambito si distinguono diverse aree caratterizzate da peculiarità geomorfologiche delimitate da confini orografici. Essendo la Puglia costituita essenzialmente da depositi carbonatici caratterizzati da diffuse morfologie carsiche, è una delle regioni a più elevata densità di ipogei con alta valenza archeologica e storico- artistica, attualmente in stato di conservazione precario, per cui, in alcuni casi viene obliterata la lettura completa dell'insediamento stesso. Il patrimonio ipogeo, molto complesso e articolato, è basato su una pluralità di processi insediativi e culturali di epoche e connotazioni diverse, strettamente integrati nel tessuto edilizio attuale.

Le ricerche svolte hanno riguardato, con approccio multidisciplinare e multiscala, le diverse problematiche relative alle tipologie di ipogei, analizzando la loro ubicazione, genesi, il sistema di integrazione con la città e il possibile recupero funzionale.

Il metodo di indagine è stato di tipo deduttivo. A seguito dell'analisi effettuata mediante schedatura di siti presi in esame nel territorio di Gravina di Puglia, Palagianello e Monopoli, sono stati individuati alcuni ipogei significativi in funzione della genesi, tipologia, quota sul l.m.m., condizioni ambientali e climatiche e potenzialità di recupero al fine di sostenere al meglio la progettualità e ipotizzare una loro riconversione ad attività contemporanee.

I modelli insediativi ipogei più comuni in base alla loro genesi sono di due tipi – quelli con sviluppo in verticale e quelli in orizzontale. Se opportunamente valorizzate e messe in relazione con il livello stradale, le aree del sottosuolo possono contribuire attivamente allo sviluppo di spazi urbani e favorire la trasformazione del territorio in un ben più vasto processo di controllo e rinnovamento della forma del paesaggio mediterraneo. La riqualificazione degli ipogei diviene proposta di fruibilità e uso di luoghi con funzioni diverse, attraverso un modo nuovo di vivere lo spazio tra quote fortemente differenti, tra esterno ed interno, tra spazi in luce e spazi in ombra, tra memoria e quotidianità.

1. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'area in cui sono localizzati gli ipogei oggetto del presente studio, si colloca nella porzione centrale della regione pugliese, l'altopiano delle Murge. Le forme del paesaggio sono caratterizzate da livelli altimetrici poco elevati, infatti la maggior parte della regione è costituita da aree di pianura e di colline.

Dal punto di vista geologico trattasi di una potente successione carbonatica di età giurassico-cretacea (calcari, calcari dolomitici e dolomie) che si sviluppa, con uno spessore complessivo di quasi 3.000 metri. Sui calcari, in discordanza, poggiano rocce calcarenitiche e sul margine occidentale anche argille di età plio- pleistocenica. La formazione più estesa è rappresentata dalle Calcareniti di Gravina costituita da calcareniti di colore giallo chiaro, più o meno cementate, con abbondanti fossili marini e conglomerati calcarei, la cui età è riferibile al Pliocene Superiore- Calabriano (Ricchetti, 1975). Sul versante costiero adriatico la successione carbonatica è ricoperta per vaste aree da depositi trasgressivi a cui è stata attribuita la denominazione di Tufi delle Murge. Questi depositi, che si rinvengono in lembi residuali anche in affioramenti più limitati all'interno, sono costituiti da litotipi calcareo-areancei e calcareo-areanaceo-argillosi più o meno cementati, con stratificazione non sempre evidente. Lo spessore residuale della Formazione raggiunge i 20 metri. L'età è genericamente attribuita al Pleistocene (Bosellini, 2004). Morfologicamente le Murge rappresentano una struttura allungata in direzione WNW-ESE che si estende dalla bassa valle del fiume Ofanto alla "Soglia messapica" (trasversale Taranto-Brindisi). Sono delimitate a SW, lato bradanico, a NW lato ofantino a a NE, lato adriatico (per il tratto compreso fra Conversano ed Ostuni) da alte scarpate e spianate poco estese. Lungo il versante adriatico, il paesaggio è caratterizzato da una serie di ampi ripiani che digradano verso il mare per mezzo di pendii alti poche decine di metri. Le scarpate che delimitano le Murge lungo il bordo bradanico rappresentano il prodotto di fenomeni erosivi che hanno fatto arretrare originari piani di faglia sub verticali ed hanno dato luogo ad una struttura a gradinata che prosegue anche al di sotto delle coperture plio- pleistoceniche della fossa Bradanica, del Tavoliere delle Puglie e del mare Adriatico (Pieri *et al.*, 1997).

Le scarpate corrispondono ad originari piani di faglia elaborati dall'erosione, mentre le superfici sono il prodotto di fenomeni di abrasione. La ripida scarpata che delimita le Murge lungo il litorale adriatico è impostata su un'antica lineazione tettonica con direzione WNW- ESE e E-W (Petrullo *et al.* 2017).

Data la costituzione litologica dell'altopiano non c'è una rete idrica superficiale, ma si riscontra la presenza di solchi di erosione, corrispondenti a valli cieche. Sono numerosi e costituiscono un reticolo piuttosto denso tanto da presentare a luoghi una certa gerarchizzazione. I più importanti solchi erosivi, simili a canyons, sono di origine carsica, generalmente denominati gravine, sul lato bradanico e lame sul versante adriatico dove hanno origine nella Murgia alta e sul versante orientale arrivano fino al mare. L'origine dell'insediamento rupestre dei S.S. Andrea e Procopio, descritto in questa ricerca, localizzato lungo la lama dell'Assunta è riconducibile a questa genesi.

Nella maggior parte dei casi le lame hanno fondo piatto e fianchi mediamente inclinati. Le gravine presentano una direzione prevalente da SW a NE, e a luoghi mostrano brusche variazioni di direzione o andamento meandriforme. La morfologia di questi solchi erosivi (Pennetta, 1983) può essere di tre tipi in relazione alla loro localizzazione:

a) solchi della scarpata bradanica corti e profondi con profilo trasversale a "V";
b) corsi dell'alta e media Murgia a fondo piatto e ad andamento sinuoso;

c) solchi costieri a fondo piatto e fianchi sub verticali.

La formazione di questo reticolo idrografico è stata condizionata da diversi fattori, primo fra tutti le oscillazioni glacioeustatiche del livello mare in relazione al sollevamento tettonico dell'altopiano, la presenza di fratturazione nel blocco carbonatico e le condizioni litostratigrafiche dei sedimenti. I solchi erosivi profondi conosciuti con il nome di gravine che incidono la Murgia di Laterza, Castellaneta, Palagianello, Massafra, Crispiano, Grottaglie, Ginosa e Gravina, sono invece dei veri e propri canyons carsici formatisi a seguito del graduale approfondimento del corso d'acqua nel substrato calcareo. Si tratta di corsi d'acqua sovraimposti, anche se la presenza di forme carsiche ipogee ha avuto un ruolo importante nell'origine di alcuni tratti di queste profonde incisioni, agevolando in tal modo l'erosione lineare. Lungo queste incisioni è diffusa la presenza di cavità naturali di origine carsica successivamente elaborate dall'uomo, data la caratteristica principale di roccia tenera e lavorabile.

2. ASPETTI MORFOLOGICI DEGLI IPOGEI PUGLIESI

Il mondo ipogeo in Puglia, molto frequente per la carsicità del suolo, può essere letto come una sorta di paesaggio originario che ha suggerito i caratteri di architettura letteralmente generati dal suo interno (Calderazzi, 2011). Se prendiamo in esame la vastità delle cavità sotterranee e dei paesaggi rupestri che attraversano la Puglia da Monte Sant'Angelo al Salento passando per la Murgia centrale, colpisce soprattutto la relazione di stretta continuità non solo costruttiva ma anche funzionale e spaziale tra la quota di sottosuolo e quella di soprasuolo (Calderazzi *et al.*, 2013).

Le cavità di origine antropica o *habitat* rupestri, testimoni di un antico modo di insediamento nel territorio carsico pugliese hanno trasformato la geomorfologia urbana di alcuni centri che, per la loro caratteristica carsica naturale ne hanno favorito la diffusione.

Lo scavo viene realizzato utilizzando una parete in rupe offerta dalla particolare natura del suolo costituito in genere da calcarenite. Quando la natura non offre questi fianchi come avviene nelle zone pianeggianti, è l'uomo che crea artificialmente dei fianchi verticali da cui procedere per ricavare i vani che intende realizzare.

La serie di ipogei di origine medievale è dovuta da un lato al diffondersi del monachesimo italo-greco con un'alternarsi di anacoretismo e un tipo di comunità cenobica e dall'altro alla politica tesa al ripopolamento delle campagne voluta dai bizantini in seguito alla seconda colonizzazione dell'Italia meridionale (seconda metà X secolo). Le chiese dei nuclei greco-orientali sono realizzate tenendo conto delle strutture religiose necessarie allo svolgimento del rito bizantino, mentre quelle ad uso dei latini attengono alle proprie esigenze cultuali (Chionna, 1975).

I primi abitanti delle grotte medievali si riparano nelle anse delle lame e scavano le prime chiese affrescando con figure di santi di tradizione locale le ruvide pareti ipogee. La grotta, spesso preesistente come cavità naturale, offriva un rifugio salubre e comodo, fornito della suppellettile necessaria alla vita quotidiana (panconi, mensole, nicchie, mangiatoie, vasche, macine ecc.)

A servizio dell'unità abitativa composta da due o tre vani intercomunicanti in cui l'abitazione veniva condivisa con l'animale da soma, l'asino o il mulo, si trovano l'alcova, il camino, la cisterna e le fovee per depositi di derrate.

Ingegnosi sistemi di canalizzazione permettevano la raccolta delle poche acque meteoriche ed evitavano l'allagamento all'interno. Accanto all'abitazione vi è anche un vano scavato per ospitare le attività connesse alla trasformazione dei prodotti agricoli o quelle relative alla pastorizia.

Non mancavano le grandi macine in pietra per la lavorazione delle olive o per la macinazione del grano, spesso realizzate in situ durante lo scavo della roccia, la grande vasca per la raccolta e la lavorazione delle olive e la disposizione dei fori per l'inserimento dei torchi in legno (Lavermicocca, 1977).

Attraverso la esistenza di ipogei trasformati in frantoi e annessi a masserie, il mondo produttivo era legato alla nostra economia agricola che, ancora oggi distingue la terra di Puglia tra le regioni italiane più attive per la produzione di olio d'oliva.

I villaggi rupestri della zona di Monopoli sono del tipo "a parete" correlati al particola-



Figura 1 – Insediamento rupestre SS.Andrea e Procopio a Monopoli



Figura 2 – Interno ipogeo chiesa SS. Andrea e Procopio

re aspetto geologico del territorio. Si tratta di piccoli insediamenti raggruppati intorno ad un luogo di culto originati da tradizioni di vita locale, dalla diaspora di una popolazione rurale, raccolta intorno ai propri mezzi di produzione e sopravvivenza oppure intorno a vecchie fondazioni monastiche dedite allo sfruttamento dei terreni disboscati. Un caso interessante è rappresentato dall'ipogeo dei Santi Andrea e Procopio, un villaggio rupestre ubicato sulla parete superiore della lama dell'Assunta in territorio di Monopoli (*Fig.* 1), sviluppato intorno alla chiesa risalente all'XI secolo e dedicata ai due Santi (Dell'aquila & Messina, 1998).

Il casale rupestre è costituito da grotte di uno o più vani, adibiti ad abitazione e al culto religioso. Si accede all'ipogeo attraverso un portale principale che, in facciata, è affiancato da due aperture laterali più piccole, sul modello delle chiese costruite in superficie. I portali laterali hanno la forma arcuata mentre



Figura 3 – Accesso alla chiesa SS. Andrea e Procopio



Figura 4 – Villaggio rupestre Lama d'Antico a Fasano - ingresso e interno della chiesa

quello centrale rettangolare, è sormontato da una lunetta a profilo arcuato ribassato, nella quale è graffita una croce greca a bracci espansi e da una finestra monofora (*Fig.* 2). La pianta della chiesa è ad aula unica con zona presbiteriale (nàos) suddivisa in quattro celle e terminante con due absidi gemelle. Il *nàos* è diviso dal presbiterio da una iconostasi litica a due porte, affiancate da due larghe finestre laterali, scavate ad ampia lunetta per ospitare le icone dipinte. La seconda parte del presbiterio è caratterizzata dal vero e proprio *bema* (zona riservata al clero nelle chiese bizantine dove è collocato l'altare) a cui si accede dalle celle o transetti, attraverso una seconda recinzione a due varchi. Dal *bema* si aprono due absidi semicircolari che concludono la chiesa affrescata, (*Fig.* 3).

Un altro esempio di villaggio ricavato in grotte è rappresentato da Lama d'Antico in territorio di Fasano (*Fig.* 4). Anche in tale esempio vi sono vari ambienti che gravitano intorno alla chiesa a tre navate con pareti affrescate.

Un altro caso significativo e meritevole di essere valorizzato consiste nelle cavità rupestri di Palagianello e Massafra, aree dell'arco ionico tarantino interessate da fenomeni di carsismo e dalla presenza di lame e gravine che scendono sino alla costa.

Il patrimonio ipogeico è molto complesso e articolato ed è basato su una pluralità di processi insediativi e culturali di epoche e connotazioni diverse, a volte strettamente integrati nel tessuto edilizio attuale, quali gli esempi significativi di Canosa e Gravina di Puglia che racchiudono nel sottosuolo della città storica una serie di cavità insediative di natura artificiale ricavate sottraendo materiale lapideo riutilizzato come materiale da costruzione (*Fig.* 5).

Questi esemplari di architettura ipogea, specie nelle zone periferiche delle città hanno subito saccheggi da uomini senza scrupoli che hanno divelto altari, macine, cancellando ogni segno del passato. L'interesse per la riscoperta dell'architettura rurale che attualmente si dirige verso la qualità compositiva ed ecosostenibile delle masserie, spesso ristrutturate per divenire strutture ricettive come accade nei casi della masseria Coccaro e masseria San Domenico a Fasano, in cui le grotte sono state recuperate ed integrate alle strutture residenziali per essere destinate a *beauty farm*, deve tutelare anche le tante grotte che, abbandonate, stanno perdendo la integrità degli affreschi e la potenzialità culturale e turistica che per la Puglia rimane la risorsa primaria.

Se opportunamente valorizzate e messe in relazione con lo strato del livello stradale, le aree del sottosuolo possono contribuire attivamente allo sviluppo di spazi urbani e favorire la trasformazione del territorio in un ben più vasto processo di controllo e di rinnovamento della forma del paesaggio mediterraneo. La



Figura 5 – pogeo del palazzo Orsini a Gravina

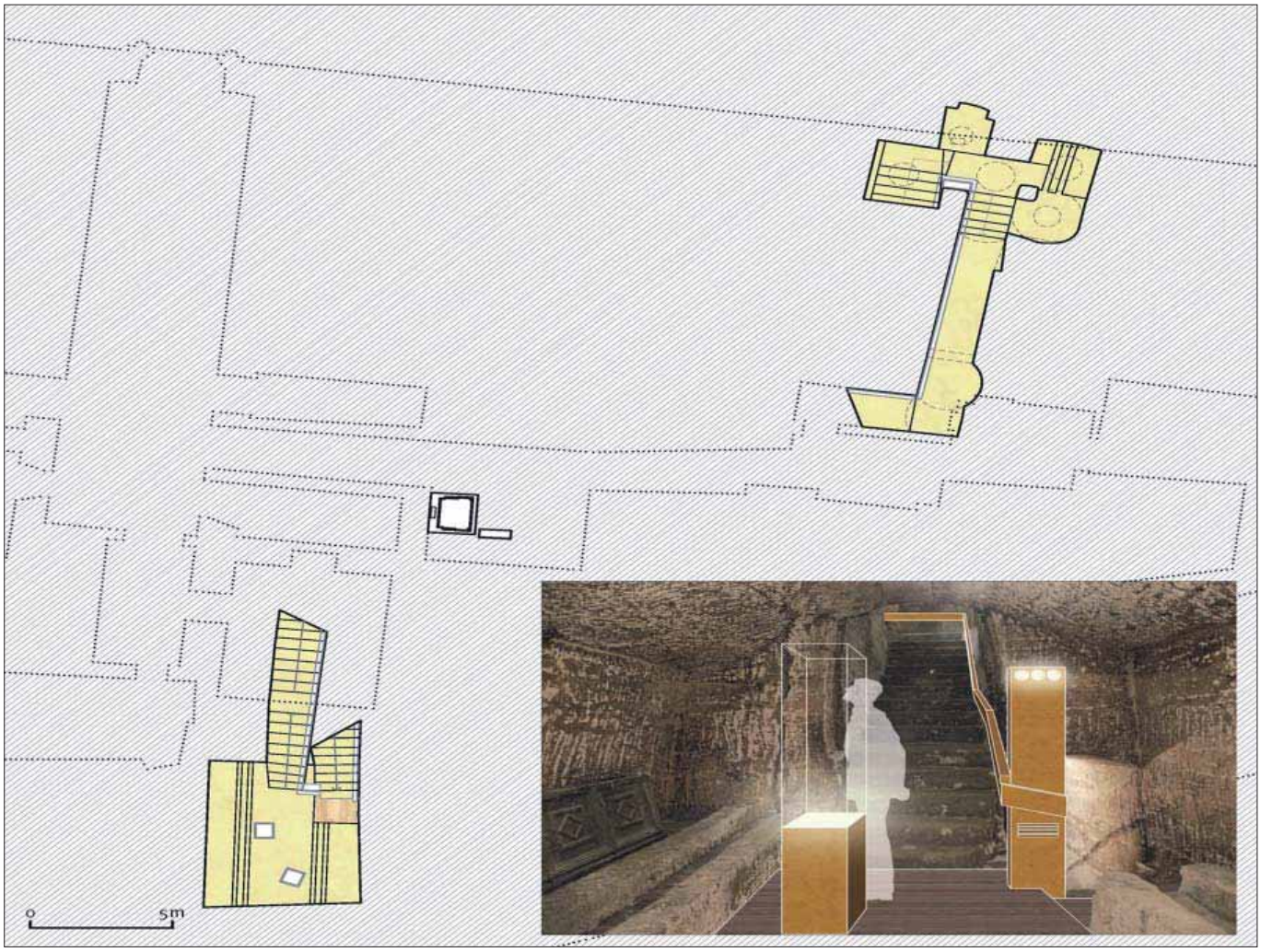


Figura 6 – Ipotesi di recupero dell'ipogeo Orsini a sede espositiva integrata con impianti tecnologici, elementi di allestimento e pavimento galleggiante.

riqualificazione degli ipogei diviene proposta di fruibilità e uso di luoghi con funzioni diverse, attraverso un modo nuovo di vivere lo spazio tra quote fortemente differenti, tra esterno e interno, tra spazi in luce e spazi in ombra, tra memoria e quotidianità.

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il riuso e la valorizzazione del sistema di ambienti ipogei è strettamente legato al raggiungimento di prestazioni idonee all'uso e all'agibilità degli stessi. Il limitato rapporto con l'ambiente esterno, generalmente caratterizzato da insufficiente ventilazione e illuminazione naturale, la presenza di elevati livelli di umidità proveniente dal masso terroso, le difficoltà di evacuazione in caso di pericolo e le problematiche di accessibilità specie per utenti diversamente abili pongono evidenti limitazioni all'uso di tali ambienti. Le destinazioni d'uso più idonee per gli ipogei non appaiono certo quelle residenziali, almeno per gli insediamenti completamente interrati, ma potrebbero essere utilizzate temporaneamente a scopo culturale, turistico e produttivo pur di non lasciare in completo abbandono tale patrimonio (*Fig.* 6).

L'adeguamento prestazionale degli ambienti ipogei può ricondursi per un verso all'inserimento di servizi tecnologici idonei anche alle specifiche condizioni ambientali e per un altro verso alla ridefinizione del quadro esigenziale-prestazionale in cui siano rispettate le condizioni di accessibilità, benessere ambientale, salvaguardia dell'ambiente e sicurezza.

Il modello per il recupero e la valorizzazione del patrimonio ipogeo si fonda sulle strategie progettuali riferite – alla riconoscibilità delle unità del sottosuolo come appartenenti ad un sistema, alla estensione della fruibilità degli ipogei ad una utenza pubblica, alla scelta di soluzioni architettoniche e tecnologiche sostenibili, alla creazione di percorsi turistici-culturali. La preservazione della natura antropica del territorio e la tutela assoluta da ogni tipo di inquinamento, il rispetto per il patrimonio culturale e paesaggistico restano le condizioni discriminanti per ogni intervento che stabilisca un nuovo equilibrio tra tradizione e innovazione, tra forma e funzione, tra uomo e natura.

BIBLIOGRAFIA

Bosellini A. (2004), *The weastern passive margin of Adria and its carbonate platforms.* Geology of Italy. Special Volume of SGI. IGC32, Florence, pp. 79-92.

Calderazzi A. (2011), *Progettare il sottosuolo. Gli Ipogei di Puglia.* Adda Editore, ISBN 9-7888-8082-991-1, pp.165.

Calderazzi A., Cariello A., Del Re D., Minerva P., Pagliarulo R., Pastore R., Trizzino R. (2013), *Strategie di recupero e valorizzazione del sottosuolo urbano – i casi di Canosa, Gravina e Palagianello in Puglia*. Geologia dell'ambiente. Supplemento al n. 2/2013. ISSN 1591-5352, pp.74- 78.

Chionna A. (1975), *Gli insediamenti rupestri nel territorio di Fasano*. Azienda autonoma di cura, soggiorno e turismo. Fasano, pp. 220.

Dell'Aquila F., Messina A. (1998), *Le chiese rupestri di Puglia e Basilicata*, Adda Editore, ISBN 88-8082-316-7, pp. 305.

Lavermicocca N. (1977), *Gli insediamenti rupestri del territorio di Monopoli*, Istituto di storia dell'arte. Facoltà di lettere e filosofia, Università degli studi di Bari, pp.161.

Pennetta L. (1983), *L'antico reticolo idrografico delle Murge*. Studi Geol. e Geof. Regione Pugliese e Lucana. Bari, 25. pp.1-17.

Petrullo A. V., Agosta F., Prosser G., Rizzo E. (2017), *Cenozoic tectonic evolution of the northern Apulian carbonate platform (southern Italy)* Ital. J. Geosci., Vol. 136, n. 2, pp. 296-311.

Pieri P., Festa V., Moretti M., Tropeano M. (1997), *Quaternary tectonic activity of the Murge area (Apulian Foreland- Southern Italy)* Annali di Geofisica, XL, 5, pp. 1395-1404.

Ricchetti G. (1975), *Nuovi dati stratigrafici sul Cretaceo delle Murge emersi da indagini nel sottosuolo.* Boll. Soc. Geol It., 94, pp. 1083-1108.

Gli ipogei di San Dana (LE). Un sistema rupestre marginale nel Salento meridionale

Stefano Calò
Gruppo speleologico leccese 'Ndronico

Daniela Longo
Università del Salento

The hypogea of San Dana (LE). A marginal cave settlement in Southern Apulia

Parole chiave (*key words*): Puglia (*Apulia*), Salento (*Salento*), insediamenti rupestri (*cave settlements*), ipogei (*hypogea*), cavità artificiali (*artificial cavities*)

RIASSUNTO

Il fenomeno degli insediamenti rupestri, ben attestato non solo in Puglia ma in tutta l'Italia meridionale, con notevoli legami culturali anche con diversi paesi del Mediterraneo, è oggetto di studio sin dagli anni Settanta. Grazie alle ricerche condotte da Cosimo Damiano Fonseca è stato possibile delineare il quadro degli insediamenti rupestri medievali del Basso Salento. La penisola salentina, con le sue piccole alture collinari definite Serre, ha offerto, nel corso del tempo, notevoli opportunità alle comunità umane per la creazione di insediamenti a carattere rupestre o ipogeo ed è proprio lungo i crinali di queste colline che si sono sviluppati i contesti più particolari come villaggi, chiese rupestri e insediamenti rurali di vario tipo spesso caratterizzati da cavità o ipogei adibiti allo sfruttamento e alla lavorazione delle risorse. Il lavoro offre un contributo alla definizione e all' identificazione del panorama rupestre storico del Salento meridionale; attraverso la metodologia del *field survey*, è stato possibile individuare, in un contesto già conosciuto per le sue "peculiarità rupestri e ipogee", nuove cavità artificiali che sono state contestualizzate nel tessuto rurale e per le quali è stato possibile dare un' interpretazione sul loro uso nel corso del tempo e una valutazione circa il loro stato attuale di conservazione.

PREMESSA

Il fenomeno storico del vivere in grotta in Puglia inizia ad essere oggetto di attenzione scientifica a partire dagli anni Settanta. Il quadro degli insediamenti in rupe medievali del Basso Salento (provincia di Lecce) ci è noto soprattutto grazie agli studi di Cosimo Damiano Fonseca i quali sanciscono l'inizio della conoscenza di questo fenomeno dell' area salentina. Prima che si iniziasse a parlare di villaggi e sistemi insediativi rupestri o ipogei l'interesse scientifico per questo fenomeno era concentrato soprattutto verso le chiese in grotta le quali, ritenute "più meritevoli" dal punto di vista artistico e architettonico, furono oggetto di un orientamento accademico estremamente generalista e fine a se stesso che, a partire dalla fine dell'Ottocento, considerò tutte le manifestazioni d'arte "bizantina" in ambiente rupestre come una conseguenza dell' importazione culturale operata dai monaci italo-greci, venuti in territorio italico durante le persecuzioni iconoclaste (Gabrieli, 1936; Medea, 1939). A partire dagli anni Sessanta e Settanta del Novecento si diffonde un nuovo orientamento accademico, l'attenzione inizia a spostarsi dalla sfera religiosa a quella laica e, pian piano, si inizia a dimostrare come molti degli insediamenti rupestri di età storica del Salento altro non sono che l' espressione di una tendenza abitativa non necessariamente legata al fenomeno monastico (Fonseca, 1970-1975; Fonseca *et al*., 1979). Purtroppo, a distanza di più di quarant'anni, non ci sono ancora per questi siti complete indagini sistematiche né topografiche né archeologiche. Sulla base di ciò è stato condotto uno studio analitico che ha permesso di analizzare alcuni ipogei e cavità rupestri artificiali presenti in una parte del Salento orientale. La ricerca, attraverso una revisione critica della letteratura esistente, e tramite l'ausilio di ricognizioni sistematiche e della georeferenziazione GPS, ha prodotto un piccolo censimento di cavità artificiali dal quale è stato possibile analizzarne le caratteristiche architettoniche (grazie anche all'apporto di tecniche fotogrammetriche), valutarne lo stato di conservazione e interpretare il loro utilizzo nelle varie fasi storiche. Inoltre, tale censimento ha contribuito ad aumentare il numero delle cavità già note in quell' area e già presenti nel catasto delle grotte e delle cavità artificiali della Puglia.

IL TERRITORIO

Il Salento, la parte più a sud della penisola pugliese, comprende un territorio molto vasto, che supera i 5000 Km^2, la sua morfologia è caratterizzata dalla presenza di corrugamenti collinari, modellati nei calcari mesozoici del Cretaceo, definiti Serre o Murge salentine. Queste colline, che non superano i 200 m sul livello del mare, seguono una morfologia che si sviluppa a sud di Lecce, con un andamento N-NO/S-SE (Sammarco, Parise, 2011; Calò, 2015). Queste alture, spesso caratterizzate da delle depressioni vallive scaglionate a quote differenti, sono composte da depositi miocenici come le "Calcareniti di Andrano", e sedimenti plio-pleistocenici come le "Calcareniti del Salento e la "Formazione di Gallipoli" (Bossio *et al*., 1989; D'Alessandro, Massari, 1997). Un territorio di questo tipo sicuramente ha favorito, nell' antichità e non solo, la creazione di architetture in negativo, tipiche degli habitat rupestri, considerando la facilità di estrazione e di reperimento di queste formazioni geologiche usate come materiale da costruzione (Sammarco *et al*., 2008). Il piccolo abitato di San Dana, frazione del comune di Gagliano del Capo, è sorto su parte di quella che viene definita appunto Serra di San Dana e si trova a 1,5 km a SE dell' abitato di Montesardo, ad un'altitudine che non supera i 160 metri sul livello del mare. Attualmente l'abitato non conta più di 200 abitanti e la sua estensione occupa piccole zone pianeggianti che si alternano a leggeri rialzi orografici definiti da terrazzamenti, alla base dei quali si sviluppano le cavità artificiali indagate.

CENNI STORICI E FONTI DOCUMENTARIE

Nonostante la loro imponenza dal punto di vista archeologico e paesaggistico questi insediamenti sono afflitti, come la maggior parte degli insediamenti medievali della Terra d' Otranto, rupestri e non, dal problema della carenza di fonti scritte che li riguardino, soprattutto per l'alto medioevo; come è ben noto questo tipo di fonti iniziano ad intensificarsi solo con l' età normanna per poi divenire preponderanti in età angioina, ma tuttavia questo rende molto complicato determinarne effettivamente le varie fasi cronologiche, soprattutto quelle più antiche (Arthur, 1997-2006). San Dana è noto nei documenti notarili medievali già a partire dal XIV secolo (Tasselli, 1963), e spesso viene riportato come un feudo affiancato da altri casali, quali *Valiano*, *Prusano*, *Misciano*, *Santru Dumitri*, *San Nicola e Vinciguerra* e *Arigliano*, che facevano parte del territorio oggi occupato dal comune di Gagliano del Capo (Ciardo, 2004). La tradizione popolare, riportata spesso dagli storici

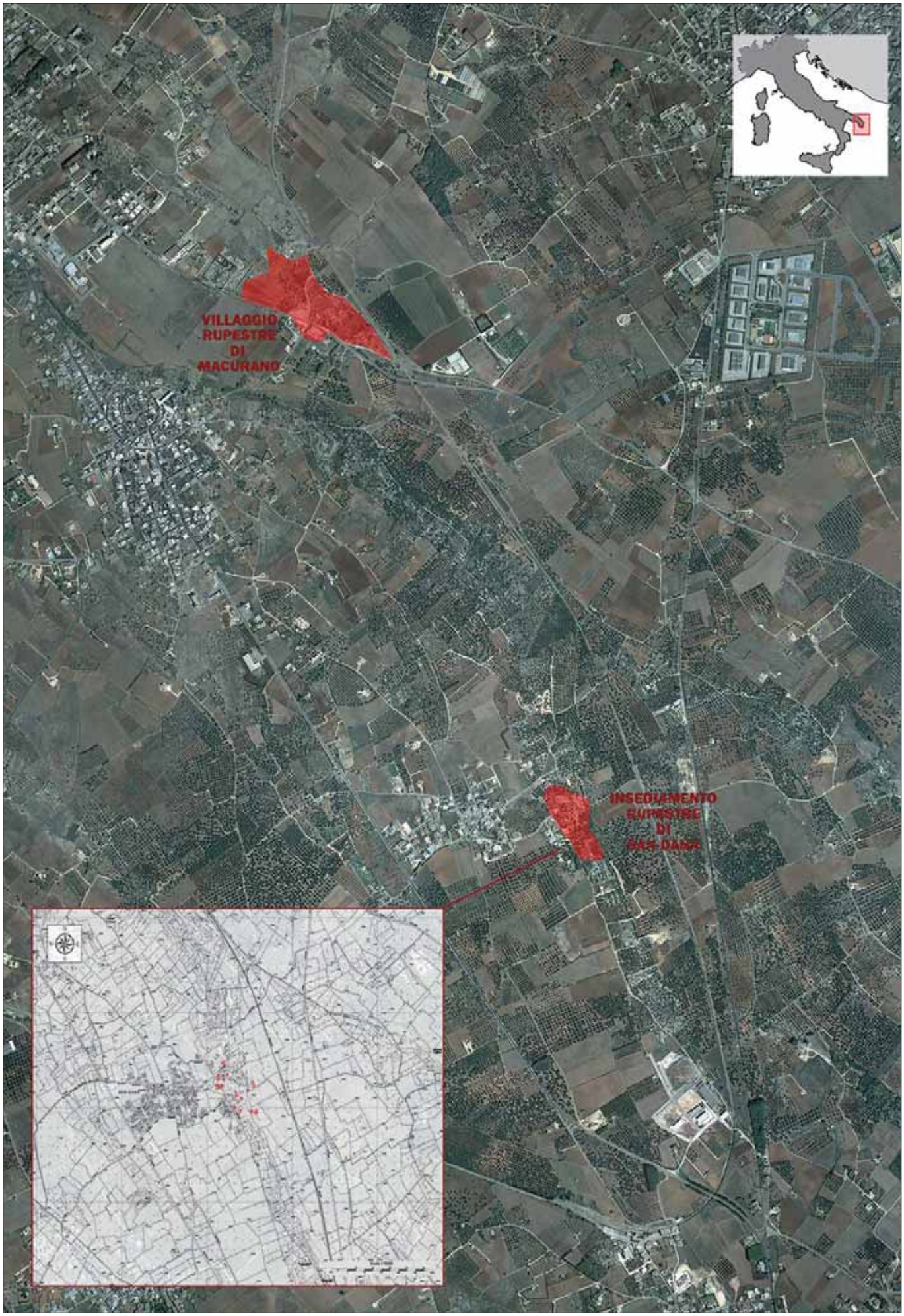


Figura 1 – Rappresentazione topografica dell' insediamento rupestre e del territorio circostante

locali, attribuisce la nascita di San Dana a una leggenda secondo la quale un gruppo di cittadini provenienti dall' antico e imponente centro messapico di Vereto, distrutto intorno al X sec., si spostò nel territorio formando diversi nuovi abitati tra cui San Dana (Biasco, 1979; Rosafio, 1989).

Il nome del casale, sempre secondo la tradizione polare, deriverebbe dall' omonimo Santo, diacono del santuario di S. Maria di Leuca, di origini albanesi, che si trovò a subire il martirio e la morte proprio -in un periodo di tempo non definito- in terra Salentina; la storia a riguardo viene riportata dalle fonti con sfumature e particolari differenti, ma ogni versione considera San Dana come luogo di martirio e morte dell' omonimo Santo (Enciclopedia Sanctorum, Vol. IV, p. 477; Tasselli, 1963; Biasco, 1979; Rosafio, 1989).



Figura 2 – Ingresso della cavità 1

IL SISTEMA RUPESTRE DI SAN DANA E IL CONTESTO ARCHEOLOGICO

Il sistema rupestre di San Dana, attualmente conta 7 cavità artificiali di cui, 4 ipogei usati come luoghi di servizio, 2 frantoi in grotta e una chiesa rupestre. Le cavità o ipogei che dir si voglia sembrano essere state adibite a vari usi -prettamente rurali- e appaiono, per conformazione e posizione, funzionali all'attività dei frantoi sopramenzionati. l'intero insediamento appare completamente integrato nel paesaggio e occupa i declivi terrazzati posti a Est della Serra (*Fig.* 1).

Di particolare interesse è la duplice toponomastica della zona, soprattutto per due motivi – il primo toponimo che identifica il luogo, "*Pareddi*", noto agli storici già a partire dal'600, viene generalmente associato al Santo eponimo Dana, che proprio in queste campagne avrebbe subito il martirio e la morte (Tasselli, 1963; Biasco, 1979; Rosafio, 1989). Il secondo toponimo della zona è "*Aia della Serra*" con il quale vengono appellati anche i frantoi e che ben si associa alle attività rurali del luogo. La presenza di una enorme aia, associata proprio a uno di questi frantoi ipogei, come dopo si dirà, ben inquadra l'importanza produttiva della zona e definisce l'attività di lavorazione delle olive come attività propria del luogo. San Dana infatti è già conosciuta nell' '800 come centro di produzione olearia, tanto che Giacomo Arditi, nella sua *Corografia fisica e storica della Provincia di Terra d'Otranto*, nel 1879, lo identifica come un " *territorio che dà olio, orzo, legumi, poco vino ed altro.*" (p. 529). Molto probabilmente le cavità artificiali erano più numerose di quelle identificate -la popolazione del luogo ne ricorda diverse- sparse a macchia di leopardo nelle campagne circostanti, come anche altri frantoi ipogei, tutti cancellati, a quanto pare, dall' espansione urbanistica. L'intero comprensorio è particolare dal punto di vista archeologico perché, oltre ad alcuni rinvenimenti di strutture d'età romana di III e IV sec. d.C. come una villa provvista di terme (identificata negli anni '70 e scavata nel 2001), a poche centinaia di metri dall' insediamento rupestre analizzato, a circa 2 km di distanza, in direzione NO, vi è il villaggio rupestre di Macurano, noto come un importante centro di produzione olearia nel Medioevo (probabilmente già a partire dall'IX secolo) con ben 5 frantoi in grotta e 31 cavità artificiali tra abitazioni e luoghi di servizio (Ciardo, 2004; Sammarco *et al*., 2008; Calò, 2015).

Le cavità artificiali

La tipologia più ricorrente è la cavità monocellulare con pianta e ingresso rettangolari (*Fig*. 2). Talvolta gli ingressi originali sono definiti da inserti in muratura e sono preceduti



Figura 3 – Rilievo 3D della cavità 1, pianta e vista prospettica



Figura 4 – Cavità 1, interno



Figura 5 – Cavità 5, croce con calvario

da qualche gradino che si collega al piano di calpestio dell' ambiente scavato posto ad una quota leggermente più bassa rispetto all' esterno. Spesso si riscontrano dei fori sul soffitto, usati come prese d'aria o focolari; solo in un caso (cavità n. 2) i fori sono due, uno vicino all'ingresso e un secondo posto in corrispondenza della parte più interna dell'ambiente rupestre. In quasi tutte le cavità censite si risconta la presenza di varie nicchie, di diverse dimensioni, quasi tutte appartenenti alla tipologia delle nicchie a ripiano; talune per dimensione e posizioni possono essere intese come dei ripostigli. Accanto ad esse compaiono nicchie di minute dimensioni interpretabili come vani porta lucerna. Gli ambienti scavati spesso hanno i pavimenti, a tutt'oggi, coperti da interri, più o meno consistenti, ad eccezione della cavità 1 nella quale si riscontra la presenza del piano di calpestio in roccia. Solo in un caso (cavità 4) sul pavimento in roccia risulta scavato un foro rettangolare di 80x 60 cm, con una risega sui bordi; tale foro attualmente è ingombro di detriti e vegetazione infestante che impediscono di capirne la sua utilità, si intravedono solo le pareti che sembrano avere un andamento scampanato, non si esclude che possa essere servito come pozzetto per decantare liquidi o per conservare derrate di vario tipo. Rispetto alle caratteristiche sopradescritte, fa eccezione la cavità 1, l'unico ipogeo ad essere caratterizzato da due ambienti (*Fig.* 3). A questa cavità si accede tramite un piccolo corridoio scandito da alcuni gradini; il primo ambiente, di forma rettangolare, ha un aspetto molto semplice; un enorme foro sul soffitto, vicino l'ingresso consente alla luce di illuminare interamente l'interno. Difficile capire se tale foro, di notevoli dimensioni, sia scaturito da un crollo o sia stato creato in seguito a modifiche apportate all'invaso durante le sue fasi d'uso. Sulla parete destra si nota la presenza di una grande nicchia scavata. Immediatamente dopo l'ingresso vi è una piccola fossa sul pavimento di forma globulare (Questa fossa ricorda le fove delle abitazioni rupestri dell'arco ionico tarantino; cfr. Caprara, 2001).

Il secondo ambiente ha un profilo circolare ed è separato dal primo da un inserto di roccia sul cui fronte compaiono due piccole nicchie (*Fig.* 4). Lo studio dello scavo dell'intera cavità lascia immaginare che l'ipogeo sia stato realizzato inizialmente con un solo vano ma che poi, in seguito anche al cambiamento della destinazione d'uso, sia stato ampliato con il secondo vano circolare e forse anche con il grande foro sul soffitto.

Scarso risulta il repertorio epigrafico dei graffiti sulle pareti delle cavità, riconducibili esclusivamente al tipo della croce semplice o con calvario, quest'ultima individuata solo nella cavità 4 (*Fig.* 5).



Figura 6 – Cavità 5, frantoio, interno (foto di G. Tonti)



Figura 7 – Cavità 5, frantoio, vasche di decantazione



Figura 8 – Cavità 6, frantoio, ingresso

I frantoi ipogei

Nell' area indagata sono stati identificati due frantoi ipogei o in grotta (cavità 5 e 6); di questi il primo, che è posto a poco più di 50 m dalla cavità 1, è quello più ampio. Internamente è caratterizzato da un grande vano al quale si collegano piccoli ambienti di servizio, alcuni identificati da dei muretti realizzati in pietrame e bolo a base di terra rossa (*Fig*. 6). Nel grande vano principale si conservano ancora resti di macine, gli incavi per l'alloggiamento dei torchi alla calabrese e sul pavimento si riconoscono diverse vasche per la decantazione dell' olio e per la raccolta dei residui di lavorazione delle olive (*Fig*. 7; sulla tipologia e sulle caratteristiche dei frantoi in grotta del Salento si vedano Monte, 1995-2000).

Poco distante dall'ingresso del frantoio, a circa 40 m in direzione NO vi è una enorme aia, del diametro di circa 10 m, ricavata sulla pietra levigata e delimitata da blocchi di calcare locale, attorno alla quale si notano alcune incisioni per canalizzare l'acqua.

A circa 120 m NO dal primo frantoio, una enorme apertura nella roccia, che si affaccia su un canalone, immette in ampio vano, anche in esso si notano sul pavimento varie vasche di decantazione e sulla base ciò che resta di alcune parti di arredo anche questa cavità può essere interpretata come frantoio (il secondo della zona, *Fig*. 8); purtroppo le attuali condizioni dell'invaso, ridotto ormai a discarica, non permettono ulteriori e più approfondite valutazioni; ciò che si può ipotizzare è che forse, la cavità nasce come naturale e poi viene ampliata e razionalizzata nel corso del tempo.

Questi due frantoi in grotta non dovevano essere gli unici presenti in zona; gli abitanti del luogo infatti ne ricordano un terzo cancellato dall' espansione urbanistica.

La "cripta" di S. Apollonia

La cosiddetta "cripta" di S. Apollonia (cavità 7, PUCA_990, *Figg*. 9-10), è l'unico edificio di culto ipogeo identificato nella zona ed è' stata scavata sul lato Est della serra. Non ha una struttura definita ed è impossibile comprenderne le fattezze originarie per via degli innumerevoli interventi che l'hanno caratterizzata nel corso della storia. L' accesso conduce direttamente nella camera centrale senza copertura, attorno alla quale sono state create tre zone – una stanza o celletta con un grande sedile in pietra (*Fig*. 11) e soffitto in mattoni (un rifacimento moderno in seguito a un crollo) rivolta a S/SE, una grossa nicchia con gradino sedile, e una zona con degli affreschi e notevoli azioni di riempimento che nascondono la parete originale. Al centro del grande ambiente compare un enorme pilastro di pietra collegato al soffitto il quale risulta molto irregolare. Sulle pareti, gli affreschi, ormai in avanzato stato di degrado, sono di



Figura 9 – Cripta di S. Apollonia, interno



Figura 10 – Cripta di S. Apollonia, lato Sud



Figura 11 – Cripta di S. Apollonia, sedile in pietra

fattura molto popolare e scadente; realizzati in epoca settecentesca rappresentano due Vergini con Bambino, una crocifissione appartenente ad una Trinità, un San Francesco ritratto nell' atto di ricevere le stigmate, e S. Apollonia su cui vi è la scritta 1758 che data l'intero apparato pittorico (*Figg*. 12-13); diverse trace di pittura compaiono anche sul pilastro e su una parte del soffitto (Fonseca *et al*., 1979, p. 187-188).

Come Cosimo Damiano Fonseca già notò alla fine degli anni Settanta, l'ipogeo è probabile che non sia nato con finalità cultuali. La presenza della celletta con il sedile in pietra e l'impossibilità di ascrivere questo invaso nella categoria delle cavità di uso civile, indussero lo stesso Fonseca a identificare questa chiesa ipogea come un piccolo eremo, nato in un tempo non definibile, completamente trasformato e adattato poi ad un altro scopo (Fonseca *et al*., 1979, p. 188). Attualmente, sia le fonti che gli elementi archeologici non consentono di dimostrare l'esistenza di presenze monastiche nella zona e benché la presenza di un seggio litico di quel tipo tenda a rimandare al monachesimo in rupe non è elemento sufficiente per poter affermare un uso monastico dell' ipogeo, considerando anche il fatto che lo stesso invaso non avendo una forma definita non è paragonabile ad altri monasteri o cenobi in rupe pugliesi, come ad esempio quelli del tarantino (cfr. Caprara, 2001)[1]. Quello che è oggettivamente rilevabile è che probabilmente la cosiddetta cripta sia più antica di quello che sembra, anche se non è possibile capirne né la forma né la funzione originarie; per certo si possono riconoscere almeno tre strati di affresco sovrapposti – quello più superficiale settecentesco (con diverse sovra dipinture); uno intermedio, probabilmente di pieno XVI secolo a cui appartiene la raffigurazione della Vergine posta sulla parete a sinistra nella parte più interna dell' invaso (*Fig*. 12) e uno più antico che poggia direttamente sulla superficie lapidea e che corrisponde al primo ciclo pittorico che ha caratterizzato la cavità; purtroppo ciò che resta di questo strato di affresco non fornisce attualmente elementi utili per la sua datazione.

Ribadendo il concetto che, al momento, non siamo in grado di determinare le origini cronologiche della cavità, si può ben affermare con certezza che ad un certo punto della storia (probabilmente dal XVI secolo in poi) vi

1 Nel Salento, la presenza di un altro seggio litico all'interno di un ipogeo è stata identificata nel sito dell' antica abbazia di San Nicola di Macugno, presso Neviano, LE; in questo caso l'associazione con il monachesimo medievale è dimostrata dalle fonti, anche se ancora permangono dubbi sull'uso esclusivamente monastico dell'ipogeo in questione in quanto le indagini archeologiche hanno dimostrato l'esistenza di fasi di frequentazione civili; cfr. Calò, 2015.



Figura 12 – Cripta di S. Apollonia, affresco della Vergine con Bambino

sono state diverse e importanti trasformazioni architettoniche che hanno portato l'invaso ad avere l'aspetto che presenta al giorno d'oggi e da cui si deduce l'esigenza, da parte della comunità del luogo, di aver un luogo di culto definito (Calò, 2015, pp. 133-134). Inoltre la committenza privata e laica dell' edificio si evince bene non solo dalla tipologia degli affreschi, di fattura popolaresca e appartenenti ad una mano non molto esperta, ma anche dalla presenza di una piccola sepoltura posta all'interno dell'invaso (situazione frequente nelle chiese rupestri Salentine; cfr. Falla, Castelfranchi, 1991, pp. 89-90).

Le strade

Nella zona sono presenti diversi solchi e tracce di carraie -di dimensione variabi-



Figura 13 – Cripta di S. Apollonia, affresco della santa omonima

le- che si intrecciano in un reticolo di piccoli sentieri, collegati a loro volta con la viabilità maggiore che circonda il declivio su cui vi sono le varie cavità. Non molto distante dall'ingresso di uno dei frantoi (cavità n. 5) vi è un tratturo scavato nella roccia che si conserva per circa 50 metri nel banco roccioso. Tutti questi elementi, se contestualizzati e messi in relazione dal punto di vista topografico, sembrano svilupparsi tutti in direzione Nord, verso il villaggio rupestre di Macurano, che dista dal nostro insediamento non più di 2 km in linea d'aria. Ovviamente queste tracce di viabilità individuate hanno una datazione incerta, probabilmente a causa della prolungata fase d'occupazione dell'area, inoltre, la collocazione topografica di alcune di esse e il loro andamento rimanderebbero ad una fase di realizzazione più antica dell'insediamento rupestre indagato.

LO STATO DI CONSERVAZIONE

A causa dell' abbandono e dell' incuria, per alcune delle cavità di cui si è parlato, sono state rilevate delle problematiche che minano il loro stato di conservazione. Durante l'indagine si è preso coscienza di come alcuni fattori ambientali quali la vegetazione infestante e incontrollata, l'esposizione agli agenti atmosferici e non per ultima, l' espansione urbanistica, abbiano influito sulla conservazione delle varie unità rupestri e ipogee. La cavità n. 4 ad esempio, a causa proprio della vegetazione risulta non facilmente accessibile e all'interno le radici degli alberi si sono sviluppate a tal punto da intaccare il pavimento e le pareti rocciose provocando delle fessurazioni sulle pareti che potrebbero compromettere l'integrità dell' invaso; tale situazione di fessurazione, dovuta ai medesimi motivi è stata riscontrata anche in uno dei frantoi (cavità n. 5). La continua esposizione agli agenti atmosferici ha poi comportato una costante infiltrazione di acqua che ha portato alla formazione di muffe e vari microrganismi che hanno intaccato la superficie della roccia, e hanno favorito il distacco -come nel caso della cripta di S. Apollonia- delle superfici affrescate.

OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

L'insediamento analizzato si configura come un nucleo di ipogei e cavità completamente integrato nel paesaggio. Accantonata definitivamente la teoria che ha visto alcune di queste cavità come espressione del monachesimo eremitico - tesi non dimostrata né dimostrabile - e premettendo che allo stato attuale è impossibile far risalire ogni cavità ad una cronologia definita per la mancanza di scavi sistematici che le riguardano, è tuttavia possibile individuare un uso che sembra accomunare, almeno per una fase cronologica, tutte le cavità prese in esame.

Sulla base di diversi elementi – come il materiale archeologico di superficie – è altamente probabile che la loro origine sia antica e che sia perpetuata nel tempo, sicuramente a fasi alterne, coprendo un arco di tempo che potrebbe andare dal tardo medioevo fino sicuramente all' età moderna. Con molta probabilità lo sfruttamento maggiore di queste cavità, che si può costatare archeologicamente, è avvenuto tra XVI e XVIII secolo e a dircelo sono – le pitture della cripta di S. Apollonia datate al 1758 (*Fig.* 13), la presenza dei frantoi in grotta, realizzati secondo una tipologia usata tra 500 e 600 fino addirittura all'800, e l'identificazione di materiale fittile di epoca sia basso che e post medievale e anche moderna, ascrivibile a impasti acromi di contenitori d'uso comune, nei pressi di alcune cavità. Molto probabilmente, quindi, ci troviamo davanti ad un insediamento a carattere rurale che trova la sua ragion d'essere nella presenza dei frantoi ipogei che fanno del luogo una zona di trasformazione e produzione delle risorse rurali. Gli scopi d'uso di alcune cavità sono abbastanza chiari, vi sono una stalla (cavità 3) e dei depositi di attrezzi o derrate (cavità 2-4), che possono aver avuto anche una funzione abitativa e di ricovero (cavità 1-4). Ad usufruire di queste cavità è stata la comunità locale di San Dana che, sfruttando questo insediamento almeno dal '500 finanche all' 800, ha poi scelto come luogo di culto (e probabilmente anche di aggregazione e di identificazione) la cripta di S. Apollonia, cripta probabilmente già esistente ma poi plasmata e adattata alle esigenze e ai gusti religiosi della gente di quell' epoca. Considerando tutto ciò si può dedurre che tale insediamento ha avuto come attività principale la produzione olearia, collocandosi nel territorio in una posizione marginale rispetto ad altri sistemi rupestri come quello di Macurano; la marginalità dell'insediamento rupestre di San Dana, non è un caso isolato nel Salento, ipogei e cavità artificiali diffuse o collocate "marginalmente" rispetto ai sistemi urbani maggiori si trovano da Nord a Sud nella provincia di Lecce, basta vedere gli aggrottamenti artificiali nei canali di Leuca, o quelli nei dintorni di Lecce (Sammarco, 2000, Sammarco, Parise, 2011; Sammarco, Calò, Parise, 2017).

Le conclusioni a cui si è approdati con questo studio potranno essere confermate o smentite solo con degli scavi archeologici e ulteriori indagini sistematiche, volti non solo a capirne la natura ma anche indirizzati a fermare l'avanzato degrado in cui versano queste cavità.

BIBLIOGRAFIA

Arditi G. (1879), *Corografia fisica e storica della Provincia di Terra d'Otranto*, Lecce.

Arthur P. (1997), *Tra Giustiniano e Roberto il Guiscardo. Approcci all'archeologia del Salento in età bizantina,* in *I Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*, Pisa, 29-31 maggio 1997, Firenze 1997, pp. 194-199.

Arthur P. (2006), *L'archeologia del villaggio medievale in Puglia*, in – M. Milanese (a cura di), *Vita e morte dei villaggi rurali tra medioevo ed età moderna*. Quaderni dei villaggi abbandonati della Sardegna, 2, Firenze, pp. 97-121.

Biasco A. (1979), *San Dana nella storia del Capo di Leuca*, Padova.

Bossio A., Mazzei R., Monteforti B., Salvatorini G. (1989), *Studi su Neogene e Quaternario della Penisola Salentina. II – Evoluzione paleogeografia della area di Leuca nel contesto della dinamica mediterranea*, Atti Convegno sulla conoscenze geologiche del territorio salentino, Lecce, 12 dicembre 1987, pp. 31-47.

Calò S. (2015), *Paesaggio di pietra. Gli insediamenti rupestri delle serre salentine*. Roma, Arbor Sapientiae Editore.

Caprara R. (2001), *Società ed economia nei villaggi rupestri. La vita quotidiana nelle gravine dell'arco Jonico Tarentino*, Fasano.

Ciardo M. (2004) *La storia di Gagliano del Capo dall' età Romana al Medioevo*, Tricase (Le).

D'alessandro A., Massari F. (1997), *Pliocene and Pleistocene depositional environments in the Pesculuse Area (Salento, Italy)*, Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia, 103 (2), pp. 221-258.

Falla Castelfranchi M. (1991), *Pittura monumentale bizantina in Puglia*, Milano.

Fonseca C. D.(1970), *Civiltà rupestre in Terra Jonica*, Milano - Roma.

Fonseca C. D (1975), *La civiltà rupestre medievale nel Mezzogiorno d'Italia. Ricerche e problemi*. Atti I Convegno Internazionale di Studi sulla Civiltà Rupestre Medioevale nel Mezzogiorno d'Italia (Mottola-Casalrotto 1971), Genova.

Fonseca C. D., Bruno A.r., Ingrosso V., Marotta A. (1979), *Gli Insediamenti Rupestri Medievali Nel Basso Salento*, Galatina.

Gabrieli G. (1936), *Inventario topografico e bibliografico delle cripte eremitiche casigliane di Puglia*, Roma.

Medea A. (1939), *Gli affreschi delle cripte eremitiche pugliesi*, Roma.

Monte A. (1995), *Frantoi ipogei del Salento*, Lecce.

Monte A. (2000), *Le miniere dell'olio liquido. Archeologia industrial in Terra d'Otranto – I frantoi ipogei*, Lecce

Rosafio V. (1989), *Cenni storici di Macurano, casale scomparso, di San Dana nel capo di Leuca*, Tricase (Le).

Sammarco M. (2000), *Gli insediamenti rupestri nel Capo di Leuc*a, Galatina.

Sammarco M., Parise M, Donno G.p., Inguscio, S. Rossi E. (2008), *Il sistema rupestre di località Macurano presso Montesardo (Lecce, Puglia),* Atti VI Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali - Napoli, 30 maggio - 2 giugno 2008, Opera Ipogea 1/2, pp. 273-282.

Sammarco M., Parise M. (2011), *Insediamenti rupestri nel basso Salento (Lecce, Puglia).* Atti del VII Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali, Urbino 4-8 dicembre 2010, Opera Ipogea 1-2, pp. 27-36.

Tasselli L. (1693), *Antichità di Leuca città già posta nel Capo salentino, de' luoghi delle Terre e d'altre città del medesimo Promontorio*. Lecce.

Privata Traiani domus. Elaborazioni 3D, ricerca e fruizione

Privata Traiani domus. 3D modeling, research and cultural heritage enhancement

Parole chiave (*key words*): Sovrintendenza Capitolina (*Sovrintendenza Capitolina*), mostra Traiano (*Trajanus exhibit*), beni culturali (*cultural heritage*), ipogei di Roma (*Roman hypogea*), Colle Aventino (*Aventinus Hill*), Privata Traiani Domus (*Privata Traiani Domus*), modellazione 3D (*3D modeling*), fotogrammetria (*photogrammetry*), affreschi (*roman fresco*), pareti e volte dipinte (*Roman wall and vault paintings*), valorizzazione

Elisabetta Carnabuci
Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali
E-mail: elisabetta.carnabuci@comune.roma.it

Federica Michela Rossi
Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali,
E-mail: federicamichela.rossi@comune.roma.it

Stefano Calò
Gruppo speleologico leccese 'Ndronico
E-mail: calostefano@hotmail.it

Elettra Santucci
Associazione Roma Sotterranea
E-mail: elettra.santucci@gmail.com

PREMESSA

L'immenso patrimonio archeologico della città di Roma resta a volte nascosto all'interno di siti ipogei, celati agli occhi dei visitatori perché di difficile accesso. Grazie alle nuove tecnologie le recenti tecniche di rilievo permettono di ottenere modelli tridimensionali con immagini fotografiche dettagliate, rendendo tali ambienti virtualmente accessibili per scopi legati alla ricerca e alla fruizione. In occasione della mostra dal titolo: "Traiano. Costruire l'impero, creare l'Europa"(Roma, Mercati di Traiano, 29.11.17-16.09.18) su committenza della Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali è stato prodotto un elaborato 3D degli ambienti ipogei della *Privata Traiani domus*, finalizzato alla conoscenza del sito attraverso video rendering divulgativi. I prodotti ottenuti rappresentano uno strumento fondamentale per il percorso conoscitivo del monumento, e costituiscono un primo passo verso la valorizzazione del sito, permettendo la realizzazione di elaborati di dettaglio finalizzati a futuri interventi di riqualificazione e restauro (in particolare, per la Sovrintendenza Capitolina la campagna di documentazione del complesso è stata coordinata da Elisabetta Carnabuci, funzionario responsabile del monumento e da Federica Michela Rossi; l'attività di ispezione e documentazione, coordinata da Luca Antognoli, è stata realizzata nei mesi di aprile 2016 e giugno-settembre 2017 da Elettra Santucci, Ivano Stranieri, Stefano Calò e Tullio Bernabei. Tale esplorazione è stata condotta in proficua collaborazione con i tecnici di ACEA, e in particolare con l'Ing. Alessandro Teodori).

LA PRIVATA TRAIANI DOMUS

Gli ambienti ipogei noti con il nome di *Privata Traiani domus* si trovano oggi a oltre dieci metri sotto l'attuale quota di calpestio. Sono accessibili attraverso un pozzetto situato in Piazza del Tempio di Diana (*Fig.* 1), che si sviluppa verticalmente per quattro metri dal livello stradale e raggiunge la sommità delle volte, dove una scala metallica permette di superare un dislivello di altri sei metri, fino alla quota pavimentale degli ambienti.

Le attività di studio del sito archeologico, avviate nel 2016 dalla Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali in collaborazione con l'Associazione Roma Sotterranea (l'Associazione dall'anno 2000 si occupa dello studio, la documentazione e il rilievo di ambienti ipogei di interesse archeologico), si sono rese possibili solo grazie a specifiche procedure di sicurezza messe in atto durante tutte le fasi del cantiere, al fine di garantire in ogni momento l'incolumità degli operatori. A causa delle evidenti difficoltà di accesso, il sito è infatti assimilabile a uno "spazio confinato" e le esplorazioni al suo interno sono state effettuate da operatori specificamente formati per operare in cavità artificiali nel rispetto delle attuali norme in merito alla salute e sicurezza sul lavoro (per una puntuale descrizione delle procedure di sicurezza adottate cfr. in questo volume: *Le tecniche per operare in sicurezza in spazi confinati applicate nel progetto di studio e recupero* "Forma Aquae Maxentii").

Lo studio del monumento della *Privata Traiani domus* ha comportato attività preliminari quali l'ispezione dei luoghi (*Fig.* 2) e la verifica della fattibilità degli interventi, a seguito delle quali sono iniziate le operazioni volte ad acquisire materiale documentario aggiornato, tra cui una documentazione video-fotografica di dettaglio e un rilievo topografico eseguito con stazione totale. Questo ha permesso la realizzazione di una pianta aggiornata (*Fig.* 3) e la corretta localizzazione delle strutture archeologiche sulla plani-



Figura 1 – Colle Aventino, inquadramento del sito (foto satellitare da Bingmaps)

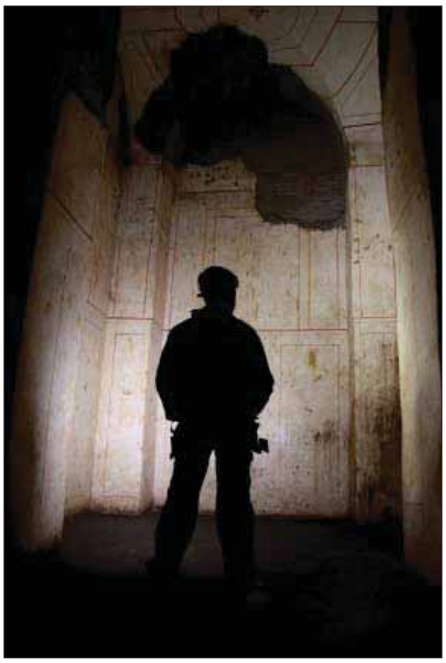


Figura 2 – Ispezione preventiva degli ambienti della Privata Traiani domus *(foto E. Santucci)*

metria catastale. In occasione della mostra: "Traiano. Costruire l'impero, creare l'Europa", dedicata all'imperatore Traiano, il progetto di documentazione e di studio del complesso edilizio è stato integrato, per la prima volta, con la realizzazione di un rilievo fotogrammetrico, basato sull'acquisizione del dato fotografico. Questo ha permesso di ottenere un rilievo tridimensionale del sito ipogeo (*Fig.* 4), con immagini fotografiche dettagliate, e la realizzazione di video rendering, restituendo in tal modo al sito la possibilità di fruizione

Il complesso appare di particolare interesse per la ricostruzione storico-topografica dell'Aventino e per una maggiore conoscenza della figura di Traiano, dal momento che, secondo l'opinione diffusa, dovrebbe trattarsi di una porzione della più ampia dimora privata dell'*Optimus Princeps* abitata prima di diventare imperatore (sulla *Privata Traiani domus* si veda Lanciani 1870; Coarelli 1984; La Follette 1985; La Follette 1994; Chini 1997; Chini 1999; Coarelli 1999; La Follette 1999; Chini 2005; Chini 2010; Bruno 2012, p. 405.

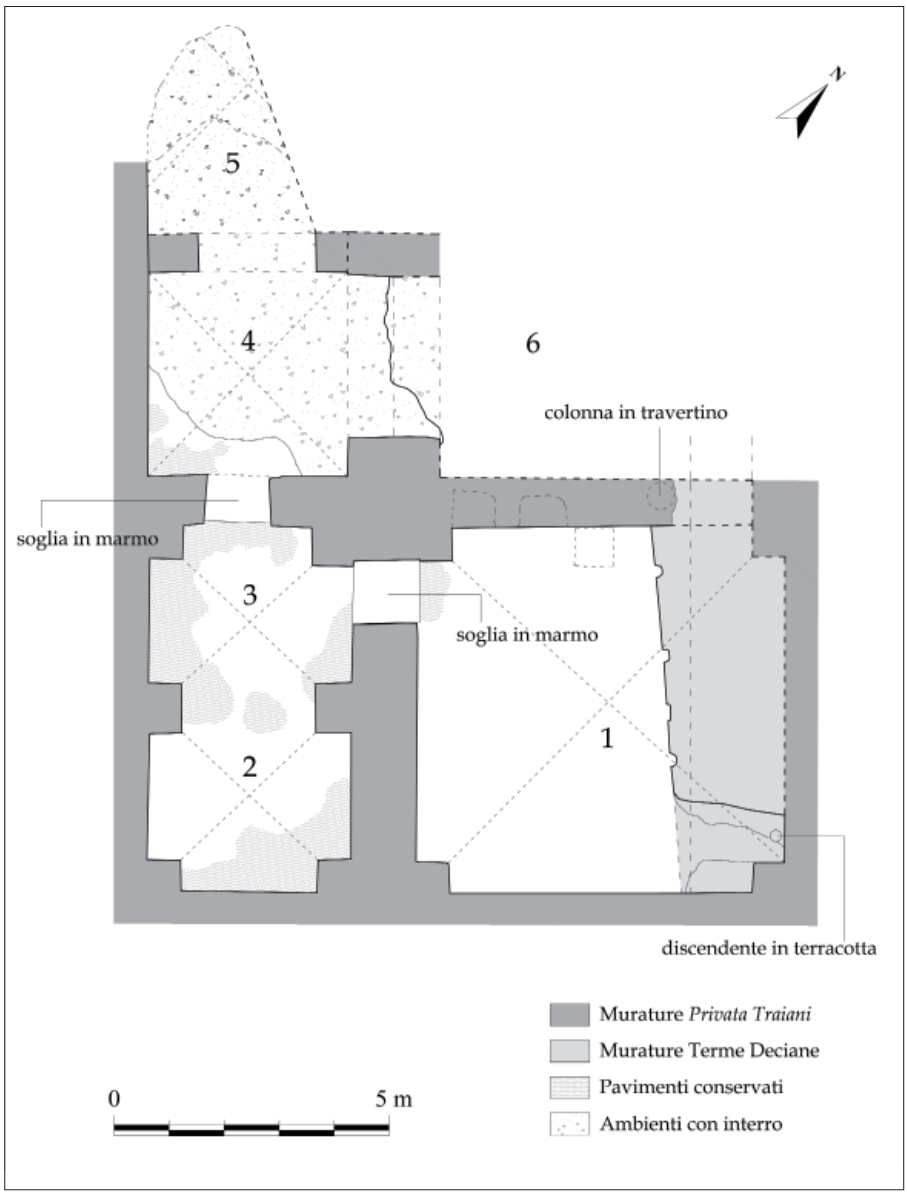


Figura 3 – Pianta della Privata Traiani domus *(elaborazione grafica E. Santucci, rilievo Roma Sotterranea)*

da parte della collettività. Gli elaborati grafici bidimensionali di dettaglio ottenuti, come le ortofoto, mostrano lo sviluppo lineare degli ambienti (*Fig.* 5). Questo strumento si è rivelato fondamentale anche durante le fasi di studio delle strutture, permettendo un'accurata analisi delle superfici anche agli studiosi ai quali, è interdetto l'accesso per motivi di sicurezza. I prodotti ottenuti costituiscono inoltre uno strumento utile per il monitoraggio indiretto del monumento.

Per l'identificazione, ormai superata, del monumento con il complesso rinvenuto a più riprese al di sotto della Chiesa di Santa Prisca, si veda Vermaseren, Van Essen 1955-1956; Vermaseren, Van Essen 1965. Per un riesame della questione, cfr. Carnabuci, Rossi 2017). Occorre tuttavia evidenziare che l'esame stilistico delle pitture lascia ipotizzare un ambito cronologico più tardo, compreso tra l'età antonina e l'età severiana. In questa contesto, tuttavia, sono chiaramente visibili lacerti pavimentali e strutture murarie, riconducibili ad un preesistente assetto monumentale.

Con ogni probabilità gli ambienti conservati sotto la Piazza del Tempio di Diana (riportati casualmente alla luce negli anni Venti del Novecento, in occasione della posa in opera di una fognatura nell'area della piazza) facevano parte di un più ampio complesso, da collegare con quello riportato alla luce a più riprese nell'area dell'attiguo Casale Torlonia (Coarelli 1984, pp. 162-163; La Follette 1985, pp. 143-144; Quaranta 2011, p. 1141 ss.).

DESCRIZIONE E CRONOLOGIA DEGLI AMBIENTI

Le tecnologie utilizzate hanno consentito di iniziare lo studio del sito e della sequenza cronologica delle strutture, analizzando gli ambienti divenuti virtualmente accessibili e proponendo un aggiornamento della documentazione grafica rispetto a quella esistente. Le centinaia di foto scattate per la realizzazione del modello inoltre, hanno permesso di esaminare in modo puntuale le pitture che decorano le volte e le pareti, modificando in parte la datazione tradizionalmente accettata. Il modello 3D, rendendo possibile la restituzione puntuale delle altissime volte, poste ad oltre 6 metri dal piano pavimentale (*Fig.* 6), ha evidenziato anche importanti e rari dettagli costruttivi delle stesse, contribuendo alla conoscenza della tecnica delle centine lignee rivestite di mattoni. La possibilità poi di misurare precisamente ogni dettaglio utile e di creare sezioni nei punti di particolare interesse, ha permesso una conoscenza approfondita della struttura, impensabile fino a poco tempo fa.

Il sito è composto da 6 stanze in sequenza (*Fig.* 3) che costituiscono presumibilmente solo l'angolo meridionale di un edifico molto più esteso e complesso (una più ampia trattazione sul monumento è in Carnabuci, Rossi 2017).

Il primo vano (*Fig.* 4A.1), in cui si accede tramite una ripida e lunga scaletta a due rampe, è il più grande conservato, ha una pianta quadrata ed è caratterizzato da pilastri angolari che sostengono una volta a crociera. Le pareti, come detto altissime (l'ambiente risulta essere il più alto, m. 6,30, tra quelli conservati), conservano una decorazione pittorica a fondo bianco che scandisce con fasce rosse le partizioni architettoniche e l'impronta di una zoccolatura marmorea, di cui resta solo un breve lacerto. Il disegno delle pareti è composto in particolare da una fascia con elementi geometrici su cui poggiano dei sottili ed elegantissimi candelabri verdi, in primo piano che attraversano in altezza tutta la parete e dividono lo spazio in tre pannelli, tutti arricchiti da quadretti centrali. Questi, privi di cornice e quasi sospesi, rappresentano ai lati, dei paesaggi, detti idillico-sacrali (*Fig.* 7A)

(sulla nozione di paesaggio idillico sacrale vedi La Rocca 2008, pp. 34-38), mentre nel pannello centrale, nature morte (*Fig.* 7B).

Nella parte alta delle pareti, appena sotto la volta, sono le lunette decorate da elementi geometrici, ormai solo un ricordo di schemi architettonici. La decorazione della volta, poco conservata e simile alle lunette, è arricchite da snelle ghirlande vegetali con fiori rossi.

Tutto lo schema decorativo descritto rimanda ad esempi pittorici da Ostia inquadrabili in età antonina (138-161 d.C.), sia per la composizione generale che per lo stile (Falzone 2007, pp. 90-95, *Figg.* 45-46).

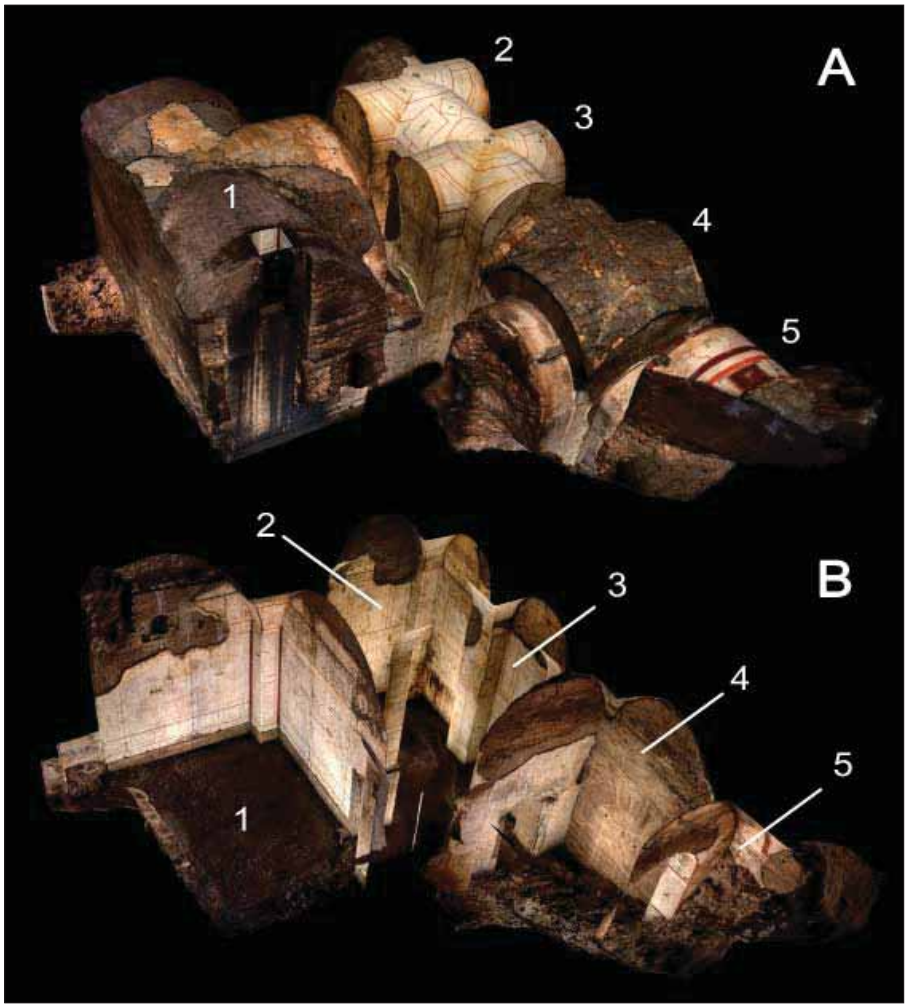


Figura 4 – Modello 3D della Privata Traiani domus *(elaborazione da rilievo fotogrammetrico tridimensionale di S. Calò, E. Santucci)*

La stanza inoltre conserva lungo tutto il lato nord-orientale una poderosa struttura muraria di fondazione che la taglia proseguendo verso NO. La muratura in cementizio, con ogni probabilità pertinente alle soprastanti Terme Deciane (La Follette 1985; La Follette 1994; La Follette 1999, con bibliografia precedente; Bruno 2012, p. 408) datate al 250 d.C., è in parte gettata in cassaforma e mostra ancora le impronte dei ritti e delle tavole lignee. Inglobata nel cementizio è anche parte di un discendente in terracotta relativo alle terme. La fondazione si appoggia direttamente contro il muro originario della stanza 1 ancora affrescato ma già molto lacunoso nella superficie pittorica e nella zoccolatura marmorea.

Sul lato NO del vano, proprio grazie allo scasso realizzato per l'ingombrante passaggio delle strutture del complesso termale, è visibile un'alta colonna liscia in travertino inglobata nella parete affrescata. Si può presumere così che in una prima fase questo lato dell'ambiente fosse scandito da colonne (purtroppo il settore a NO, l'ambiente 6, oggi non è ispezionabile in quanto al suo interno è stata costruita una vasca moderna in muratura, probabilmente in relazione ai grandi interventi edilizi del 1925-30, cfr. Quaranta 2011, pp. 1133-1134).

Alla stessa fase costruttiva precedente potrebbe anche essere riferita una muratura in blocchetti rettangolari di tufo nella parte inferiore della parete di fronte, costituita nella metà superiore da cortina laterizia.

Nell'angolo occidentale dell'ambiente 1 è presente una piccola porzione di pavimento in tessellato monocromo bianco a tessere piuttosto grandi, oggi appena visibile a ridosso di una soglia in marmo che sottolinea il passaggio all'ambiente 3. L'apertura di questa porta deve essere stata praticata sicuramente dopo la decorazione della stanza 1, in quanto ne interrompe bruscamente lo schema. La pareti del passaggio e di quello che collega il vano 3 al 4, sempre con soglia e fuori asse, sono decorate con una testa di Satiro (*Fig.* 8A) e una di Gorgone (*Fig.* 8B), inquadrate da un pannello rettangolare rosso su fondo bianco. Queste teste in posizione isolata al centro di pannelli sono molto frequenti in schemi a fondo bianco di epoca tardo antonina, seconda metà del II secolo (Falzone 2007, p. 118, *Fig.* 67).

Attraversando la porta si entra così nei vani 2/3 (*Figg.* 3, 5.2-3, 10.2-3) che costituiscono in realtà un'unica stanza a pianta rettangolare allungata e occupano l'angolo meridionale dell'edificio. Anche in questo caso gli angoli del vano sono occupati da rinforzi a pianta quadrata i quali, insieme ad altri due pilastri al centro dei lati lunghi, hanno la funzione di sostenere le due volte a crociera che coprono l'ambiente. In questo modo la stanza, ristretta nel mezzo, è anche divisa in due zone differenziate: una di passaggio e funzionale ai percorsi interni e l'altra a Sud, priva di finestre, molto più appartata (per un simile assetto planimetrico vedi Barbera 1996, p. 86).

In entrambi gli ambienti, come in tutte le stanze, la pavimentazione a mosaico è appena visibile ma appare costituita anche qui da un tessellato monocromo bianco a tessere piuttosto grandi.

Le pareti, prive di zoccolatura sono suddivise orizzontalmente in due registri uguali mediante due linee rosse continue di spessore diverso; il fondo bianco è scandito da riquadri delimitati da fasce sottili che seguono e sottolineano le partizioni architettoniche della stanza. Sulla parte bassa sono presenti su ogni parete due pannelli rettangolari suddivisi da un alto candelabro verde, filiforme e schematico, che si ripete anche sui lati frontali dei pilastri che restringono la stanza. Al centro dei riquadri campeggiano soggetti animali, o vegetali (*Figg.* 5.2-3, 8C) Il secondo registro è invece occupato da un unico riquadro centrale ornato al centro da un ramo pendente di fiorellini. Completano la decorazione le lunette, nelle quali compare un candelabro vegetale con tralci fogliati, nastri e ghirlande.

La doppia volta a crociera (*Figg.* 4A.2-3, 6) mostra uno schema concentrico a pianta circolare e ottagonale, realizzato con linee colorate e di diverso spessore, che creano l'illusione di due cupole poligonali con elemento vegetale centrale. Questo sistema decorativo integrato di pareti e volte si inserisce nel quadro della cd pittura lineare trovando confronti a partire dall'età tardo antonina (Le Bruyne 1968, pp. 81-85, *Figg.* 1-3, Hoestetter *et al.* 1994, p. 140, *Fig.* 25, Falzone, Vitti, Ungaro 2010, tav. CLXXVI).

Si entra poi nella stanza 4 dove è evidente, come la decorazione parietale risulti molto

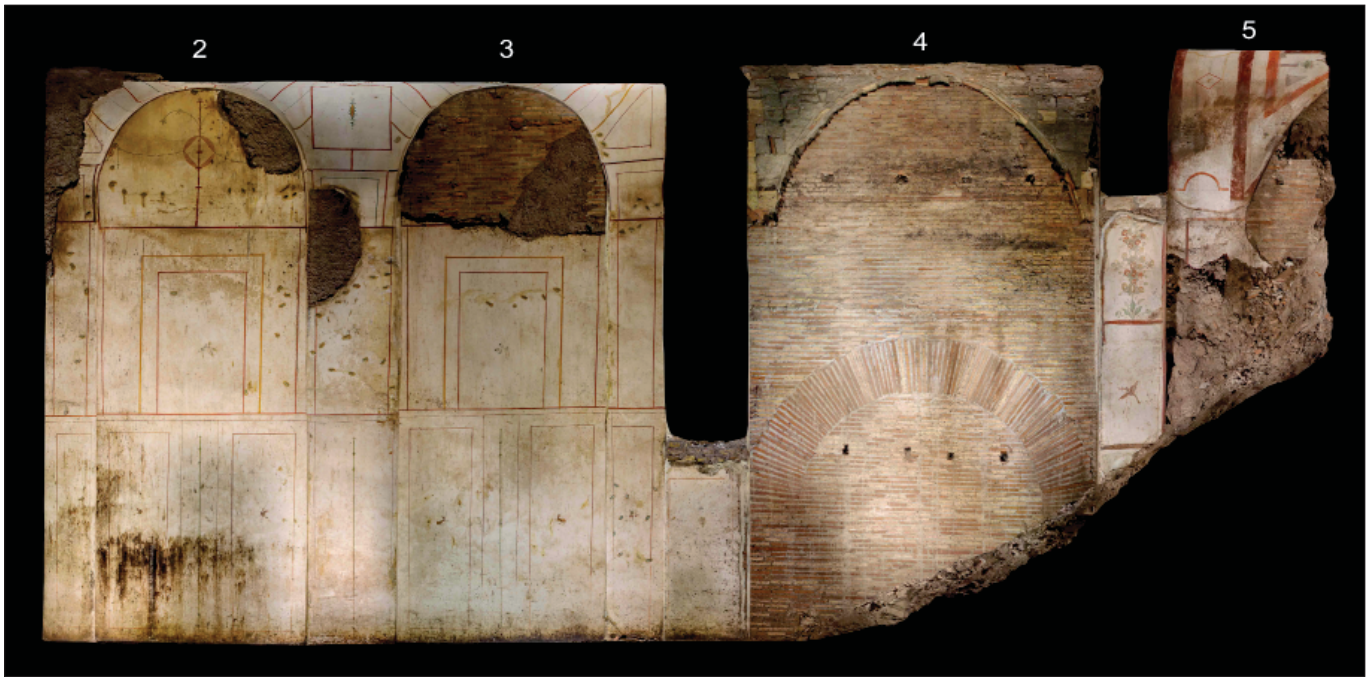


Figura 5 – Ortofoto delle pareti sud-ovest degli ambienti 2, 3, 4, 5 della Privata Traiani domus *(elaborazione da rilievo fotogrammetrico tridimensionale di S. Calò, E. Santucci)*

compromessa (*Figg.* 3, 4B.4, 5.4, 10.4), anche a causa dell'ingente quantità di terra ancora presente ma dove però è possibile una più attenta osservazione delle murature in laterizio visibili. La parete SO infatti, libera del tutto dall'intonaco, conserva tre marcapiani di bipedali e un grande arco di scarico, sempre in bipedali, alcuni dei quali rastremati, non troppo omogenei nella lunghezza, tanto da creare un estradosso piuttosto irregolare. Il lato opposto del vano si apre verso l'ambiente 6 con un grande arco ed un sott'arco. Purtroppo questo passaggio è oggi occupato interamente da una vasca moderna in muratura, probabilmente costruita nell'ambito dei grandi interventi edilizi del 1925-30, che si estende nel vano 6.

Il pavimento, molto diverso dagli altri e oggi totalmente nascosto dalla terra, è un tessellato a fondo nero e frequenti inserti marmorei policromi di forme quadrangolari e irregolari disposti in filari paralleli, a cui si mescolano alla rinfusa poche tessere bianche a contrasto. Tale tipologia genericamente in precedenza datata all'età tardo repubblicana (Morricone 1980, p. 60, n. 61, tav. XX: fine del II sec. a.C. / inizi del I sec. a.C.) trova ora puntuali confronti riferibili almeno al pieno I sec. d.C. (Roma: Angelelli 2010, pp. 257, 263, 282 e nota 55, *Figg.* 323, 329; Villa Adriana:



Figura 6 – Volte degli ambienti 2-3 della Privata Traiani domus *(foto I. Stranieri)*

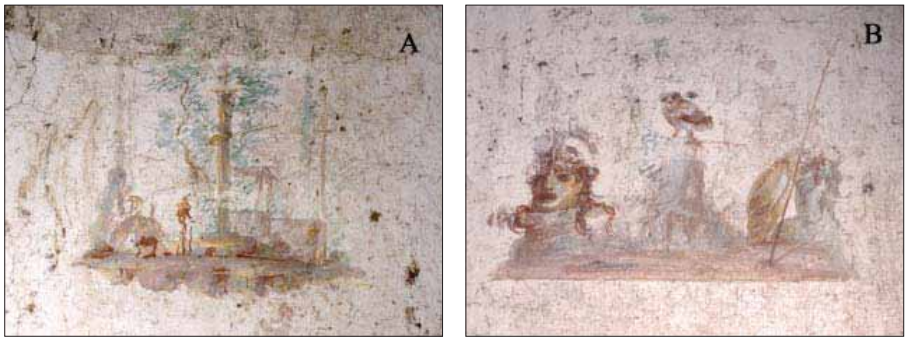


Figura 7 – Quadretti affrescati nella Privata Traiani domus *(foto E. Santucci); A. Ambiente 1, quadretto con paesaggio idillico-sacrale; B. Ambiente 1, quadretto con natura morta*

Vincenti 2017, p. 44, tav. III, n. 5; Miseno: Sposito 2015, p. 32, *Figg.* 11-13; Ercolano: Grandi 2014, pp. 44-45, nn. 12, 61 tavv. XCVI-XCVII).

Di grande importanza dal punto di vista costruttivo e cronologico, è la volta a crociera del vano 4 che conserva ancora il rivestimento intradossale in laterizio (*Figg.* 4A.4, 5.4). Per la costruzione della volta infatti sulla centina lignea è stato disposto un manto di mattoni sesquipedali, foderato a sua volta da uno strato continuo di bessali alcuni dei quali posti di taglio. Queste specifiche caratteristiche, trovano confronti con esempi simili diffusi in età severiana (Lancaster 2005, pp. 208-209), con anticipazioni già in età antonina (Lancaster 2005, p. 207; Lancaster 1998, p. 160) e forse adrianea (Lancaster 2005, p. 207).

Il passaggio tra l'ambiente 4 e 5 è coperto da un arco molto alto, decorato sempre a fondo bianco, i cui piedritti presentano riquadri rossi al cui interno sono dipinti due uccelli in volo che reggono nel becco rispettivamente una cavalletta e una farfalla (*Fig.* 8D). Nell'intradosso sono rappresentate una ricca ghirlanda con fiori rossi e gialli (*Figg.* 5.4-5, 10.4-5) e una maschera di figura femminile evanide.

Nell'ambiente 5 ancora completamente interrato (*Fig.* 11), è visibile solo parte della decorazione della volta a crociera (*Figg.* 4A.5, 9). Essa è introdotta da una larga fascia a fondo bianco delimitata da bande e linee rosse e gialle al centro delle quali sono rappresentati un ippocampo e una gazzella. Il pennacchio della volta conservato solo per uno spicchio e delimitato da una fascia rossa con occhielli, mostra in posizione centrale un pannello rosso su base, decorato con ippocampo, ai cui lati simmetricamente erano dipinti altri elementi di cui si conserva una coppa su piedistallo colma di fiori e frutti. La decorazione della volta per la composizione generale, l'uso della policromia e i motivi di repertorio, rimanda ad esempi simili di età severiana (Falzone 2007, pp. 140-144, *Figg.* 85-86). Anche in questo caso le lacune della superficie pittorica permettono di evidenziare lo stesso rivestimento intradossale della volta dell'ambiente 4.

Sulla base dei dati archeologici analizzati, riconsiderati grazie alla nuova documentazione e soprattutto al rilievo fotogrammetrico delle superfici, è possibile puntualizzare alcune questioni emerse nel corso dell'analisi delle murature e delle relative decorazioni.

Ricapitolando, nella piccola porzione di edificio esaminata, esiste una prima fase costruttiva, testimoniata dalla colonna in travertino inglobata, come si è visto, nel muro divisorio tra i vani 1 e 6; tale elemento lascia presumere in questo punto una diversa articolazione planimetrica, che doveva prevedere un ingresso al vano 1 da NO attraverso appunto un passaggio colonnato. Testimonianze più antiche sono altresì costituite forse dal pavimento in tessellato con inserti dell'ambiente 4, almeno del pieno I sec. d.C., e anche dal muro con paramento a blocchetti rettangolari di tufo del vano 1, anche se non è possibile attribuirle con certezza ad un'unica fase. All'età antonina invece può essere ascritta la decorazione dello stesso ambiente 1, che, ormai chiuso dalla parete piena di NO, doveva prevedere un accesso a NE. In una fase di poco successiva venne aperto il passaggio tra i vani 1 e 3, che interrompe malamente lo schema decorativo della stanza 1. Le pitture che adornano questo passaggio e quelle utilizzate nell'ambiente 2-3 e forse anche nel 4, quelle assai poco conservate, sono databili all'età tardo antonina. Un ultimo periodo di sicura frequentazione di questa porzione del complesso risale all'età severiana, momento al quale può essere ascritto il lacerto di decorazione della volta a crociera della stanza 5. Infine tra questo periodo e la costruzione delle terme Deciane nel 250 d.C., si situa l'obliterazione definitiva degli ambienti, con il conseguente parziale interramento dei vani e il disfacimento degli apparati decorativi. Le imponenti fondazioni dell'edificio termale soprastante infatti, come detto, distruggono porzioni di volte e murature, e riempiono le lacune delle pitture e della zoccolatura marmorea.



Figura 8 – Elementi affrescati nella Privata Traiani domus *(foto E. Santucci); A. Testa di Satiro nel passaggio tra l'ambiente 1 e 3; B. Testa di Gorgone nel passaggio tra l'ambiente 1 e 3; C. Ambiente 2-3, stambecco con nastro; D. Passaggio tra l'ambiente 4 e 5, uccello con farfalla nel becco*

LA FOTOGRAMMETRIA 3D IN AMBIENTE IPOGEO

Per la realizzazione del rilievo tridimensionale (*Figg.* 4, 10) è stata eseguita la tecnica fotogrammetrica improntata sul metodo



Figura 9 – Lacerto della volta dell'ambiente 5 della Privata Traiani domus*, (foto E. Santucci)*

image based. Tale tecnica, basata sull'acquisizione del dato fotografico, è stata scelta poiché consente di ottenere una restituzione metrica degli ambienti senza ricorrere necessariamente all'uso di attrezzature *laser scanner*, che avrebbe richiesto tempi di elaborazione e costi molto più elevati(per una panoramica sul concetto di fotogrammetria e la sua applicazione si vedano Remondino *et al.* 2008; Remondino *et al.* 2011; Remondino, Poli 2014; Douglas, Lin, Chodoronek 2015).

Per l'acquisizione fotografica sono state utilizzate tre fotocamere digitali reflex Canon con sensore CMOS full frame di diverso modello. La scelta di operare con l'ausilio di tre fotocamere è scaturita dalla necessità di acquisire in parallelo il maggior numero di dati fotografici, conciliando la disponibilità delle attrezzature usate dalla squadra di rilevatori nelle diverse giornate di esplorazione e tenendo conto del limitato tempo di permanenza in cui si è dovuto svolgere il lavoro all'interno del sito ipogeo.

L'acquisizione fotografica è stata pianificata tenendo conto della complessità degli ambienti e delle loro caratteristiche architettoniche. Per garantire un'adeguata illuminazione delle superfici, in particolare nel caso dell'intradosso delle volte poste a oltre 6 metri di distanza, sono state utilizzate lampade led artificiali che hanno permesso di raggiungere un livello di illuminazione pari a circa 6000 lumen. Le lampade sono state posizionate e orientate di volta in volta in maniera tale da ottenere un'illuminazione costante e omogenea durante tutte le fasi di lavoro.

Una adeguata illuminazione degli ambienti ha consentito di sfruttare al meglio le impostazioni manuali delle fotocamere, per ottenere immagini correttamente esposte con l'utilizzo di tempi non troppo lunghi e la possibilità di utilizzare una ISO con una bassa percentuale di rumore (per un confronto dello stesso metodo si veda il procedimento usato in Limoncelli 2013; Germiniano, Limoncelli 2016).

Le foto sono state scattate stimando un grado di sovrapposizione dei fotogrammi (*overlap*) pari a una percentuale di circa 80%. Durante l'acquisizione, si è cercato di mantenere una distanza focale costante (18 mm), per facilitare il processo di elaborazione automatica di interpolazione dei dati da parte del software.

L'attività di acquisizione fotografica ha prodotto 1740 immagini in formato RAW, le quali sono state elaborate in fase di post-produzione per omogeneizzare e armonizzare i valori di contrasto, luci e ombre, e ove necessario, correggere l'esposizione.

Un primo processo di elaborazione del software, definito *structure from motion* (SFM),che sfrutta l'identificazione di punti omologhi sui fotogrammi grazie a una fase di allineamento automatizzato, ha generato una prima nuvola di punti, con la quale è stato possibile valutare nel complesso la qualità dell'acquisizione fotografica degli ambienti. Si è proceduto poi alla fase di *cloud-computing*, attraverso cui è stato possibile ottenere la superficie del modello tridimensionale e la *texture* foto realistica.

La maglia di punti ottenuta durante le operazioni di rilievo topografico con stazione totale ha permesso di orientare e scalare correttamente il modello 3D. Solo alcuni dei punti rilevati sono stati utilizzati per scalare il modello, dando priorità alle superfici prescelte per la realizzare delle ortofoto. Il procedi-



Figura 10 – Vista prospettica delle pareti nord-est degli ambienti 2, 3, 4, 5 della Privata Traiani domus *(elaborazione da rilievo fotogrammetrico tridimensionale di S. Calò, E. Santucci)*



Figura 11 – Interro presente nell'ambiente 5 della Privata Traiani domus *(foto I. Stranieri)*

mento utilizzato ha previsto sia l'inserimento delle coordinate tridimensionali dei punti di riferimento, associate a punti specifici riconoscibili sulle fotografie, che delle distanze lineari tra alcuni di essi.

L'irregolarità delle superfici murarie degli ambienti archeologici ha prodotto in alcune aree un'alterazione della superficie del modello (*mesh*), che è stata attenuata con procedure di correzione aumentandone la definizione (*remeshing*).

Il prodotto finale è stato utilizzato per estrarre ortofoto, sezioni e viste prospettiche, utilizzabili per la creazione di elaborati grafici bidimensionali (piante, prospetti, sezioni) e animazioni 3D per una maggiore conoscenza del sito.

CONCLUSIONI

Le tecniche di rilievo utilizzate hanno permesso di restituire alla collettività, almeno virtualmente, queste strutture archeologiche ubicate nel sottosuolo del Colle Aventino. Inoltre, la versatilità del modello 3D e del dato fotogrammetrico nel suo complesso, consentono di avere a disposizione uno strumento molto utile sia per la progettazione di opere di valorizzazione del sito che per il monitoraggio indiretto dello stesso, finalizzati a futuri interventi di riqualificazione e restauro. Considerata l'importanza del contesto si ritiene comunque auspicabile la progettazione di una migliore accessibilità al monumento, tale da permettere l'esecuzione in sicurezza degli indispensabili lavori di pulizia e consolidamento delle superfici murarie e degli apparati decorativi; sarebbe così possibile rendere fruibile il sito archeologico. La futura accessibilità al complesso permetterebbe altresì di verificare una serie di quesiti emersi a seguito di questo lavoro preliminare, che riguardano in particolare la lettura diacronica delle murature e la definizione funzionale degli ambienti.

BIBLIOGRAFIA

Angelelli C. (2010), *La basilica titolare di S. Pudenziana: nuove ricerche*, Roma.

Barbera M.R. (1996), *La stanza E8*, in Barbera M.R., Paris R. a cura di, *Antiche stanze. Un quartiere della Roma imperiale nella zona di Termini*, Catalogo della mostra (Roma 1996-1997), Milano. pp. 86-88.

Bruno D. (2012), *Regione XIII. Aventinus*, in Carandini A., a cura di *Atlante di Roma antica. Biografia e ritratti della città. 1. Testi e immagini*, Roma, pp. 388-420.

Carnabuci E., Rossi F.M. (2017), *Privata Traiani domus*. Meraviglia nascosta e ritrovata, in Parisi Presicce C., Milella M., Pastor S., Ungaro L. a cura di, *Traiano. Costruire l'Impero, creare l'Europa*, Roma, pp. 310-316.

Chini P. (2005), *Le Case romane sull'Aventino*, in *Forma Urbis*, Roma.

Chini P. (2010), *I Privata Traiani*, in *Roma, una città, un impero* 2, pp. 65-79.

Coarelli F. (1984), *La casa privata di Traiano*, in *Roma sepolta*, Roma, pp. 157-165.

Coarelli F. (1999), s.v., Privata Traiani, in *LTUR* IV, Roma, pp. 164-165.

Douglas M., Lin S., Chodoronek M. (2015), *The applications of 3D Photogrammetry for in-field documentation archaeological features*, in "Journal of Society for American Archaeology", n. 3, pp. 136-152.

Falzone S. (2007), *Ornata aedificia. Pitture parietali dalle case ostiensi*, Roma.

Falzone S., Vitti M., Ungaro L. (2010), *Gli affreschi delle tabernae del piano terra del grande emiciclo dei mercati di Traiano*, in ZIMMERMANN N. (Hrsg.) *Antike Malereizwischen Lokalstil und Zeitstil*, Aktendes XI. Internationalen Kolloquiumsder AIPMA (Ephesos 2010), Wien, pp. 589-594.

Germinario C., Limoncelli M. (2016), *Dal rilievo in Camera-scanner alla piattaforma di fruizione QTVR-based stereoscopica. Metodologie integrate per il monitoraggio e la valorizzazione delle superfici pittoriche in ambiente rupestre,* Archeomatica-Tecnologie per i Beni Culturali, VII, pp. 6-10, 2016.

Grandi M. (2014) *Fauces*, in Guidobaldi F., Grandi M., Pisapia M.S., Balzanetti R., Biagliati A. (2014), *Mosaici antichi in Italia. Regione prima. Ercolano*, volume 1, Pisa, Roma, pp. 44-45.

Hostetter E., Howe T.N., Brandt J.R., St. Clair A., Peña J.T., M. Parca-Gleason K.L., N.F. Miller (1994), *A Late-Roman domus with apsidal hall on the NE slope of the Palatine: 1989-1991 seasons*, in *JRA*, Suppl. Ser. 11, pp. 140-145.

La Follette L. (1985), *Le Terme Deciane sull'Aventino*, in *QuadAEI* 11, pp. 139-144.

La Follette L. (1994), *The Baths of Trajan Decius on the Aventine, in Rome Papers: the Baths of Trajan Decius, Iside e Serapide nel Palazzo, a late domus on the Palatine and Nero's golden house*, in *JRA* Suppl. Ser. 11, pp. 6-88.

La Follette L. (1999), s.v., *Thermae Decianae*, in *LTUR* V, Roma, pp. 51-53.

La Rocca (2008), *Lo spazio negato. La pittura di paesaggio nella cultura artistica greca e romana*, Milano.

Lancaster L.C. (1998), *Reconstructing the restorations of the Colosseum after the Fire of 217*, in AJA, 11, 1998, pp. 146-174.

Lancaster L.C. (2005), *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome. Innovations in Context*, Cambridge University Press.

Lanciani R. (1870), *Recenti scoperte in Roma e nelle vicinanze*, in *BullInst* 1870, pp. 74-90.

Le Bruyne L. (1968), *L'importanza degli scavi lateranensi per la cronologia delle prime pitture catacombali*, in RivArcC 44, pp. 81-113.

Limoncelli M. (2013), *Il contributo delle tecnologie digitali per la valorizzazione del patrimonio rupestre pugliese*, in MINGOZZI M., ROTONDO R. (2016), *Puglia rupestre inedita*, Bari, pp. 83-100.

Morricone M.L. (1980), *Scutulata pavimenta. I pavimenti con inserti di marmo o di pietra trovati a Roma e dintorni*, Roma, 1980.

Quaranta P. (2011), *Vivere all'Aventino. L'Evoluzione dell'edilizia abitativa unifamiliare del colle dal I al IV sec d.* C., in BRANDT O., PERGOLA PH., a cura di, *Marmoribus Vestita. Studi in onore di Federico Guidobaldi*, Studi di Antichità Cristiana 63, Città del Vaticano, pp. 1133-1152.

Remondino F., El Hakim S., Gruen A., Zhang L. (2008), *Turning image into 3D models*, in IEEE Signal Processing Magazine 25 (4), pp.55-64.

Remondino F., Poli D. (2014), *Back to the future. Il ritorno della fotogrammetria*, in GEOmedia 2, pp. 6-8.

Remondino F., Rizzi A., Agugiaro G., Jimenez B., Menna F., Nex F., Baratti G. (2011), *Rilievi e Modellazione 3D*, Atti della 51a Conferenza Nazionale ASITA, 15-18 novembre 2011, Reggia di Colombo.

Russo M., Remondino F., Guidi G. (2011), *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in Archeologia e Calcolatori 22, pp. 169-198.

Sposito F. (2015), *Il contributo dello studio dei rivestimenti pavimentali alla ricostruzione dell'urbanistica: il caso di Minturnae*, in Bellini G.R., Von Hesberg H. a cura di, *Minturnae nuovi contributi alla conoscenza della Forma Urbis*, Giornata di studio sui lavori a *Minturnae* (Roma - 29 settembre 2011), Roma, pp. 27-42.

Vermaseren M.J., Van Essen C.C. (1955-1956), *The Aventine Mithraeum Adjoining the Church of St. Prisca. A Brief Survey of the Dutch Excavations on the Aventine, in Antiquity and Survival* 1, pp. 3-36.

Vermaseren M.J., Van Essen C.C. (1965), *The excavations in the Mithraeum of the Church of Santa Prisca in Rome*, Leiden.

Vincenti V. (2017), *Mosaici antichi in Italia. Regione quarta. Pavimenti musivi e cementizi di Villa Adriana*, Pisa-Roma.

Il sentiero dell'acqua di Sinalunga

Sinalunga's water foot-path

Gianfranco Censini
Geologo presso GOERISORSE ITALIA
E-mail: g.censini@georisorse.it

Pierpaolo Dore

Eleonora Dallocchio

Gruppo Archeologico Sinalunghese, Sinalunga (SI)
E-mail: gruppoarcheologicosinalunghese@gmail.com

Parole chiave (*key words*): pozzo (*shaft*), cunicolo (*adit*), acquedotto (*waterway*), Periodo Romano (*Roman Age*), Medio Evo (*Middle Age*), Pliocene (*Pliocene*), sabbie (*sands*)

ABSTRACT

Sinalunga is a municipality on the western edge of the Chiana Valley. See *Fig.* 1. The name deriving from the latin words Sinus+Longus (Long bay) is the testimony of a period in which the waters of the Foenna River, tributary of the "Canale Maestro della Chiana", stagnated in the plain below. The waters of the hills, however, have been captured with wells and tunnels since ancient times. This tunnel, whose characteristics are illustrated, was excavated around 1265 (Middle Age) to connect a well that existed since Roman times in the center of the Sinalunga Castle with the external area. This link, on the basis of which we can also add paleo-climatic hypotheses linked to the climatic variations that have occurred in historical times, can now be visited along a path that has been defined as "Il Sentiero dell'Acqua", the "Water Foot-Path". The analysis of these hypogean spaces was, moreover, enriched by the cataloging of dozens of rock writings and engravings, in part still undergoing determination by an expert epigraphist. Guided tours to this place are periodically carried out during which the geological characteristics of the formations are illustrated and information on the excavation methods used at the time of construction are given.

RIASSUNTO

Sinalunga è un comune sul bordo occidentale della Val di Chiana. Vedi Figura 1. Il nome derivante dalle parole romane Sinus Longus (Lunga Insenatura) è la testimonianza di un periodo in cui le acque del Torrente Foenna, tributario del Canale Maestro della Chiana, ristagnavano nella piana sottostante. Le acque delle colline, invece, sono state captate con pozzi e gallerie sin da tempi remoti. Questo Cunicolo, di cui si illustrano le caratteristiche è stato scavato intorno al 1265 per collegare un pozzo esistente sin dall'epoca romana nel centro del Castello di Sinalunga con la zona esterna. Questo collegamento, sulla cui motivazione si possono addurre anche ipotesi paleo ambientali legate alle variazioni climatiche che ci sono state anche in tempi storici, è oggi visitabile lungo un percorso che è stato battezzato "Il Sentiero dell'Acqua". Il rilevamento di questi spazi ipogei è stato, inoltre, arricchito dalla catalogazione di decine di scritte ed incisioni rupestri, in parte ancora in fase di determinazione da parte di un esperto epigrafista. Periodicamente vengono effettuate visite guidate a questo luogo durante le quali vengono illustrate le caratteristiche geologiche delle formazioni presenti e date informazioni sulle modalità di scavo utilizzate all'epoca della costruzione.

1. CONTESTO STORICO

Il cunicolo, da notizie storiche e da una targa scolpita presente all'esterno dell'entrata, risulta essere stato scavato in pieno

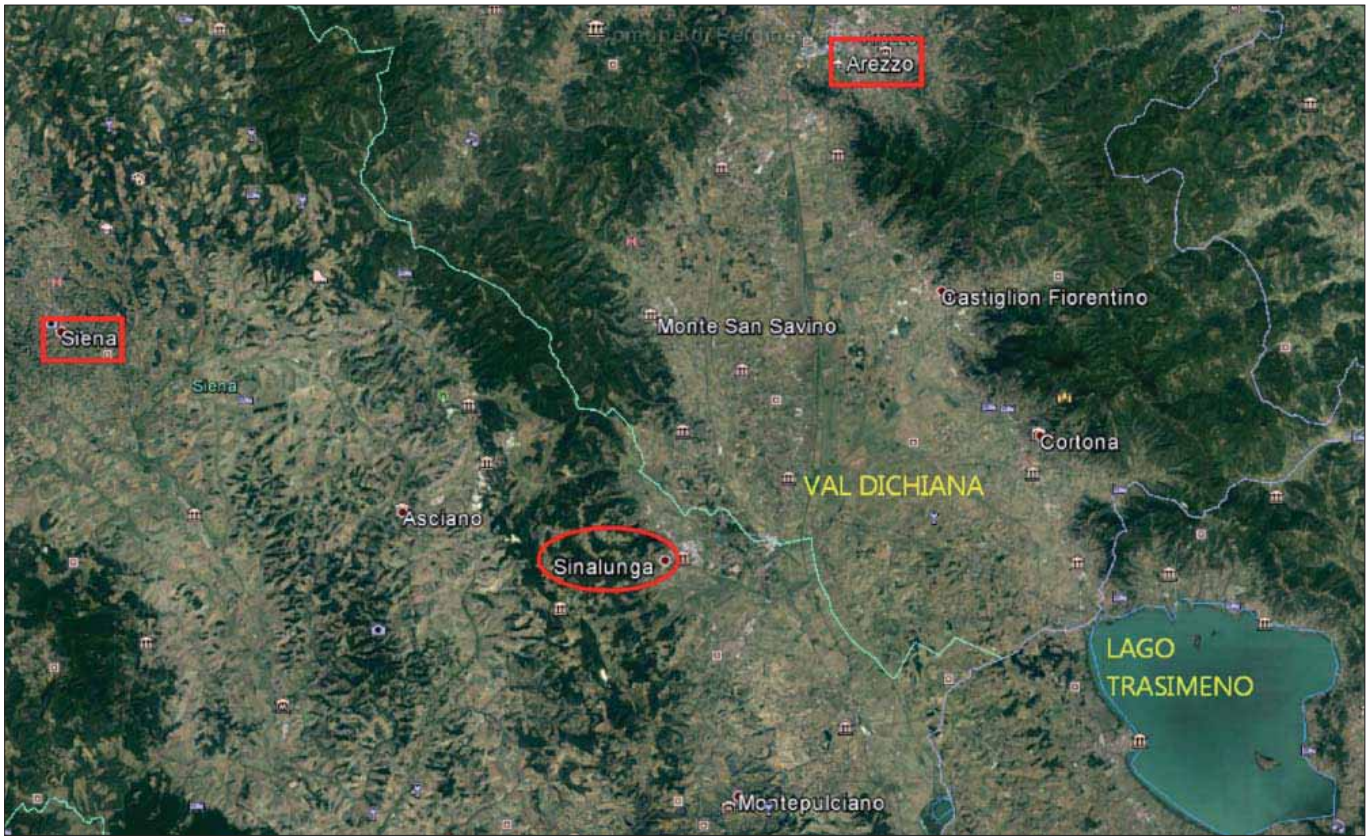


Figura 1 – Ubicazione di Sinalunga sul bordo occidentale della Val di Chiana – Provincia di Siena

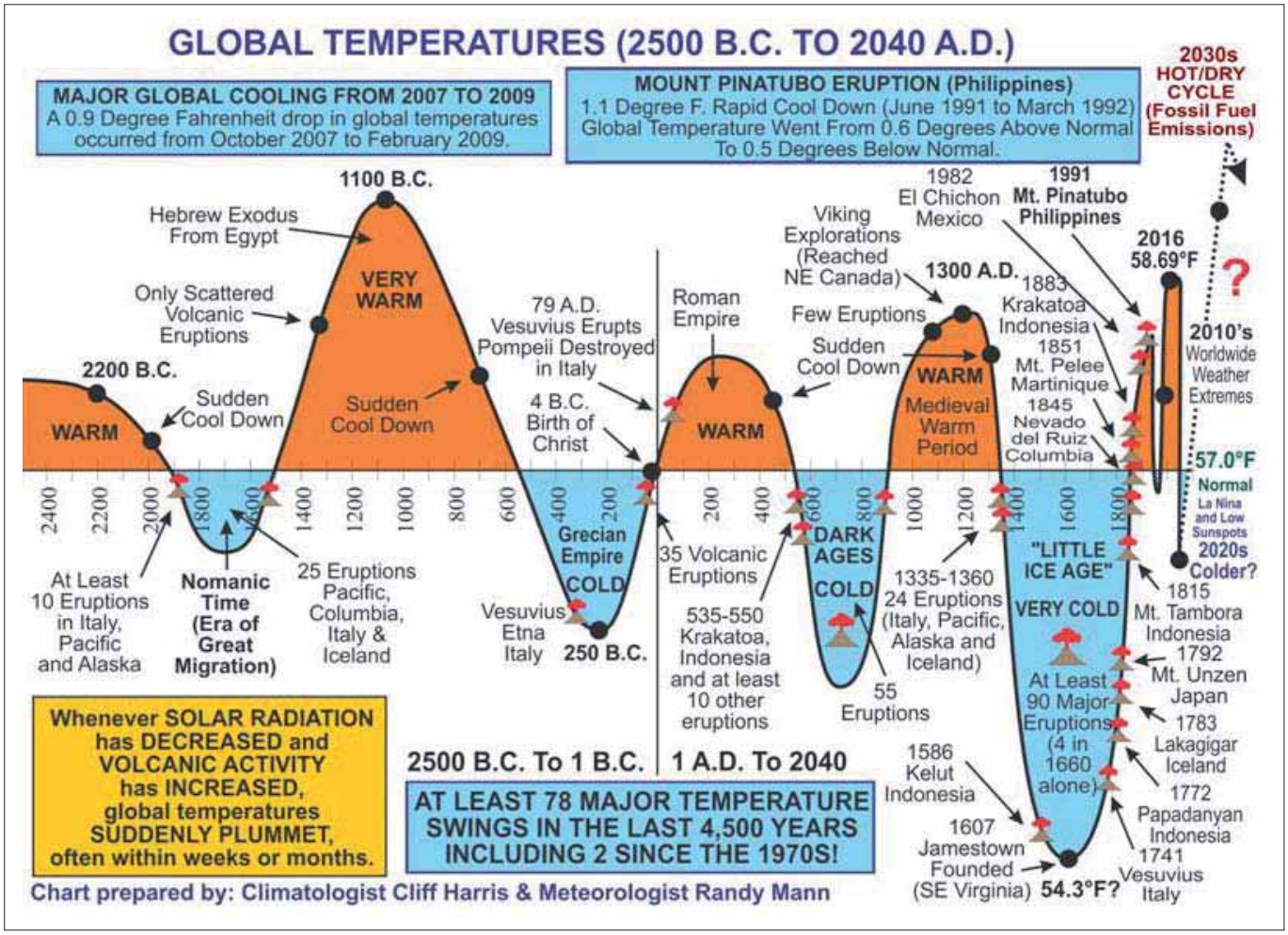


Figura 2 – Diagramma delle temperature globali dal 2500 A.C. fino ai giorni attuali – da Harris & Mann. Aggiornato al 10/03/2018

periodo medioevale, cioè nel 1265 (A.D. MCCLXV), quando l'acqua era un bene prezioso e la vita delle Comunità locali era concentrata all'interno di castelli e città fortificate. Siena e tutto il suo territorio, di cui "Asinalonga" faceva parte, sviluppò importanti acquedotti sotterranei (i cosiddetti "bottini") che collegavano sorgenti, anche esterne alle mura, con fonti pubbliche. Proprio a Siena molte delle principali Fonti della Città, tra le quali la celeberrima Fonte Gaia di Piazza del Campo, sono ancor oggi alimentate da alcuni di questi bottini, come lo sono ancora cisterne private direttamente all'interno dei palazzi delle famiglie più importanti.

Nel caso di Sinalunga, tuttavia, si ebbe una situazione inversa: un pozzo esistente nel centro del Castello, (in via San Martino, dove oggi c'è la chiesa di Santa Croce), venne collegato, mediante lo scavo di un cunicolo, ad una fonte esterna: La Fonte del Castagno. (GRIECO, 2012). Questo fatto, anomalo per il periodo in questione, è stato oggetto di varie valutazioni ed interpretazioni. Tra le varie ipotesi formulate sta prendendo campo quella che lega questo fatto con una grave crisi idrica, riferibile a cosiddetto "Periodo Caldo Medievale" durante il quale, molto probabilmente, il livello di falda scese fino a rendere difficile prender l'acqua dal pozzo stesso.

L'esistenza di questo "Periodo Caldo Medievale", al di là delle ipotesi che vengono formulate per giustificarne l'origine, appare confermata da numerose informazioni e notizie storiche. Nella figura 2 si riporta il diagramma delle temperature globali dal 2500 A.C. fino ai giorni attuali, proposto da alcuni climatologi negli anni scorsi e recentemente aggiornato (HARRIS & MANN, 2018). In questo diagramma, che giustifica molte delle variazioni climatiche con le attività vulcaniche che hanno portato, per alcuni periodi, ad una riduzione della trasparenza dell'atmosfera ed una conseguente diminuzione dell'energia solare che raggiunge la terra, si nota la perfetta coincidenza della data di scavo del nostro Cunicolo con il picco di massima temperatura del Medio Evo. Non è un caso che molte fortificazioni dell'epoca siano caratterizzate da importanti opere per la raccolta e la conservazione dell'acqua. L'acqua, un bene che, ovviamente, era importantissimo ed a volte scarseggiava. Il Cunicolo, infatti, oltre a costituire una galleria per portare l'acqua dal pozzo alla Fonte del Castagno, costituisce anche una vera e propria "galleria drenante" che, oltre a recuperare la poca acqua presente nel pozzo, raccoglie anche molte altre venute lungo il suo tracciato. Inoltre un secondo cunicolo è stato scavato anche in direzione trasversale al primo, proprio con lo scopo di aumentare la quantità d'acqua che raggiunge la fonte esterna.

2. CONTESTO GEOLOGICO

Il cunicolo, in ottimo stato di stabilità, è stato scavato seguendo il contatto tra la serie pliocenica basale (sabbioso conglomeratica) e, al disotto, la formazione arenacea oligomiocenica del Macigno, formazione rocciosa e permeabile solo lungo le fratture, altrimenti pochissimo permeabile. Vedi figure 3 (Carta geologica schematica) e 4 (foto della serie pliocenica basale). Le sabbie e conglomerati pliocenici di ambiente litoraneo sono, invece, altamente permeabili e tutto il cunicolo funge da galleria drenante delle acque che si concentrano in corrispondenza di questo contatto. Lo scavo del pozzo romano di Via San Martino fu, sicuramente, deciso in base ad osservazioni "idro-geologiche" dell'epoca, infatti, il colle su cui venne realizzato il "Castrum" che in seguito divenne il Castello di Sinalunga era, ed ancora è, circondato da sorgenti ubicate tutte, su questo contatto litologico e, più o meno, alla stessa quota. La sezione geologica della Serie pliocenica è perfettamente esposta nella pareti del pozzo romano che presenta un diametro medio di circa 4 m ed una profondità di 28m. Vedi sezione

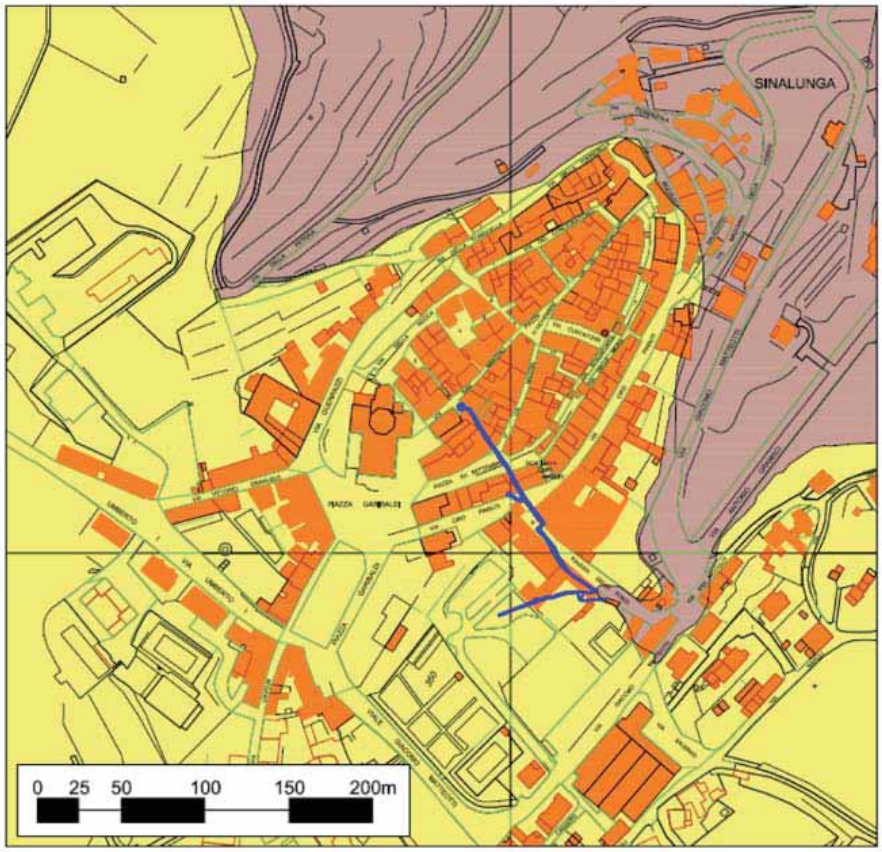


Figura 3 – Carta geologica schematica del centro storico di Sinalunga

cui l'acqua fuoriesce per fluire nella canaletta sottostante il pavimento del cunicolo fino a giungere alle vasche di decantazione ed alla fonte esterna.

3. LA STRUTTURA DELL'IPOGEO.

Nella figura 6 si riporta in dettaglio la planimetria del cunicolo che risulta, come detto prima, diviso in due diramazioni principali, per una lunghezza complessiva di oltre 200m. Il primo tratto in entrambe le diramazioni, dove si ha una modestissima copertura, consiste in un'opera realizzate in muratura di mattoni e pietre locali (Macigno). Successivamente, a circa 20 m dall'entrata, si giunge nelle zone scavate, con facilità, nelle sabbie e conglomerati pliocenici, che risultano da debolmente a moderatamente addensati, raramente cementati dalla deposizione di carbonato di calcio secondario. Questa cementazione secondaria è particolarmente vistosa lungo le pareti, in particolare al contatto con il sottostante Macigno e, nella diramazione detta "della Croce", si possono osservare numerose stalattiti e stalagmiti che raggiungo anche 10-20cm di lunghezza. Questa di calcite deriva dalla deposizione del carbonato di calcio che le acque meteoriche dissolvono circolando in questi sedimenti pliocenici costituiti, in gran parte da elementi calcarei provenienti dalle Formazioni della Serie Toscana che nel mare Pliocenico emergevano come tante isole di un "Paleo-Arcipelago Toscano".

di figura 5. Dalla base, accessibile attraverso il cunicolo, si possono misurare almeno 4 m di alternanze di livelli ciottolosi e sabbiosi, dove è presente la falda idrica, tipici di ambiente costiero, soprastanti alle arenarie con alternanze di siltiti, che si trovano circa 20 cm sotto il pelo dell'acqua. Più in alto e fino al piano campagna, corrispondente al pavimento della Chiesa di Santa Croce, già di San Martino, si trovano sedimenti sabbioso-limosi localmente ben addensati, che testimoniano il progressivo abbassamento della zona durante il Pliocene medio, dato che questi sono sedimenti di mare via via più profondo. Alla base, nel complesso acquifero, vi sono alcuni scavernamenti molto pronunciati (anche oltre il metro, enfatizzati nella sezione del pozzo) che evidenziano come, in tempi antecedenti lo scavo del cunicolo, il livello di falda avesse raggiunto quote molto più alte dell'attuale. Attualmente, infatti, stante la presenza del cunicolo, il livello dell'acqua non può più risalire oltre il limite dello stramazzo, punto da



Figura 4 – Foto della Serie Pliocenica basale – Alternanze di livelli sabbiosi e ghiaiosi debolmente addensati

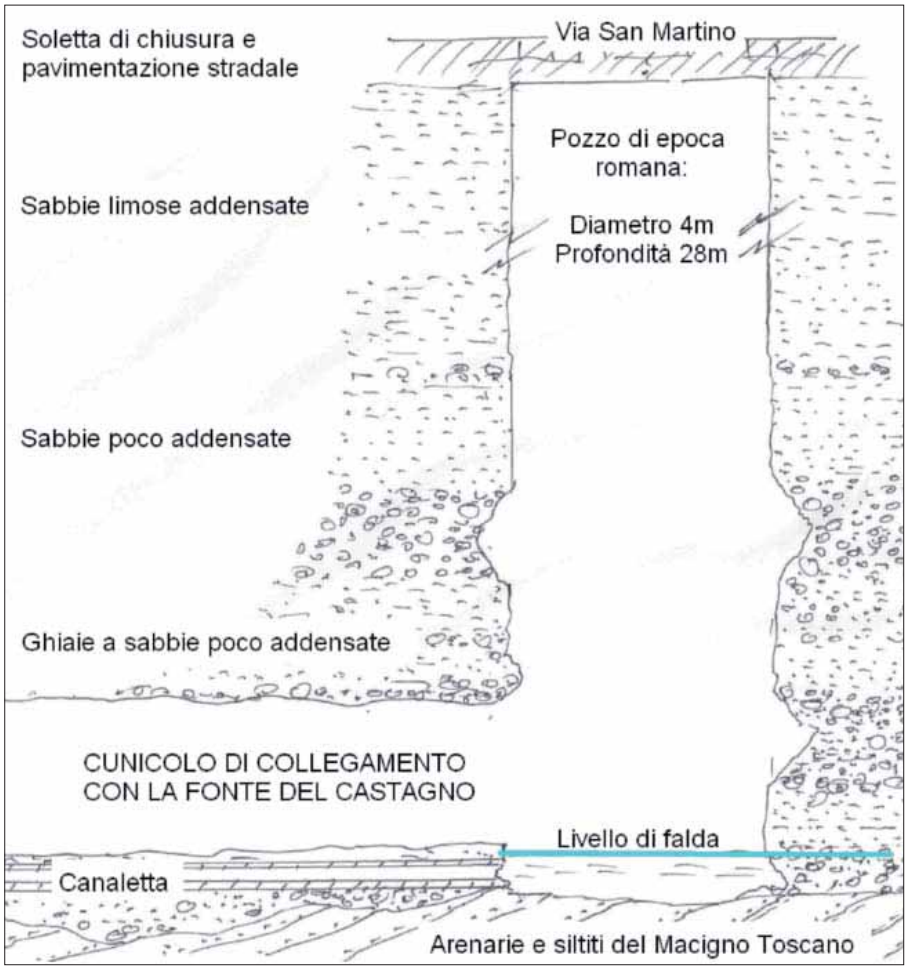


Figura 5 – Sezione del pozzo di epoca romana

ne impostata in superficie. Piccole correzioni della direzione di questi due rami di collegamento verso i "punti di destinazione" ne sono una implicita conferma.

Il cunicolo principale collega il Pozzo di San Martino, circolare di quasi 4 m di diametro ed alto 28 metri, vedi figura 5 e figura 8, il cui accesso superiore risulta chiuso in quanto dopo la realizzazione del Cunicolo la risalita della falda è stata impedita da drenaggio dello stesso ed la funzione di pozzo cessò.

Sul fondo del pozzo, comunque, l'acqua è perennemente presente ed il fondo stesso ha la funzione di vasca di decantazione da cui parte la canaletta di collegamento con la Fonte esterna. Vedi figura 5.

Dalla cisterna di raccolta e decantazione costruita al termine del cunicolo e restaurata nel XIX secolo fuoriescono, quotidianamente, circa 70 metri cubi di acqua che vengono presi per irrigazione del verde pubblico della zona o, altrimenti dispersi nelle fognature nei periodi di non utilizzo.

4. ATTUALE FRUIZIONE DELL'IPOGEO

Dopo l'esplorazione del 2015 e la verifica delle condizioni di sicurezza, il Gruppo Arche-

Non è certo che le due diramazioni siano state scavate nello stesso tempo, anzi vi sono documenti che portano ad ipotizzare interventi successivi per cercare di aumentare anche in tempi relativamente recenti (XIX secolo) la portata di acqua verso la Fonde del Castagno. È, invece, molto probabile che la costruzione del cunicolo principale, quello che collega il Pozzo di San Martino con la Fonte del Castagno, sia avvenuta partendo da un pozzo intermedio (situato in corrispondenza della attuale Piazza XX Settembre - Via delle Mura) dove sono presenti in sotterraneo imponenti opere di consolidamento, evidenti in maniera particolare nel rilievo eseguito con laser scanner lungo questo Cunicolo. Vedi figura 7. Questa zona può suggerire la presenza di una camera di lavoro da cui sono stati scavati due rami in direzione opposta (cosa che avveniva nello scavo dei "bottini di Siena") fino a raggiungere il grande pozzo esistente ed il ramo di collegamento con la Fonte. La direzione di scavo poteva essere indicata con la tecnica del pozzo di "smiraglio", cioè una direzione concretizzata in superficie mediante una barra allineata secondo la direzione da seguire, veniva riporta in fondo al pozzo mediante due fili a piombo che, con il loro allineamento, indicavano nel sottosuolo la stessa direzio-

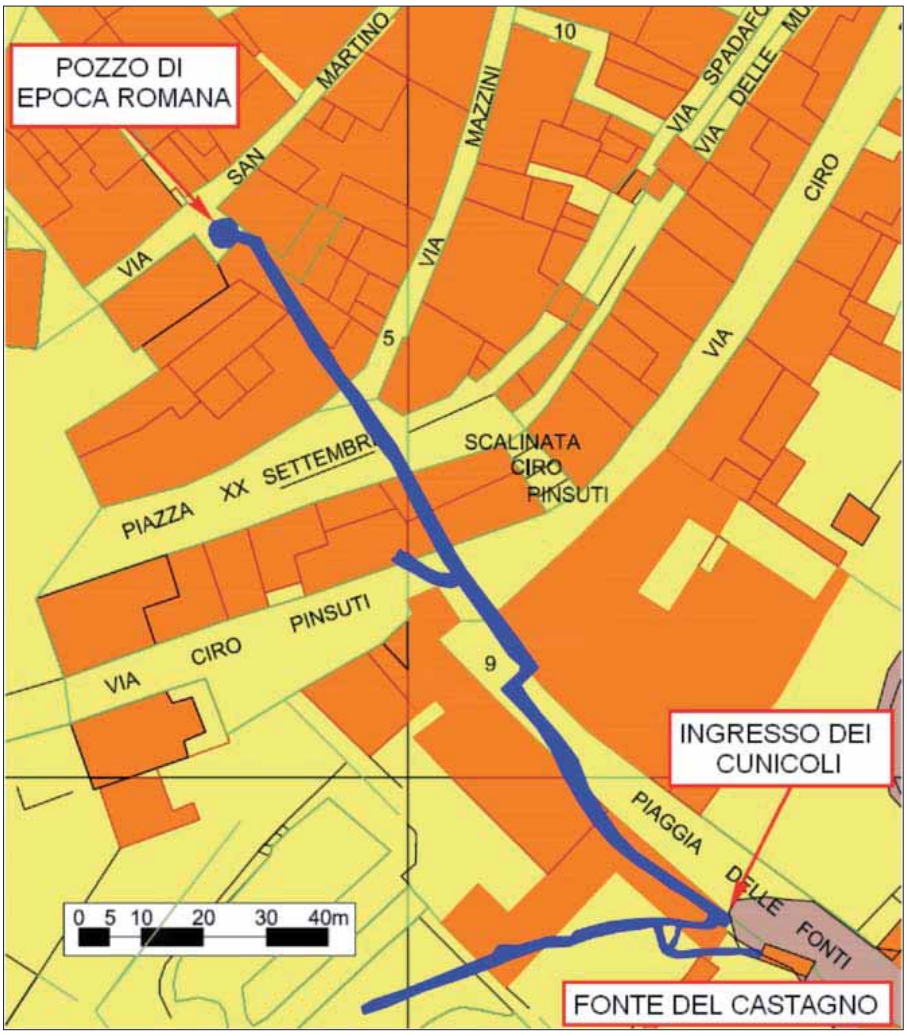


Figura 6 – Planimetria di dettaglio dei due cunicoli principali

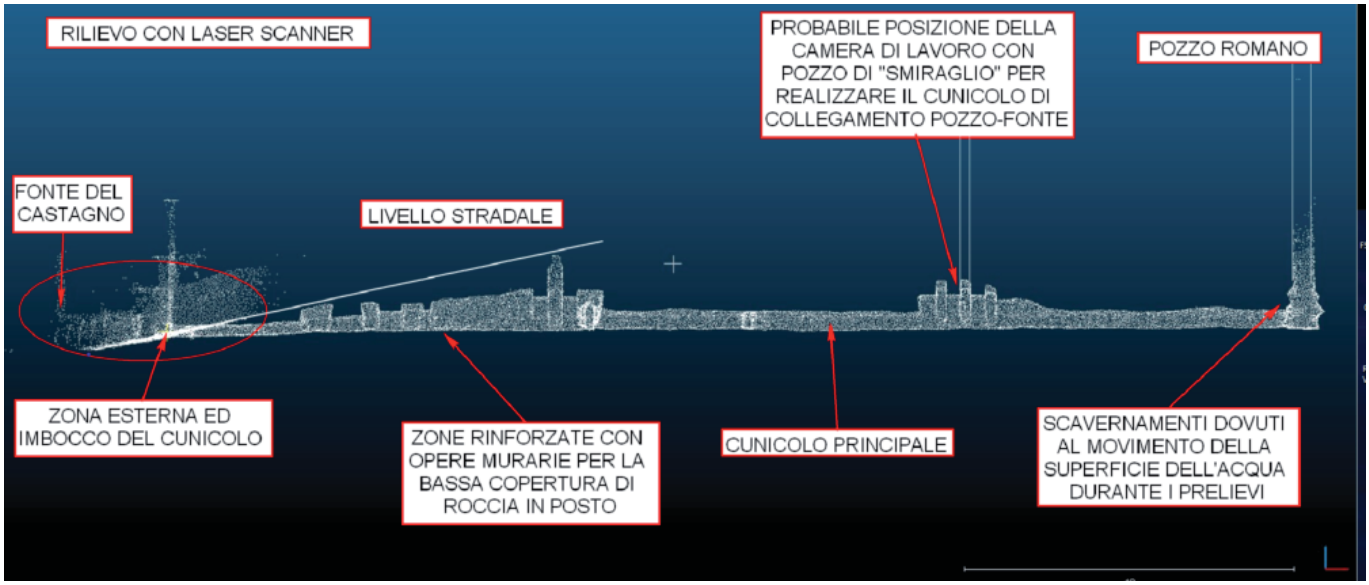


Figura 7 – Sezione del cunicolo ottenuta da rilievo Laser-Scanner

ologico Sinalunghese, considerando il grande interesse storico, ha avviato una serie di iniziative in collaborazione con l'Amministrazione Comunale che hanno portato all'ideazione di un percorso turistico, il Sentiero dell'Acqua. Ad oggi sono centinaia le persone che hanno visitato il cunicolo, aperto su richiesta i fine settimana.

La procedura di ingresso per i visitatori comporta una sottoscrizione ed accettazione delle condizioni previa informazione sullo stato dei luoghi e dei rischi legati alla possibilità di scivolare, inciampare o di essere colpiti da frammenti litoidi che potrebbero cadere dalla formazione ciottolosa in cui sono scavati i cunicoli.

Tutti i visitatori vengono dotati di elmetto protettivo con lampada frontale. Vedi foto allegate nelle figure 9 e 10. La visita viene gestita da una squadra di non meno di 3 persone: 2 all'interno del cunicolo (uno in testa ed uno alla fine della fila di visitatori) ed uno all'imbocco del cunicolo in collegamento radio con le guide che si trovano all'interno con i visitatori. Per



Figura 8 – Vista del pozzo dalla fine del cunicolo di acceso



Figura 9 – Foto di un gruppo di visitatori appena "istruiti per le misure di sicurezza" in attesa di entrare



Figura 10 – Foto di un gruppo di visitatori lungo il cunicolo

maggior sicurezza è stata installata anche una linea citofonica, via cavo, tra il punto di ingresso ed il pozzo al termine del cunicolo principale.

5. ALTRI STUDI IN ATTO

Durante la visita all'interno del cunicolo non si può non osservare la moltitudine di scritte incise nelle sabbie compatte, queste iscrizioni sono state fotografate e raccolte in un catalogo, che ne contiene 53, che è in fase di determinazione da parte di un epigrafista. Dalle prime letture è possibile osservare come la maggior parte delle scritte sia riferibile al 1691, 1852, anni di probabile manutenzione, o ampliamenti, della struttura. Purtroppo la natura litologica dei materiali (sabbie poco addensate) ha portato alla scomparsa di molte altre di cui si vedono solo vaghi segni.

BIBLIOGRAFIA

Grieco E. (2012), *Dizionario toponomastico di Sinalunga. Origine e significato di 700 nomi di luogo*, Quaderni Sinalunghesi, Anno XXIV, nº 1 Pubblicazione periodica del Comune di Sinalunga – Edizioni Luì - Chiusi

Harris C. Mann R. (2018), *Global Temperature Trends From 2500 B.C. To 2040 A.D.* http://www.longrangeweather.com/global_temperatures.htm

Il complesso ipogeo in località San Fortunato - Marsciano (PG)

The underground complex of San Fortunato - Marsciano (PG)

Valerio Chiaraluce
Archeologo libero professionista - Associazione Culturale Toward Sky
E-mail: tularilar@gmail.com, www.todisotterranea.it

Parole chiave (*key words*): Galleria (*gallery*), cunicolo idraulico (*hydraulic tunnel*), acquedotto romano (*roman aqueduct*), cantina (*cellar*), Marsciano, Migliano, Umbria

In questo studio viene descritto il complesso sotterraneo esistente presso l'insediamento di San Fortunato in Sigillo, nel comune di Marciano in Umbria. La collina di San Fortunato è composta da uno strato di sabbia compatto particolarmente adatto allo scavo di ambienti ipogei. Durante l'esplorazione e la mappatura della vasta cantina sotterranea ottocentesca appartenente alla fattoria locale sono stati identificati due tratti di gallerie idrauliche facenti parte di un acquedotto romano, del quale sino ad oggi si conosceva soltanto un terzo tratto di modeste dimensioni. Complessivamente l'acquedotto doveva superare i 400 m di sviluppo; esso era destinato a captare l'acqua di vena e a condurla presso un sito di utilizzo non ancora identificato, probabilmente una villa rustica.

***

The purpose of this research is to describe the underground complex that exists at the settlement of San Fortunato in Sigillo, in the municipality of Marciano in Umbria. The hill of San Fortunato is composed of a compact sand layer that is particularly suitable for digging underground spaces. The vast nineteenth-century underground cellar belonging to the local farm has been explored and mapped for the first time. These operations have made it possible to identify two sections of tunnels belonging to a Roman aqueduct of which only a little part was known until now. Overall, the aqueduct had to exceed 400 m in length. It was used to capture the vein water and transport it to an unidentified site, probably a rustic villa.

1. UBICAZIONE DELL'AREA

L'insediamento di San Fortunato in Sigillo (319 m s.l.m.) occupa un morbido crinale delimitato lateralmente dalle valli del fiume Nestore e da quella del suo affluente torrente Fersinone. Il crinale procede in salita da est verso ovest sino al castello di Migliano (450 m s.l.m.), antico feudo dei Conti Bulgarelli, e infine piega verso nord e si collega alla dorsale del Monte Vergnano (614 m s.l.m), una modesta altura del complesso collinare che si estende a sud del lago Trasimeno (*Figg.* 1-2).

2. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE

La collina è composta da strati di sedimenti lacustri e fluviali riferibili alla cosiddetta Unità di Santa Maria di Ciciliano, formatasi nel Pleistocene inferiore a seguito dello svuotamento del Bacino Tiberino che durante il Pliocene occupava le grandi depressioni tettoniche corrispondenti alla media valle del Tevere e alla valle Umbra. L'unità è composta da strati sabbiosi e ghiaiosi, depositati da fiumi ad alta sinuosità e di tipo intrecciato, da argille siltose grigio-bluastre e strati di lignite accumulatisi all'interno di piccoli laghi e paludi che occupavano parte della pianura alluvionale (Ambrosetti *et al.*, 2004; Servizio Geologico d'Italia, 1969; Taticchi, 2007). In particolare nei dintorni di San Fortunato affiora in superficie un banco di sabbie giallastre del tenore di parecchie decine di metri che in tempi recenti è stato intaccato da una cava oggi dismessa.

3. ASPETTI STORICI

La chiesa di San Fortunato in Sigillo compare per la prima volta nei documenti d'archivio nel 1258, dopo il 1311 viene cinta di mura assieme all'abitato circostante, a difesa delle incursioni dei Tuderti.

La chiesa faceva parte della diocesi di Todi già ai tempi di Ludovico il Bavaro, quando è citata come termine di confine del territorio di Poggio Aquilone, e ne faceva ancora parte nel 1476 quando compare nel testamento del Conte Antonio Bulgarelli come beneficiaria di una donazione di 50 denari. Il Cardinale Fulvio della Corgna, vescovo di Perugia dal 1564 al 1574, concesse la chiesa in beneficio all'ordine dei Gesuiti, da poco insediatisi in città. L'edificio esistente risale al 1706 come dimostra la data scolpita sull'architrave della porta principale che reca anche il monogramma di San Bernardino. In seguito alla soppressione dell'ordine nel 1773 la tenuta di San Fortunato fu acquistata dalla famiglia Piazza, poi dagli Ottaviani e infine dai Corneli che ancora oggi ne sono i proprietari (Cavallucci, 2005; Grohmann, 1981; Nico Ottaviani, 2003; Vizzani, 2003; Alvi, sec. XVIII; Mazzerioli *et al.*, 2009; Nico Ottaviani, 2008; Martini *et al.*, 2009).

Dal fronte della cava di sabbia contigua all'insediamento sino al 2004 era possibile accedere all'interno di un breve tratto di cunicolo antico (Cavallucci, 2005) che era stato intercettato e in parte distrutto dallo scavo. In seguito alla cessazione dell'attività estrattiva e al reinterro della cava, su richiesta della Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Umbria, è stato realizzato un pozzo di cemento profondo 8,25 m, che costituisce l'attuale accesso (*Cap.* 1). Il cunicolo segue un orientamento NO-SE ed è scavato direttamente nel banco di sabbia senza alcun rivestimento in muratura. Lo speco presenta la caratteristica sezione ogivale delle gallerie idrauliche di epoca romana e preromana. A 10,85 m dall'attuale ingresso la galleria è ostruita da un accumulo di terreno argilloso evidentemente precipitato dall'esterno attraverso un pozzo (*Cap.* 2). Poco prima dell'interruzione il soffitto subisce un brusco salto di quota che sembra corrispondere al punto in cui due squadre di operai, che scavavano da direzioni opposte, si sono incontrate. Lungo tutta la galleria sono presenti piccole nicchie disposte a distanze pressappoco regolari, destinate a sorreggere lucerne ad olio (*Fig.* 4).

4. NUOVE ACQUISIZIONI

Nel 2004 sono stati individuati altri due tratti di galleria che presentano caratteristiche simili a quello già noto e che appartengono evidentemente allo stesso complesso. Questi cunicoli sono raggiungibili attraverso una cantina ipogea che li ha intercettati, il cui accesso è situato al pian terreno del Cantinone di San Fortunato (*Capp.* 3-6), massiccio edificio risalente al 1880 situato accanto alla fornace recentemente valorizzata (Capoccia, 2001), che aveva la funzione di cella vinaria e di magazzino del grano e degli altri prodotti della tenuta (*Fig.* 5). Il livello inferiore è occupato da un unico grande ambiente coperto a volta (*Fig.* 6), lungo le cui pareti si allineano parecchie botti di legno, alcune delle quali presentano intagliata la data di realizzazione. Il tratto sotterraneo della cantina è accessibile attraverso un passaggio a volta che si apre nella parete di destra, alle spalle di una delle botti (*Cap.* 4) (*Fig.* 7). Il complesso è formato



Figura 1 – Posizionamento geografico del sito

da due ampi corridoi scavati direttamente nel banco di sabbia e disposti tra loro ad angolo retto (*Fig.* 8), lungo le cui pareti si aprono grandi nicchie che un tempo ospitavano botti di legno e orci di terracotta destinati a contenere vino ed olio (rispettivamente *Capp.* 4,7,8 e *Capp.* 14, 7, 11).

Nella parte più interna della cantina (*Cap.* 11) la galleria ottocentesca intercetta perpendicolarmente un cunicolo preesistente (*Figg.* 10-11). Questo segue un andamento rettilineo con direzione NNO-SSE ed è percorribile per 46,45 m, dal suo termine originale verso monte (*Cap.* 12) sino al punto dove risulta ostruito da un accumulo di terreno argilloso (*Cap.* 15).

L'alto tratto di galleria antica, posto più a nord, è accessibile tramite uno stretto passaggio situato vicino al *Cap.* 8 (*Fig.* 9). Questo dapprima presenta direzione NNO-SSE, ma dopo 6 m, con due cambi di direzione, piega verso sinistra (*Cap.* 9) e prosegue con percorso rettilineo in direzione ONO-ESE per altri 29 m sino ad una ostruzione formata da un accumulo di terreno argilloso (*Cap.* 10). I segni lasciati dagli attrezzi di scavo sulle pareti indicano che il mutamento della direzione della galleria è dovuto alla giunzione di due tratti scavati contemporaneamente da direzioni opposte. Osservando la parete nel punto di congiunzione con la cantina, infatti, è possibile riconoscere i resti di un pozzo a sezione rettangolare munito di pedarole per la discesa poste al centro dei lati maggiori,



Figura 2 – Ortofoto della zona di San Fortunato in Sigillo con indicazione degli ambienti ipogei. I cerchietti rappresentano una ipotetica successione di pozzi posti lungo il percorso dell'acquedotto alla distanza di un actus.

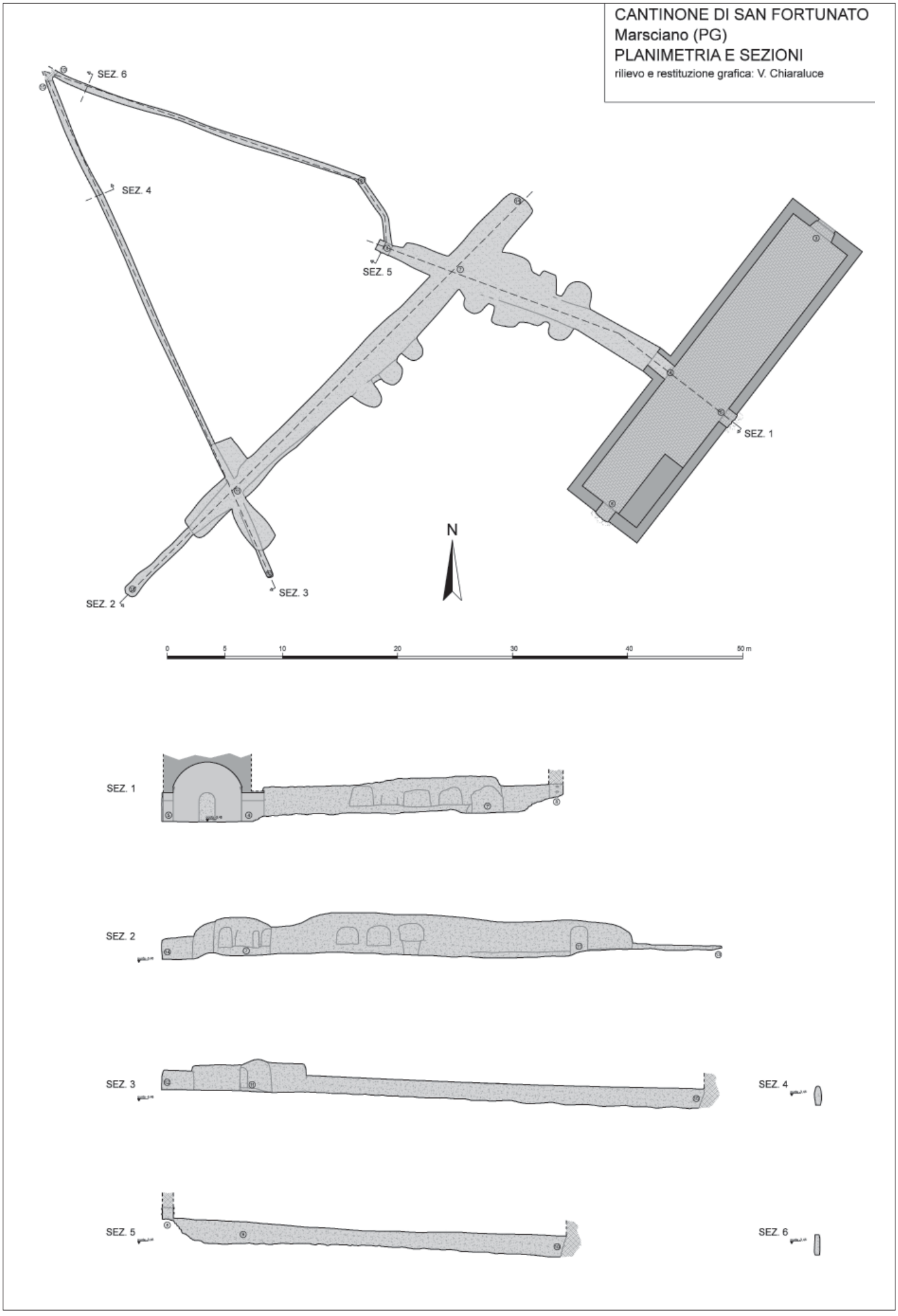


Figura 3 – Cunicolo della cava di sabbia. Pianta e sezioni

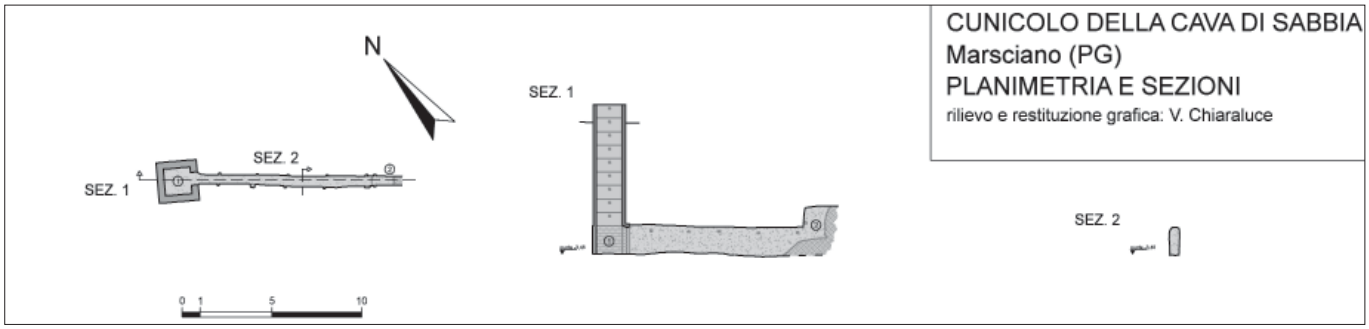


Figura 4 – Ipogeo del Cantinone. Pianta e sezioni



ostruito, anche in questo caso, da un accumulo di materiale gettato dall'alto (*Cap.* 8). Probabilmente il cunicolo antico proseguiva ancora oltre questo pozzo ma il suo percorso è stato completamente divorato dallo scavo della cantina ottocentesca.

Osservando il rilievo (*Fig.* 3) si deduce che i due tratti di cunicolo antico erano congiunti verso valle, nel punto dove ora sono entrambi interrotti dal cumulo di detrito, originatosi evidentemente alla base di un pozzo che raggiungeva la superficie (*Capp.* 10, 15). Nel complesso, gli ambienti ipogei del Cantinone, rilevati nel 2009, raggiungono uno sviluppo lineare complessivo di 154 m.

Figura 5 – Cantinone di San Fortunato



Figura 6 – Ambiente voltato al piano seminterrato del Cantinone



Figura 7 – Ambiente voltato al piano seminterrato del Cantinone



Figura 8 – Parte iniziale della cantina ipogea vista dal Cap. 4



Figura 9 – Pozzo a sezione rettangolare da cui si diparte uno dei tratti dell'acquedotto romano (Cap. 8)



Figura 10 – Punto in cui la cantina intercetta uno dei tratti dell'acquedotto romano (Cap. 11)



Figura 11 – Uno dei tratti dell'acquedotto romano (Capp. 11-15)



Figura 12 – Tubuli a siringa rinvenuti a valle del sito della vecchia cava

5. CONCLUSIONI

I tratti di cunicolo indagati sotto la collina di San Fortunato appartenevano ad un acquedotto sotterraneo, il cui sviluppo complessivo doveva superare i 400 m, destinato a captare l'acqua di vena e a condurla presso un sito di utilizzo, probabilmente una villa rustica, non ancora identificato, posto a SO del Podere Greppo Morelli, lungo il tracciato della Strada Orvietana, una viabilità certamente antica che collegava Perugia al territorio volsiniese (Scarpignato *et al*., 2003; Centro di Ricerche Ambiente Cultura Economia, 2001, con bibliografia precedente). Sia la presenza nei terreni arativi circostanti di frammenti di ceramica romana, tra cui tubuli a siringa (*Fig.* 12), sia le distanze che intercorrono tra i pozzi, che sembrano essere multiple dell'*actus* (35,52 m), fanno propendere per una datazione del complesso in epoca romana.

BIBLIOGRAFIA

Alvi G.B. (XVIII sec.), *Dizionario Topografico Tudertino*, testo manoscritto, Archivio Storico Comunale di Todi, Fondo Alvi, arm. I, palch. I, n. 23, f. 135r.

Ambrosetti P., Basilici G. (2004), in L. Passeri (a cura di), *Guide Geologiche Regionali. Appennino Umbro-Marchigiano*, I, 3a ristampa, Milano, pp. 45-47, 275-287.

Capoccia M. (2001), *Marsciano e il suo territorio. Guida turistica e culturale*, Marsciano, pp. 11-12.

Cavallucci F. (2005), *Marsciano. Segni e voci dell'uomo*, Marsciano, pp. 398-402.

Centro di Ricerche Ambiente Cultura Economia (a cura di) (2001), *Precatalogazione dei beni culturali del Comune di Marsciano*, CD Rom distribuito dal Comune di Marsciano, Marsciano.

Grohmann A. (1981), *Città e territorio tra medioevo ed età moderna (Perugia, secc. XIII-XVI)*, Perugia, tomo II, pp. 997-998.

Martini M.P., Nico Ottaviani M.G. (2009), *Lo statuto di Marsciano del 1531. Traduzioni e interpretazioni*, Quaderni Marscianesi, 14, Marsciano.

Mazzerioli L., Menganna C. (2009), *I marchesi Monaldi signori del castello di Migliano 1380-1937*, Collazzone.

Nico Ottaviani M.G (a cura di) (2003), *Albero et istoria della famiglia de' Conti di Marsciano di Ferdinando Ughelli. Storia di una famiglia signorile dalle origini ad Antonio conte di Marsciano, Parrano, Migliano*, con ristampa anastatica dell'opera dell'Ughelli, Marsciano, p. 133.

Nico Ottaviani M.G. (2008), *Statuti, territorio e acque nel Medioevo. Perugia e Marsciano, Tevere e Nestóre*, Quaderni del Centro per il collegamento degli studi medievali e umanistici in Umbria, 44, Spoleto.

Scarpignato M., Nico Ottaviani M.G., Covino R. (2003), *L'antica Via Orvietana. Collegamento tra Perugia e Orvieto attraverso il territorio di Marsciano*, Quaderni Marscianesi, 2, Marsciano.

Servizio Geologico d'Italia (1969), *Carta Geologica d'Italia, foglio 130 (Orvieto)*, 2a edizione, Ercolano.

Taticchi C. (2007), Il Fiume Nestore. Elementi geomorfologici, idrografici e tendenza evolutiva del tracciato tra Pietrafitta e Marsciano, Quaderni Marscianesi, 11, Marsciano, pp. 42-48.

Vizzani T. (2003), A*ppendice* in NICO OTTAVIANI, 2003, pp. 1-160 ed in particolare p. 76.

Potenzialità delle cavità ex-estrattive tra recupero ambientale e nuovi usi: applicazioni nel Parco dell'Appia Antica

Potential of abandoned underground quarries between environmental recovery and new uses: applications in the "Appia Antica" regional park

Paola Veronica Dell'Aira
Dipartimento di Architettura e Progetto,
Sapienza Università di Roma
E-mail: paolaveronica.dellaira@uniroma1.it

Carlo Esposito
Dipartimento di Scienze della Terra,
Sapienza Università di Roma
E-mail: carlo.esposito@uniroma1.it

Paola Guarini
Dipartimento di Architettura e Progetto,
Sapienza Università di Roma
E-mail: paola.guarini@uniroma1.it

Parole chiave (*key words*): cavità sotterranee (*underground cavities*), recupero e valorizzazione (*recovery and valorization*), approccio interdisciplinare (*interdisciplinary approach*)

RIASSUNTO

Quello del recupero e della valorizzazione dello spazio ex estrattivo (ipogeo o a "cielo aperto") è un ambito di ragionamento progettuale di significativa importanza, oltre a costituire una meta di intervento di grande sfida, in quanto saldo alleato delle contemporanee istanze di politica ambientale.

Il contributo presenta le esperienze condotte in due Ricerche Universitarie[1] aventi come coordinamento la Progettazione Architettonica, ma svolte in piena sinergia e condivisione d'intenti con le discipline di Scienze della Terra e della Psicologia Ambientale. La visione che sottende questa impostazione multidisciplinare si fonda sulla convinzione che il recupero delle aree di cava vada interpretato non semplicemente come indispensabile intervento di bonifica, rinaturalizzazione o messa in sicurezza, quanto piuttosto come verifica di fattibilità, volta alla ri-funzionalizzazione e al riuso, onde consentire una "re-immissione in vita" di questi territori.

Le cavità artificiali, infatti, pur nascendo a servizio della città di superficie e non presentando particolare pregio artistico, hanno un valore testimoniale da riscoprire e valorizzare. Il tema principale del nostro lavoro di ricerca ha riguardato pertanto l'indagine e lo studio di tali contesti, con un approfondimento specifico delle realtà caveali presenti all'interno del Parco dell'Appia Antica, esplorando la possibilità che questi luoghi possano essere aperti alla visita e inseriti in una dimensione di pubblica fruizione, sopperendo, in tal modo, alla necessità di reintegrazione urbana di spazi e servizi collettivi, senza ulteriore consumo di suolo.

Una fitta rete di cavità (tra totalmente sotterranee e non), originate, principalmente, dalla coltivazione delle pozzolane sottende, infatti, la superficie naturale del territorio del Parco, lambendo sepolcri, colombari, catacombe e altri ambienti di straordinario interesse storico-archeologico, tracciando un affascinante disegno di "città di sotto". L'ipotesi è quella di creare, parallelamente ai consueti itinerari storico-archeologici e ambientali interni al Parco, diversi percorsi di fruizione alternativi e specifici, legati da *fil-rouge* funzionali o da narrazioni tematiche, con possibilità di accessibilità straordinaria ad alcuni siti puntuali.

Ogni occasione, ogni luogo, potrebbe attivare funzioni compatibili con la morfologia dello spazio stesso, di volta in volta incontrato e trattato. Le diverse morfologie, le diverse nature, possono agire da indicatori d'uso possibile (allestimenti espositivi, percorsi immersivi di conoscenza, strutture di ricerca, spazi d'incontro, etc.) e aprire parallelamente il campo ad attività di monitoraggio e prevenzione dei rischi di crolli e voragini, promuovendo sperimentazioni in ambito geologico, speleologico, archeologico.

ABSTRACT

The recovery and enhancement of abandoned mining areas (either underground or open-pit) is a significant and challenging task that can be also properly framed within the contemporary environmental policy issues.

The paper presents the experiences carried out in two University Researches coordinated by the Architectural Design but carried out in full synergy and sharing of intent with the disciplines of Earth Sciences and Environmental Psychology. The vision that underlies this multidisciplinary approach is based on the belief that the recovery of quarry areas should be interpreted not as a "simple" remediation, re-naturalization or securing, but rather as a feasibility check, aimed at re-functionalization and reuse, thus allowing for a "re-entry into life" of these territories.

The artificial cavities, originally excavated to supply construction materials to the surface city and – thus – not presenting particular artistic value, have a testimonial value to be rediscovered and enhanced. The main theme of our research work has therefore focused on the investigation and study of these contexts, with a specific study of the quarries within the Appia Antica Park, exploring the possibility that these places can be opened for the visit and inserted into a public-use dimension, thus compensating for the need for the urban reintegration of collective spaces and services, without further land consumption.

A dense network of cavities (between totally underground and not), originated mainly from the cultivation of "pozzolane", features the natural surface of the Park territory, rich in sepulchres, columbaria, catacombs and other environments of extraordinary historical-archaeological interest, tracing a fascinating drawing of "city below". The hypothesis is to create, alongside the usual historical-archaeological and environmental itineraries within the Park, alternative and specific fruition paths, linked by a functional common theme or

1 I progetti di Ricerca di Ateneo, Sapienza Università di Roma si intitolano rispettivamente:
Sottosuoli urbani. La progettazione della città che scende, anno 2012; gruppo di ricerca: Paola Veronica Dell'Aira (responsabile), Andrea Grimaldi, Filippo Lambertucci, Paola Guarini, Stefano Aragona, Fabio Bisegna, Gianluca Bianchi Fasani, Ferdinando Fornara, Salvatore Miliziano, Fabio Recanatesi, Chiara Burattini, Giovanni Dibenedetto, Carla Molinari, Erica Molinario, Valentina Nunnari, Valerio Ottavino, Isabella Santarelli, Giovanni Tomassetti, Leo Viola. I risultati della ricerca sono pubblicati in: *Sottosuoli Urbani. La progettazione della "città che scende"*, a cura di: P.V. Dell'Aira, A. Grimaldi, P. Guarini, F. Lambertucci. vol. 6 DiAP Print Progetti, Quodlibet, Macerata, 2015, pp. 264.
Nuovi cicli di vita per le aree ex estrattive. Da risorsa produttiva a risorsa "vasta": sociale, ambientale, culturale, economica, anno 2014; gruppo di ricerca: Paola Guarini (responsabile), Paola Veronica Dell'Aira, Stefano Aragona, Carlo Esposito, Giuliano Milana, Salvatore Miliziano, Luca Montuori, Riccardo Petrachi, Alma Rossi, Caterina Rossetti, Silvia Ariccio, Carla Molinari, Erica Molinario, Giulia Perugi, Isabella Santarelli. I risultati della ricerca sono pubblicati in: *Il recupero dei siti di cava: dall'intervento puntuale alla strategia di scala vasta. Ipotesi per il territorio del Parco dell'Appia Antica*, a cura di: P.V. Dell'Aira, P. Guarini. vol. 10 DiAP Print Progetti, Quodlibet, Macerata, 2017, pp.192.

thematic narratives, with the possibility of extraordinary accessibility to some specific sites.

Every occasion and place could activate functions compatible with the morphology of the space itself. The different morphologies and natures, can act as indicators of possible use (exhibition set-ups, immersive paths of knowledge, research facilities, meeting spaces, etc.). The same sites, that should be carefully monitored to prevent the risk related to falls of rock blocks up to the cavity collapse, can be also exploited for promoting experiments in geological, speleological and archaeological fields.

1. IL RECUPERO DELLE CAVE COME PROGETTO INTERDISCIPLINARE

La valorizzazione delle aree estrattive dismesse, sia ipogee che di sopra-suolo, rappresenta un'attività preziosa in una proficua strategia di trasformazione delle città e dei territori, che guardi al risparmio di suolo e che minimizzi gli impatti ambientali.

Il presente contributo sintetizza l'esperienza maturata nell'ambito di due Ricerche Universitarie che hanno visto il coinvolgimento di esperti di diverse discipline con l'intento di superare l'attuale interpretazione del recupero delle aree di cava come solo intervento di bonifica, rinaturalizzazione o messa in sicurezza, e proporre una nuova sfida al progetto, volta a verificare la fattibilità di ipotesi di ri-funzionalizzazione e riuso, che consentano una "reimmissione in vita" di questi territori.

In questa prospettiva, diviene irrinunciabile proporre un approccio interdisciplinare, un approccio integrato, che superi gli specialismi e consenta di affrontare la complessità delle questioni in gioco.

Se in una visione di valorizzazione e riuso l'Architettura può dare forma ad un'ipotesi di trasformazione e svolgere il ruolo di componente trainante, il discorso non può svilupparsi e progredire senza il supporto dei suoi presupposti avvaloranti, senza cioè il contributo di discipline sostanzialmente complementari al progetto di architettura.

Tra questi, due ambiti di competenza appaiono assolutamente propedeutici, rispetto a ogni ipotesi di riuso. Da un lato, è imprescindibile il possesso di solide conoscenze nel campo della Psicologia Sociale e Ambientale: competenze capaci di agire da guida verso l'abitabilità funzionale, biologica ed emotiva di questi spazi particolarmente inospitali e "difficili". Dall'altro, diviene fattore determinante l'ausilio delle Scienze della Terra e, in special modo, la conoscenza della natura geologica dei siti, il carattere dei palinsesti, le consistenze strutturali, i materiali caratterizzanti il contesto ex-estrattivo.

Per tramite della stretta collaborazione tra Architettura e Geologia, il progetto di recupero può spingersi oltre la riduzione e/o annullamento del cosiddetto "rischio", e cogliere l'opportunità di restituire questi luoghi alla conoscenza ri-destinandoli al pubblico uso.

L'obiettivo è quello di recuperare i siti di cava, valorizzando il patrimonio geologico, la natura morfologica dello scavo, le peculiarità degli invasi spaziali, le qualità paesaggistiche dei luoghi, e tramutarli in risorsa culturale, turistica ed economica.

In termini tecnici, la sinergia consente di padroneggiare la valutazione delle condizioni di stabilità delle gallerie, di individuare, di queste, i settori critici, di formulare eventuali interventi di messa in sicurezza. Essa permette inoltre di misurare con precisione il gradiente di abitabilità, funzionale e percettiva, degli invasi e la loro salubrità o pericolosità eventuale dal punto di vista fisiologico. La visione che sottende questa impostazione multidisciplinare si fonda quindi sulla convinzione che il recupero delle aree di cava vada interpretato come opportunità per restituire questi luoghi alla conoscenza, al pubblico godimento, consentendone la fruizione e un nuovo uso.

La ricerca ha trovato l'idoneo campo di sperimentazione nel Parco dell'Appia Antica (*Fig.* 1) che, per le presenze storico-archeologiche e naturalistiche nonché per la disponibilità e la lungimiranza dell'Ente gestore, rappresenta un ottimo esempio di zona da rivalorizzare anche attraverso la creazione di percorsi tematici che ne mettano in luce i pregi geologici, archeologici e storico-paesaggistici.

Ciò che si era avviato nella prima Ricerca come ragionamento teorico, per concludersi con l'indagine, il rilievo e l'esplorazione pro-

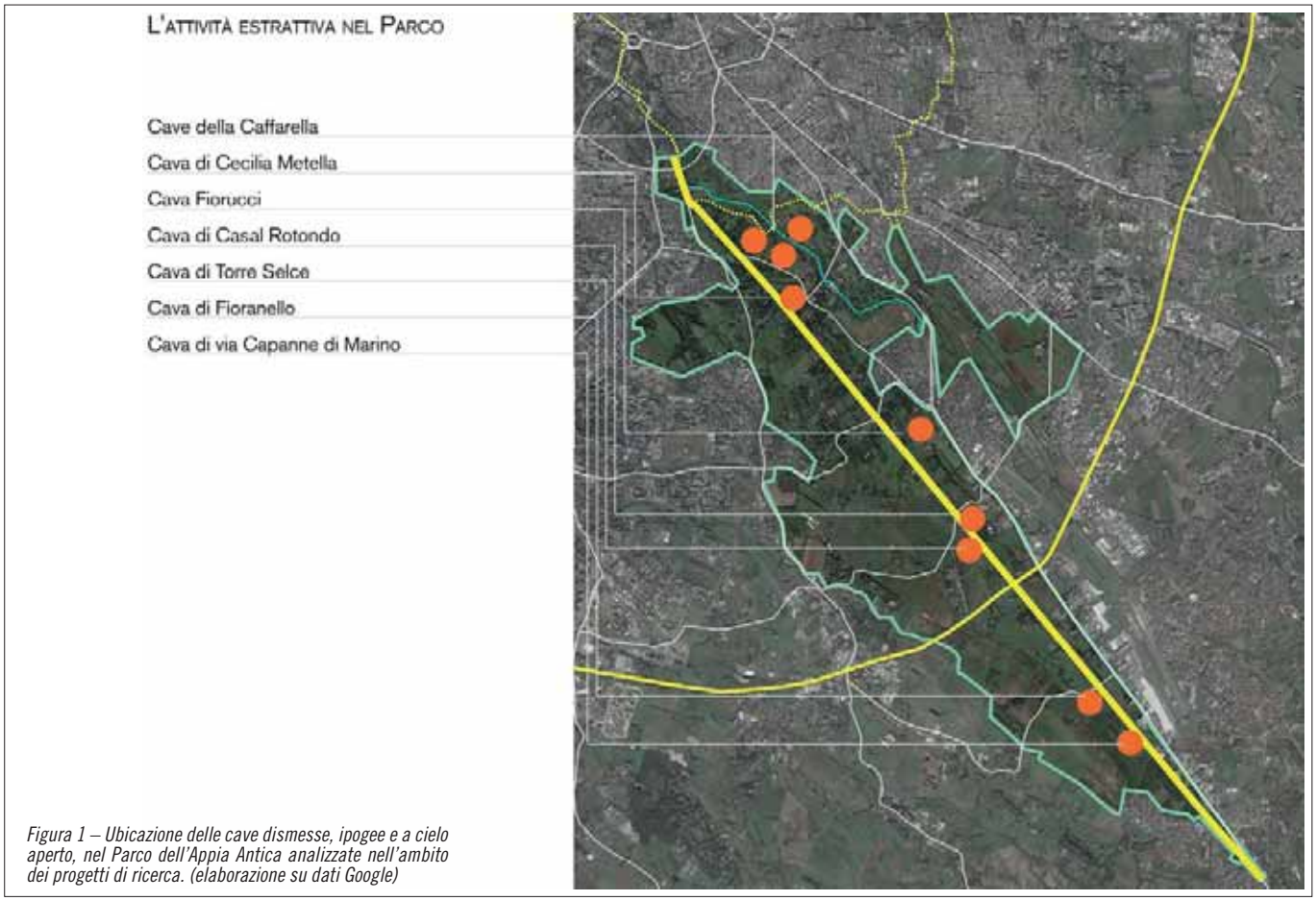


Figura 1 – Ubicazione delle cave dismesse, ipogee e a cielo aperto, nel Parco dell'Appia Antica analizzate nell'ambito dei progetti di ricerca. (elaborazione su dati Google)

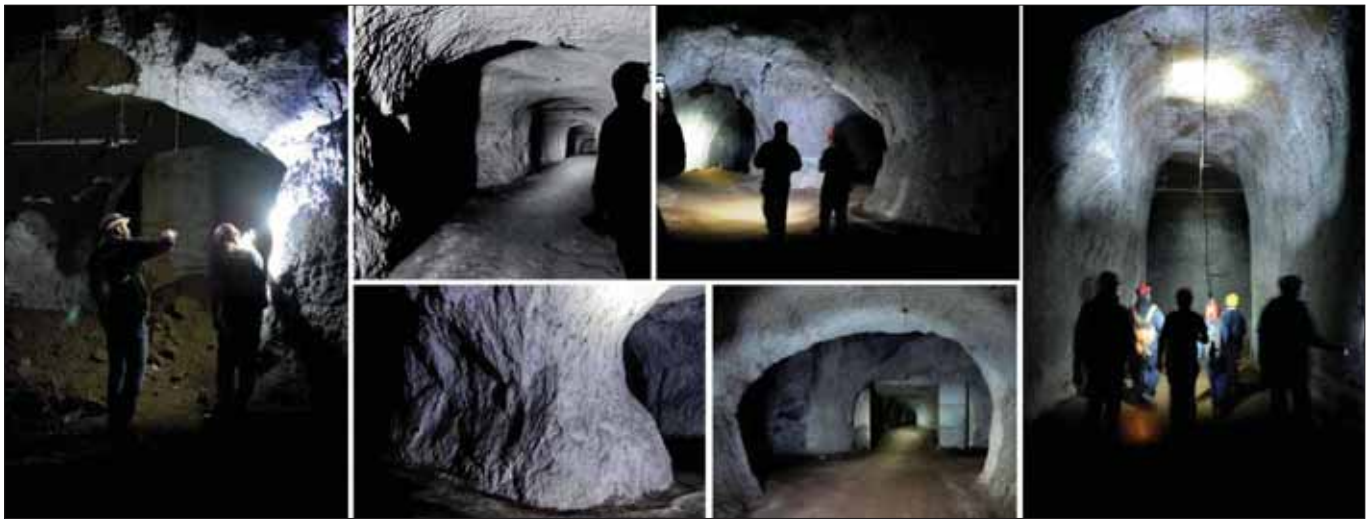


Figura 2 – Cave del Parco della Caffarella. Le gallerie di coltivazione: variazioni delle configurazioni morfologico-spaziali (foto di C. Molinari e I. Santarelli)

gettuale sul sito ipogeo della Cava dismessa di Torre del Fiscale (antico giacimento di pozzolana, interno all'omonimo Parco), ha trovato implementazione e approfondimento nell'ambito della successiva Ricerca, attraverso il tracciamento sia di linee guida di intervento per singoli luoghi (criteri e soluzioni dal carattere più metodologico che formale) sia attraverso l'ipotesi della creazione di una rete di siti, bisognosi di recupero, capaci di costruire, in interazione tra loro, vasti e articolati itinerari di visita e, insieme, sedi di nuove funzionalità urbane.

Lungo l'Appia Antica, all'interno dell'attuale Parco Regionale, è presente un'estrema pluralità di siti, per lo più unici e distintivi in quanto a posizioni, dimensioni, caratteristiche, nature e qualità (*Fig.* 2).

In particolare, la configurazione dell'invaso censito, risalente sia alla propria originaria morfologia naturale, sia alla successiva trasformazione antropica, volta alla coltivazione dei suoi giacimenti, ha agito da elemento ispiratore, costituendo il primo fattore da proteggere. Ciò è valso in ordine a due grandi ragioni:

- la valorizzazione dei segni testimoniali dell'uso trascorso: un uso da non discriminare e, quindi, da non occultare per semplicistica o ideologica condanna del suo movente economico;
- la massimizzazione delle potenzialità già iscritte nelle fattezze morfo-dimensionali, quando largamente aderenti, se non addirittura coincidenti con i requisiti imposti dai nuovi usi da introdurre.

Dalla mappatura, è emersa l'elevata discrepanza di condizioni che attraversa il "parco

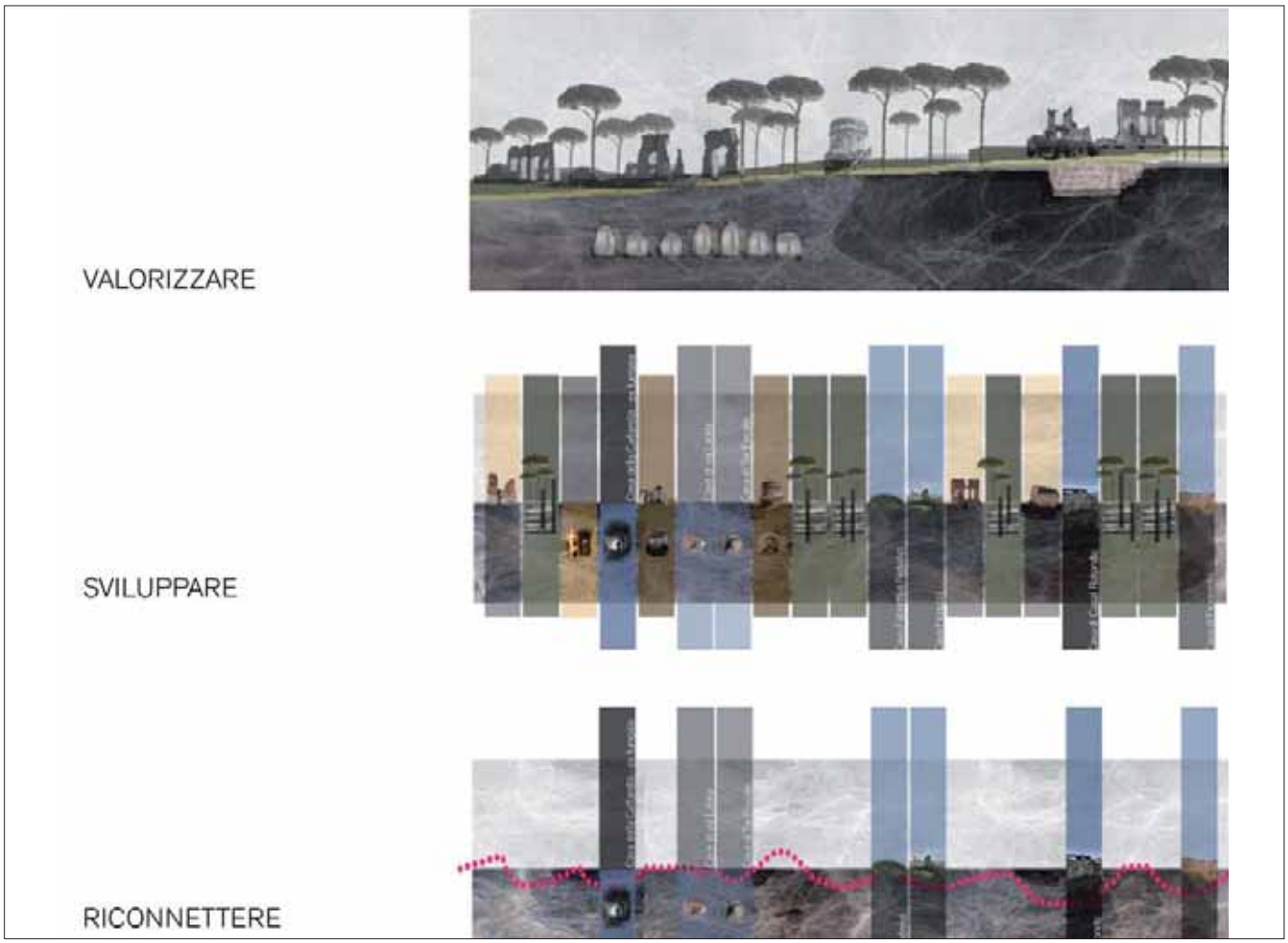


Figura 3 – Azioni di sistema per il recupero delle cave nel Parco dell'Appia Antica. (disegno di C. Molinari)

cave" del territorio interessato. Le divergenze spaziano dalle forme ai colori, dalla stratigrafia alle maggiori o minori continuità interne, dal livello di degrado, alla prestanza statica, alla salubrità ambientale.

Per tale motivo, il ragionamento già avviato nell'ipotesi di riconversione del singolo caso della Cava di Torre del Fiscale, trasformato progettualmente, in spazio di visita, conoscenza, sperimentazione, attraverso laboratori didattici e funzioni di servizio, ha trovato la sua migliore estensione in un lavoro di "messa a sistema" di più luoghi dismessi, ipogei e/o "a cielo aperto", capaci di correlarsi, vuoi per analogia di usi compatibili, vuoi per complementarietà di destinazioni: più luoghi in grado di tracciare un quadro esaustivo delle diverse funzionalità necessarie all'interno del Parco. Dall'indagine ci si è quindi mossi verso il tracciamento di un Masterplan: l'invenzione di una rete tematica, la creazione di una collana di siti.

Le strategie generali del progetto di recupero delle aree di cava nel Parco dell'Appia Antica sono riconducibili a tre principali azioni di sistema (*Fig.* 3) in grado di promuovere un processo di riconnessione ambientale, storico, culturale:

- *valorizzare* le aree ex-estrattive del Parco, promuovendone i valori storico-paesaggistico, geologico, archeologico, ambientale, testimoniale;
- *sviluppare* un indirizzo tematico che si offra come sistema fruitivo/didattico specifico del Parco;
- *riconnettere* le aree ex-estrattive ad aree e/o preesistenze di grande valore archeologico, storico-artistico, naturalistico, paesaggistico e ambientale.

Sono stati successivamente messi a fuoco alcuni temi e azioni progettuali volti a favorire l'individuazione degli accessi alle cave all'interno del Parco e a facilitare la fruibilità dei siti: migliorare la visibilità degli ingressi e disegnarne la soglia, individuare percorsi in sicurezza, predisporre minimali apparati di supporto alla visita, illuminare lo spazio per accompagnare il percorso ed esaltare la morfologia dello scavo (*Fig.* 4).



Figura 4 – Valorizzazione delle cave ipogee. Temi e azioni progettuali

2. IL RUOLO DELLA GEOLOGIA A SUPPORTO DEL RECUPERO DEI SITI EX-ESTRATTIVI

Il Parco dell'Appia antica si trova nel settore meridionale della città di Roma che, dal punto di vista geologico, è dominato dalla presenza dei depositi vulcanici essenzialmente riferibili all'attività del distretto vulcanico dei Colli Albani. Nell'area sono estesamente presenti depositi di pozzolana (in particolare pozzolane rosse e nere), largamente sfruttati fin da tempi antichi come materiale edilizio; tufi (Tufo Lionato) entro i quali sono state storicamente ricavate cave di prestito ma anche e soprattutto spazi ipogei per la tumulazione e lave basaltiche ("Colata di Capo di Bove" (*Auctorum*), anch'esse sfruttate fin dai tempi dell'antica Roma per le ottime prestazioni quale materiale edilizio (in particolare con funzione di basolato stradale).

Un fitto reticolo ipogeo, articolato anche su più livelli, è presente nel sottosuolo dell'area in corrispondenza dei massimi spessori delle pozzolane. L'escavazione delle cave ipogee è stata in larga parte possibile grazie al peculiare assetto geologico tale per cui il Tufo Lionato, con discrete caratteristiche meccaniche, presente al tetto delle pozzolane, ha garantito la formazione dell'effetto arco nella calotta delle gallerie estrattive. Tuttavia, nel

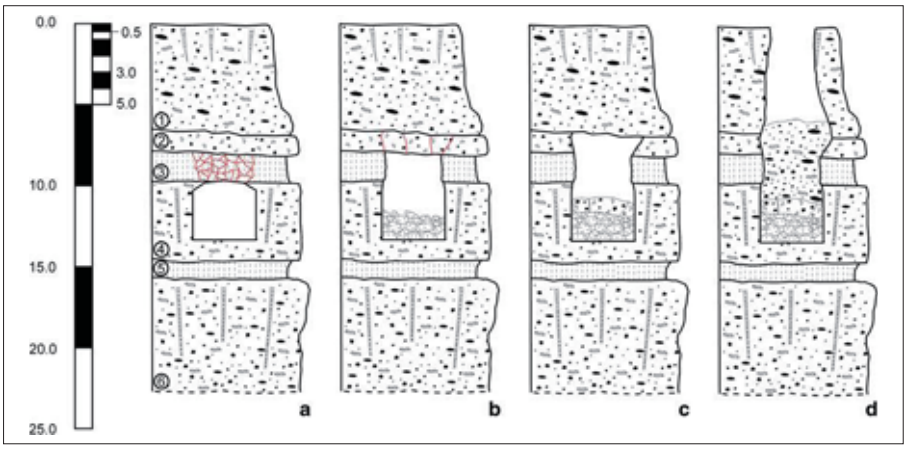


Figura 5. Modello evolutivo del collasso progressivo della calotta dei reticoli ipogei nelle vulcaniti albane del settore meridionale di Roma fino alla formazione di voragini in superficie. Legenda: 1) Pozzolanelle; (2) Tufo Lionato; (3) Paleosuolo 1; (4) Pozzolane Nere; (5) Paleosuolo 2; (6) Pozzolane Rosse. (da Bianchi Fasani et al.*, 2011)*

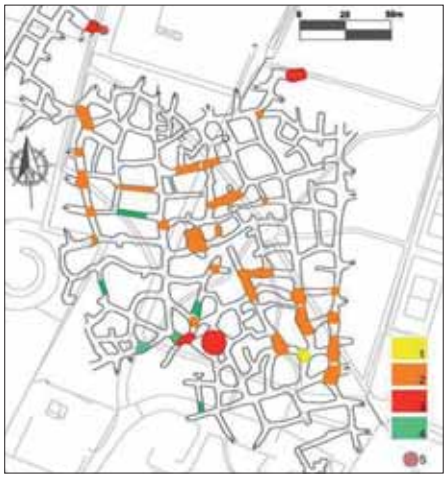


Figura 6 – Esempio di zonazione di un reticolo ipogeo in termini di predisposizione al dissesto in funzione dei risultati di sopralluoghi in sito e di comparazione delle condizioni rilevate con il modello di Bianchi Fasani et al. *(2011). Legenda: 1) fessurazioni poligonali nel paleosuolo (stadio A di figura 5); 2) collasso del paleosuolo (stadio B di figura 5); 3) collasso del Tufo Lionato (stadio C di figura 5); 4) e 5) cavità totalmente riempita di detrito o sink-hole (stadio D di figura 5). (da Bianchi Fasani et al., 2011)*

medio e lungo termine, l'accumulo di stress, nonché la degradazione delle proprietà meccaniche del tufo legata a processi di alterazione, ha portato e tuttora porta spesso, alla migrazione verso l'alto delle calotte fino al vero e proprio collasso delle cavità ed alla formazione di voragini in superficie, secondo lo schema e le modalità ben descritti nel lavoro di Bianchi Fasani *et al*. (2011), con le relative conseguenze in termini di rischio (*Fig.* 5).

In base al modello concettuale proposto da Bianchi Fasani *et al*., l'osservazione delle condizioni della calotta delle gallerie in termini di litologia affiorante e stato di fratturazione, unitamente alla conoscenza della soggiacenza e, quindi, del carico litostatico agente, rappresentano una prima indicazione per la valutazione preliminare delle condizioni di stabilità nei reticoli ipogei (*Fig.* 6). In base a questa valutazione è poi possibile progettare interventi strutturali, localizzati o diffusi, di messa in sicurezza e/o sistemi di monitoraggio con finalità di allertamento.

Anche per ciò che concerne le ex-cave a cielo aperto, un adeguato rilievo geostrutturale e geomeccanico, corroborato da rilievi topografici ad altissima risoluzione (tipo LiDAR), è un elemento fondamentale per la valutazione della pericolosità, almeno in termini di zonazione delle aree a maggior propensione al dissesto, e quindi delle potenziali condizioni di rischio.

La riscoperta di luoghi attualmente abbandonati (e fonti di rischio), se non addirittura degradati, quali le cave dismesse sia sotterranee che a cielo aperto, rappresenta anche un'opportunità unica per illustrare "dal vivo" le peculiari caratteristiche dell'assetto geologico di un settore della città ampiamente rappresentativo della Roma storica, dando così la possibilità di istituire potenziali geo-siti capaci di mettere in evidenza, non solo l'evoluzione geologico-ambientale recente dell'Urbe, ma anche la stretta connessione tra l'ambiente geologico e lo sviluppo socio-economico della civiltà romana.

In definitiva, il ruolo delle Scienze della Terra nell'ambito del progetto può essere visto nella duplice veste di contributo geologico-tecnico, per la definizione delle condizioni di stabilità delle cavità ipogee così come dei fronti di cava a cielo aperto dismessi e, quindi, per garantire le condizioni minime di sicurezza per una loro fruizione anche attraverso proposte progettuali e di monitoraggio per la messa in sicurezza, nonché di contributo geologico-stratigrafico e vulcanologico, per rendere i siti di interesse delle finestre sull'evoluzione geologica recente dell'Urbe e, in particolare, sulle "georisorse" che tanto hanno contribuito allo sviluppo ed al successo della civiltà romana.

3. GLI AMBITI TEMATICI DI INTERVENTO

Cinque temi, nello specifico, facenti capo ad altrettante categorie interventuali hanno scandito il percorso di lavoro e i risultati del processo progettuale con specifico riferimento al recupero degli ambienti ipogei.

3.1 Cave come tappe di percorsi tematici

Nell'operazione condotta, per il Masterplan Cave del Parco dell'Appia Antica, si ipotizza che la comunicazione della rete dei luoghi, ovvero del sistema recuperato e "ri-editato" possa avvenire attraverso la costruzione di un itinerario artistico. Il tema è quello dell'arte *en plein air*: un insieme di opere scultoree, poste a punteggiare il territorio, in prossimità degli accessi ai siti ex-estrattivi, quale strumento introduttivo che ne evidenzi le interrelazioni alla maggior scala del paesaggio complessivo del Parco. Le ex-cave divengono polarità funzionali all'interno di un paesaggio culturale. Tra le forme d'arte più appropriate ai temi e ai contesti, si fa esplicito richiamo alle omo-



Figura 7 – Cava di Tor Fiscale. Le colonne di luce, landmark luminosi (disegno di C. Molinari)

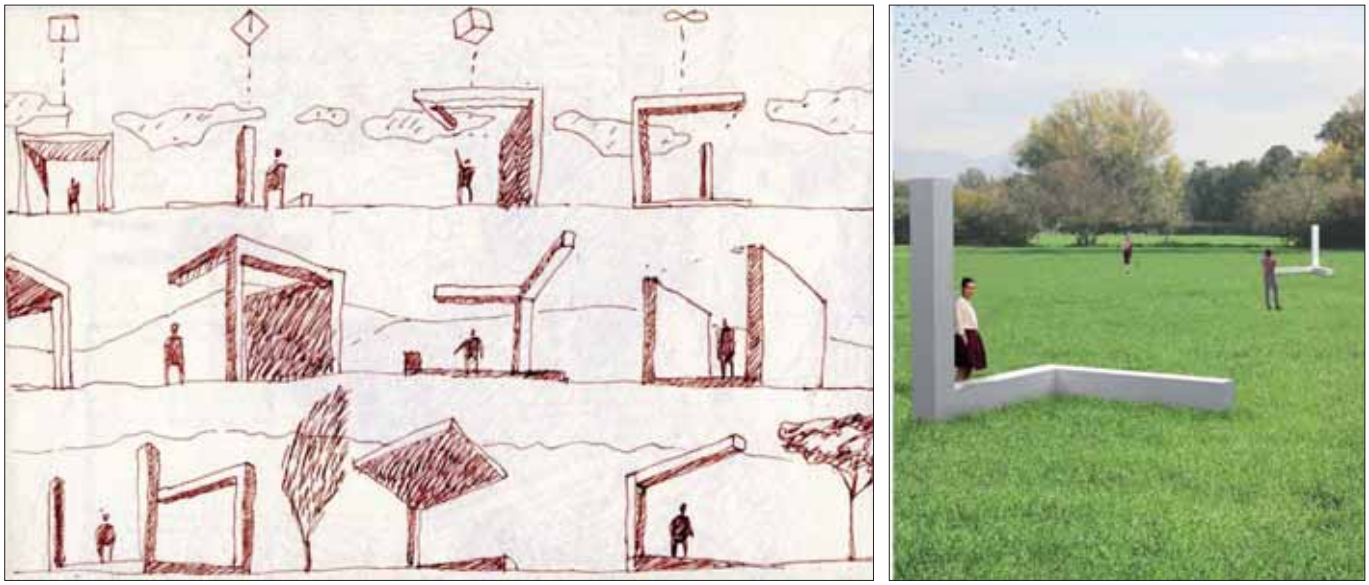


Figura 8 – Cave del Parco della Caffarella. Gli Elementi Totem, oggetti figurativi di riferimento: variazioni spaziali (schizzo di L. Montuori), fotoinserimento

loghe, ancorché alternative, ricerche estetiche della *Land Art* degli anni sessanta e settanta, dell'Arte Ambientale e dell'*Art in Nature*.

3.2 Cave come "leganti" tra sotto-e sopra-suolo

Nel recupero della Cava di Tor Fiscale, il reticolo sotterraneo, la sua estensione, il suo andamento, affiorano in superficie segnalando la loro rinnovata presenza attraverso un sistema di attrezzature di *land_marking*, una catena di esili "colonne di luce" che fanno da riscontro *en plein air* dell'architettura di sottosuolo (*Fig.* 7).

Nell'ipotesi "sistemica" formulata per il Parco dell'Appia, si è considerata l'ipotesi di evidenziare gli itinerari riproducendo in superficie i percorsi attraverso "Elementi Totem": oggetti tridimensionali in cemento o acciaio come elementi figurativi di riferimento, per orientare il visitatore, evidenziando la presenza delle aree recuperate, segnalando la prossimità di una discenderia o di un ingresso (*Fig.* 8). Gli Elementi Totem hanno altresì il compito di informare e spiegare le caratteristiche geologiche e spaziali degli ambienti di cava, sottolineando e identificando i luoghi.

3.3 Le "porte" d'accesso, le soglie: ingressi in piano e discenderie

Sono state progettate architetture minime che segnano gli ingressi alle cave e contengono servizi introduttivi alla fruizione delle aree: i portali d'accesso (*Fig.* 9).

L'esperienza dello spazio cavo viene preannunciata attraverso la realizzazione di due tipi di strutture. Le prime sono pensate per segnalare il punto di passaggio tra l'esterno e l'interno; sono elementi volumetricamente finiti, cubi apribili, scomponibili, che chiudono l'ingresso delle cave attraverso una camera di passaggio, un luogo che non è né un fuori né un dentro, che prelude all'esperienza straniante e astratta del buio sotterraneo. Le seconde, più aperte, ricostruiscono il cubo per parti, attraverso frammenti di una griglia ritagliati in una rete infinitamente più vasta, riferita alla scala geografica.

3.4 La valorizzazione delle morfologie. L'intervento antropico "a seguire": usi e percorsi interni

Al di sotto del piano di campagna, l'inserimento di oggetti o elementi artificiali è limitato al minimo per lasciare che sia l'esperienza stessa dello spazio a prevalere (*Fig.* 10). È quest'ultima, infatti, che istruisce e guida le fattibilità: gli usi compatibili, le valenze, le potenzialità già presenti, semplicemente apprezzabili e valorizzabili. Parliamo, in questo caso, non tanto di

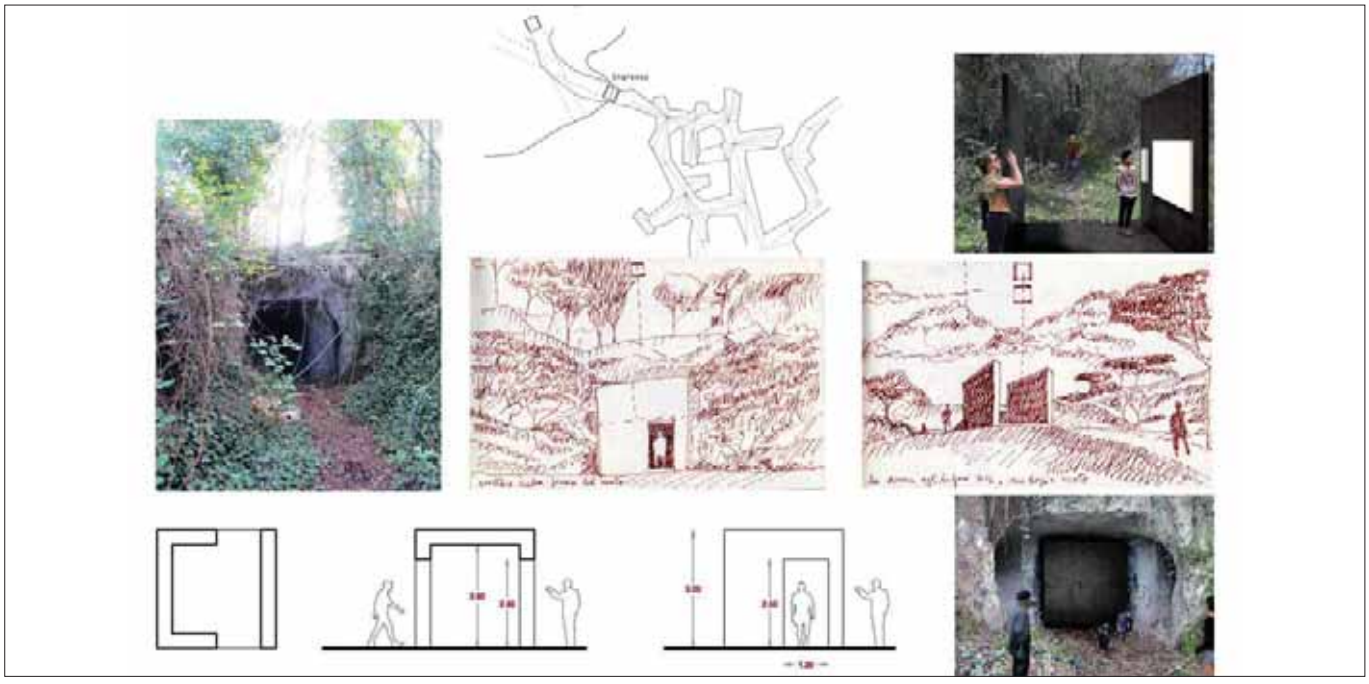


Figura 9 – Cave del Parco della Caffarella. Architetture minime di ingresso alle cave e di introduzione alla fruizione: planimetria, pianta, sezioni, fotoinserimenti, disegni di studio (schizzi di L. Montuori)

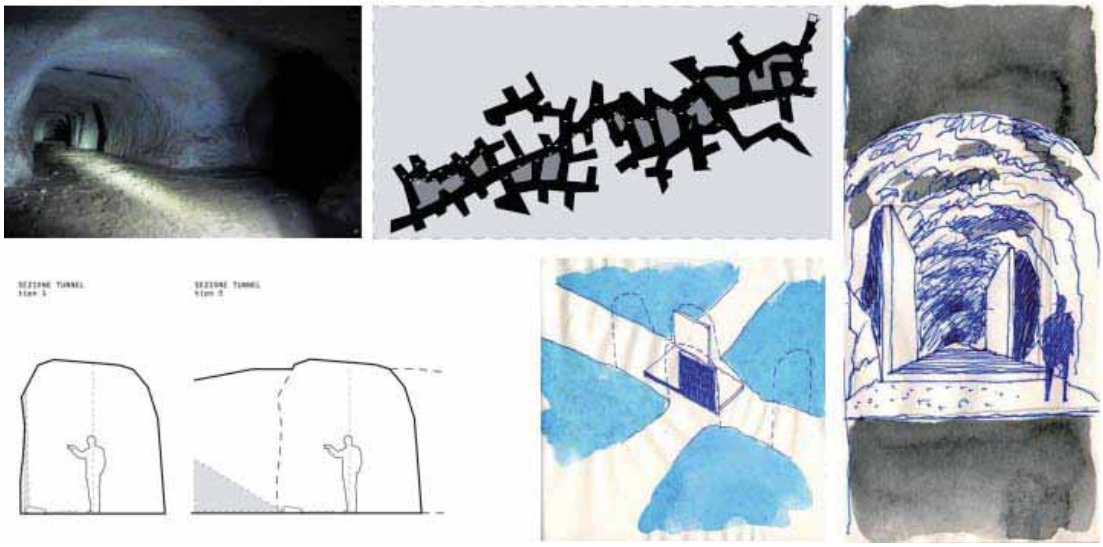


Figura 10 – Cave del Parco della Caffarella. Il percorso di visita, luce e ombra: planimetria, sezioni, disegni di studio (schizzi di L. Montuori)

riconversione come trasformazione, ma piuttosto di un progetto di sottoscrizione e conferma.

3.5 I servizi e le attrezzature di visita: arredo, luce, corredi tecnici

Il sistema delle superfici pavimentate è stato studiato come piano d'installazione (*plug-in*) di dispositivi di supporto alla visita: elementi di arredo, sostegni informativo-didattici, apparecchi illuminanti (*Fig.* 11).

Sui piani verticali si possono immaginare alcuni elementi esplicativi e pannelli didattici retroilluminati alternati a vere e proprie finestre o punti di vista su cunicoli non esplorabili. Il novero delle soluzioni elaborate ha condotto alla stesura di un abaco di componenti modulari.

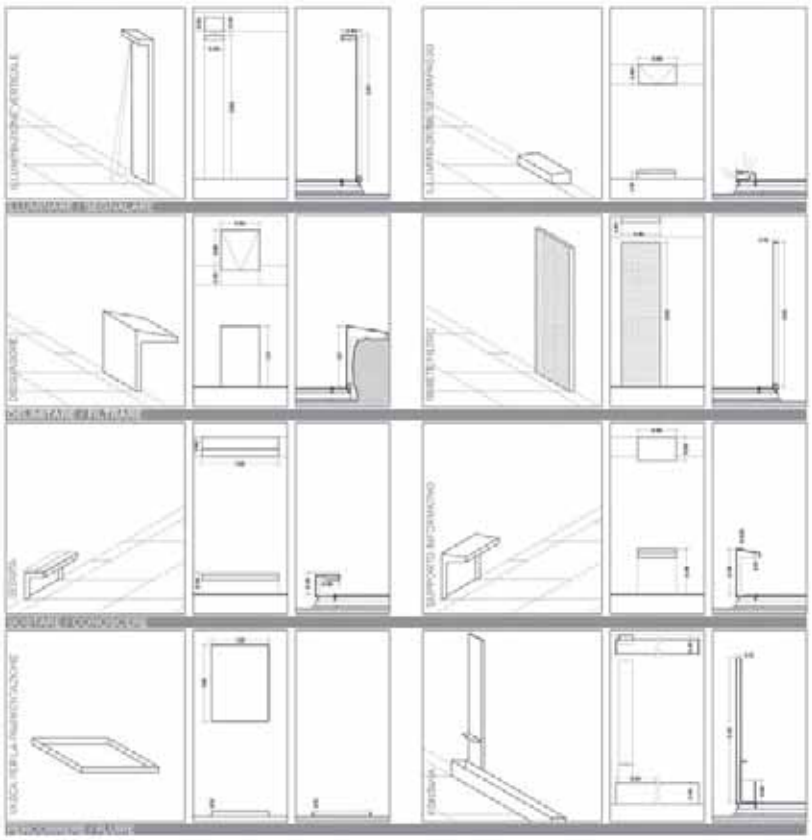


Figura 11 – Cave del Parco dell'Appia Antica. Dispositivi di supporto alla visita: elementi di arredo, sostegni informativo_didattici, apparecchi illuminanti

4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le cave rappresentano un patrimonio culturale da valorizzare, suggerendo un cambiamento di prospettiva e di visione: da luoghi di degrado e deturpamento del paesaggio naturale a "geositi", da elementi di cesura fisica e ambientale a occasioni per creare sistemi di relazione territoriale e paesaggistica con l'ambiente cui appartengono, relazioni culturali e fruitive con reti di luoghi notevoli per pregio storico, archeologico, naturalistico.

Il recupero delle cave dismesse costituisce un'importante occasione per ricomporre nel tempo testimonianze di epoche, culture, usi, frammenti di stili di vita e allo stesso tempo far emergere, attraverso queste "finestre a cielo aperto", la storia geologica di un territorio (Rossi, 2017), il palinsesto di strutture fisiche, di livelli di suolo. L'obiettivo del lavoro di ricerca è stato quello di suggerire una fruizione che esalti il fascino percettivo del paesaggio sotterraneo, che narri attraverso la lettura del sottosuolo le vicende dell'umanità e, allo stesso tempo, rappresenti una testimonianza visitabile del patrimonio geologico.

Ogni luogo è chiamato ad attivare funzioni compatibili con la morfologia dello spazio stesso, ad agire da indicatore d'uso possibile (allestimenti espositivi, percorsi immersivi di conoscenza, strutture di ricerca, etc.) e ad aprire parallelamente il campo ad attività di monitoraggio e prevenzione dei rischi di crolli e voragini, promuovendo sperimentazioni in ambito geologico, speleologico, archeologico.

Il progetto di valorizzazione e fruizione dei siti di cava deve fondarsi su invenzioni architettoniche di supporto a nuove funzionalità urbane ma, allo stesso tempo, deve prestare la massima attenzione al benessere fisico e psicologico, nonché garantire irrinunciabili condizioni di sicurezza e di stabilità delle strutture. Sono questi i presupposti dello sguardo interdisciplinare maturato all'interno della Ricerca, nella convinzione che per queste tipologie di interventi siano indispensabili "virtuose alleanze" tra complementari esperienze di campo.

BIBLIOGRAFIA

Bianchi Fasani G., Bozzano F., Cercato M. (2011), *The underground cavity network of south-eastern Rome (Italy): an evolutionary geological model oriented to hazard assessment*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 70: 533-542.

Rossi A. (2017), *Il parco di sotto: l'importanza delle cave dismesse nel sistema di fruizione al Parco Regionale dell'Appia Antica*, in P.V. Dell'Aira, P. Guarini (a cura di), Il recupero dei siti di cava: strategie di scala vasta. Ipotesi per il Parco dell'Appia Antica, vol. 10 DiAP Print Progetti, Quodlibet, Macerata.

Gli ipogei di Bagnoregio e Civita (Viterbo): una ricchezza (quasi) sconosciuta

The hypogees of Bagnoregio and Civita (Viterbo): a resource (almost) unknown

Parole chiave (*key words*): Pleistocene (*Pleistocene*), Lazio (*Lazio*), Civita di Bagnoregio (*Civita di Bagnoregio*), stratigrafia (*stratigraphy*), tufo vulcanico (*volcanic tuff*), argille marine (*marine clays*), ipogei (*hypogea*), patrimonio geologico (*geological heritage*)

Giovanni Maria Di Buduo
Geologo
E-mail: giovannimariadibuduo@gmail.com

Valerio Chiaraluce
Archeologo
E-mail: tularilar@gmail.com

Luca Costantini
Geologo
E-mail: geologocostantiniluca@gmail.com

Tommaso Ponziani
Direttore Museo Geologico e delle Frane, Civita di Bagnoregio (VT)
E-mail: info@museogeologicoedellefrane.it

ABSTRACT

Il territorio di Civita di Bagnoregio è situato nella provincia di Viterbo ed è caratterizzato da rilevanti valenze naturalistiche, geologiche e storico-archeologiche: tra queste ultime spiccano le numerose e poco conosciute cavità ipogee di origine antropica. A partire dal 2004 alcuni degli ipogei sono stati censiti e studiati dall' associazione culturale Toward Sky, mentre più recentemente il "Museo Geologico e delle Frane", presidio territoriale di ricerca e divulgazione scientifica, sta lavorando per valorizzare e far conoscere questo patrimonio sotterraneo.

***

The territory of Civita di Bagnoregio is located in the province of Viterbo and is characterized by significant natural, geological, historical and archeological features, such as the numerous and little known hypogeal cavities of anthropic origin. Since 2004 some of the hypogea have been surveyed and studied by the cultural association Toward Sky, while more recently the "Museo Geologico e delle Frane", a territorial research and scientific dissemination center, is working to promote and make known this underground heritage.



Figura 1 – Panoramica di Civita (in primo piano) e Bagnoregio (sullo sfondo). Foto di Claudio Cannone

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il borgo di Civita di Bagnoregio è situato nella provincia di Viterbo (Lazio), in prossimità del confine con l'Umbria, tra il lago di Bolsena ad ovest, Orvieto a nord e il fiume Tevere ad est. Un territorio caratterizzato da rilevanti pregi naturalistici, archeologici, geologico-paleontologici, storici, ed eno-gastronomici e da una recente ed importante espansione dell'attività turistica (Di Buduo *et al.*, 2017a).

Alcune centinaia di migliaia di persone ogni anno visitano il borgo di Civita di Bagnoregio ammirandone la straordinaria bellezza paesaggistica e la poetica fragilità (*Fig.* 1) (Di Buduo *et al.*, 2015°; Margottini, 2017), ma ben pochi sono a conoscenza dei numerosi e affascinanti ipogei ricchi di storia disseminati nel territorio circostante (*Fig.* 2) (Chiaraluce, 2007 e 2012; Di Buduo *et al.*, 2017b).

La geologia del territorio è caratterizzata da depositi vulcanici del versante orientale del Distretto Vulsino (lago di Bolsena) attivo nel Pleistocene medio tra 590 mila e 125 anni fa (Palladino *et al.*, 2010), che ricoprono argille di origine marina depositatesi nel graben del Paglia-Tevere nel Pliocene e nel Pleistocene inferiore (Mancini *et al.*, 2003-2004; Baldanza *et al.*, 2011), costituendo un vasto plateau debolmente inclinato verso est e variamente e (in alcune aree) profondamente inciso da fiumi e torrenti che drenano verso la valle del Fiume Tevere: in corrispondenza di quest'ultima i depositi marini sono ricoperti da almeno cinque ordini di lembi di depositi alluvionali terrazzati, testimonianti le diverse posizioni della piana del fiume nel corso dell'ultimo milione di anni.

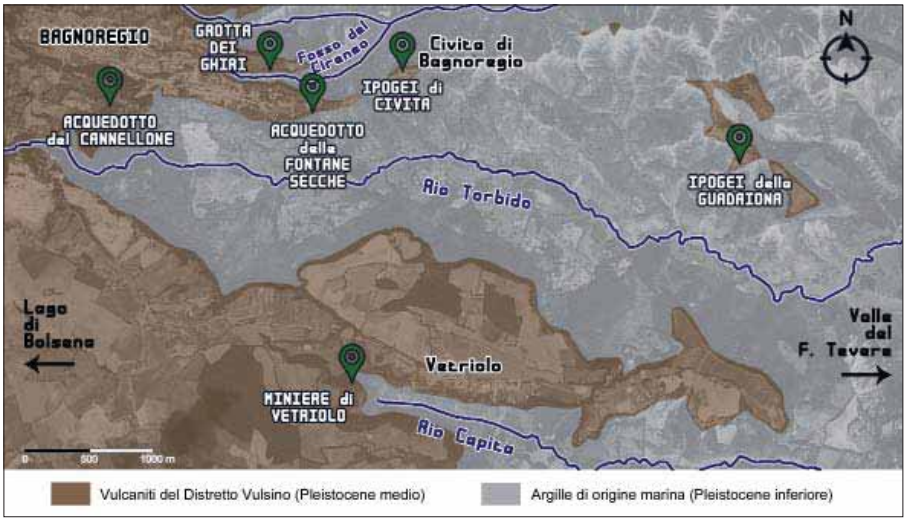
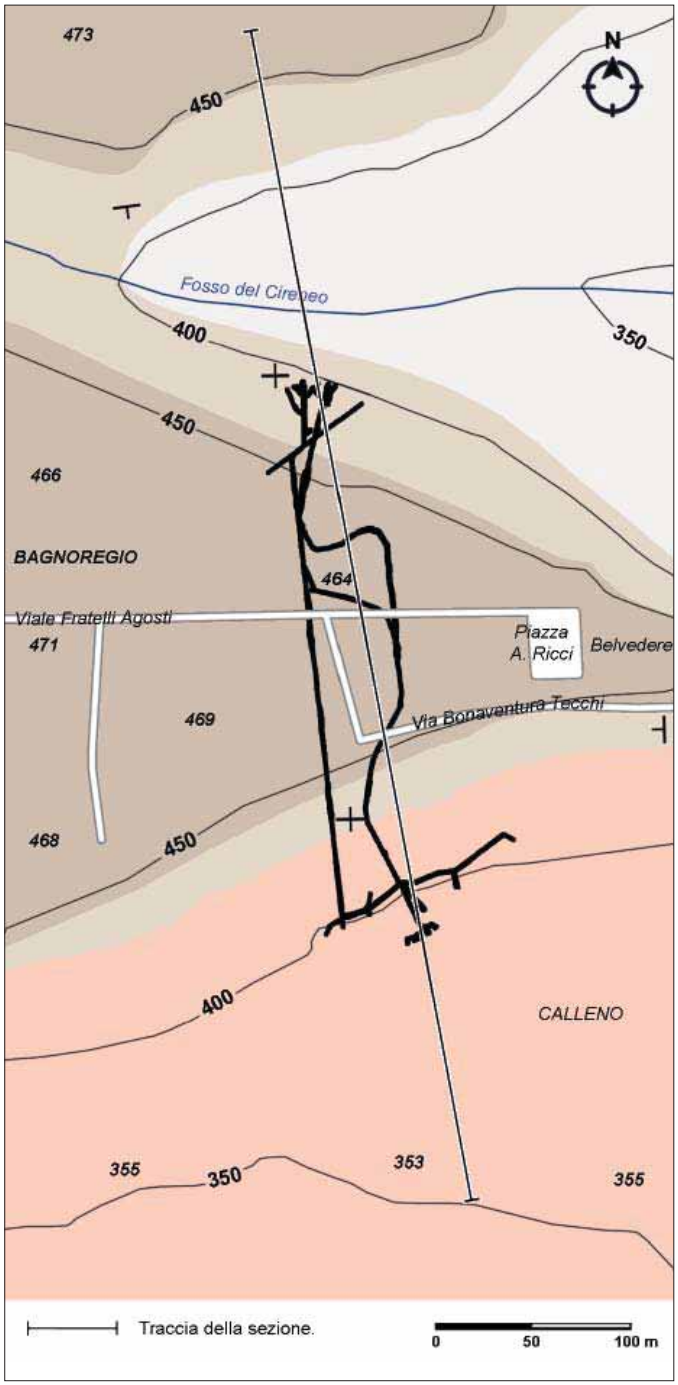


Figura 2 – Mappa dei principali ipogei nel territorio del Comune di Bagnoregio



DEPOSITI DI PALEOFRANE (Olocene)
Depositi a luoghi caotici ed eterometrici (presumibilmente corpi franosi di crolli in roccia), a luoghi con stratificazione originaria (verosimilmente dovuti a scorrimenti rotazionali), con spessori discontinui (crescenti verso il fondovalle) e molto variabili (da pochi metri ad oltre 30), in gran parte rimodellati dagli agenti erosivi.

COMPLESSO VULCANICO "BOLSENA-ORVIETO": IGNIMBRITE DI ORVIETO-BAGNOREGIO (Pleistocene Medio)
Ignimbrite cineritica pomiceo-scoriacea massiva da semi-litoide a litoide, di composizione tefritico-fonolitica; a luoghi sono presenti abbondanti scorie nerastre, inclusi litici e cristalli di leucite alterata.

COMPLESSO VULCANICO "PALEO-VULSINI": DEPOSITI VULCANICI e VULCANO-SEDIMENTARI (Pleistocene Medio)
Tufi a granulometria, tessitura e consistenza molto variabili, prevalentemente da caduta, in strati da centimetrici a metrici, costituiti in prevalenza da lapilliti e cineriti recanti lapilli, pomici, scorie e litici variamente addensati, da poco a molto consistenti (localmente semi-litoidi), a luoghi con intercalazioni di epiclastiti e paleosuoli.

ARGILLE LIMOSO-SABBIOSE (Pleistocene Inferiore)
Argille limoso-sabbiose e limi argilloso-sabbiosi massivi di origine marina, di colore grigio.

Figura 3 – Acquedotto delle Fontane Secche (Bagnoregio): carta geologica e planimetria dell'ipogeo



Figura 5 – Acquedotto delle Fontane Secche (Bagnoregio): tracciato rinascimentale. Foto di Valerio Chiaraluce

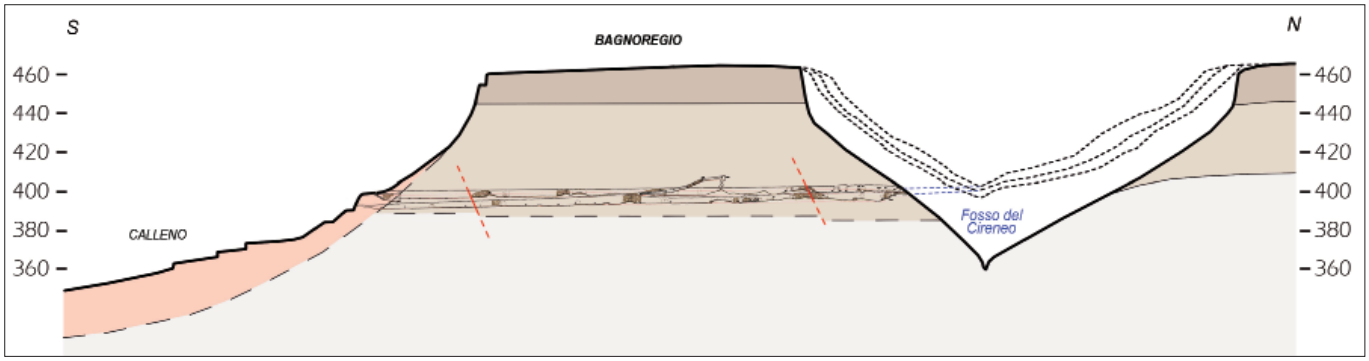


Figura 4 – Acquedotto delle Fontane Secche (Bagnoregio): sezione geologica.

L'assetto stratigrafico e la particolare morfologia, insieme alla fertilità dei suoli, hanno favorito fin dalla preistoria l'insediamento in queste aree da parte dell'uomo, che, come in buona parte dei margini del Distretto Vulcanico Vulsino caratterizzato da mesas e butte (Margottini *et al.*, 2017), occupava le rupi con abitati difesi naturalmente dalle scarpate tufacee.

I depositi vulcanici nell'area di Bagnoregio sono costituiti prevalentemente da tufi stratificati (prevalentemente da caduta), localmente con intercalazioni di epiclastiti e paleosuoli, e dall' "ignimbrite di Orvieto-Bagnoregio", tufo da flusso piroclastico prevalentemente litoide (solo localmente poco coerente) costituente una bancata di spessore variabile, in genere compreso tra 5 e 15

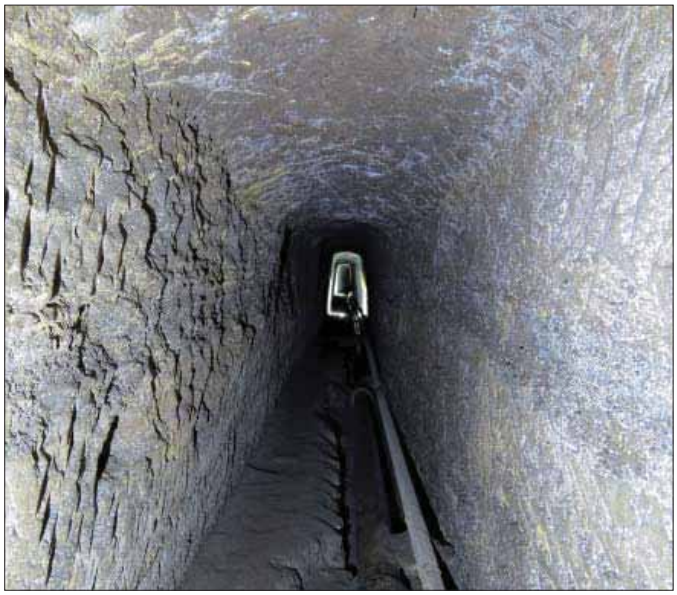


Figura 6 – Acquedotto del Cannellone (Bagnoregio): tratto centrale con la tubatura in funzione. Foto di Valerio Chiaraluce



Figura 7 – Acquedotto del Cannellone (Bagnoregio): antiche vasche per la decantazione. Foto di Valerio Chiaraluce



Figura 8 – Galleria nella miniera di diatomite in località Guadaiona. Foto di Luana Monte (www.luanamonte.com)

metri (Iacurto & Priori, 1995; Nappi *et al*., 1995; Peccerillo, 2012), depostasi in paleodepressioni radiali rispetto al centro di emissione (Complesso Vulcanico Bolsena-Orvieto, ubicato durante la sua attività all'incirca in corrispondenza del settore nord-orientale dell'attuale caldera di Bolsena) ed orientate verso ENE e NE.

2. ATTIVITÀ PER LA DIVULGAZIONE E LA CONOSCENZA DEL TERRITORIO

Il "Museo Geologico e delle Frane", ospitato nel rinascimentale Palazzo Alemanni a Civita di Bagnoregio, nel perseguire il suo impegno per lo studio, la salvaguardia e la promozione del territorio (Di Buduo *et al*., 2015b; Margottini & Di Buduo, 2017), ha recentemente realizzato la mostra "Bagnoregio Underground", preceduta da una conferenza, con il patrocinio del Comune di Bagnoregio e della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per l'area metropolitana di Roma, la provincia di Viterbo e l'Etruria meridionale.



Figura 9 – Galleria stradale tra il Fosso del Cireneo e il Fosso di Lubriano (grotta dei Ghiri): ramo morto visibile sulla volta del traforo, dovuta ad un errore nelle fasi di scavo

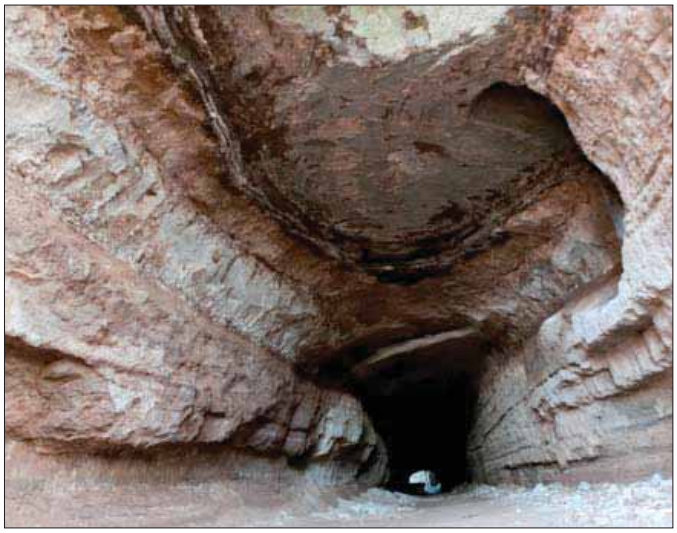


Figura 10 – Tunnel nel settore orientale di Civita. Foto di Luana Monte (www.luanamonte.com).

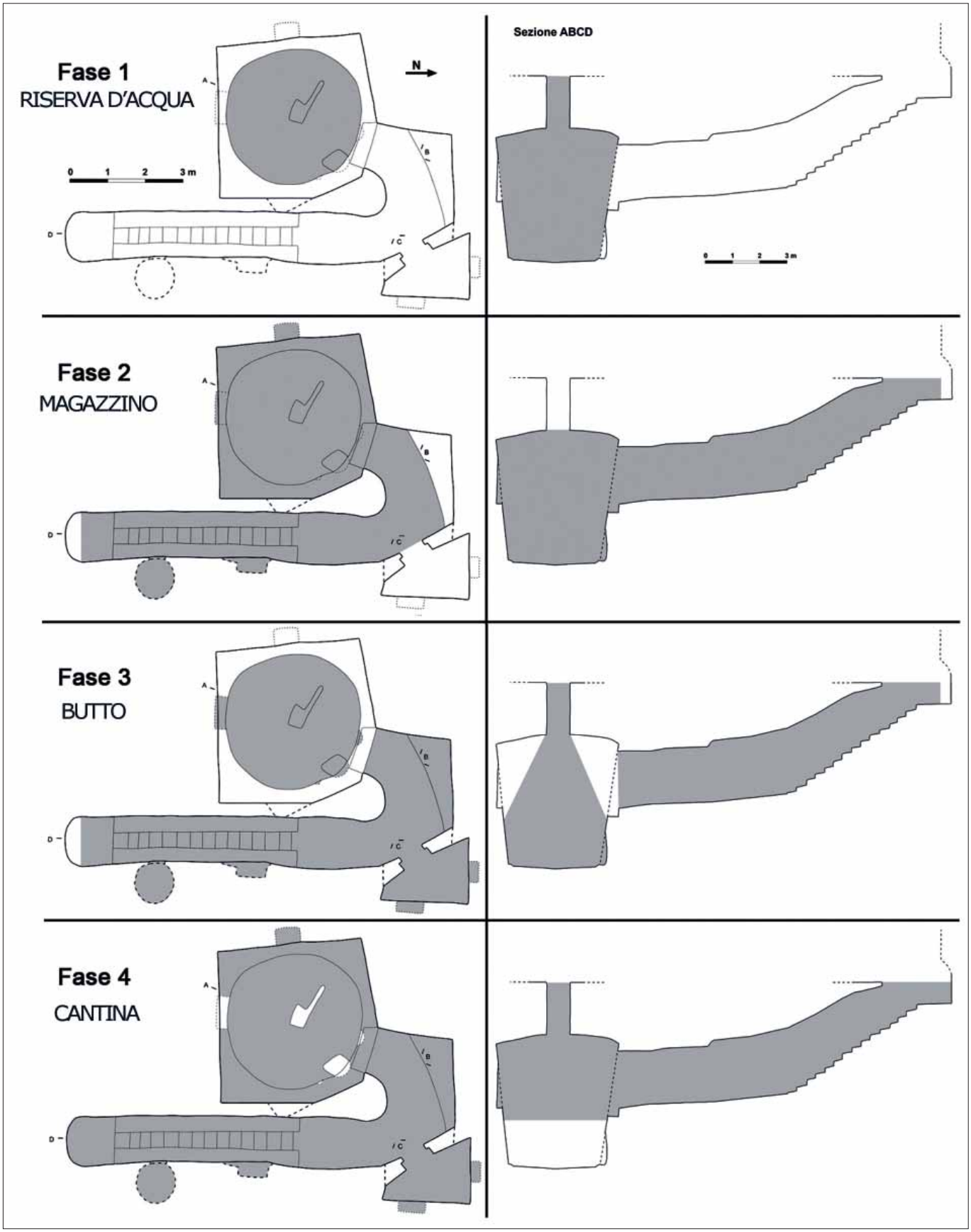


Figura 11 – Le varie fasi di scavo e di utilizzo della cisterna di Palazzo Alemanni (Tozzi, 2014)

La mostra ha permesso di ordinare e divulgare per la prima volta le attuali conoscenze sugli ipogei artificiali noti nel territorio del comune di Bagnoregio: il materiale utilizzato, con l'aggiunta di nuove valutazioni compiute dai geologi del Museo, proviene in buona parte (soprattutto per quanto riguarda gli acquedotti) dalle ricerche condotte sin dal 2004 dagli archeologi e speleologi dell'associazione culturale Toward Sky di Todi (*Figg.* 3, 4, 5) e dallo studio effettuato sull'insediamento produttivo di epoca romana in località Passeano (appena fuori Bagnoregio) dalla Soprintendenza.

3. IPOGEI DI CIVITA DI BAGNOREGIO E CIVITA

La sequenza vulcanica ha spessori variabili da pochi metri ad oltre 40 ed è costituita, come detto, nella sua parte inferiore da un intervallo di tufi fittamente stratificati e dall' "ignimbrite di Orvieto-Bagnoregio", che proprio per le otti-



Figura 12 – Parte superiore della cisterna di Palazzo Alemanni, con l'apertura da cui veniva attinta l'acqua in epoca romana

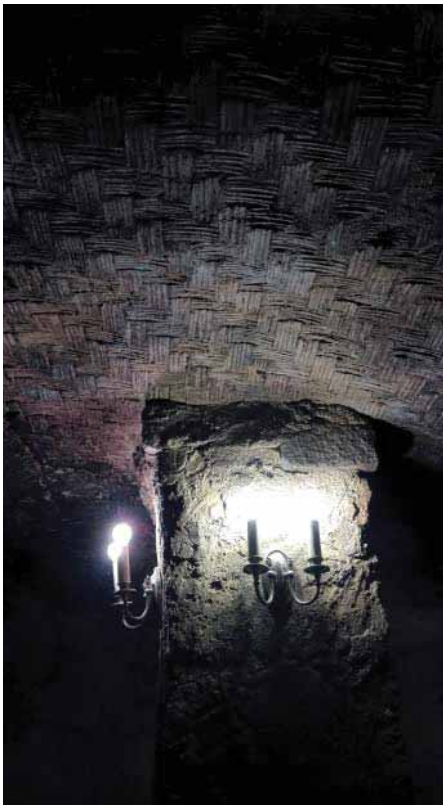


Figura 13 – Impronta della stuoia di cannucce intrecciate utilizzata per rinforzare l'intonaco che rivestiva il soffitto di un ipogeo oggi adibito ad enoteca a Civita. Foto di Claudia Gentili

me caratteristiche meccaniche è stato oggetto, a partire dall'epoca etrusca, dell'escavazione di una vasta gamma di ipogei, molto diversi per forme e dimensioni, funzionali a tutte le necessità della vita umana (Chiaraluce, 2007; Di Buduo *et al.*, 2017b): in 2500 anni si sono scavati pozzi, cisterne ed acquedotti per approvvigionarsi d'acqua (l'acquedotto del Cannellone al di sotto di Bagnoregio è ancora parzialmente in funzione; *Figg.* 6, 7), cave e miniere per estrarre minerali (presso la frazione Vetriolo nel XV sec. e in località Guadaiona dove l'attività estrattiva è andata di pari passo con lo sviluppo di un abitato rupestre rimasto in uso sino agli anni '50; *Fig.* 8), trafori stradali e camminamenti per spostarsi da un luogo ad un altro (come la grotta dei Ghiri e il tunnel sotto Civita; *Figg.* 9, 10), magazzini e cantine per conservare i beni (*Fig.* 11), stalle e colombaie per allevare gli animali, abitazioni rupestri per ripararsi dalle intemperie, botteghe e luoghi di produzione per lavorare, butti per smaltire le immondizie, tombe per seppellire i morti, edicole ed oratori per adempiere al sacro. Dallo studio effettuato è emerso che la maggior parte degli ipogei di estensione più limitata e di proprietà privata, in particolare nella frazione Civita (*Figg.* 12, 13, 14), versano mediamente in buono stato di conservazione, ma solo laddove essi sono stati riutilizzati per attività commerciali (es. ristoranti, enoteche, case vacanze) o annessi a dimore abitate. Quasi tutti gli ipogei più grandi invece, come l'acquedotto delle Fontane Secche (Di Buduo *et al.*, 2016) e le miniere



Figura 14 – Ipogeo privato a Civita di Bagnoregio. Foto di Brian Stanton (www.brianstantonphoto.com)

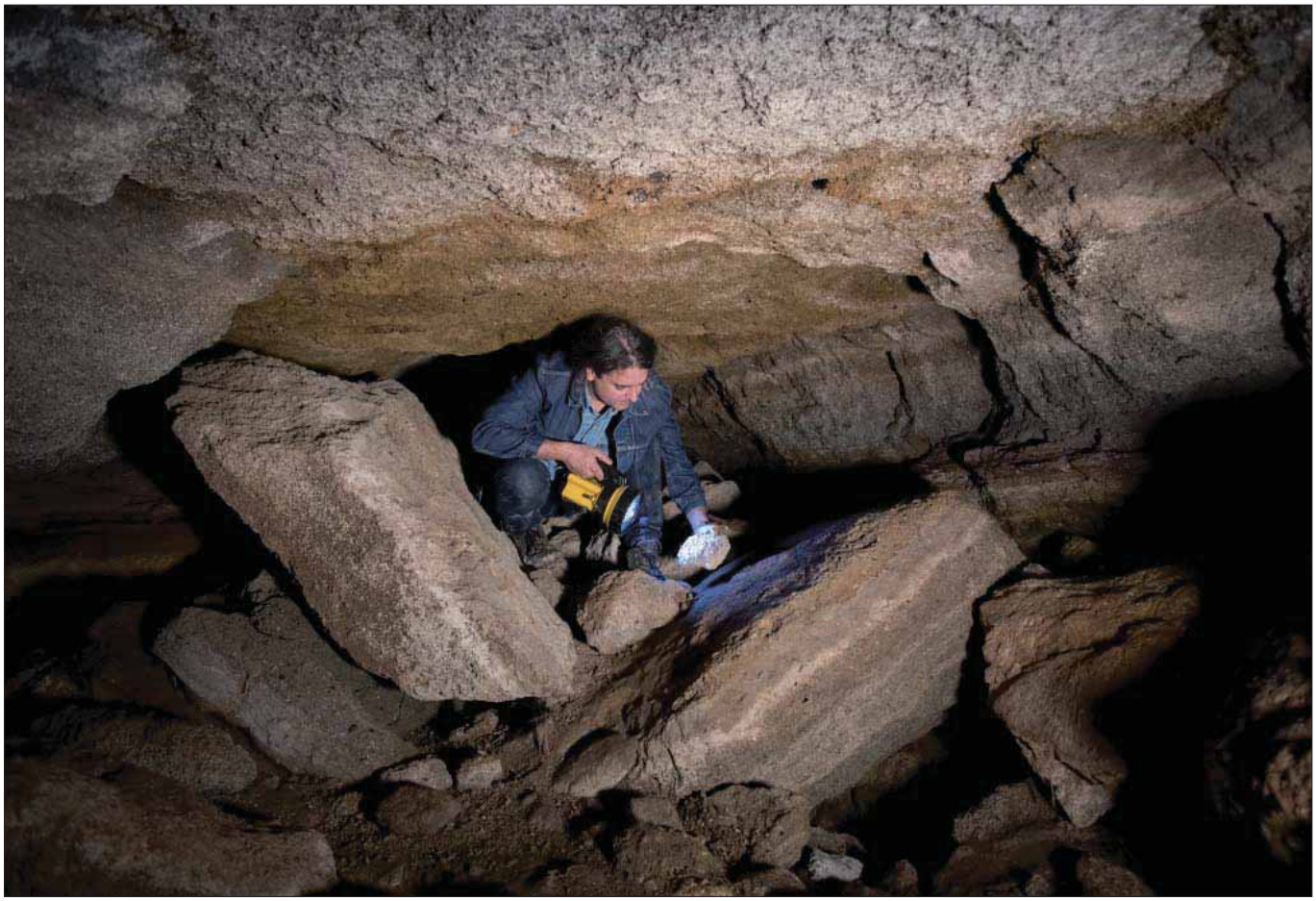


Figura 15 – Miniere in località Vetriolo: l'accesso è quasi impraticabile a causa dei crolli. Foto di Brian Stanton (www.brianstantonphoto.com)

di Vetriolo e della Guadaiona, versano in stato di abbandono e presentano diverse problematiche inerenti l'accessibilità e la stabilità in alcuni tratti più o meno estesi (*Fig.* 15).

4. CONCLUSIONI

Tali siti, in particolare il suddetto acquedotto, rappresentano potenzialmente un valido e interessante ampliamento dell'offerta turistica dell'area, finora limitata ad un turismo di massa "mordi e fuggi" a Civita; essi devono pertanto essere ulteriormente studiati, adeguatamente protetti, valorizzati, e resi fruibili alla collettività con un'accorta progettualità che ne sappia preservare e rendere apprezzabile in maniera sostenibile il fascino e la lunga storia che li caratterizza. Uno studio approfondito e capillare di questa architettura sotterranea permetterebbe inoltre di approfondire la conoscenza e quindi comprendere meglio gli oltre duemila anni di storia degli insediamenti umani nel territorio di Bagnoregio.

BIBLIOGRAFIA

Baldanza A., Bizzarri R., Hepach H. (2011), *New biostratigraphic data from the Early Pleistocene Tyrrhenian paleocoast (western Umbria, central Italy)*, Geologia Croatica, 64/2,.

Chiaraluce V. (2007), *L'acquedotto delle Fontane Secche a Bagnoregio*, Atti del I Congresso Nazionale di Archeologia del Sottosuolo, Bolsena 8-11 dicembre 2005, British Archeological Reports, International Series, 1611, Oxford, 2007.

Chiaraluce V. (2012), *L'acquedotto delle Fontane Secche a Bagnoregio*, "Archeologia Sotterranea", 7 (rivista del Centro Ricerche Archeologiche Sotterranei di Roma).

Di Buduo G.M., Costantini L., Ponziani T. (2017a), *Geologia dei vini della Teverina. Pregi e criticità,* 6°Congresso Nazionale di Geologia e Turismo - Milano 28-29 settembre 2017.

Di Buduo G.M., Chiaraluce V., Costantini L., Ponziani T. (2017b), *Bagnoregio Underground*, Professione Geologo, 51.

Di Buduo G.M., Chiaraluce V., Costantini L., Ponziani T. (2016), *L'acquedotto delle "Fontane Secche" di Bagnoregio (VT): storia, caratteristiche e problematiche geo-archeologiche, prospettive di recupero e di fruibilità turistica*, Professione Geologo, 46

Di Buduo G.M., Ponziani T., Petitta M. (2015a), *Civita di Bagnoregio e la Valle dei Calanchi*, Natura & Montagna, 2/2015, anno LXII.

Di Buduo G.M., Costantini L., Ponziani T. (2015b), *L'impegno del Museo Geologico e delle Frane per salvare Civita di Bagnoregio*, Professione Geologo, 44.

Iacurto O., Priori A. (1995), *Caratterizzazione geomeccanica delle ignimbriti compatte di Civita di Bagnoregio (VT) in situazioni di dissesto idrogeologico*, Geologia tecnica e ambientale, 2.

Mancini M., Girotti O., Cavinato G.P. (2003-2004), *Il Pliocene e il Quaternario della Media Valle del Tevere (Appennino Centrale)*, Geologica Romana, 37, pp.175-236.

Margottini C. (2017), *Trent'anni di studi geologici, geomorfologici ed applicativi a Civita di Bagnoregio*, in (a cura di) GISOTTI G., MARGOTTINI C., *Atti del Convegno "Idee per salvare Civita di Bagnoregio"*, Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 1/2017, Anno XXV (periodico trimestrale della SIGEA).

Margottini C., Di Buduo G.M. (2017), *The Geological and Landslides Museum of Civita di Bagnoregio (Central Italy)*, Landslides (Journal of the International Consortium on Landslides), 14.

Margottini C., Melelli L., Spizzichino D. (2017), *A living landscape at the border of Volcano: Mesa and Butte landforms in Lazio, Umbria and Tuscany*, in (a cura di) SOLDATI M., MARCHETTI M., Geological Landscapes of Italy, Springer.

Nappi G., Renzulli A., Santi P., Gillot P. Y. (1995), *Geological evolution and geochronology of the Vulsini Volcanic District (Central Italy)*, Bollettino Società Geologica Italiana, 114, pp. 599-613.

Palladino D.M., Simei S., Sottili G., Trigila R. (2010), *Integrated approach for the reconstruction of stratigraphy and geology of Quaternary volcanic terrains: an application to the Vulsini Volcanoes (central Italy)*, The Geological Society of America, Special Paper 464, pp. 63-84.

Peccerillo A. (a cura di) (2012), *L'ignimbrite di Orvieto-Bagnoregio,* Ed. Nuova Phromos, Città di Castello (Perugia).

Tozzi R. (2014), *La cisterna romana di Palazzo Alemanni a Civita di Bagnoregio: un esempio di riutilizzo fino all'epoca moderna*, L'Etruria meridionale rupestre, Atti del Convegno internazionale "*L'Etruria rupestre dalla protostoria al Medioevo: insediamenti, necropoli, monumenti, confronti*", Barbarano Romano – Blera (VT), 8-10 ottobre 2010.

Cavità sotterranee di Roma: procedure regionali per la valutazione della pericolosità geologica e attività di monitoraggio e conservazione della biodiversità

Underground cavities of Rome: regional procedures for the assessment of geological hazard and monitoring and conservation of biodiversity

Eugenio Di Loreto[1]
Lorenzo Liperi[1]
Stefania Nisio[2]
Ivana Pizzol[1]
Federica Roscioli[3]
Elena Santini[1]
Alessandra Tomassini[4]

[1] Regione Lazio
[2] ISPRA
[3] Associazione Teriologica Italiana – Gruppo italiano ricerca chirotteri
[4] Tutela Pipistrelli onlus

Email: esantini@regione.lazio.it; lliperi@regione.lazio.it

Parole chiave (*key words*): pianificazione territoriale *(urban planning)*, cavità sotterranee, *(underground cavities)*, Natura2000 *(Natura2000)*, monitoraggio *(monitoring)*, chirotteri *(bats)*

RIASSUNTO

La città di Roma è interessata da un tessuto artificiale di reti caveali sviluppatesi all'interno delle formazioni piroclastiche, dovute all'attività dei distretti vulcanici dei Colli Albani e dei Monti Sabatini. Nel corso dei secoli le piroclastiti sono state oggetto di attività estrattiva di materiali per l'edilizia e/o di scavi in sotterraneo nelle catacombe, nei colombari storici e in numerosi ipogei. La presenza di questi vuoti artificiali, spesso in cattivo stato di conservazione, determina situazioni di pericolosità in vari quartieri e municipi di Roma. Si verificano spesso crolli delle cavità, che possono interessare edifici, strade ed infrastrutture. Le aree maggiormente interessate dalla presenza di queste cavità sono state segnalate in numerosi studi bibliografici ed indicate in apposite cartografie. Alcune di queste cavità svolgono anche la funzione di habitat per numerose specie di Chirotteri, caratteristiche di ambienti ipogei ed oggetto di una protezione rigorosa ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "*Habitat*". Il presente articolo, descrive la particolare situazione di pericolosità geologica e di vulnerabilità ambientale delle cavità sotterranee dell'area romana. Sono illustrate le attività che le strutture regionali competenti stanno predisponendo per la conoscenza delle aree con potenziale presenza di cavità nel sottosuolo e del loro stato di conservazione, nonché la verifica della presenza di specie di Chirotteri e la conseguente segnalazione alla Rete "*ChiroNet*".

ABSTRACT

The city of Rome is affect by an artificial network of underground cavities developed within the pyroclastic formations, due to the activity of the volcanic districts of the Colli Albani and Monti Sabatini. In the course of the centuries have these been the subject of mining activities for building materials and / or underground excavations in catacombs, in historic colombaria and in hypogea. The presence of these artificial holes, often in a bad state of conservation, determines dangerous situations in various districts and municipalities of Rome. This causes collapses that can affect buildings, roads and infrastructures. The areas, which are most, affect by the presence of these cavities, have been reported in numerous bibliographic studies and indicated in specific maps.

Some of these cavities also act as habitats for many species of Bats, characteristics of hypogeal environments and subject to strict protection under the Directive 92/43/CEE "*Habitat*". In the present article, start from the particular situation of geological danger and environmental vulnerability of the underground cavities of the Roman area. The activities that the competent regional structures preparing for the knowledge of areas with potential presence of cavities in the subsoil and of their conservation status, are illustrated, as well as the verification of the presence of species of Bats and the consequent reporting to the Network "*ChiroNet*".

1. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il sottosuolo di Roma è interessato da un tessuto di cavità sotterranee artificiali di diversa natura (Crescenzi, Piro & Vallesi, 1995; Ciotoli *et al.,* 2013, 2015 a, b, 2016), sviluppatesi nel corso della millenaria storia della città. Sono riconoscibili n° 5 tipologie di cavità sotterranee (Ciotoli *et al.,* 2013, 2015 b): 1) Cave per l'estrazione di materiali per l'edilizia; 2) Catacombe e colombari; 3) Cunicoli idraulici, acquedotti e fognature; 4) Cavità varie di interesse archeologico (cisterne, pozzi, cavità di servizio); 5) Cavità moderne (metropolitane; gallerie stradali e ferroviarie; parcheggi interrati). Le cavità, nel corso degli anni, hanno subito vari processi di trasformazione della loro destinazione d'uso, legate all'espansione urbanistica del territorio: da cave per il recupero di materiale da costruzione, a luoghi di culto per cerimoniali religiosi, a cimiteri ipogei, a opere idrauliche sotterranee, a rifugi e ricoveri bellici, ad aree destinate alla coltivazione di generi alimentari (fungaie), fino all'uso attuale per la viabilità sotterranea, per i parcheggi e per altre infrastrutture di trasporto (Funiciello *et al.,* 2006; Ciotoli *et al.* 2013, 2015 a, b, 2016). Le cavità artificiali sono sviluppate principalmente nei terreni piroclastici (pozzolane e tufi) dei distretti vulcanici dei Colli Albani e dei Monti Sabatini, che sono relativamente teneri e facili da scavare e pertanto utilizzabili come materiali da costruzione. Le aree maggiormente interessate dalla presenza di cavità artificiali si rinvengono nel settore sud est della città, come segnalato in diversi studi bibliografici (Ventriglia, 1971 e 2002; Sciotti, 1982; Lanzini, 1995; Mazza *et al*., 2001; Mazza *et al*., 2008; Nisio, 2010, 2011; Nisio & Ciotoli, 2016; Ciotoli *et al.,* 2013, 2015 a, b, 2016) e in opportune cartografie allegate (*Fig*. 1).

A partire dal dopoguerra, la presenza di questi vuoti artificiali, spesso in cattivo stato di conservazione o di cui si è persa la memoria storica, ha determinato situazioni di pericolosità in vari quartieri e municipi di Roma, a causa: del peso dei fabbricati soprastanti, spesso costruiti ignorando la presenza dei vuoti nel sottosuolo; delle vibrazioni indotte sulle volte con aumento del grado di fratturazione delle cavità, dovute al continuo aumento del traffico veicolare e alla costruzione della linea della metropolitana; del degrado dei terreni provocato dalle perdite di acquedotti e fognature. In alcuni casi si sono verificati crolli e sgrottamenti in profondità, che hanno interessato edifici, strade ed infrastrutture di reti di servizi, presenti in superficie (Nisio,

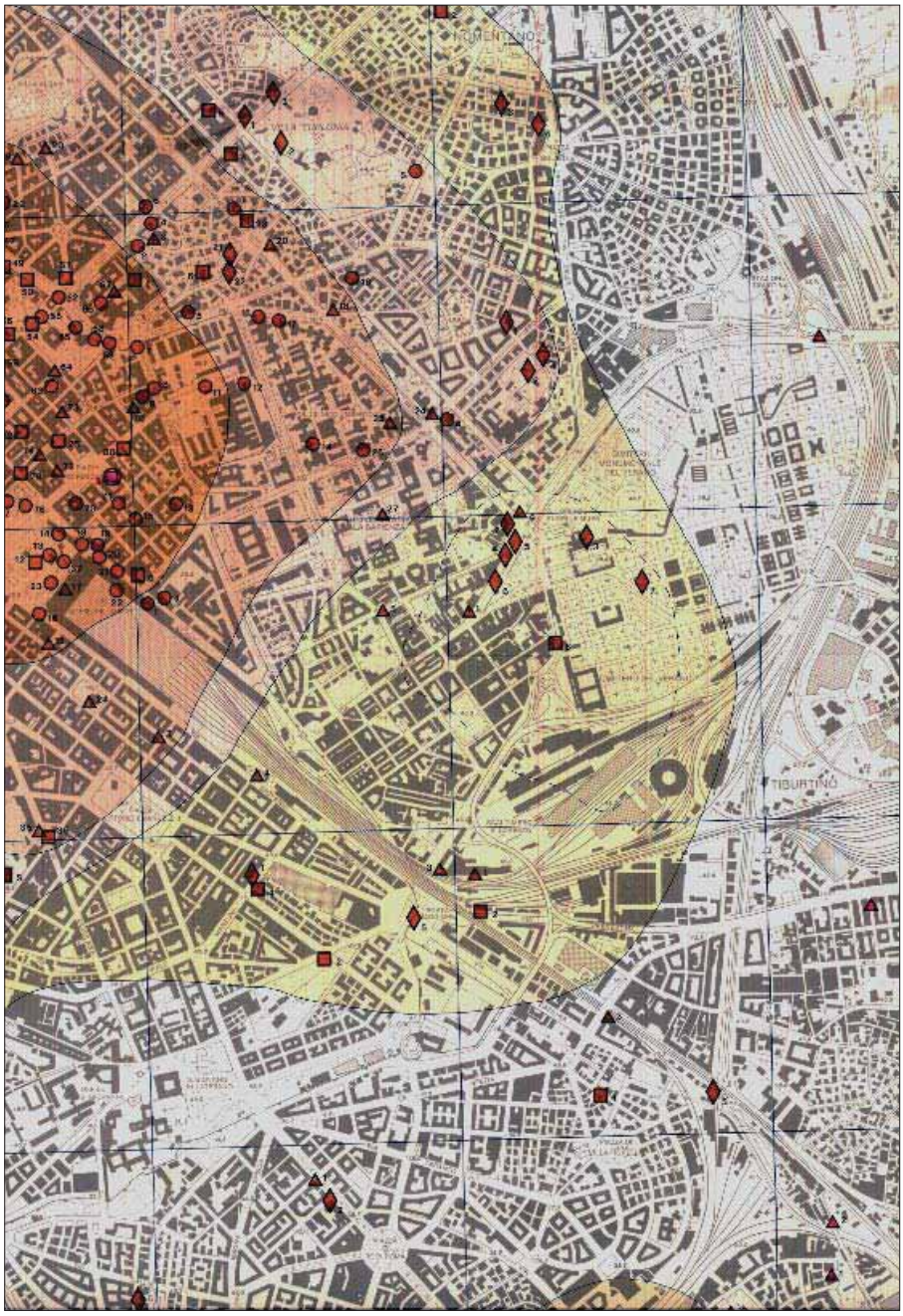


Figura 1 – Stralcio della Carta delle cavità sotteranee del Ventriglia, 2002

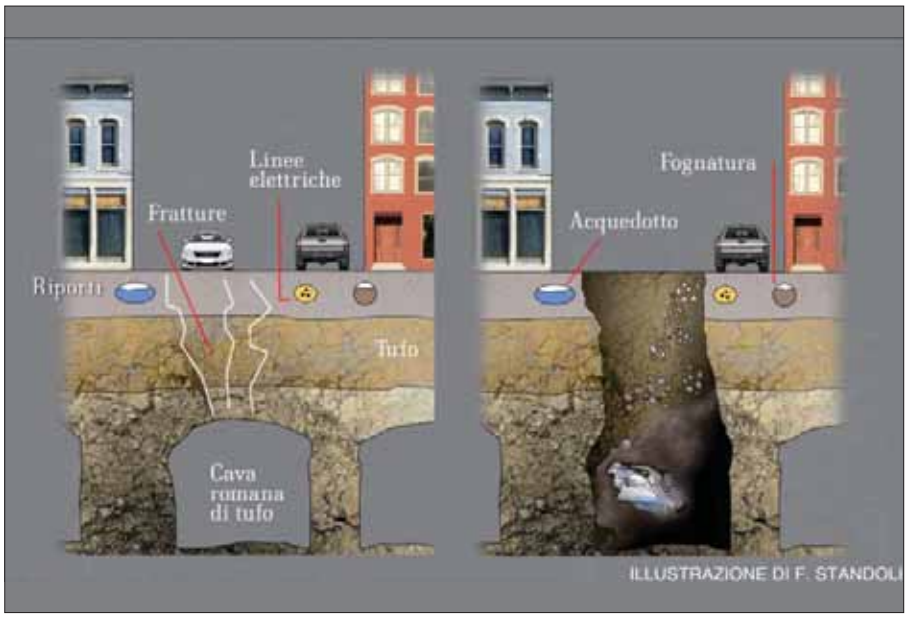


Figura 2 – Schema illustrato di un crollo in una cava sotterranea

2010, 2011; Ciotoli *et al.,* 2013, 2015 a, b, 2016; Nisio & Ciotoli, 2016) (*Fig.* 2).

2. ANALISI DI PERICOLOSITÀ DELLE CAVITÀ SOTTERRANEE

La Direzione Regionale Risorse Idriche e Difesa del Suolo, nell'ambito delle attività istituzionali, rilascia il parere di compatibilità geomorfologica (ai sensi dell'art. 89 D.P.R. 380/01) propedeutico all'approvazione degli strumenti urbanistici, nonché alla realizzazione di opere che interagiscono con la componente suolo e sottosuolo. Nello specifico, un'apposita Delibera di Giunta Regionale (D.G.R. 2649/99) stabilisce che debbano essere prodotte obbligatoriamente le seguenti cartografie di dettaglio: geologica con sezioni geologiche interpretative; geomorfologica; acclività; idrogeologica; pericolosità e vulnerabilità (fornisce indicazioni sulle cavità segnalate e i dissesti verificatesi), idoneità geologica e vegetazionale. Quest'ultima, rappresenta il documento cartografico finale di sintesi che tiene conto degli aspetti di pericolosità individuati, in relazione alla destinazione di uso dell'area. In particolare, qualora l'intervento proposto ricada in un contesto antropico nel quale, da studi bibliografici, è segnalata la presenza di una diffusa rete caveale nel sottosuolo, viene richiesto di verificarne l'esistenza indicando gli edifici (*Fig.* 3) e le reti di servizio interagenti.

La sovrapposizione degli elementi di pericolosità con le destinazioni urbanistiche fornisce l'idoneità del sito ad ospitare le opere con le eventuali prescrizioni da adottare. La metodologia di studio e le indagini da effettuare per individuare le aree da inibire all'edificazione è stata approvata con apposito strumento normativo (D.G.R. n. 1159/2002). In fase di progettazione esecutiva è prevista la realizzazione un idoneo piano di studio delle cavità, finalizzato alla verifica di stabilità statica delle pareti e delle volte, e ai possibili interventi di bonifica e di stabilizzazione delle stesse.

Un caso studio di analisi di pericolosità è stato realizzato nel 2008 nel territorio del Municipio Roma VI (Mazza *et al*., 2008), attraverso l'utilizzo di indicatori di pericolo del sistema ipogeo e di vulnerabilità del sistema insediativo. Ulteriori studi di suscettibilità del territorio sono stati compiuti dall'ISPRA a partire dal 2008 con il progetto "Sprofondamenti nei centri urbani". I risultati di tale progetto hanno portato alla realizzazione di una carta di suscettibilità a piccola scala del territorio all'interno del Grande Raccordo Anulare (Ciotoli *et al*., 2015).

L'ISPRA ha costituito un tavolo di lavoro, con vari Enti ed Associazioni speleologiche, che hanno portato alla realizzazione di una nuova carta in scala 1:20.000 delle cavità



Figura 3 – Pali di fondazione nelle cave sotto Villa de Santis (foto M. Piro)

sotterranee di Roma. Nella carta si evidenzia lo sviluppo planimetrico delle aree oggetto di passata escavazione presenti al di sotto del tessuto urbano (Nisio *et al.* 2017).

3. LA BIODIVERSITÀ NELLE CAVITÀ SOTTERRANEE

Le cavità del sottosuolo, incluse quelle della città eterna, richiamano l'attenzione di diversi professionisti oltre ai geologi e agli ingegneri, tra cui quelli che si occupano di Conservazione di specie ed habitat (Biologi, Naturalisti, Laureati in scienze ambientali).

Alcune delle tipologie di cavità sotterranee elencate in precedenza, infatti, possono svolgere la funzione di habitat per numerose specie di Chirotteri, caratteristiche di ambienti ipogei ed oggetto di una protezione rigorosa ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "*Habitat*", recepita dal Decreto del Presidente della Repubblica n° 357 dell'8 settembre 1997. Le cause di declino delle popolazioni di Chirotteri sono attribuite principalmente all'alterazione e alla distruzione degli ambienti in cui essi si rifugiano o si alimentano, oltre che al disturbo antropico diretto (Biscardi *et al.,* 2012).



Figura 4 – Stralcio del Geodatabase di Chironet, aggiornato al 2017

4. ATTIVITÀ REGIONALI PER LA CONSERVAZIONE DEI CHIROTTERI

Nel 2014 la Regione Lazio con la (DGR 497/2007) ha costituito la Rete Regionale di Monitoraggio dei Chirotteri denominata *ChiroNet* per rispondere all'obbligo del monitoraggio dello stato di conservazione delle specie e degli habitat di interesse comunitario ai sensi della Direttiva 92/43/CEE. *ChiroNet* è composta dal personale regionale afferente alla Direzione competente, dal personale delle Aree Naturali Protette Nazionali e Regionali opportunamente formato per il monitoraggio dei Chirotteri, e da specialisti chirotterologi afferenti a tre soggetti esterni: l'Associazione Tutela Pipistrelli ONLUS, l'Università Federico II di Napoli e il Gruppo Italiano di Ricerca Chirotteri (GIRC) dell'Associazione Teriologica Italiana ONLUS. La Rete ha come obiettivo principale quello di monitorare a livello regionale lo stato di conservazione dei chirotteri misurando alcuni parametri ritenuti cruciali dai documenti europei e nazionali di riferimento (ETC/BD, 2011; Genovesi *et al.*, 2014; Rondinini *et al.*, 2013): il *range*, la popolazione, l'habitat della specie e le prospettive future. Lo stato di conservazione delle specie è misurato attraverso una matrice di valutazione che, combinando i valori di 4 parametri misurati, individua 4 categorie di stato di conservazione: favorevole, inadeguato, cattivo e sconosciuto. Le attività di monitoraggio della Rete *Chironet* prevedono, quindi, sopralluoghi mirati nei siti noti di presenza delle specie(*roost)*, che possono coincidere con grotte e cavità sotterranee presenti nel sottosuolo urbano. I *roost* rappresentano i tipici rifugi che i Chirotteri utilizzano per il letargo (*hibernacula*), per il parto e l'allattamento (*nursery*), per l'accoppiamento, per il transito durante le migrazioni stagionali (*swarming*) e per il semplice riposo diurno nel periodo di vita attiva. I *roost* rappresentano quindi una componente importantissima del parametro "*habitat* delle specie". Il monitoraggio presso i *roost*, inoltre, permette di misurare anche il parametro relativo alla consistenza delle popolazioni attraverso tecniche di conteggio diretto ed indiretto. All'avvio delle attività di monitoraggio la Rete ha verificato solo le stazioni note come *roost* e tra queste solo quelle più rilevanti per specie e numero d'individui (Agnelli *et al.*, 2004), e facilmente raggiungibili, pertanto le prime indagini hanno interessato i *roost* delle specie troglofile e/o antropofile. I dati raccolti dalla *Chironet* sono organizzati in un *geodatabase* dedicato (*Fig.* 4), finalizzato alla verifica nel tempo dello stato di conservazione dei Chirotteri e utile

alle scelte gestionali per ottimizzare le azioni di conservazione di queste specie per le quali l'Unione Europea prevede una protezione rigorosa (Direttiva 92/43/CEE).

Per l'avvio delle attività di monitoraggio nei Municipi di Roma Capitale sono stati selezionati dalla banca dati regionale 7 *roost*, utilizzati da 8 specie (Tabella 1).

L'avvio delle attività di monitoraggio ha previsto la verifica della presenza attuale dei *roost* (*Figg.* 5 e 6) i cui dati informativi derivavano da fonti bibliografiche datate; si è

Tabella 1 – Specie di Chirotteri presenti nel territorio di Roma Capitale (Fonte: BD Chironet**) e stato di conservazione**

Nome specie	Nome comune	Allegato DIR 92/43/CEE	Stato di conservazione (art. 17 DIR 92/43/CEE[1])	Stato di conservazione e tutela in Italia (classificazione IUCN[2])
Rhinolophus ferrumequinum	Rinolofo maggiore	Allegati II, IV	Cattivo trend in peggioramento	VU
Rhinolophus euryale	Rinolofo euriale	Allegati II, IV	Cattivo trend in peggioramento	VU
Rhinolophus hipposideros	Rinolofo minore	Allegati II, IV	Inadeguato trend in peggioramento	EN
Pipistrellus kuhlii	Pipistrello albolimbato	Allegati IV	Favorevole	LC
Miniopterus schreibersii	Miniottero	Allegati II, IV	Cattivo trend in peggioramento	VU
Myotis capaccini	Vespertilio di Capaccini	Allegati II, IV	Cattivo trend in peggioramento	EN
Myotis myotis	Vespertilio maggiore	Allegati II, IV	Inadeguato trend in peggioramento	VU
Myotis blithii	Vespertilio di Blyth	Allegati II, IV	Inadeguato trend in peggioramento	VU

1 - Classificazione secondo Reporting art. 17 Direttiva "Habitat"
2 - Classificazione IUCN: EN (endangered) – Minacciato, VU (vulnerable) – Vulnerabile, LC (least concern) – preoccupazione minima

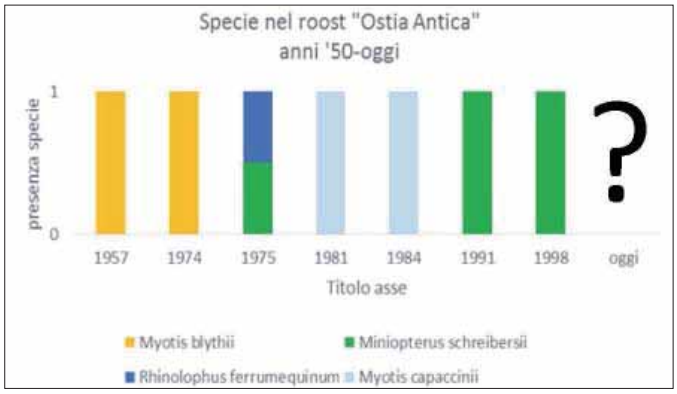


Figura 5 – Colonia di Rhinolophus euryale *(foto M. Scalisi)*



Figura 6 – Esemplare di Myotis myotis/blythii *(foto M. Scalisi)*

proceduto, pertanto, ad indagare soprattutto tre *roost* romani posti rispettivamente in zona Montesacro, presso gli scavi di Ostia antica e lungo l'Appia antica. I sopralluoghi hanno richiesto a volte una vera e propria indagine storica preliminare per individuare l'ubicazione precisa di alcuni siti segnalati che il profondo cambiamento del tessuto urbano di Roma, a partire dal dopoguerra, ha reso difficilmente rintracciabili. In questi casi la conservazione della biodiversità ha trovato una valida alleata proprio nella geologia, che ha descritto e, quando possibile, localizzato alcune tipologie di cavità, quali ad esempio le antiche cave di pozzolana e tufo di Roma, che a volte coincidevano con i *roost*: senza



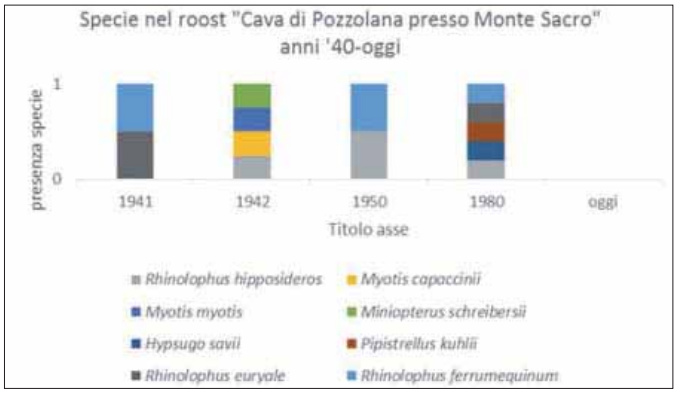


Figure 7 e 8 – Specie presenti rispettivamente nei roost "Ostia Antica" e "Monte Sacro" dagli anni '40 ad oggi

questa collaborazione non sarebbe stato possibile ritrovare alcuni dei *roost* indagati. Le indagini hanno rilevato diverse situazioni: nel sito di Montesacro (*Fig*. 7) non è stata confermata la presenza dei *roost*, probabilmente a causa dello sviluppo urbanistico dell'area, successivo alla segnalazione storica riportata nella Banca Dati (la prima segnalazione è del 1941); ad Ostia antica sarà necessario svolgere ulteriori sopralluoghi per verificare l'esistenza dei *roost* e delle specie segnalate (*Fig*. 8); infine nel sito lungo l'Appia antica è stato confermato il *roost* e sono stati osservati numerosi individui in volo.

5. CONCLUSIONI

La Regione Lazio in questi ultimi anni, in collaborazione con l'ISPRA, sta sviluppando studi sui fenomeni di *sinkholes* e sulle cavità artificiali in contesto urbano. Tali studi dovranno portare alla redazione di Linee Guida di indirizzo metodologico delle indagini da eseguire ai fini della valutazione del rischio di sprofondamento veloce del suolo dovuto alla presenza di cavità sotterranee artificiali in ambiente urbano, con la descrizione delle tipologie di risanamento. Queste Linee Guida saranno utili ai geologi chiamati ad affrontare concretamente tali situazioni e dare risposte immediate e realistiche sugli interventi da realizzare. L'enorme patrimonio sotterraneo di Roma non è stato ancora esaustivamente esplorato ed è senz'altro auspicabile promuovere una maggiore sinergia con i professionisti e/o le associazioni che se ne occupano attraverso una partecipazione attiva alla Rete regionale di monitoraggio *ChiroNet*. In quest'ottica la Rete è aperta a nuove collaborazioni sia con il mondo della geologia, sia con quello della speleologia e dell'archeologia. In questa sede si vuole infine sottolineare l'importanza, quando s'interviene a qualsiasi fine in cavità sotterranee, di una preventiva verifica della presenza di Chirotteri, rivolgendosi agli specialisti della rete *Chironet*, sia per determinare la specie, sia per valutare e/o individuare le opportune misure precauzionali da mettere in essere per evitare il disturbo delle specie rinvenute.

BIBLIOGRAFIA

Agnelli P., Martinoli A., Patriarca E., Russo D., Scaravelli D. & Genovesi P. (a cura di) (2004), *Linee guida per il monitoraggio dei Chirotteri: indicazioni metodologiche per lo studio e la conservazione dei pipistrelli in Italia.* Quad. Cons. Natura 19, Min. Ambiente – Ist. Naz. Fauna Selvatica.

Biscardi S., Cistrone L., Tomassini A., Pieroni A., Russo D. (2012), *I chirotteri della Riserva Naturale Regionale Monti Navegna e Cervia*. Collana Atlanti Locali, Edizioni ARP, Roma.

Ciotoli G. Corazza A., Finoia M.G., Nisio S., Succhiarelli C. (2013), *Gli sprofondamenti antropogenici nell'area urbana di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 143-182.

Ciotoli G., Nisio S., Serafini R. (2015), *Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma: analisi previsionale*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 99, 167-188.

Ciotoli G., Ferri G., Nisio S., Succhiarelli C. (2015), *The underground cavities in the territory of Rome: typologies, distribution and sinkhole susceptibility.* Hypogea 2015 - Proceedings of International Congress of Speleology in Artificial Cavities - Rome, March 11/17 2015 311.

Ciotoli G., Nisio S., Amanti M. (2016), *La Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici.* Professione Geologo, Ordine Geologi del lazio.

Crescenzi R., Piro M. & Vallesi R. (1995), *Le cavità sotterranee a Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 50, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, p.249-278.

D.G.R. n. 2649/99 (Deliberazione Giunta Regionale - numero 2649 del 26/05/1999) *Linee guida e documentazione per l'indagine geologica e vegetazionale estensione dell'applicabilità della Legge n.64 del 02/02/ 1974 ai comuni individuati tra quelli ad alto rischio sismico in base all'ordinanza n. 2788 del 12 Giugno 1998 della Presidenza del Consiglio Dipartimento della Protezione Civile. BUR 26 maggio 1999.*

D.G.R. n. 1159/2002 (Deliberazione Giunta Regionale - numero 1159 del 2/08/2002) *"Integrazione alla DGR 2649 del 18 Maggio 1999 - Normativa tecnica per l'edificazione in zone a rischio Sinkhole.*

D.G.R. n. 497/2007 (Deliberazione Giunta Regionale - numero 497 del 03/07/2007), *Attivazione e disposizioni per l'organizzazione della Rete regionale per il monitoraggio dello stato di conservazione degli habitat e delle specie della flora e della fauna (Direttiva 92/43/CEE, LR 29/97).*

ETC/BD - Evans D. and Arvela M. compiled by (2011), Assessment and reporting under Article 17 of the Habitats Directive Explanatory Notes & Guidelines for the period 2007-2012. Final Draft July 2011. European Topic Centre on Biological Diversity. http://circa.europa.eu/Public/irc/env/monnat/library?l=/habitats_reporting/reporting_2007-2012&vm=detailed&sb=Title.

Funiciello R., Heken G., De Rita D. & Parotto M. (2006), *"I sette colli: guida geologica a una Roma mai vista"*. Raffaella Cartina Editore. Roma.

Genovesi P., Angelini P., Bianchi E., Duprè E., Ercole S., Giacanelli V., Ronchi F., Stoch F. (2014), *Specie e habitat di interesse comunitario in Italia: distribuzione, stato di conservazione e trend. ISPRA, Serie Rapporti, 194/2014.*

LANZINI M. (1995), *Il Problema delle cavità sotterranee a Roma* (Un rischio geologico). SIGEA Geologia dell'Ambiente.3, Luglio-settembre 1995.

Mazza R., Capelli G., Lanzini. M. (2008), *La cartografia tematica dell'area Tuscolana, Prenestina, Casilina, comprendente le indicazioni di dettaglio della distribuzione delle cavità nelle unità vulcaniche*.

Mazza R., Paganelli D., Campolunghi, Capelli G., Lanzini. M., Sereni F., & De Filippis L. (2001), *Rischio di crollo da cavità sotterranee nel settore orientale del comune di Roma*. Memorie Descr. Carta Geologica d'Italia Vol. LXXX, ISPRA

Nisio S. (2010), *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani.* Atti 2° Workshop internazionale: I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato. Roma 3-4 dicembre 2009. ISPRA, 845-864.

Nisio S. (2011), *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. VII Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano, ISPRA.

Nisio S., Ciotoli G. (2016), *Rome: sinkhole events and network of underground cavities (Italy)* Geophysical Research Abstracts Vol. 18, 12155, 2016 EGU General Assembly 2016.

Nisio S. Allevi M. Ciotoli G., Ferri G. Fiore R. Paolucci R., Stranieri I., Succhiarelli C. (2017), *Carta delle cavità sotterranee di Roma.* http://www.isprambiente.gov.it/files2017/cartografia/carta_cavita_sotterranee_Roma.pdf.

Rondinini, C., Battistoni, A., Peronace, V., Teofili, C. (compilatori) (2013), *Lista Rossa IUCN dei Vertebrati Italiani. Comitato Italiano IUCN e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma.*

Sciotti M. (1984), *Il problema del recupero delle zone interessate da vecchie cave in sotterraneo nell'area urbana di antichi centri abitati.* Quarry e Construction.

Ventriglia U. (1971), *La geologia della città di Roma* - Amministrazione Provinciale di Roma.

Ventriglia U. (2002), *Geologia del territorio del comune di Roma.* Amministrazione Provinciale di Roma, Difesa del suolo. Servizio Geologico.

Siracusa ipogea: carta di censimento e classificazione dei principali sistemi ipogei di Acradina Neapolis ed Ortigia

Syracuse ipogea: Census and classification of the main hypogean systems of Acradina Neapolis and Ortigia

Parole chiave (*key words*): ipogei (*hypogea*), catacombe (*catacombs*), acquedotti (*aqueducts*), Siracusa (*Siracusa*)

Anna Maria Di Maio
Laurea in Storia, laurea Specialistica in Valorizzazione dei Beni Archeologici
E-mail: annamariadimaio@ymail.com

Gaetano Bordone
Geologo, libero professionista

Maria Giompapa
Geologo, libero professionista

Claudio Miraglia
Geologo, libero professionista

Luciano Arena
Geologo, Gruppo Speleologico Siracusano

RIASSUNTO

Siracusa è, dopo Roma, la città con il più rilevante patrimonio sotterraneo, fatto di sistemi ipogeici ed opere d'arte sotterranee, scavate ed utilizzate ininterrottamente dai primi segni di civiltà fino agli eventi della seconda guerra mondiale, quando furono adattate ed impiegate come rifugio antiaereo.

SUMMARY

Siracusa is the city with the biggest underground heritage, made up of hypogea and underground works of art that were carved and used continuously from the beginning of time to WWII, when they were transformed into air-raid shelters.

INQUADRAMENTO STORICO

Sin dai tempi preistorici Siracusa ha subìto numerose frequentazioni ma è stata la colonizzazione greca del 734 a.C. guidata da Archia di Corinto a dare maggiore sviluppo alla città. Concentrata in un primo momento nell'isola di Ortigia, cresce incessantemente spandendosi verso la terraferma, dotata di una caratteristica geomorfologica particolare, che ha agevolato, sin dal periodo greco-romano, lo sfruttamento del sottosuolo, facilitando sia lo scavo delle "latomie" ipogee (cavità sotterranee per l'estrazione lapidea) sia di opere sotterranee di natura idraulica (longitudinali e verticali) come acquedotti, pozzi e cisterne realizzati per la captazione, la veicolazione e la raccolta dell'acqua.

Dopo il primo semplice uso della grotta come riparo e abitazione, l'uomo, ha iniziato a scavare, modificare, ingrandire, decorare, abbellire, trasformare, scendendo sempre più a fondo, inseguendo limiti labili e indefiniti, sospesi tra arte e materia. Certamente la valenza idraulica e mineraria ha avuto un grande ruolo nell'escavazione della terra ma cunicoli e gallerie, grotte e ipogei, hanno presto giocato una funzione diversa da quella semplicemente utilitaristica, proponendo un ruolo criptico e cultuale, come la Cripta di San Marciano e il Sacello Pagano.

L'evidenza antropica delle latomie ipogee e delle altre opere sotterranee ci regala un paesaggio incantevole fatto di pareti e volte lapidee, di vele cristalline, stalattiti e stalagmiti, di pozzi e acqua sorgiva, anche di piante e di giardini, spesso immortalati negli

acquerelli dei dotti viaggiatori stranieri del grand tour.

In Ortigia, gli ipogei erano spesso collegati tra loro, facilitando l'accesso in caso di fuga, necessità o rifugio. Nei quartieri Neapolis e Acradina, molte di queste cavità, dopo il loro abbandono, sono state reimpiegate come sepolture.

Le preesistenze idrauliche hanno accolto per secoli loculi, tombe e sarcofagi, accompagnate da una cospicua quantità di pitture parietali.

Dagli anni quaranta in poi i sistemi ipogeici sono stati chiusi, vietati, murati, abbandonati, divenuti pericolosi e accessibili solo con grandi difficoltà.

Oggi la città riscopre questa parte misconosciuta del suo patrimonio monumentale e culturale che va tutelato e valorizzato non soltanto per esigenze pratiche di conservazione statica ma per riproporre una porzione significativa del mondo sotterraneo. Queste cavità artificiali rappresentano un complesso straordinario sulle cui pareti la stratificazione storica ci permette di leggere evidenti tracce di un passato immortalato dall'ingegno artistico di chi ci ha preceduto.

La carta di sintesi con la rappresentazione "geolocalizzata" degli ipogei è il risultato del lavoro congiunto di varie competenze, con l'obiettivo di porre in evidenza le caratteristiche geologiche e antropiche di questo territorio. Lo stato di fatto degli ipogei è un punto di partenza per valorizzare questo immenso patrimonio attraverso la fruizione pubblica, compatibile con la conservazione del bene e l'utilizzo didattico del patrimonio sotterraneo.

HISTORICAL BACKGROUND

The site of Siracusa has been influenced by the presence of numerous peoples since prehistory, but it is only after being colonised by the Greeks led by Archia from Corinth in 734 b.C., that the city gained in importance. Though initially it was concentrated on the island of Ortigia, the city slowly started to expand onto the mainland. Thanks to special geomorphological characteristics, the site of the city was ideal for the construction of both underground "*latomie*" (underground caves used for stone quarrying) and underground resources for water (longitudinal and vertical) such as wells, aqueducts and cisterns used to find, transport and collect water, from the Greek and Roman period onwards.

After the first simple use of caves as shelter and dwelling places, man started to dig, to modify, expand, decorate, adorn and transform the caves, digging deeper, and chasing ephemeral and undetermined limits, suspended between art and substance. Certainly the hydraulic and mining value has had a great role in the excavation of the earth but tunnels and tunnels, caves and hypogea, they soon played a different function from the simply utilitarian, proposing a cryptic and cultual role, like the Crypt of San Marciano and the Pagan Sacellum.

The anthropic evidence of the hypogean quarries and other underground works gives us an enchanting landscape made of stone walls and ceilings, of crystalline vaults, stalactites and stalagmites, wells and spring water, but also plants and gardens, often immortalized in the watercolours of the erudite foreign travellers on the Grand Tour.

In Ortigia, the hypogea were often interconnected facilitating access in case of flight, necessity or refuge. In the Neapolis and Acradina districts, many of these cavities after being abandoned, were reused as cemeteries.

The pre-existing water system housed *loculi*, tombs and sarcophagi for centuries,

as well as a conspicuous quantity of wall paintings. From the 1940s onwards, these underground systems were closed, out-of-bounds, walled up and abandoned, as they had become dangerous and almost impossible to access.

Today, the city is rediscovering this forgotten part of its monumental and cultural heritage, one that must be protected and valued not only for practical needs of static conservation, but also to bring a significant portion of the underground world back to life. These artificial caves represent a series of extraordinarily varied places used in different ways over time, on whose walls the historical stratification allows us to read clear traces of a past immortalised by the artistic talents of those who preceded us.

The summary paper with the "geo-localised" representation of the hypogea is the result of the joint work of various skills, and aims to shape the geological and anthropological characteristics of this territory in a single, unified solution. The present state of the hypogea is a starting point for the promotion of this immense heritage, through public access which is compatible with the conservation of the property and the educational use of our underground heritage.

NOTA GEOLOGICA

Gli aspetti geologici del territorio hanno avuto un ruolo fondamentale sulla nascita e lo sviluppo della città di Siracusa: la grande disponibilità d'acqua e la facilità nel reperimento dei materiali da costruzione sono stati fattori decisivi e linee guida della pianificazione territoriale dei nostri predecessori: "Acqua" e "Pietra".

"L'acqua" è l'elemento conduttore delle colonizzazioni che a Siracusa hanno inizio con i Greci per poi proseguire con i Romani, i Bizantini, gli Arabi, i Normanni, gli Svevi, gli Spagnoli fino agli industriali italiani degli anni '60.

Ogni cosa in Siracusa ricorda l'acqua: lo stesso etimo Siracusa deriva dal greco *Suraka* che significa "abbondanza d'acqua" e con il termine *Syrakos* veniva chiamato il fiume che attraversava la pianura alluvionale della città fino a sfociare nel Porto Piccolo. Esso scorreva anticamente dalle balze di Panagia fino al mare con direzione NW-SE con un percorso che attualmente interesserebbe approssimativamente il complesso residenziale S Giorgio - Piazza S. Giovanni - Santuario Madonna delle Lacrima - Piazza della Vittoria - Viale Luigi Cadorna - Porto Piccolo, ed oramai obliterato.

"L'acqua"è presente diffusamente nel sito Parco Neapolis che si trova alla terminazione del più importante sistema acquedottistico antico (Acquedotto Galermi, Acq. Paradiso, Acq. Ninfeo), alimentandone le vasche ivi presenti e permettendo la costruzione ed il funzionamento dei mulini realizzati nel '700 (quest'area è nota anche con il nome Area dei Mulini del Galermi). "L'acqua" ha permesso la creazione di giardini e vegetazione lussureggiante.

Anche l'isola di Ortigia è ricca di sorgenti e fonti naturali (chiamate nell'accezione popolare *Occhi di Zivillica* o *Occhi di Zilica*, già parzialmente interrotte durante la costruzione delle mura spagnole nel XVI secolo) che fuoriescono al di sotto o in corrispondenza del livello medio del mare; la presenza delle sorgenti è legata alla pendenza naturale delle fluenze e dall'altro ai sistemi di fratturazione esistenti nelle rocce, fattori entrambi che favoriscono l'insorgenza delle acque. Tutte queste polle di acqua dolce, presenti in Ortigia e sfruttate nei secoli per l'approvvigionamento idrico, rappresentano la stupefacente terminazione di questo sistema idraulico, in parte naturale ed in parte antropico, che ha attirato colonizzatori da tutto il mondo e ha permesso l'instaurarsi di splendide civiltà attraverso i secoli e lo sfruttamento a fini commerciali dell'acqua.

"Pietra", l'altra parola chiave, è la materia prima delle *latomie*; l'etimo stesso latomia derivante dal greco (litos=pietra, temno=tagliare) ha insita la parola e ne ricorda l'originale significato ovvero cave di estrazione del materiale lapideo, il calcare bianco di Siracusa con cui sono state realizzate le più importanti costruzioni templari della pentapoli greca (*Arthemision, Athenaion, Olympieion*) ad eccezione dell'*Apollonion* per il quale sono stati impiegati i blocchi calcarenitici provenienti dalle cave più antiche del Plemmirio. L'originario assetto geologico è stato in parte cancellato dall'attuale sistemazione urbana della città ed a seguito delle variazioni del livello del mare negli ultimi 2500 anni (Mirisola & Polacco, 1996) che hanno modificato fino ad occultare importanti evidenze geologiche o paleogeografiche come antiche sorgenti, linee d'impluvio delle acque superficiali o aree paludose; tuttavia parte del sottosuolo urbano si è salvato e le latomie, le catacombe, gli acquedotti, le cripte, i cunicoli, le gallerie, le cisterne, le cantine e le opere ipogeiche in genere ci permettono di conoscere il sottosuolo al di sotto della superficie topografica della città.

Siracusa sorge prevalentemente su un blocco calcareo di origine sedimentaria rialzato da una serie di faglie che lo isolano dal resto del territorio circostante[1], individuando così un limite geografico perfettamente circoscritto già in epoca greca con la costruzione delle mura dionigiane. Quest'altopiano roccioso nella parte sommitale mantiene un'altezza media di 80 metri e verso E degrada sino a un'altezza di circa 10-15 m, generando una costa alta a falesia; nella zona centrale è caratterizzato da una serie di terrazzi marini quaternari (Di Grande & Raimondo, 1983).

La parte del tavolato calcareo degli Iblei costituiva sino alla fine del Miocene, prima



Figura 1 – Veduta satellitare di Siracusa (immagine da Google earth pro)

1 1 Per effetto della tettonica locale, è possibile riconoscere due zone d'alto strutturale (Horst): una occupa la terraferma con i quartieri citati (horst Belvedere-Siracusa o di S. Panagia), e l'altro l'isola d'Ortigia. Questi si trovano lungo un allineamento di horst da Monte Tauro (Augusta) alla Penisola Maddalena.



Figura 2 – Grotta dei Cordari. Latomia del Paradiso (foto Arena L.)

della sua emersione, un ambiente deposizionale tipico di piattaforma carbonatica, ovvero di mare basso, che ha dato luogo alla formazione delle rocce che oggi riconosciamo in affioramento nella maggior parte della Sicilia Sud-Orientale. Per effetto della tettonica si sono succedute poi varie fasi di emersione e sommersione che hanno originato la successione stratigrafica che verrà descritta di seguito e innescato la formazione di fenomeni carsici riconoscibili in tutto il tavolato calcareo.

La città di Siracusa, posta nella Sicilia Sud-Orientale, sorge su un complesso carbonatico formato prevalentemente da una successione di *Calcareniti mioceniche* che possono raggiungere notevoli spessori, sino a 150 m, cui succedono al suo tetto nella parte sud-orientale della città (quartiere Acradina) *Calcareniti e sabbie organogene quaternarie* (Lentini *et al.*, 1987). Si distinguono nella parte rialzata a nord, rocce sedimentarie di colore biancastro, che nei livelli a banchi hanno caratteristiche di resistenza alla compressione mediamente elevate - siti nei quali sorgono le latomie - rispetto a quelle che si trovano a S e S-E, Calcareniti a Sabbie di colore giallo, prevalentemente formate da accumuli detritici di resti organogeni che hanno caratteristiche meccaniche più scadenti - nelle quali si sono sviluppate successivamente le catacombe-; l'andamento degli strati è prevalentemente orizzontale o sub orizzontale (come verrà scritto oltre).



Figura 3 – Acquedotto del Ninfeo (foto Arena L.)

La configurazione morfologica di Ortigia è legata all'evoluzione strutturale della formazione carbonatica che la compone e che ne ha determinato la morfogenesi, il deflusso idrico superficiale e la tipologia degli insediamenti urbani succedutisi nel tempo. L'isola è un "alto strutturale" (horst) delimitato a O, S ed E da una scogliera modellata nei calcari e impostata sulle direttrici tettoniche principali; verso N la costa degrada sul mare interessata da depositi sedimentari pleistocenici più recenti, sui quali giacciono in sovrapposizione terreni di riporto. In particolare, i terreni di scavo degli ipogei sono costituiti prevalentemente da un complesso calcarenitico, con strati più o meno compatti a grana arenitica di colore biancastro alternati a livelli calcareo-marnosi "teneri" di potenza compresa tra 10 e 100 cm, più o meno intensamente fratturati di colore bianco o giallastro, geologicamente ascrivibili alla <<Formazione Monte Carrubba>> (Grasso *et al.*, 1982). Quest'alternanza calcareo-marnosa, affiorante con spessori di circa 20 m, costituisce il substrato roccioso di tutta l'isola di Ortigia; presenta giacitura suborizzontale con lieve immersione verso E-SE compresa tra 5 e 10 gradi.

Dal punto di vista strutturale la formazione è interessata da un reticolo di fratturazione coniugato ai principali sistemi tettonici, non più attivi, che interessano Ortigia, rispettivamente con direzione NNO-SSE, ENE-OSO ed E-O (Ghisetti e Vezzani, 1981). Le dislocazioni più importanti hanno "ribassato" il basamento calcareo del settore sud-orientale dell'isola. Il loro rigetto ovvero lo spostamento massimo delle faglie all'interno dell'isola, determinato con i dati disponibili, va da 4,50 a oltre 13,00 metri ed è ben evidenziato dal maggiore spessore dei terreni di copertura e, soprattutto, dalla presenza di depositi pleistocenici trasgressivi sull'alternanza calcareo-marnosa.

DESCRIZIONE DELLA CARTA

La carta, titolata *Siracusa Ipogea*, nasce dal censimento e successiva classificazione dei principali sistemi ipogeici presenti nel sottosuolo di Acradina, Neapolis ed Ortigia, molti dei quali venuti alla luce durante i lavori di restauro dell'ultimo decennio, e riporta le principali risorse ipogeiche e cavità antropiche del territorio studiate, comprendenti:

- latomie
- acquedotti
- ipogei
- catacombe

Riguardo all'utilizzo attuale, le risorse ipogeiche sono state distinte per colore: in rosso sono rappresentati i *beni non accessibili*; in giallo i *beni potenzialmente accessibili*, in verde i *beni accessibili*. Più dettagliatamente, i siti rappresentati in rosso comprendono beni documentati in bibliografia e complessi ipogeici utilizzati anche come rifugi antiaerei, in seguito obliterati o inaccessibili.

Quelli in giallo sono i beni che, per motivi di manutenzione o perché ricadono in aree private, non sono al momento accessibili.

Quelli di colore verde sono relativi a beni di libera fruizione ed a complessi ipogeici utilizzati anche come rifugi antiaerei.

Per la realizzazione della carta sono state numerate e vettorializzate tutte le planimetrie disponibili. In seguito si sono implementate

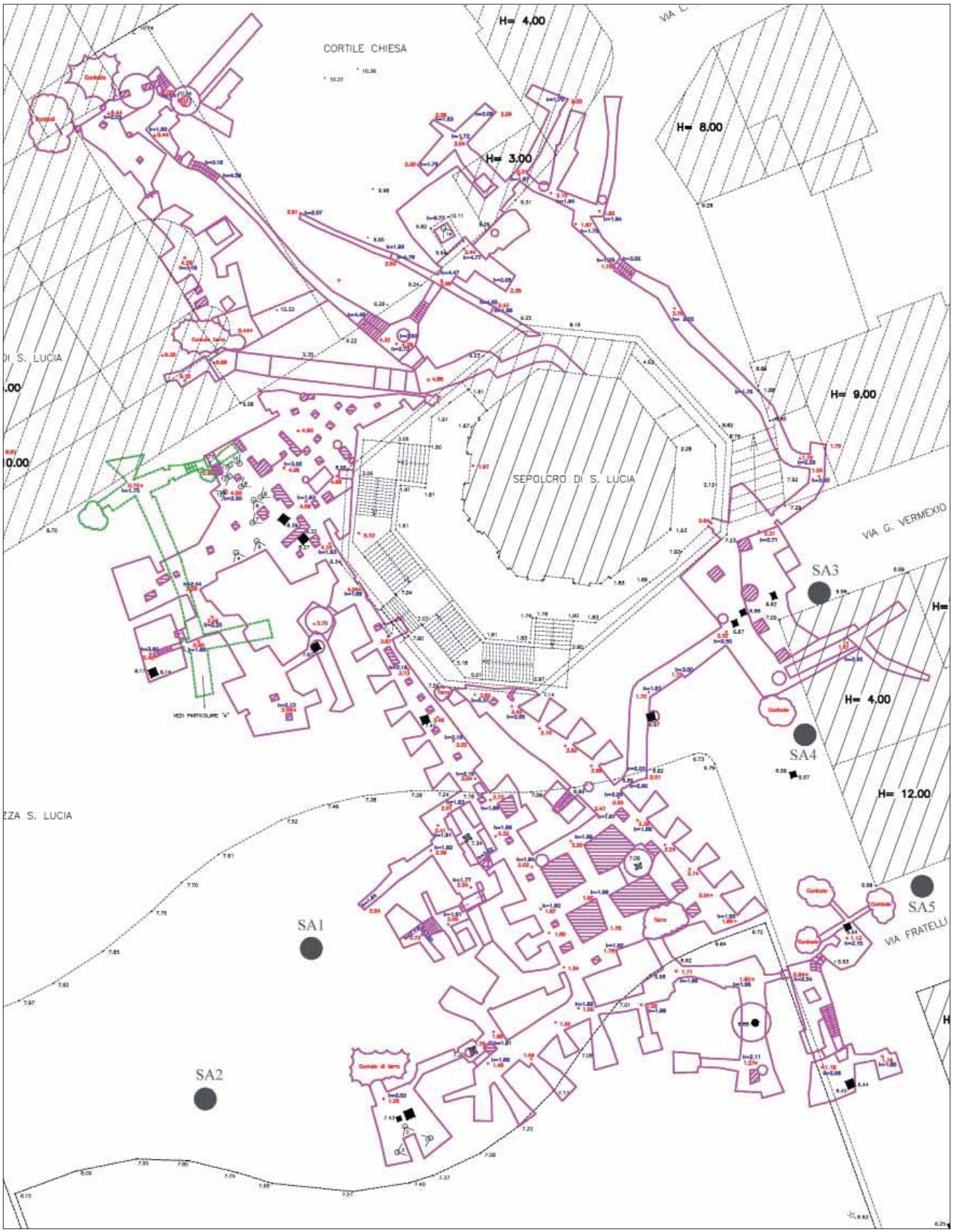


Figura 4 – Catacomba di Santa Lucia (rilievo GEOMERID s.r.l.)



Figura 5 – Catacomba di San Giovanni (Griesheimer M.)

su una piattaforma GIS sovrapponendo le planimetrie su una base cartografica georiferita, la Carta Tecnica Regionale in scala 1:2.000 rispetto al sistema geografico Gauss-Boaga. Questa parte di lavoro è stata svolta utilizzando il software "Quantum GIS - open source".

L'analisi interpretativa dell'ambiente fisico - geografico della città consente di definire la presenza di un elemento di rottura topografica, che si trova in corrispondenza della linea di faglia, riconoscibile nella falesia della *Balza Acradina* (*Fig.* 1). Questo confine ideale, in realtà diventa fisico, perché divide lo spazio tra le principali opere d'escavazione a cielo aperto e sotterranee, "latomie" nella zona a nord e le "catacombe" e "ipogei" nella zona a sud.

La successione delle principali latomie, da Est verso Ovest, è la seguente: Latomia dei Cappuccini, Broggi e Casale, Carratore, Santa Venera, del Paradiso (*Fig.* 2), Intagliatella, Cozzo Romito, Novantieri, Bufalaro.

I principali complessi catacombali sono rappresentati da: Santa Lucia, la necropoli della Vigna Cassia e San Giovanni.

Nella carta spiccano anche i maggiori sistemi acquedottistici: Paradiso, Galermi e Ninfeo (*Fig.* 3), che attraversano la città. Infine sul lungomare di levante, *Pietralonga,* è stato cartografato un gran numero d'ipogei, rilevati e studiati dall'archeologo Paolo Orsi, successivamente obliterati dagli stessi proprietari.

Per quanto riguarda le catacombe, il vasto cimitero di *S. Lucia* (il cui toponimo è dedicato al luogo in cui è avvenuto il seppellimento della nostra patrona) (*Fig.* 4) ha sfruttato al massimo le strutture preesistenti, generalmente acquedotti sotterranei. Questo cimitero, con le sue quattro regioni A, B, C, D e la complessa rete di gallerie che si sviluppano in alcuni casi a tre livelli sovrapposti, supera per la vastità quello di S. Giovanni. Dal punto di vista architettonico il complesso catacombale presenta particolarità strutturali che non sono comuni a nessuna delle altre catacombe della città.

L'articolazione dei cimiteri in più regioni, in conformità a modelli romani, nasce dall'accorpamento d'ipogei di diritto privato, come l'ipogeo anonimo (Marchese G. 1996). Le gallerie si dipartono in tutte le direzioni dalla tomba della santa. Il reimpiego di un braccio d'acquedotto, nella regione B, è stato sfruttato per consentire nell'alzato l'apertura dei loculi.

Il riutilizzo delle preesistenze idrauliche è presente anche nella necropoli della *Vigna Cassia*, divisa a sua volta in tre cimiteri: *Marcia*, *Maggiore o S. Diego* e *Santa Maria di Gesù*. L'aspetto saliente è la presenza di un acquedotto greco, in disuso, nella regione centrale del complesso, che collega S. Diego a S. Maria di Gesù, con due diramazioni iniziali, una ad O, che è quella che fa da corridoio fra i due cimiteri, e l'altra, tuttora inesplorata a N. Nel primo tratto l'acquedotto appare strutturalmente integro e si può percorrere per circa 40 metri dirigendosi verso la regione di Santa Lucia (Marchese 2012); ed è in quest'area che sono stati osservati tre livelli sovrapposti. Quest'antico acquedotto, che costituisce la galleria principale di S. Maria di Gesù, si presenta con semplici ordini di loculi scavati nelle pareti rocciose.

La catacomba di *S. Giovanni*, cimitero di comunità, (*Fig.* 5) fu realizzata dopo la pace costantiniana, secondo un progetto omogeneo. Una grande arteria centrale il *decumanus maximus* divide la catacomba in due parti: settentrionale e meridionale, ed è tagliata da nord a sud, da cinque gallerie trasversali o *cardines*. Un *decumanus minor* quasi parallelo al *maximus*, si svolge nella parte nord del cimitero. Nella zona meridionale, lo spazio presenta diramazioni secondarie con numerosi ambienti, più ampli quadrangolari o circolari, molti dei quali con un chiaro

riutilizzo di forme idrauliche. San Giovanni si sviluppa lungo il braccio di un acquedotto del tutto simile per caratteristica e misura a quello della Necropoli di Vigna Cassia e numerose cisterne diventano magnifiche rotonde. Numerosi ipogei d'età tardo imperiale sono stati studiati e pubblicati da Paolo Orsi tra il 1891 ed il 1920, ubicati nel margine superiore dell'Acradina orientale (Orsi, 1897). Questi sepolcri sono stati denominati "ipogei minori", per distinguerli dai vasti cimiteri di comunità, collocati nel loro insieme tra la fine del II e il V secolo. Essi furono costruiti per accogliere nuclei familiari, gruppi d'appartenenza o membri di uno stesso gruppo sociale, ed erano in genere sepolture di diritto privato.

Le caratteristiche strutturali degli ipogei minori presentano un insieme di note comuni, in quanto sono costituiti da un vano o corridoio centrale, con brevi gallerie, di 10-13 m, che in entrambi i lati sviluppano inumazioni ad arcosolii monosomi o polisomi, cruciformi nello schema originario, che verrà modificato successivamente, alcuni di loro hanno alla fine

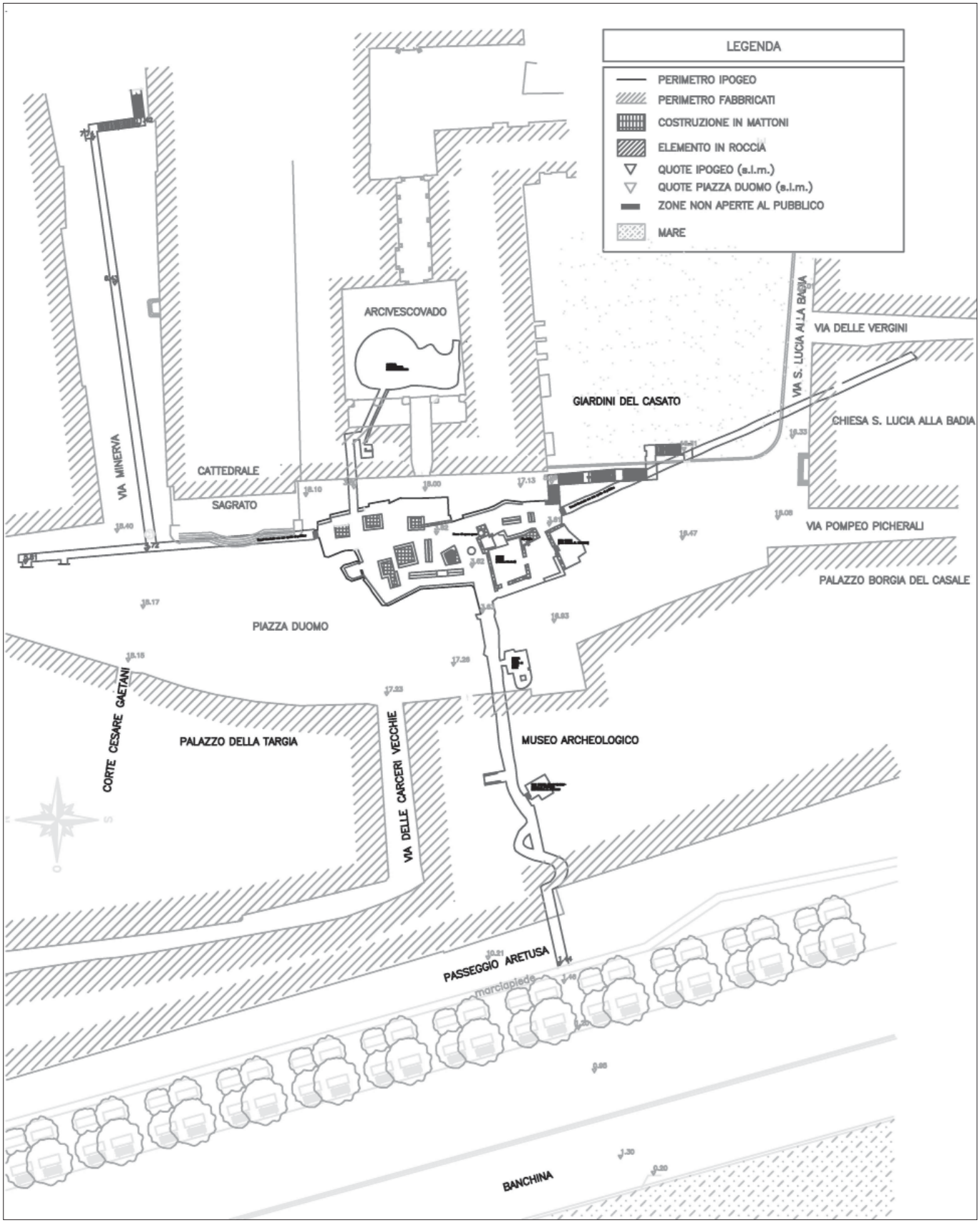


Figura 6 – Sistema Ipogeico di Piazza Duomo (rilievo top master s.r.l.)

del corridoio principale; un sarcofago scavato nella roccia, altri semplice camere rettangolari, dove si trovano le sepolture a mensa, fosse terranee e ossari con accesso sul lato Sud o Est. Gli ipogei a pianta cruciforme, con annesse sepolture ad arcosoli, hanno inizio nel III secolo, e sono comuni, come struttura architettonica, tanto a pagani come cristiani.

Negli ipogei Cappuccini-San Giuliano i sepolcri costituiscono l'attuale prova della lenta sovrapposizione del primo cristianesimo nella tradizione pagana: la mancanza di titoli epigrafici e di affreschi li distingue dagli altri.

In Ortigia gli ipogei minori sono stati individuati sul lungomare di Ponente o Alfeo (Nastasi, 2006) mentre, sul lungomare di Levante di rilevanza è il complesso ipogeico S. Domenico.

Nel complesso, i principali complessi ipogeici sono costituiti dal *sistema ipogeico di Piazza Duomo* e dal *complesso ipogeico della Chiesa di S.Francesco di Paola e Convento dei Minimi*, che si collega a un altro complesso *sistema ipogeico situato sotto la Chiesa di S. Filippo*, nel cuore dell'isola di Ortigia, oltre al nominato *complesso ipogeico di S. Domenico* posizionato sul lungomare di levante.



Figura 7 – Pozzo di San Filippo (foto Arena L.)

Il sistema ipogeico di Piazza Duomo è quello più rappresentativo e rilevato nel dettaglio in tutto il suo sviluppo sotterraneo da Top Master s.r.l. (*Fig.* 6). L'ipogeo risale all'epoca greca e congiunge in senso E-O Piazza Duomo alle mura della Marina di ponente; si articola in una galleria principale, da cui si dipartono alcune gallerie minori, una delle quali si ricongiunge alla grande cisterna del Palazzo Arcivescovile. Lungo il percorso dell'ipogeo s'incontrano i resti di altri pozzi e antiche cisterne, intercettate e distrutte durante i lavori di scavo delle gallerie. Gli eventi bellici legati alla Seconda Guerra mondiale riportarono l'attenzione sui vani sotterranei individuati nel secolo precedente. In occasione del secondo conflitto mondiale, vennero predisposti dal Comitato Cittadino dell'U.N.P.A.(Unione Nazionale Protezione Antiaerea) punti di raccolta per la popolazione civile in caso di attacco.

I cunicoli di Piazza Duomo risultano collegati ad un altro importantissimo sistema ipogeico localizzato al di sotto della Chiesa di S. Francesco di Paola e Convento dei Minimi in via Logoteta alla Giudecca edificati nel 1705 dai Padri Minimi o Paolotti. Questo complesso monumentale, chiuso e abbandonato dal sisma del 13 dicembre 1990, è stato restaurato nel 2005/2006 con interventi di consolidamento strutturale e aperto al pubblico in occasione della 18° Giornata di Primavera (27-28 marzo 2010) organizzata dal FAI – delegazione di Siracusa nel corso della quale sono stati ammirati molti dei suoi cunicoli sotterranei. Il sistema ipogeico, che si sviluppa al di sotto di una porzione del Convento alla profondità di circa 6 m dalla superficie per un'estensione di circa 200 m^2, è caratterizzato da numerose digitazioni alcune delle quali con altezze massime di circa 1,70 m e larghezza media di circa 3-4 m. Di rilevante interesse sono le parti superiori di due cisterne contigue ancora ben intonacate e conservate mentre le parti inferiori sono state scavate e asportate.

Questo percorso ipogeico inoltre si collega ad un altro complesso sistema ipogeico situato sotto la Chiesa di S. Filippo, sempre alla Giudecca, formato da diversi piani utilizzati nel passato per varie forme di culto e nel quale sono presenti affreschi. All'interno di esso si trova il Pozzo di S. Filippo (*Fig.* 7), già noto a Jean Houel (1776) che lo descrisse e disegnò nella sua monumentale opera *"Voyage pittoresque des isles Sicilie, de Malte et de Lipari"*; è accessibile mediante una scala a chiocciola di età cinquecentesca che lo collega alla soprastante Chiesa. Le acque in fondo al pozzo presentano le stesse caratteristiche delle altre polluzioni del substrato di Ortigia, tra le quali quelle più conosciute sono rappresentate dal miqwè "Bagno Bianca" utilizzato per i riti di purificazione ebraica.

I sistemi ipogeici di Piazza Duomo e della Chiesa di S. Francesco di Paola-Convento dei Minimi hanno avuto il ruolo di rifugi antiaerei: in particolare, all'interno del "Sistema ipogeico di Logoteta" sono state rinvenute le sedute realizzate lungo i corridoi e all'interno della grande latomia attorno a contrafforti appositamente costruiti, a testimonianza del lungo periodo trascorso dalla popolazione di Ortigia.

La dott.ssa Graziella Cusmano nella sua tesi "*Ipogei tra storia e teatralità: riqualificazione delle sottrazioni materiche del Duomo e S. Filippo*" (Cusmano, 2017), analizzando gli ipogei di Siracusa e facendo riferimento alla classificazione stabilita dalla Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana basata su sette tipologie principali, li ha catalogati secondo macro categorie (es. opere idrauliche, di culto ecc.) che ne individuano la funzione, suddivise successivamente per tipologie che li distinguono per la loro forma (es. cisterna a camera singola del tipo a tholos). In fase di redazione delle schede di catalogo, gli ipogei sono stati inseriti in ordine cronologico in un apposito elenco che ne evidenzia le diverse destinazioni d'uso e le trasformazioni subite nell'arco dei secoli.

Al di fuori dell'isola di Ortigia, ed esattamente nella vasta area prospiciente l'attuale viale S. Panagia, sede fino a qualche decennio fa di un insediamento dell'aeronautica militare, sono stati costruiti durante la seconda guerra mondiale, nei primi anni '40 del secolo scorso, depositi sotterranei di carburante, in calcestruzzo spesso alcuni metri, per una capienza di qualche migliaio di metri cubi, completamente impermeabilizzati con una copertura di ferro. Le vasche erano e sono collegate ancora oggi da una rete di gallerie sotterranee nelle quali, oltre alle tubazioni atte a trasferire, in sicurezza il carburante, hanno trovato alloggio i sistemi di ventilazione forzata, di comunicazione e di illuminazione.

La delegazione FAI di Siracusa ha scelto in occasione delle giornate di Autunno 2017 questo straordinario sito, mai aperto al pubblico, chiuso e abbandonato dal 1966 sia per l'interesse storico e archeologico del sito, sia per lanciare l'idea di un possibile futuro utilizzo.

Di seguito riportiamo la tabella di supporto alla lettura della carta, indicando l'ordinamento numerico riportato sulla carta (*Fig.* 8),

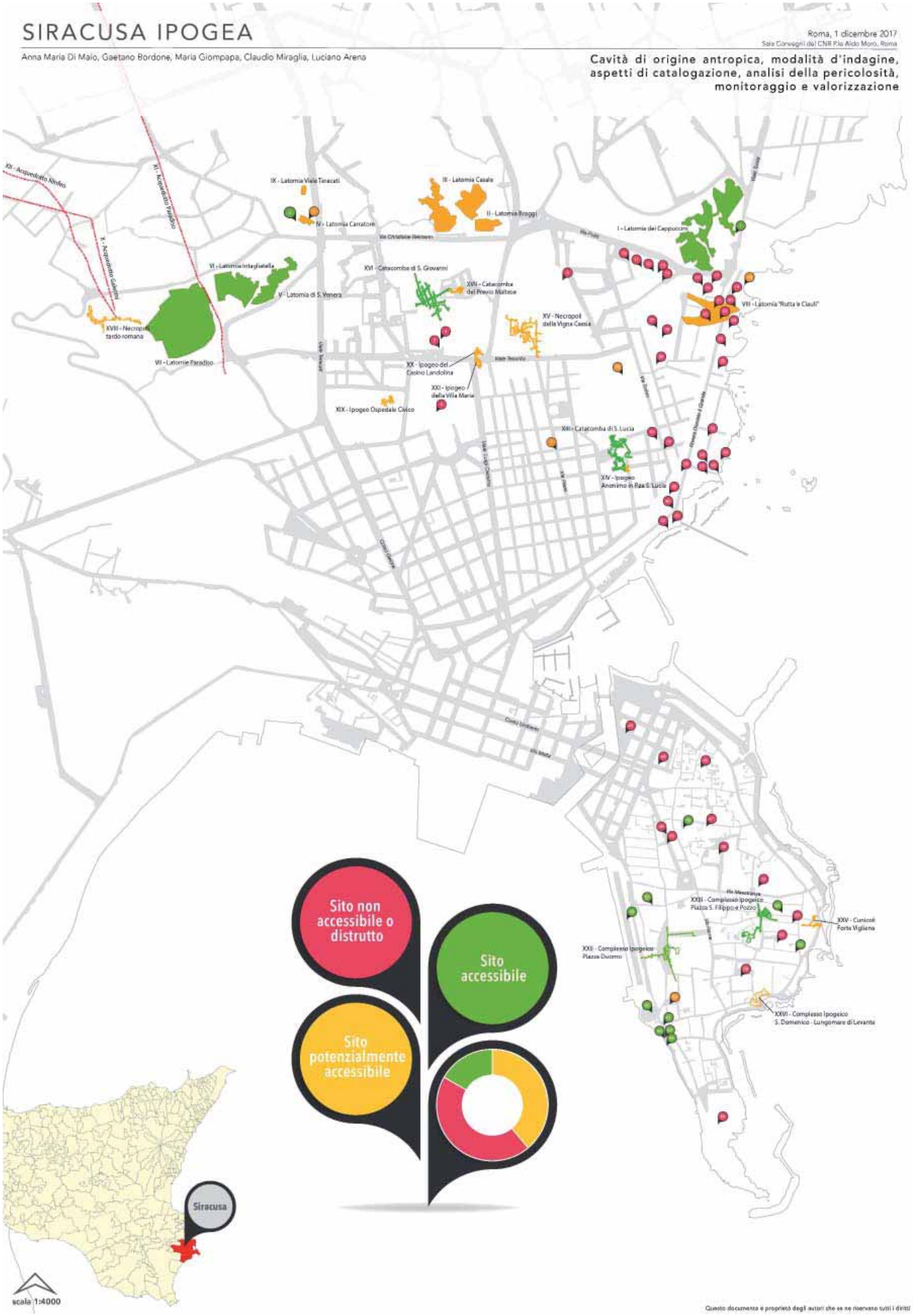


Figura 8 – Carta Siracusa Ipogea (elaborazione di Miraglia C.)

Tabella di supporto alla lettura della carta

N.	CLASSIFICAZIONE	NOME	NOTE	CNCA	COLORE
I	Latomia	DEI CAPPUCCINI	Fruibile, oggi ipogeo in passato ipogeo	E	
II	Latomia	BROGGI	Fruibile, oggi ipogeo in passato ipogeo	E	
III	Latomia	DEL CASALE	Fruibile, oggi ipogeo in passato ipogeo	E	
IV	Latomia	CARRATORE	Privato non accessibile	E	
IX	Latomia	TERACATI	Privato non accessibile	E	
V	Latomia	S. VENERA	Fruibile, oggi ipogeo in passato ipogeo	E	
VI	Latomia	INTAGLIATELLA	Fruibile, oggi ipogeo in passato ipogeo	E	
VII	Latomia	PARADISO	Fruibile, oggi ipogeo in passato ipogeo	E	
VIII	Latomia	DELLA “RUTTA ‘E CIAULI”	Potenzialmente fruibile	E	
X	Acquedotto	GALERMI	In galleria	A	
XI	Acquedotto	PARADISO	In galleria	A	
XII	Acquedotto	NINFEO	In galleria	A	
XIII	Catacomba	SANTA LUCIA	Fruibile	C1, C2	
XIV	Ipogeo	ANONIMO IN PIAZZA SANTA LUCIA	Potenzialmente fruibile	C2	
XIX	Ipogeo	OSPEDALE CIVICO	Potenzialmente fruibile	C1, C2	
XV	Catacomba	VIGNA CASSIA	Accessibile solo per studio	C1, C2	
XVI	Catacomba	SAN GIOVANNI	Fruibile	C1, C2	
XVII	Catacomba	PREDIO MALTESE	Potenzialmente fruibile	C2	
XVIII	Ipogei	NECROPOLI TARDOROMANA	Parzialmente fruibile all’interno del parco Archeologico della Neapolis	C1, C2	
XX	Ipogeo	CASINO LANDOLINA	Potenzialmente fruibile	C2	
XXI	Ipogeo	VILLA MARIA	Potenzialmente fruibile	C2	
XXII	Complesso ipogeico	PIAZZA DUOMO	Grandi ambienti collegati da gallerie, utilizzati come rifugi antiaerei accessibili	A, D7, E	
XXIII	Complesso ipogeico	PIAZZA S. FILIPPO	Grandi ambienti collegati da gallerie, utilizzati come rifugi antiaerei accessibili ed esplorati	A, C, D7	
XXIV	Complesso ipogeico	CHIESA S. FRANCESCO DI PAOLA E CONVENTO DEI MINIMI, VIA LOGOTETA	Fruibile	A	
XXV	Gallerie ipogee	VICOLO FORTE VIGLIENA	Percorsi in galleria potenzialmente fruibili	A	
XXVI	Complesso ipogeico	S. DOMENICO – LUNGOMARE DI LEVANTE	Percorsi in galleria potenzialmente fruibili	A	
1	Ipogei	DELLA LATOMIA DEI CAPPUCCINI	Fruibile	C2	
2	Ipogei	DELLA LATOMIA CARRATORE	Non accessibili, sito privato	C2	
3	Ipogei	VILLA REIMMAN	Accessibili dalla Villa Reimman	C2	
4	Ipogei	VILLA LANDOLINA	Potenzialmente fruibile	C2	
5	Ipogeo	ASSENNATO	Non accessibile	C2	
6	Ipogeo	DEL SANTUARIO	Inaccessibile	C2	
7	Ipogeo	MITREO	Obliterato	C	
8	Serbatoi e Gallerie	VIALE S. PANAGIA	Potenzialmente fruibile	A4, D5	
9	Krane	GROTA DEI LAGHI	Obliterato	A	
10	Ipogeo	CAPPUCCINI IV (Mezio I)	Obliterato	C2	
11	Ipogeo	CAPPUCCINI V (Mezio III)	Obliterato	C2	
12	Ipogeo	CAPPUCCINI VI (Mezio II)	Obliterato	C2	
13	Ipogeo	CAPPUCCINI XI	Obliterato	C2	
14	Ipogeo	CAPPUCCINI XII	Obliterato	C2	
15	Ipogeo	TROJA - SALAZZO	Non accessibile	C2	
16	Ipogeo	CAPPUCCINI VIII	Obliterato	C2	
17	Ipogeo	CAPPUCCINI IX	Obliterato	C2	
18	Latomia	LATOMIA DELLA “RUTTA ‘E CIAULI II”	Potenzialmente fruibile	C2	
19	Ipogeo	CAPPUCCINI I	Obliterato	C2	
20	Ipogeo	BONAIUTO	Non accessibile	C2	
21	Ipogeo	CAPPUCCINI II	Obliterato	C2	
22	Ipogeo	TRIGILIA	Obliterato	C2	

Tabella di supporto alla lettura della carta

N.	CLASSIFICAZIONE	NOME	NOTE	CNCA	COLORE
23	Ipogeo	A SAN GIULIANO II	Obliterato	C2	
24	Ipogeo	MAUCERI	Obliterato	C2	
25	Ipogeo	Villa Di Pace	Non accessibile	G	
26	Ipogeo	RUSSO	Obliterato	C2	
27	Ipogeo	CAPPUCCINI a San Giuliano	Obliterato	C2	
28	Ipogeo	CAPPUCCINI a San Giuliano II	Obliterato	C2	
29	Ipogeo	A SAN GIULIANO	Non accessibile	C2	
30	Ipogeo	FÜHRER	Potenzialmente fruibile	C2	
31	Ipogeo	VIA MONSIGNOR BIGNAMI	Non accessibile	C2	
32	Ipogeo	DE BONI	Obliterato	C2	
33	Ipogeo	FORTUNA	Non accessibile	C2	
34	Ipogeo	BELLONI - MONTEFORTE	In area privata	C2	
35	Ipogeo	VALLONE FORTUNA	Obliterato	C2	
36	Ipogeo	PUPILLO I – II	In area privata	C2	
37	Ipogeo	ATTANASIO	Non accessibile	C2	
38	Ipogeo	BRANCIAMORE	Non accessibile	C2	
39	Ipogeo	CAPPUCCINI III	Obliterato	C2	
40	Ipogeo	DI VIA ARSENALE	Obliterato	C2	
41	Ipogeo	CAPPUCCINI XIII	Non accessibile	C2	
42	Ipogeo	CAPPUCCINI XIV – XV	Non accessibile	C2	
43	Ipogeo	PIAZZA DELLA POSTA	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
44	Ipogeo	ATTUALE MERCATO COPERTO CON ACCESSO VIA TRENTO E VIA DE BENEDICTIS	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
45	Ipogeo	VICOLO ALLA GRAZIELLA	Non accessibile	A	
46	Ipogeo	S. PIETRO, S. TOMMASO, IN PIAZZA S. PIETRO E VIA MIRABELLA	Fruibile	A	
47	Ipogeo	CASA ABELA IN VIA MIRABELLA, PIAZZA DANIELI	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
48	Ipogeo	PREVIDENZA SOCIALE VIA DEL LITTORIO	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
49	Ipogeo	PALAZZO INA VIA DEL LITTORIO	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
50	Ipogeo	VIA DEI GRACCHI IN VIA DEI SANTI CORANATI	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
51	Ipogeo	EX TRIBUNALE	In collegamento con Complesso XXIV	A	
52	Ipogeo	CORTE DEI BOTTAI	Fruibile	A, D7	
53	Ipogeo	PASSEGGIO ADORNO OGGI SALE DI ESPOSIZIONE	Fruibile	A	
54	Ipogeo	MIQWE' VICOLO DELL'ULIVO	In area privata	A, C	
55	Ipogeo	PALAZZO BIANCA	Ipogeo	A, C	
56	Ipogeo	MIQWE' VIA ALAGONA	Fruibile	A, C	
57	Ipogeo	S. GIOVANNELLO ALLA GIUDECCA	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
58	Ipogeo	PIAZZA S. GIUSEPPE	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	
59	Complesso ipogeico	PIAZZA S. ROCCO	Ambienti ipogei, utilizzati come rifugiantiaerei accessibili	A, D7	
60	Ipogeo	TRAFORO LARGO ARETURA, OGGI SEDE DELL'AC-QUARIO COMUNALE	Fruibile	A	
61	Ipogeo	FONTE ARETUSA	Fruibile	A	
62	Ipogeo	FONTE ARETUSA CONCERIE – DAMMUSO CRISTINA	Fruibile	A	
63	Ipogeo	DAMMUSO BONGIOVANNI	In area privata	A	
64	Ipogeo	DAMMUSO SCALA	Fruibile	A	
65	Ipogeo	PIAZZA CASTELLO MANIACE	Utilizzato come rifugio antiaereo, inaccessibile ed inesplorato	D7	

la classificazione, i nomi dei siti, l'accessibilità e le tipologie CNCA.

PROPOSTA

Gran parte del patrimonio sotterraneo è stato sottoposto a numerosi sopralluoghi e ricognizioni, tuttavia per una cospicua parte non è stato possibile, finora, determinare lo stato di fatto e per questa ragione si è specificata la fonte bibliografica.

Abbiamo realizzato una classifica dei beni in base alla fruizione ed all'accesso al sito, utilizzando tre diversi colori: verde, giallo, rosso in funzione rispettivamente dell'utilizzo e accessibilità totale, parziale, negata e secondo le tipologie individuate nella classificazione della Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana.

Allo stato attuale, riguardo le latomie, sono fruibili solo parte della Latomia del Paradiso, all'interno del Parco Archeologico della Neapolis, e la Latomia dei Cappuccini aperta da aprile a ottobre venerdì, sabato e domenica.

Le catacombe accessibili al pubblico sono quelle di San Giovanni e Santa Lucia, mentre la Necropoli di Vigna Cassia si apre solo per richiesta.

Infine, gli ipogei minori di Acradina non sono visitabili, perché o di proprietà privata o chiusi o inaccessibili, mentre in Ortigia è possibile visitare il sistema ipogeico di Piazza Duomo, con ingresso dalla piazza ed uscita al passeggio della Marina, il pozzo di san Filippo accessibile dalla chiesa di san Filippo Apostolo e il *miqwé* in Via Alagona all'interno di una struttura alberghiera.

La nostra proposta di valorizzazione parte dalla rappresentazione cartografica aggiornata di tutti i sistemi ipogeici e delle cavità artificiali che oltre ad avere valore storico-culturale e quindi a costituire un tassello fondamentale per ricostruire la storia della città, possono essere in molti casi classificate come immobili con valori specifici, da tutelare ai sensi della normativa nazionale sui Beni artistici, storici, culturali e archeologici.

Il patrimonio ipogeo è strumento essenziale per connettere il tessuto urbano storico a quello attuale, punto di partenza per una fruizione mirata alla conoscenza e salvaguardia del Bene, compatibile con l'utilizzo didattico e culturale del patrimonio sotterraneo Siracusano.

La Carta, si configura come uno strumento a uso sia dei professionisti che si occupano di pianificazione territoriale e progettazione d'interventi che possono avere interferenze con il sottosuolo sia di chi vuole esplorarlo e riscoprirlo.

Lo scopo è di conservare la memoria storica e vitale della città di Siracusa, tramandando il suo patrimonio.

La fruizione degli ipogei non può prescindere però dalla loro messa in sicurezza, obiettivo perseguibile attraverso mirati interventi di risanamento e consolidamento da sviluppare con adeguati progetti esecutivi. A base dello studio dovrà essere previsto un accurato rilievo plano-altimetrico di tipo geo-topografico-strutturale con l'obiettivo di individuare potenziali scenari di pericolosità geologica o strutture instabili ai fini della successiva valorizzazione e tutela dei beni geo-ambientali e culturali. Il gran numero di ipogei studiati e riportati su carta dimostra che la sua fruizione ad oggi è molto limitata: approfondire lo studio di questo patrimonio rafforza la memoria storica in un ambito topografico ben definito.

CONCLUSIONI

La divulgazione, l'utilizzo e lo studio potrebbero fornire i tasselli mancanti per una definitiva interpretazione del territorio.

Suggeriamo percorsi virtuali che accentuano il fascino tipico dell'ambiente ipogeo, punto di partenza concreto alla scoperta della Siracusa Sotterranea.

Proponiamo che le latomie e gli ipogei di Siracusa siano riqualificati e messi in sicurezza per favorire la loro naturale valorizzazione e studio, unico modo per salvaguardare e tutelare questo patrimonio culturale.

Senza dimenticare che la città Aretusea è Patrimonio Mondiale dell'Umanità.

BIBLIOGRAFIA

Agnello G. (1969), *Recenti scoperte di monumenti paleocristiani nel Siracusano*, in Atti del VII Congresso Internazionale di Archeologia Cristiana, (Berlin, 1965), Città del Vaticano, Berlin pp. 309-326.

Agnello S. L. (1957), *Paganesimo e cristianesimo nelle catacombe di S. Lucia a Siracusa,* in Atti del V Congresso Internazionale di Archeologia Cristiana, Città del Vaticano, pp. 335-343.

Agnello G. (1963), *Un sacello pagano con affreschi nella catacomba di santa Lucia a Siracusa*, in Palladio 13, pp. 8-16.

Agnello G. (1969), *La cripta di San Marziano a Siracusa alla luce dei recenti scavi*, "Palladio", n. s., XVIII, 1968, pp.3-24.

Agnello S. L. (1978), *Osservazioni sul primo impianto urbano a Siracusa*, in "CronA" XVII.

Agnello S. L. (1997), *Eventi sismici nella siracusa romana*, in Sicilia dei Terremoti, a cura di G. Giarrizzo, Catania, pp. 37-48.

Agnello S. L. (2001), *Una motropoli ed una città siciliane fra Roma e Bisanzio*, Fondazione Giuseppe e Santi Luigi Agnello.

Bordone G., Giompapa M., Arena L. (2014), *Carta dei percorsi sotterranei ed ipogei in Ortigia (Siracusa): Poster con Planimetria in scala 1:2000 in atti dell'VIII Convegno di speleologia in cavità artificiali (7-8-9- sttembre 2012)*, Speleologia Iblea, Vol.XV pp.219-225, Ragusa.

Cavallari F. S. & Holm A. (1883), *Topografia archeologica di Siracusa*, Palermo.

Cusmano G. (2017), *Ipogei tra storia e teatralità: riqualificazione delle sottrazioni materiche del Duomo e S. Filippo,* tesi di Laurea presso la Facoltà di Architettura di Siracusa.

Di Grande A. & Raimondo W. (1983), *Lineamenti geologici del territorio siracusano tra Palazzolo, Noto e Siracusa (Sicilia Sud-Orientale)*, Bollettino della Società Geologica Italiana 102, 241-260.

Di Maio A. M. (2014), *Carta dei cimiteri sotterranei e ipogei di Siracusa*. Atti dell'VIII Convegno Nazionale di Speleologia in cavità artificiali, Ragusa Settembre 2012. In *Speleologia Iblea n.15 anno 2011-2013,* 121-130.

Fallico A. M. (1971), *Saggi di scavo nell'area della Villa Maria*, in Notizie degli scavi, Tomo 2, pp. 581-683.

GEOMERID (2007), *Rilievo topografico in "Studi preliminari per il progetto della Catacomba di S. Lucia a Siracusa e della conseguente messa in sicurezza della Basilica della Piazza e del tessuto urbano circostante*, per Regione Siciliana, Assessorato ai Beni culturali ed Ambientali, per Pontificia Commissione di Archeologia, Sacra Ispettorato per le Catacombe della Sicilia Orientale.

Ghisetti F., Vezzani L. (1981), The *structural features of Iblean plateau and of the Mount Judica area (South Eastern Sicily): a microtectonic contribution of the deformational hystory of the Calabrian Arc*, in «Bollettino della Società Geologica Italiana», 99, pp. 57-102.

Grasso M, Lentini F. & Pedley H. M. (1982), *Late Tortonian-Lower Messinian Miocene paleogeography of SE Sicily: information from two new formations of the Sortino* Group. Sedimentary Geology, 32, pp. 279-300.

Greco G. (1999), *Pagani e cristiani a Siracusa tra il III e IV secolo*, in Kokalos.

Griesheimer M. (1989), *Genèse et développement de la catacombe Saint Jean a Syracuse*, Mefra 10.2.

Houel J. (1776), *Voyage pittoresque des isles Sicilie, de Malte et de Lipari*, Parigi.

Lentini F. *et al.* (1987), *Carta geologica del settore Nord Orientale Ibleo (Sicilia S-E) scala 1:50.000,* Selca, Firenze.

Marchese G. (1996), *Ipogeo anonimo in piazza S. Lucia a Siracusa*, in R. A. C. 72.

Marchese A. M. (2012), *Sulle orme di Paolo Orsi, La necropoli di Vigna Cassia a Siracusa*, Bonanno Editore.

Mirisola R. Polacco L. (1996), *Contributi alla paleogeografia di Siracusa e del territorio siracusano* – classe di Scienze morali, lettere e arti Venezia, Vol. LXVI.

Nastasi C. (2006), Rilievo Dammusi – *Indagini geognostiche e diagnostiche per i lavori di consolidamento lungomare Alfeo nel Comune di Siracusa*.

Orsi P. (1895), *La catacomba Führer nel predio Adorno Avolio*, in RQXI, Roma, pp. 2 -28.

Orsi P. (1897), *Di alcuni ipogei cristiani a Siracusa*, in RQXI, Roma, pp. 475-495.

Sgarlata M. (2007), *La catacomba di S. Lucia a Siracusa: origini e trasformazioni*, in Atti IX Congresso Nazionale di Archeologia Cristiana, Palermo, vol. II, pp. 1565-1588.

TOP MASTER s.r.l. (2007), Rilievo ipogeo di Piazza Duomo.

❑

Conservazione alimentare in ambiente ipogeo: l'esempio delle cave in sotterraneo della Val di Non

Underground food storage: the example of hypogeal warehouses in Val di Non (Trento, Italy)

Antonio Galgaro[1,2], Giorgia Dalla Santa[1], Matteo Cultrera[1], Michele De Carli[3], Stefano Daz[3], Maurizio Fauri[4], Alessandra De Lullo[5], Simonetta Cola[5], Paolo Scotton[1], Fabrizio Conforti[6], Andrea Fuganti[4]

(1) Dip. Geoscienze; Università di Padova;
(2) CNR-IGG Uos Padova;
(3) DII; Università di Padova;
(4) DICAM; Università di Trento;
(5) DICEA; Università di Padova;
(6) Tassullo Materiali Spa; Tassullo (TN)

Parole chiave (*key words*): stoccaggio ipogeo (*hypogeal warehouse*), proprietà termiche delle rocce (*rock thermal properties*), dolomite (*dolomite*), sostenibilità ambientale *(environmental sustainability*), Melinda, Tassullo

RIASSUNTO

Notoriamente nella storia dell'uomo, il sottosuolo ha sempre rappresentato luogo di conservazione alimentare, sia per le favorevoli condizioni di temperatura e umidità che per il suo ruolo di protezione dagli agenti esterni e dagli insetti nocivi.

Recentemente, in Val di Non (TN), un accordo siglato tra la Tassullo Materiali spa, il Consorzio Melinda e gli enti locali ha permesso di riutilizzare in modo estremamente vantaggioso per il territorio gli ampi spazi in sotterraneo creati dalle attività estrattive effettuate nella cava di Rio Maggiore. Tali spazi, infatti, grazie all'inerzia termica tipica dell'ambiente ipogeo, possiedono caratteristiche idonee alla conservazione anche su lungo periodo di generi alimentari deperibili, con consistenti risparmi di energia.

Le locali condizioni geologiche, rendono il sito particolarmente adatto ad un suo impiego per lo stoccaggio: dal 2013, le attività estrattive sono condotte in modo da creare delle celle autonome, utilizzate prevalentemente per la conservazione in atmosfera controllata delle mele Melinda e, potenzialmente, per lo stoccaggio di risorse idriche e come locazione del *datacenter* della Provincia di Trento.

La filiera virtuosa, che qui coniuga l'attività di estrazione ipogea con un riutilizzo degli ambienti di scavo, costituisce un esempio di eccellenza di rilievo internazionale.

EXTENDED ABSTRACT

Since from the ancient times, the underground has always been used for food storage, thanks to the favorable conditions of constant temperature and humidity as well as for the capacity to protect from external agents and harmful insects.

Recently, in Val di Non (in the Eastern Alps in North Italy), an important agreement has been signed between the Tassullo Materiali spa, the Melinda Consortium and the local authorities in order to reuse the large underground spaces created by the extraction activities carried out in the quarry of Rio Maggiore for the long-term preservation of perishable foodstuffs. The local geological conditions and the thermal characteristics of the rock (dolomia) make the site particularly suitable for the use as a storage, with consistent energy savings.

Hence, since from 2013, the extraction activities are conducted in order to create autonomous cells mainly used for the conservation in a controlled atmosphere of the apples produced by Melinda Consortium. The underground space would be used also to store water resources and to host the data center of the Trento Province.

This agreement, that combines different interests in a virtuous supply chain, is an interesting example of integration between hypogeous extraction and useful reuse of excavation environments in an extremely beneficial way for the territory.

INTRODUZIONE

In località Tuenetto di Predaia, in sinistra orografica della Val di Non (TN) si trova la miniera di Rio Maggiore, in concessione alla Tassullo Materiali spa per l'estrazione della Dolomia di Torra (Dolomia giurassica), utilizzata come materia prima per la realizzazione di materiali speciali per l'edilizia. La Tassullo è un'azienda leader nella produzione di materiali leganti e inerti per l'edilizia e per il restauro (isolamenti, pavimentazioni, ecc.), prodotti ottenuti dal 1909 dall'estrazione e lavorazione di circa 120.000 m^3/anno di rocce (dolomia) e altri minerali, con un aumento annuale di estrazione del 10%.

Dal 2004 l'azienda ha intrapreso un innovativo progetto di coltivazione in sotterraneo della miniera Rio Maggiore allo scopo di sviluppare l'attività produttiva dell'impianto di lavorazione di Mollaro, posto nelle vicinanze della miniera, in modo da riutilizzare le cavità create dall'estrazione dei minerali per lo stoccaggio alimentare con metodi industriali. Un recente accordo firmato nel giugno 2013, infatti, tra la Tassullo Materiali spa, il Consorzio Melinda e gli enti locali ha permesso di portare avanti tale attività combinando insieme gli interessi privati e di salvaguardia del territorio, prevedendo di riutilizzare gli spazi ipogei creatisi nel tempo per scopi differenti da quelli originari di estrazione. Dopo un'opportuna valutazione dei relativi effetti ambientali, è stato così avviato un progetto di riutilizzo innovativo delle cavità sotterranee per la realizzazione di magazzini ipogei per lo stoccaggio in atmosfera controllata delle mele del Consorzio Melinda e di bacini per l'accumulo e l'approvvigionamento idrico del territorio. I lavori di conversione, avviati nel 2013, sono a tutt'oggi in fase di realizzazione. Elemento chiave del progetto è lo sfruttamento dell'enorme capacità termica della roccia naturale, che, abbinata alla bassa conducibilità termica, permette di realizzare camere isolate, non soggette alle escursioni termiche stagionali, azzerando l'uso degli isolanti artificiali abitualmente impiegati nei magazzini epigei.

L'utilizzo delle cavità sotterranee è prevalentemente alimentare: nel 2016 erano stoccate in atmosfera controllata all'interno delle cave circa 30.000 tonnellate di mele, con un raddoppio previsto entro il 2021. Un ulteriore elemento di innovazione è dato dalla combinazione della frigoconservazione ipogea con il controllo dell'atmosfera interna: non appena il vano è riempito con le mele da conservare, viene chiuso in modo ermetico e l'atmosfera interna viene sostituita con azoto. Questa tecnica necessita che le celle non permettano fughe di gas, al fine di mantenere inalterati nel tempo sia gli elevati tassi di N_2 e CO_2 che il ridotto tenore di O_2, né risentano di infiltrazioni idriche. A tal fine, la Tassullo Materiali spa ha studiato e prodotto uno speciale materiale cementizio, impermeabile anche ai gas e non tossico, così da poter essere impiegato nel rivestimento delle cavità ipogee per la conservazione alimentare.

Come illustrato nel seguito, le cave in esame sono particolarmente adatte all'impiego quale volume di stoccaggio, date le locali condizioni litostratigrafiche, idrogeologiche e geo-strutturali. Dopo una breve presentazione delle principali caratteristiche dell'impianto, il presente lavoro illustra alcune analisi con-

dotte sul comportamento termico dell'ammasso roccioso in relazione ai processi di climatizzazione ipogea ivi implementati. In particolare, i primi risultati ottenuti con una modellazione FEM (Modello agli Elementi Finiti) dell'evoluzione delle condizioni termofisiche nell'intorno delle celle sono stati validati tramite il confronto con i dati di monitoraggio registrati durante le prime fasi di stoccaggio nelle cavità.

I vantaggi offerti da questa soluzione sono diversi. Innanzitutto vi è un vantaggio economico legato al consumo di energia: le analisi termiche condotte hanno infatti dimostrato come la conservazione ipogea delle mele permetta un significativo risparmio energetico rispetto ai classici magazzini epigei. In secondo luogo, la conservazione così dilatata nel tempo permette di proporre il prodotto sul mercato nel momento di maggiore convenienza per il produttore, garantendo così un ulteriore vantaggio. Infine, il riutilizzo delle cavità formate dalle attività estrattive permette di non sottrarre gli spazi in superficie ad altri usi (coltivazione, residenziale, ecc.) e di preservare il paesaggio, fatto particolarmente importante in aree dove lo spazio è limitato, come in ambiente montano di fondovalle.

1. MAGAZZINI IPOGEI A TEMPERATURA CONTROLLATA

In generale, l'uso di spazi sotterranei per la realizzazione di magazzini di stoccaggio a temperatura controllata permette una significativa riduzione dei costi di gestione legati al riscaldamento e raffreddamento degli ambienti rispetto a quelli delle strutture superficiali di pari dimensione. Questo perché, anche a profondità molto basse, le temperature nel terreno e negli ammassi rocciosi presentano escursioni più contenute dell'aria esterna. Non solo la temperatura interna dei magazzini è meno influenzata dalle variazioni di umidità e temperatura esterne, ma anche il consumo energetico dei sistemi di condizionamento è minore, dato che la minor differenza di temperatura tra la camera e l'ambiente circostante garantisce una ridotta dispersione di calore (Carmody & Sterling, 1984; Park *et al.*, 1999). I costi di gestione, dunque, risultano essere nettamente inferiori rispetto a quelli per magazzini epigei, essendo più contenuti gli interventi di climatizzazione da applicare.

Il riutilizzo, inoltre, permette di abbattere anche i costi di costruzione. Infatti, nel caso la cavità non esistesse in origine, i costi di costruzione dei magazzini ipogei sarebbero generalmente superiori rispetto a quelli di strutture superficiali: secondo una stima elaborata da Zevgolis *et al.* (2004), la creazione di spazi sotterranei destinati allo stoccaggio ammonterebbe a circa il 60% del costo totale dell'opera.

Ovviamente il costo iniziale di realizzazione di celle di stoccaggio si riduce sensibilmente se si realizzano strutture ipogee in spazi sotterranei già disponibili, come miniere o gallerie in disuso. Secondo una statistica mondiale stilata da Sugai *et al.* (2010), le ex miniere sotterranee riutilizzate per la realizzazione di magazzini a temperatura controllata sono state adibite solo per il 15% alla conservazione di alimenti, per il 13% alla coltivazione di funghi e per l'11% allo stoccaggio del petrolio greggio; nei rimanenti casi, invece, si sono creati magazzini adibiti principalmente allo stoccaggio di rifiuti industriali o all'immagazzinamento di materiali che non necessitano di temperature controllate, come automobili e navi.

La conservazione di prodotti ortofrutticoli in ambiente ipogeo è favorita anche dal poter controllare e mantenere costante nel tempo temperatura e umidità. Condizioni di umidità troppo bassa possono portare ad un'eccessiva perdita di acqua/peso da parte del prodotto, mentre un'umidità troppo elevata può produrre l'innesco di marcescenza: di conseguenza, impermeabilizzazione e isolamento termico risultano accorgimenti importanti anche se la loro realizzazione può incrementare il costo totale di costruzione dell'impianto di circa il 16% (Zevgolis *et al.*, 2004). D'altra parte, non tutti i prodotti ortofrutticoli possono essere sottoposti alla cosiddetta "frigoconservazione ipogea": per utilizzarla è infatti necessario che il prodotto mantenga intatte le caratteristiche sensoriali e nutrizionali fino al termine del periodo di stoccaggio. Park *et al.*, (1999) e Choi *et al.*, (2000) hanno svolto una serie di test sperimentali in modo da identificare le condizioni di temperatura/umidità e la durata ottimali di frigoconservazione ipogea in atmosfera controllata per svariate tipologie di prodotti ortofrutticoli.

Nella Provincia di Trento la diffusione di magazzini ipogei è stata favorita oltre che da fattori di carattere economico anche dall'aumento nel tempo della produzione agricola e delle aree geografiche dove tale produzione viene commercializzata. Si è creata, così, la necessità di allungare il periodo di conservazione dei prodotti agricoli, garantendone elevate proprietà qualitative e limitando il più possibile l'utilizzo di conservanti, elementi che vengono soddisfatti grazie alle stabili e controllabili condizioni di conservazione nelle celle sotterranee. Va inoltre aggiunto che in un contesto di aumento delle temperature globali, tali pratiche forniscono un contributo importante alla riduzione delle emissioni climalteranti in atmosfera, grazie alla loro elevata efficienza energetica.

1.1 La miniera di Rio Maggiore e il riutilizzo degli spazi ipogei

Il complesso si trova a 275 m sotto il livello naturale del terreno, a sua volta a 575 m s.l.m. La coltivazione della miniera Rio Maggiore prevede la realizzazione di 62 camere di estrazione, scavate mediante esplosivo e di una galleria principale di collegamento delle varie camere, posta su due livelli: livello 0 con quota di imbocco a circa 540 m s.l.m. e livello 1 con quota di imbocco a circa 580 m s.l.m.

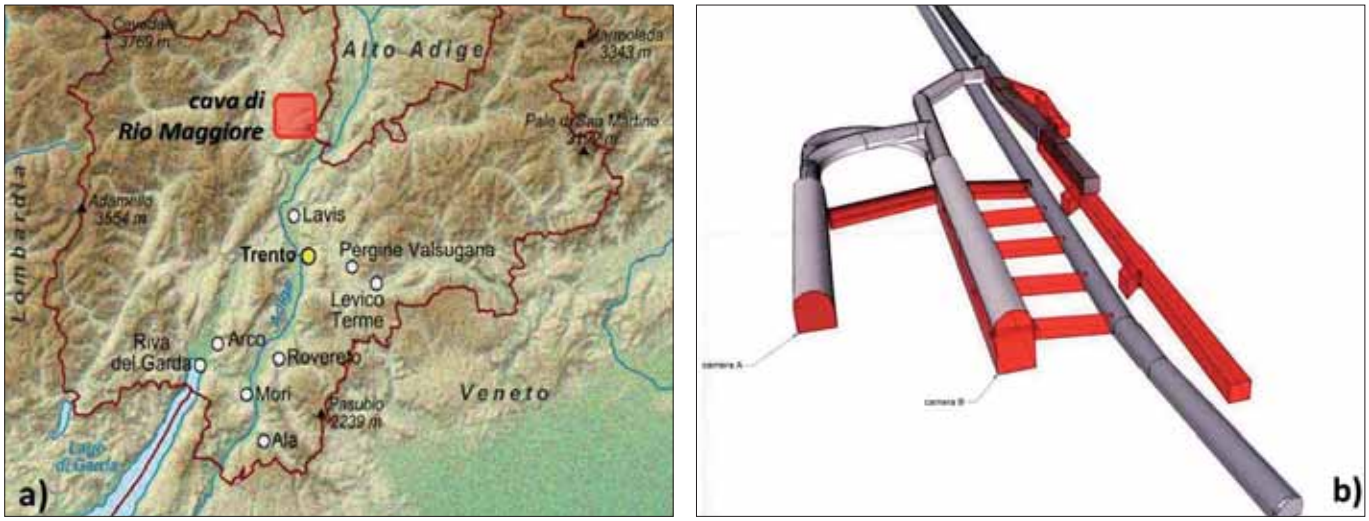


Figura 1 – (a) Mappa del nord Italia con indicazione dell'ubicazione dal sito minerario "Rio Maggiore"; (b) schema tridimensionale delle camere ipogee e dell'imbocco principale a livello 0.

(*Fig.* 1). A intervento concluso la superficie complessiva di coltivazione della miniera risulterà pari a 757.540 m^2.

In base al programma di miglioramento ambientale una prima innovazione messa in atto nella miniera è l'utilizzo di parte degli spazi ipogei per la *realizzazione di impianti adibiti alla lavorazione della dolomia estratta:* in tale modo, le prime fasi della filiera produttiva (estrazione, frantumazione e vagliatura) sono completate direttamente in sotterraneo, riducendo le emissioni di polvere e rumore e l'impatto ambientale dell'intero processo. Inoltre, il mantenimento dei materiali in ambiente sotterraneo a microclima controllato permette un incremento della qualità del prodotto finito (Fuganti *et al.*, 2013). Le camere adibite alle prime fasi di lavorazione sono collegate tra loro da gallerie e cunicoli di servizio e allo stabilimento esterno mediante nastro trasportatore. All'esterno viene completato il ciclo produttivo con miscelazione, confezionamento e caricamento dei prodotti finiti.

Dato che i comuni di Taio e Vervò e i vari Consorzi Irrigui di Miglioramento Fondiario presenti nella Val di Non presentano notevoli difficoltà di approvvigionamento idrico sia per uso potabile che irriguo, una parte dei vuoti lasciati dallo scavo della miniera sono stati riutilizzati per la realizzazione di bacini di accumulo. In particolare, sono stati realizzati due *serbatoi sotterranei per l'accumulo dell'acqua*, con la possibilità di ampliare in futuro i volumi di immagazzinamento fino a un totale di 500.000 m^3 con la costruzione di ulteriori bacini. La posizione dei serbatoi ottimizza i costi energetici per il pompaggio e la distribuzione nel territorio (*Fig.* 2a): infatti, il livello della falda acquifera profonda (1) all'interno della dolomia si trova ad una quota inferiore rispetto alla zona estrattiva e presenta una temperatura pressoché stabile di 10°C. Attraverso appositi pozzi (2), realizzati durante la fase iniziale di ricerca mineraria, l'acqua della falda è pompata e stoccata all'interno dei bacini di accumulo sotterranei (3), da cui viene mandata in superficie mediante un pozzo di collegamento tra sotterraneo e fuori terra. Il percorso dell'acqua dai pozzi ai bacini è studiato per dissipare il calore generato dal sistema di raffreddamento (4) delle celle frigorifere ipogee. In questo modo viene garantito un approvvigionamento idrico con una manutenzione ridotta al minimo e con un'elevata sicurezza, in quanto i bacini sono realizzati in roccia compatta con ottime caratteristiche meccaniche e il pelo libero dell'acqua si trova a una quota inferiore rispetto alle gallerie di accesso ai serbatoi. Inoltre, la conservazione dell'acqua avviene in condizioni microclimatiche ideali (assenza di luce che impedisce la formazione di alghe ed elevata umidità che annulla l'evapotraspirazione) (Fuganti *et al.*, 2013).

L'intero sistema è organizzato attraverso un corridoio centrale di smistamento in cui possono circolare i mezzi di trasporto, da dove avviene l'accesso a camere separate su entrambi i lati (*Fig.* 2b).

Inoltre una parte delle camere di estrazione sarà allestita per poter ospitare il *datacenter* della Provincia di Trento, garantendo anche in questo caso un ambiente ottimale dal punto di vista della temperatura e della sicurezza.

Il riutilizzo primario dei vuoti minerari sotterranei lasciati dallo scavo della miniera Rio Maggiore è comunque quello della *conservazione delle mele* (*Fig.* 3), utilizzando le tecniche di frigoconservazione in spazi ipogei in associazione con il controllo dinamico dell'atmosfera interna e senza l'impiego di isolanti artificiali.

Tutte le varie strategie di conservazione applicate ai prodotti ortofrutticoli sono volte a controllare i parametri dell'ambiente di conservazione (principalmente velocità di raffreddamento, igiene, temperatura, umidità, velocità dell'aria nelle zone di stoccaggio e composizione dell'aria): lo sviluppo dei microrganismi infatti dipende dall'ambiente di conservazione, dalle caratteristiche intrinseche degli alimenti (composizione chimica, pH e contenuto d'acqua) e dallo stato iniziale dei prodotti. La capacità di mantenere il prodotto in ottime condizioni è direttamente proporzionale alla durata della fase iniziale di adattamento della popolazione microbica all'ambiente di conservazione, terminata la quale inizia la proliferazione esponenziale. Nelle celle ipogee qui descritte sono utilizzate in modo combinato i seguenti accorgimenti:

1. *Refrigerazione con un controllo della temperatura* molto preciso e periodicamente calibrato, in modo da avere condizioni uniformi all'interno della cella (le differenze devono essere inferiori a 1° C). Prima che arrivi il carico di mele, attraverso il pre-raffreddamento, la cella viene portata da una temperatura naturale di 10-11°C, caratteristica della roccia, alla temperatura ottimale di conservazione (0-1°C), poi mantenuta costante per tutto il periodo di stoccaggio. Le unità di raffreddamento in cella sono alimentate da acqua con aggiunta di glicole propilenico (fluido antigelo a ridotto impatto ambientale, scelto per evitare contaminazioni del sito e della falda in caso di perdite dei condotti).
2. *Controllo dell'umidità interna*: l'aria di cella è mantenuta ad un elevato tasso d'umidità relativa (90-95%) al fine di ridurre la migrazione d'acqua dal frutto verso l'esterno. Il controllo avanzato dell'umidità interna delle celle di stoccaggio è possibile grazie alle caratteristiche geologiche dell'ammasso. Sebbene le rocce siano dotate di buona permeabilità, le sovrastanti formazioni marnose ricche in contenuto argilloso (vedi *Cap.* 2) limitano l'infiltrazione delle acque meteo-

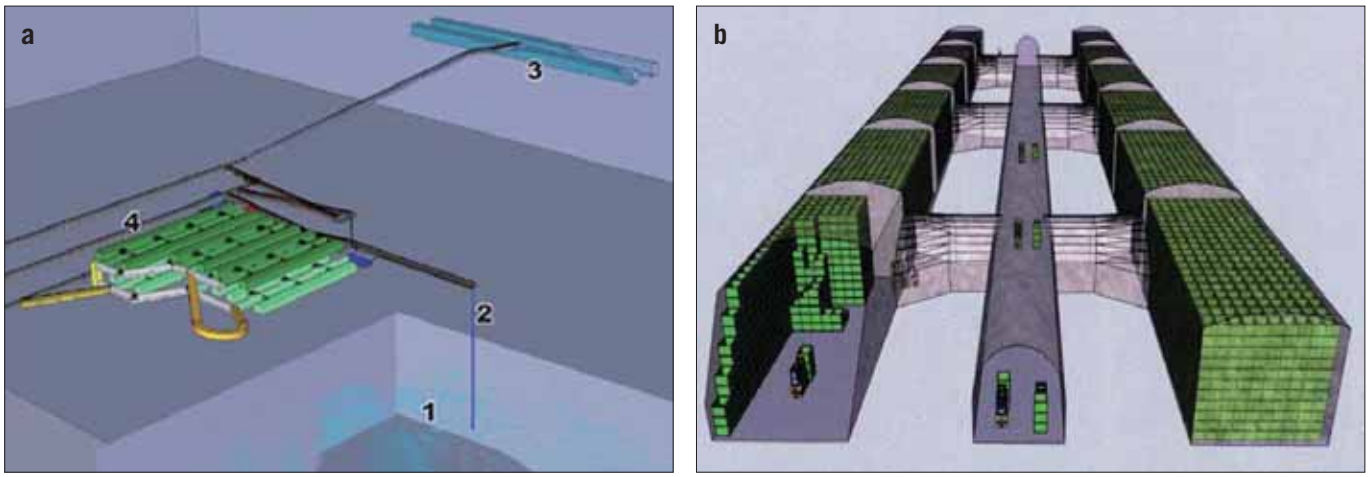


Figura 2 – (a) Funzionamento degli impianti di pompaggio e stoccaggio dell'acqua; (b) Elementi costituenti ciascuna unità dell'impianto sotterraneo. A gennaio 2017 sono presenti circa 30 celle di conservazione con sezione di circa 12m x 11m e lunghezza 25m. Ogni cella ha una capacità massima di circa 900 ton di mele, per una capienza complessiva di circa 30.000 ton di mele (circa il 10% della produzione del Consorzio Melinda). (da www.melinda.it)

riche nei depositi sottostanti di dolomia, e mantengono così un basso grado di saturazione. Inoltre, il fronte di accesso della miniera è il risultato di un piano di faglia che ha determinato il contenimento della falda acquifera in profondità: per la realizzazione della miniera/magazzino non si sono quindi rese necessarie opere di drenaggio delle acque di falda.

3. *Ventilazione forzata*: le celle sono equipaggiate con 4 ventilatori con inverter in grado di muovere l'aria con una portata di 40 Vol/h (circa 78.000 m^3/h), in modo da portare l'aria della cella alla temperatura di conservazione in poche ore e quella delle mele in alcuni giorni. Inoltre, all'interno dell'area di stoccaggio è necessario mantenere una certa ventilazione (qualche decimo di m/s) per evitare stratificazioni e disuniformità delle condizioni di temperatura e umidità. Per questo i ventilatori generano un funzionamento a regime tale da garantire un afflusso uniforme d'aria a tutta la merce conservata; anche la distribuzione dei cassoni che contengono le mele deve essere ottimizzata a questo scopo.
4. *Controllo dell'atmosfera interna a elevato tenore di anidride carbonica (CO_2) e di azoto (N_2) a scapito dell'ossigeno (O_2).* L'aria nelle celle viene ricircolata e al contempo la sua composizione viene definita da un sistema esterno di generazione dell'atmosfera. Una volta che una cella è riempita e sigillata, i generatori di atmosfera riducono velocemente le quantità d'ossigeno al suo interno, aumentando CO2 e N2. I livelli di gas sono poi costantemente monitorati e regolati grazie ai sistemi di monitoraggio presenti in ciascuna cella. Questa tecnica si è rivelata estremamente efficace per rallentare la degradazione perché le mele, a differenza di altri prodotti, mantengono la respirazione cellulare (che richiede O2 ed emette CO2), con una cinetica regolata dalla concentrazione dei due composti chimici.

Inoltre, la diminuzione della pressione parziale di ossigeno riduce lo sviluppo di microrganismi aerobi e il rallentamento di altri processi biologici, sebbene un certo contenuto di ossigeno vada comunque mantenuto per evitare l'innesco di meccanismi anaerobici di fermentazione. L'atmosfera controllata necessita che le cavità scavate nella roccia siano impermeabili ai gas: per questo la parete delle celle è trattata con un materiale minerale a doppio strato a presa accelerata e a ridotta permeabilità ai gas, appositamente studiato e messo in opera dalla Tassullo Materiali spa. Questo materiale è usato per regolarizzare la superficie interna alla cella e successivamente rifinito con una rasatura/finitura con materiale minerale impermeabilizzante.

Di fondamentale importanza per massimizzare l'efficienza della conservazione è anche il grado di maturazione delle mele alla raccolta. A tal fine la suddivisione dello spazio in celle è particolarmente efficace perché permette di stoccare assieme mele della stessa varietà raccolte a pochi giorni di distanza (massimo 7-10 giorni).

Dal punto di vista economico, la conservazione in magazzini ipogei risulta più efficiente in termini energetici rispetto alla conservazione epigea, pur in presenza di consumi energetici inizialmente più elevati, in quanto l'impianto frigorifero inizialmente richiede un maggiore consumo di energia per contrastare l'iniziale dispersione del freddo nella massa rocciosa. Successivamente però il mantenimento della temperatura all'interno della roccia richiede una minima quantità di energia, grazie alle basse temperature naturali e alle proprietà della roccia. Il risparmio energetico aumenta progressivamente negli anni di funzionamento: secondo una stima dell'azienda, il consumo di energia elettrica annuo in condizioni di regime è inferiore del 70% rispetto alle soluzioni superficiali.

Tale stoccaggio, poi, non risente dei picchi che caratterizzano i periodi estivi di un magazzino epigeo e la richiesta frigorifera risulta più stabile, permettendo così una previsione più precisa dei costi di mantenimento. Inoltre, l'accumulo frigorifero della roccia garantisce una maggiore autonomia delle celle in caso di guasto dell'impianto. Un ulteriore risparmio deriva dal fatto che l'ammasso roccioso mantiene inalterate le sue proprietà termiche nel tempo, a differenza degli isolanti artificiali che hanno una vita limitata e col passare del tempo, per diffusione di umidità all'interno delle porosità del materiale, perdono le loro proprietà e devono essere smaltiti in discariche di rifiuti speciali, con conseguenti ulteriori elevati costi ambientali.

Infine, anche l'uso dell'acqua della falda acquifera presente negli strati più profondi (vedi paragrafo 2) come mezzo di smaltimento del calore di condensazione dei gruppi frigoriferi apporta un ulteriore risparmio energetico ed economico. Nelle pompe di calore, infatti, lo scambio termico lato condensatore è eseguito con scambiatori a fascio tubiero alimentati dall'acqua di falda pompata a circa 15°C. La stabilità termica dell'acqua sotterranea e l'elevata efficienza energetica delle pompe aria-acqua rende particolarmente efficiente questa soluzione.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA

La Val di Non è legata ad un sistema tettonico secondo l'allineamento tettonico N-S (linea Trento-Cles); questo sistema di faglie ha avuto origine in età permiana e, evolvendosi durante tutte le fasi di orogenesi alpina, ha permesso l'affioramento in questa zona di diverse formazioni appartenenti al periodo dal Triassico all'Eocene (Prosser, 2000). Come mostrano la carta geologica locale e la relativa sezione stratigrafica riportate in *Fig.* 4 (Fuganti, 1964; Fuganti *et al.*, 2013), con l'esclusione del sedimento alluvionale quaternario, la successione stratigrafica inizia con un sistema di formazioni prettamente dolomitiche in basso e si chiude con la Formazione della Scaglia Rossa nella parte alta.



Figura 3 – (a) Una cella vuota, pronta per l'immagazzinamento; (b) Fase di stoccaggio delle mele; (c) le mele all'interno di una cella a temperatura e atmosfera controllata, viste dall'oblò della porta di accesso

Dal punto di vista geologico-strutturale l'area di studio è dominata da poche discontinuità subverticali e il principale sistema secondo l'allineamento N-S si trova ad occidente, al di fuori dall'area della miniera. La combinazione di queste impostazioni geologiche, strutturali e idrogeologiche influisce pertanto sull'infiltrazione verticale delle acque sotterranee che, nella zona mineraria, è quasi trascurabile. In effetti, le acque meteoriche presentano una scarsa infiltrazione verso il basso, in conseguenza delle formazioni prevalentemente impermeabili e sub-orizzontali

80 cm. Essa è confinata al tetto dalla formazione dei Calcari Bituminosi Selciferi, da considerare principalmente di età albiana (vedi *Fig.* 4), con spessore massimo (70-80 m) negli affioramenti occidentali presso la vecchia miniera, dove si coltivavano gli scisti bituminosi per estrarre l'ittiolo. La potenza diminuisce andando verso Est e verso Nord (Vervò e Taio) dove si raggiungono i 20-30 m. La stratificazione è sempre fitta, fra 5 e 20 cm di spessore, con frequenti intercalazioni marnose nell'area sovrastante la zona di miniera (Golder Associates, 2009).

so roccioso dalle misure/elaborazioni eseguite da Golder Associates in fase di progettazione e studio di fattibilità dell'intero progetto.

3. INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLISTICHE ESEGUITE

3.1 Caratteristiche fisiche e termiche della roccia

La conoscenza delle caratteristiche fisiche e termiche delle rocce ospitanti è fondamentale per un'adeguata valutazione di progetti di immagazzinamento in sotterraneo. Le proprietà termiche delle rocce sono influen-

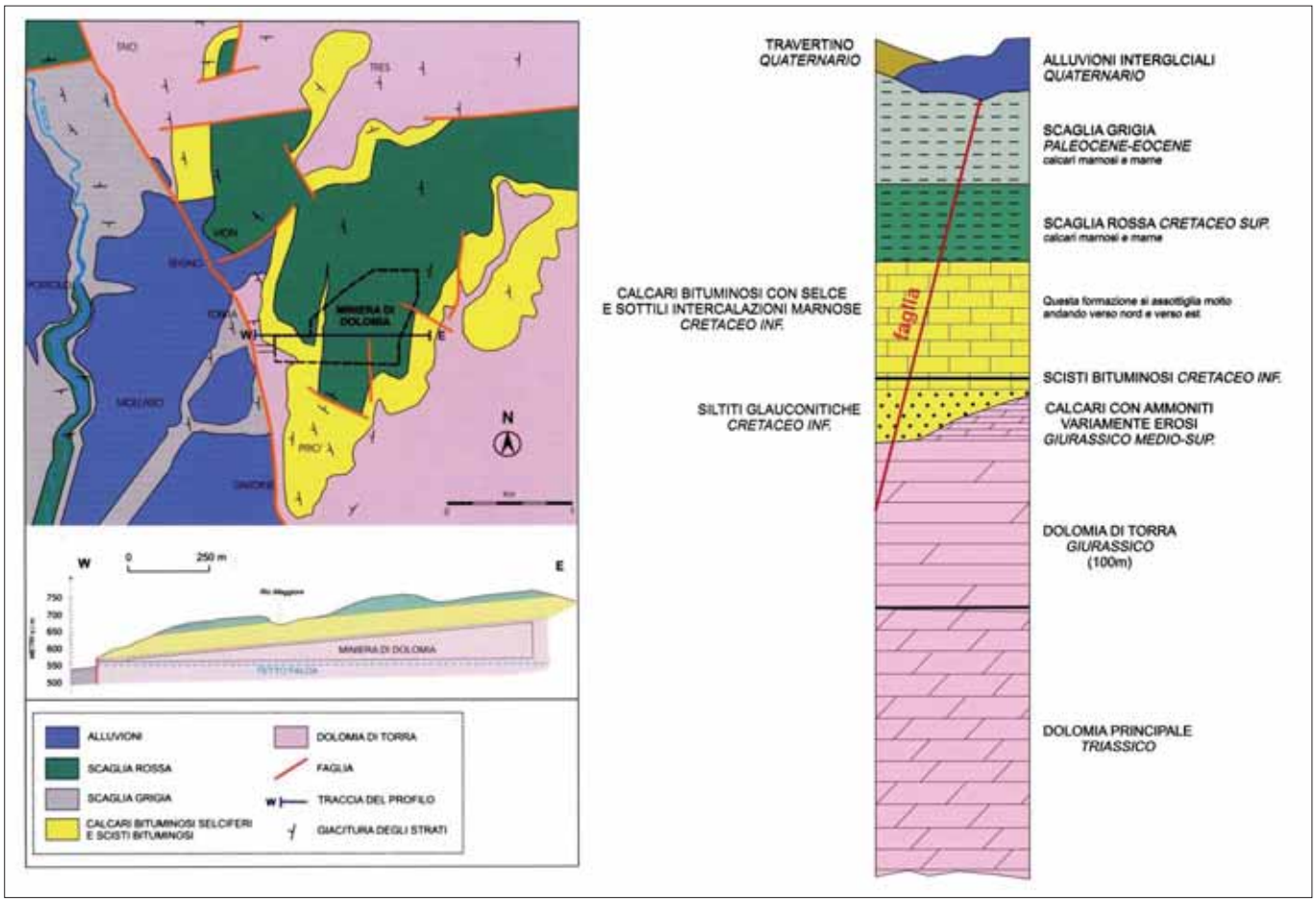


Figura 4 – Carta e profilo geologico della miniera di Rio Maggiore e delle zone limitrofe (da Fuganti et al.*, 2013 e dalla Relazione SIA, Golder Associates, 2009)*

presenti al di sotto del piano campagna. La conseguente condizione anidra delle sottostanti rocce dolomitiche le rende un materiale ottimo per ricavare cemento speciale per usi edilizi, ma, allo stesso tempo, permette di avere una bassissima conducibilità termica, ideale per la frigoconservazione.

Le formazioni rocciose interessate e le principali caratteristiche geomeccaniche sono riportate nella relazione SIA sviluppata nel 2009. La formazione rocciosa interessata dalla coltivazione del giacimento è una formazione appartenente alle dolomie del Giurassico, caratterizzata da una successione dolomitica della potenza variabile tra i 60 e 200 m, costituita da alternanze ritmiche di dolomie biogeniche e intraclastiche e cristalline, in strati di spessore variabile tra 20 e

Dal punto di vista geostrutturale, la Dolomia di Torra si presenta come una formazione monoclinalica debolmente immergente verso ovest (270/09; 294/05). I piani di stratificazione si presentano sia come superfici lisce, da planari a leggermente ondulate, caratterizzate dalla presenza di sottili veli marnosi o argillosi, sia come superfici stilolitiche, molto scabre, prive di riempimenti argillosi. Lungo i piani di stratificazione e in corrispondenza dei livelli dolomitici più fratturati e porosi sono presenti fenomeni carsici che si manifestano come cavità e concrezioni calcitiche; l'ammasso risulta interessato poi da condotti e cavità carsiche di dimensioni contenute.

In *Tab.* 1 si riportano i parametri di resistenza e deformabilità ricavati per ciascuna zona di omogeneità individuata nell'ammas-

zate dalla loro composizione chimico-mineralogica e da vari fattori fisici, come le caratteristiche strutturali e tessiturali, la porosità, la densità apparente, il grado di saturazione e quello di fratturazione e alterazione. Generalmente, all'aumentare della porosità la conducibilità termica diminuisce e viceversa per la densità (Singh, *et al.* 2005). Inoltre, il grado di saturazione e la conducibilità termica del fluido presente nei pori (acqua, olio, gas naturale, aria) influenzano significativamente la conducibilità termica della roccia nel suo insieme. Il rapporto tra la conducibilità termica e la porosità o la densità è influenzato anche dai processi di formazione e dalla composizione mineralogica e strutturale delle rocce. I processi di fratturazione e alterazione della roccia sono processi che tendono ad aumen-

Tabella 1 – Parametri di resistenza e deformabilità. *Il fattore di disturbo D è stato impiegato per il calcolo dei soli parametri residui del criterio di Hoek e Brown (Golder Associates, 2009).

dati geologici	*formazione geologica*		Dolomia di Torra			Calcari
	zona di omogeneità		D1	D2	D3	C
Parametri di resistenza e doformabilità della roccia intatta	Resistenza alla compressione uniassiale [Mpa]	$S_{c,ri}$	79,47	79,47	79,47	30,00
	Parametro m_i	m_i	4,90	4,90	4,90	4,00
	Modulo di Young [GPa]	E_{ri}	66,50	66,50	66,50	21,42
	Peso unità di volume [kN/m^3]	g	26,83	26,83	26,83	23,54
	Coefficiente di Poisson	n	0,27	0,27	0,27	0,30
Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso	Rock mass rating	*classe*	*II*	*III*	*IV*	*IV*
		RMR	61 - 80	41 - 60	21 - 40	21 - 40
	Geological Stress Index	GSI	64	55	41	29
	Fattore di disturbo*	D	0,25	0,25	0,25	-
Parametri di resistenza e doformabilità dell'ammasso roccioso	Parametri criterio Hoek e Brown	m_b	1,36	0,98	0,60	0,32
		s_b	0,02	0,01	0,00	0,00
		a	0,50	0,50	0,51	0,52
		m_b^{res}	1,13	0,78	0,41	-
		s_b^{res}	0,01	0,00	0,00	-
		a^{res}	0,50	0,50	0,51	-
	Resistenza a trazione [MPa]	$S_{t,ar}$	-1,07	-0,55	-0,19	-0,04
	Resistenza alla compressione uniassiale [Mpa]	$S_{c,ar}$	10,67	6,39	1,80	0,48
	Modulo di Young [GPa]	E_{ar}	40,56	27,15	11,37	1,64
	Coefficiente di spinta a riposo	k_0	0,37	0,37	0,37	0,43

tare la porosità complessiva di una formazione rocciosa e di conseguenza diminuiscono la conducibilità del materiale.

Al fine di eseguire una caratterizzazione termica delle rocce presenti nel sito in esame, sia in condizioni indisturbate che dopo l'attivazione delle celle di conservazione ipogea, sono state determinate tramite misure sperimentali le principali proprietà fisiche e termiche (porosità, densità, conducibilità termica e capacità termica) su diversi provini di dolomia, ricavati da 8 campioni prelevati in diverse zone della miniera (De Lullo, 2016). Le prove sono state eseguite sia su provini in condizioni di temperatura ambiente (20°C), in stato anidro e dopo imbibizione, sia dopo essere stati sottoposti a 10 cicli termici di gelo/disgelo secondo la Norma *UNI EN 12371 "Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione della resistenza al gelo*" definendo, per tale prova, un intervallo di temperatura e numero di cicli termici adatto al problema trattato: si è imposta una variazione di temperatura ogni 24 ore in un intervallo [-10°C;+20°C], scelto appositamente più ampio di quello applicato realmente allo scopo di esaminare condizioni più gravose sia nella fase di congelamento (-10°C) che nella fase di scongelamento (+20°C).

L'azione dei processi di congelamento-scongelamento dell'acqua all'interno dei pori, delle fessure e delle articolazioni delle rocce è di notevole interesse per valutarne l'alterazione fisica qualora la temperatura oscilli attorno agli 0°C, poiché è uno dei principali fattori che generano disgregazione. L'acqua contenuta all'interno delle porosità congela generando un incremento del proprio volume di circa 9% con un conseguente aumento di pressione interna ai pori e la formazione di microfratture, che poi tendono a diffondersi nel volume circostante e a fondersi insieme. La generazione e la dissipazione ciclica delle pressioni dovute al cambio di fase dell'acqua interstiziale creano un danno cumulativo che causa il deterioramento delle rocce (Park *et al.*, 2014) e un rapido decadimento della sua resistenza (Jamshidi *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2004). In accordo con quanto suggerito da Liu *et al.* (2015), la porosità è stata misurata come indicatore della degradazione della roccia sotto l'azione di cicli gelo-disgelo.

La caratterizzazione termica del materiale è stata realizzata con uno strumento con sonda piana basato sul metodo *Modified Transient Plane Source* (Conforme a ASTM D7984) (*Fig.* 5). Il metodo garantisce un'elevata precisione, grazie alla taratura effettuata all'inizio di ogni serie di misure su alcuni materiali di conducibilità nota. Il sensore ha dimensioni ridotte e permette di realizzare misure in più punti di ciascuna faccia del campione, ottenendo il valore finale della conducibilità termica sulla faccia come una media dei valori ricavati sulla faccia stessa, procedura che incrementa l'attendibilità del dato. Sono state effettuate 5 serie di misurazioni in 5 punti posti su ogni faccia del campione (centro e 4 angoli), ciascuna misurazione composta da un rilevamento continuo di 8 acquisizioni (da De Lullo, 2016, tesi di laurea).

3.2 Modellazione termica

L'applicazione della modellistica numerica rappresenta un valido approccio per la valutazione di strutture complesse, permettendo di valutare l'efficienza a lungo termine degli impianti anche tenendo conto delle variazioni di temperatura imposte nei processi di scarico e carico delle mele nelle celle ipogee (prelievo/reimmissione di energia). Al fine di



Figura 5 – Acquisizione sperimentale delle proprietà termiche (da De Lullo, 2016, tesi di laurea)

studiare gli effetti termici generati all'interno dell'ammasso roccioso dalle variazioni di temperatura imposte è stato realizzato un modello numerico bidimensionale in ambiente Feflow 7.0, codice di calcolo agli elementi finiti 2D-3D, sviluppato dalla WASY GmbH di Berlino/Danish Hydraulic Institute (DHI) per lo studio della propagazione del calore all'interno di un mezzo poroso.

L'uso del modello ha permesso di valutare l'entità dell'anomalia termica indotta e il volume di roccia interessato a partire dalla condizione di equilibrio e di confrontarla con i dati registrati in sito da alcune sonde termiche poste nella roccia in prossimità alla parete di una cella. Inoltre, il modello numerico ha permesso di valutare i flussi termici che avvengono nel magazzino ipogeo (scambio termico tra l'aria raffreddata dalle macchine, la roccia e le mele), in modo da calcolare il fabbisogno frigorifero della cella ed eseguire una valutazione energetica dell'impianto da confrontare con quella dei magazzini epigei.

Il problema è stato sviluppato in condizioni 2D studiando una proiezione piana verticale ortogonale all'asse della galleria di collegamento. Il flusso di calore avviene in condizioni insature, poiché il contenuto d'acqua è trascurabile a causa dell'elevata profondità della falda che non interessa il sito minerario. È stato realizzato un dominio di calcolo rettangolare di dimensioni pari a circa 71m x 72m con al centro la cavità con sezione di 11m x 12m. La *mesh* di calcolo è stata infittita nell'intorno delle posizioni delle sonde di temperatura presenti in sito, al fine di ottenere un'analisi più precisa del trasporto di calore in prossimità ad esse. Le sonde sono posizionate al centro del soffitto e della parete di ogni cella con distanza crescente (0,5-1-2-4 m).

La simulazione è stata condotta imponendo inizialmente un flusso di calore in condizioni permanenti per definire la distribuzione della temperatura in accordo con il gradiente geotermico (pari a 0,03°C/m). In seguito si è sviluppata un'analisi in condizioni transitorie per studiare la modifica del campo termico dovuta al controllo della temperatura in cella. Il processo è stato simulato per un periodo di quindici mesi, pari cioè a quello registrato dalle sonde in sito, così da poter confrontare i valori di temperatura misurati e simulati e ottenere la calibrazione del modello.

La temperatura iniziale è stata fissata a un valore di 4° all'interno della cavità e 12-13°C nell'ammasso roccioso, temperature corrispondenti al gradiente geotermico reale, definite grazie alla prima fase di simulazione. La temperatura di carico delle mele è stata supposta pari a 10°C, considerando che le mele, pur essendo raccolte all'esterno ad una temperatura dell'aria di circa 16°C, sono state trasportate all'interno delle gallerie fino alla cella di stoccaggio permettendo un graduale adattamento alle condizioni interne. Successivamente, sulle pareti della cavità si è imposta una temperatura variabile da 11°C (situazione naturale indisturbata) a 1°C in 3 ore, come richiesto dal processo per la frigoconservazione.

Le proprietà dei materiali nella simulazione sono state assegnate grazie ai valori dei principali parametri fisici e termici ricavati mediante le prove di laboratorio.

La calibrazione dei parametri di trasporto del calore utilizzati dal modello e non definiti in precedenza è stata eseguita con metodo

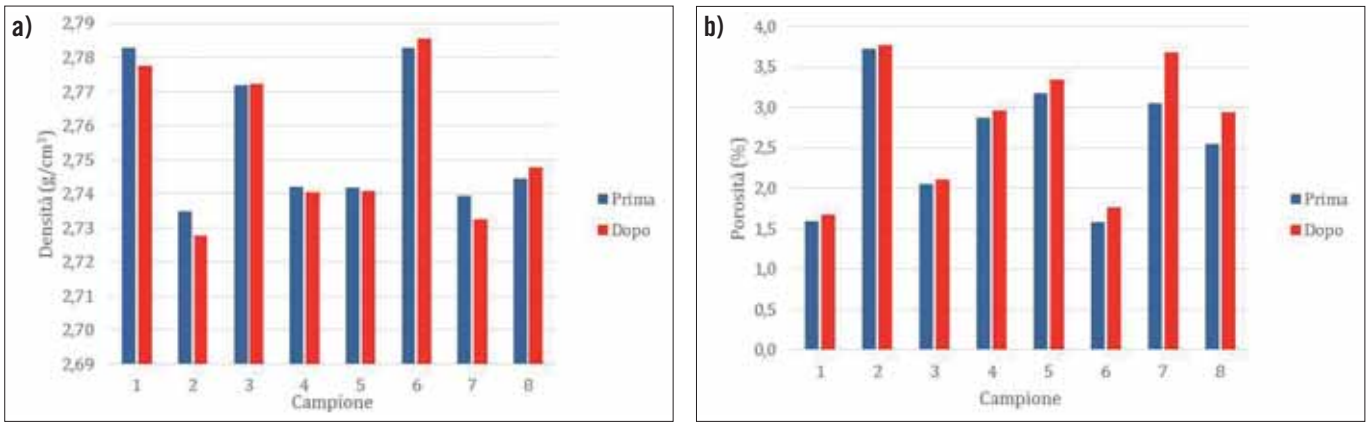


Figura 6 – Confronto tra i valori di (a)densità e (b)porosità prima e dopo i cicli di gelo-disgelo (De Lullo, 2016, tesi di laurea)

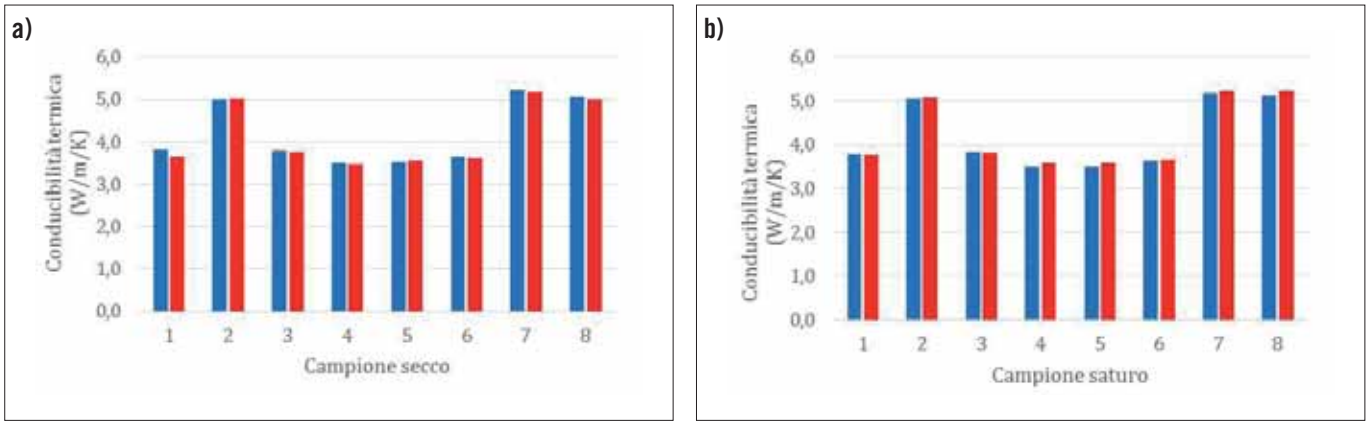


Figura 7 – Confronto tra i valori di conducibilità termica misurati prima (blu) e dopo (rosso) i cicli di gelo-disgelo per (a) campioni secchi e (b) per campioni saturi (De Lullo, 2016, tesi di laurea)

iterativo confrontando gli output numerici con le misure reali di temperatura registrate nelle sonde.

4. RISULTATI

4.1 Proprietà fisiche e termiche della roccia

Per quanto riguarda la variazione delle proprietà fisiche dei campioni dovuta ai cicli di gelo-disgelo, dalle misure sperimentali eseguite (*Fig.* 6) si osserva un incremento della porosità: poiché la porosità della roccia vergine è molto piccola, la sua variazione è comunque estremamente limitata, arrivando ad un incremento massimo pari a 0,63%. La densità, invece, subisce cambiamenti trascurabili, dell'ordine cioè di qualche centesimo di g/cm^3. Non si notano differenze nella variazione dei parametri fisici tra i campioni sottoposti alla fase di trattamento termico in condizioni sature con immersione in acqua (campioni 2-3-5-7) e in condizioni secche (campioni 1-4-6-8). I campioni 3, 6 e 8 presentano insieme un aumento di densità e di porosità. Sebbene ci si attendesse un maggior aumento della porosità nei campioni saturi dovuto alla maggior presenza iniziale di acqua nei vuoti, è probabile che la presenza di una porosità naturale del materiale prevalentemente occlusa faccia si che l'acqua contenuta nei pori in condizioni sature sia molto esigua.

Anche nel caso della conducibilità termica non vi sono variazioni significative: le misure eseguite hanno evidenziato l'assenza di variazioni significative a seguito dei cicli di gelo-disgelo (variazione massima misurata pari a 0,158 W/m/K) (*Fig.* 7). Come prima, non si notano differenze tra i campioni sottoposti ai trattamenti termici in condizioni sature (campioni 2-3-5-7) e quelli in condizioni secche (1-4-6-8), sebbene ci si aspettasse un maggior aumento della porosità nei campioni saturi dovuto alla formazione del ghiaccio e dunque un decremento della conducibilità termica nei campioni sottoposti a trattamento termico.

I valori di conducibilità termica sono mediamente maggiori nel caso di provini completamente saturati con immersione in acqua, a causa di una maggiore capacità conduttiva nello stato saturo: l'acqua che riempie le porosità, infatti, possiede una conducibilità termica (0,60 W/m/K) molto maggiore rispetto a quella dell'aria (0,0249 W/m/K), generando nel complesso un incremento di tale grandezza.

4.2 Modello numerico delle cavità

Gli output ottenuti dalle simulazioni numeriche descrivono l'evoluzione del campo termico dell'ammasso roccioso interessato dalla messa in opera delle celle ipogee. Nella *Fig.* 8 è descritta l'onda termica rispettivamente dopo 10 e 365 giorni dalla realizzazione del processo di abbassamento della temperatura imposto all'interno della cella.

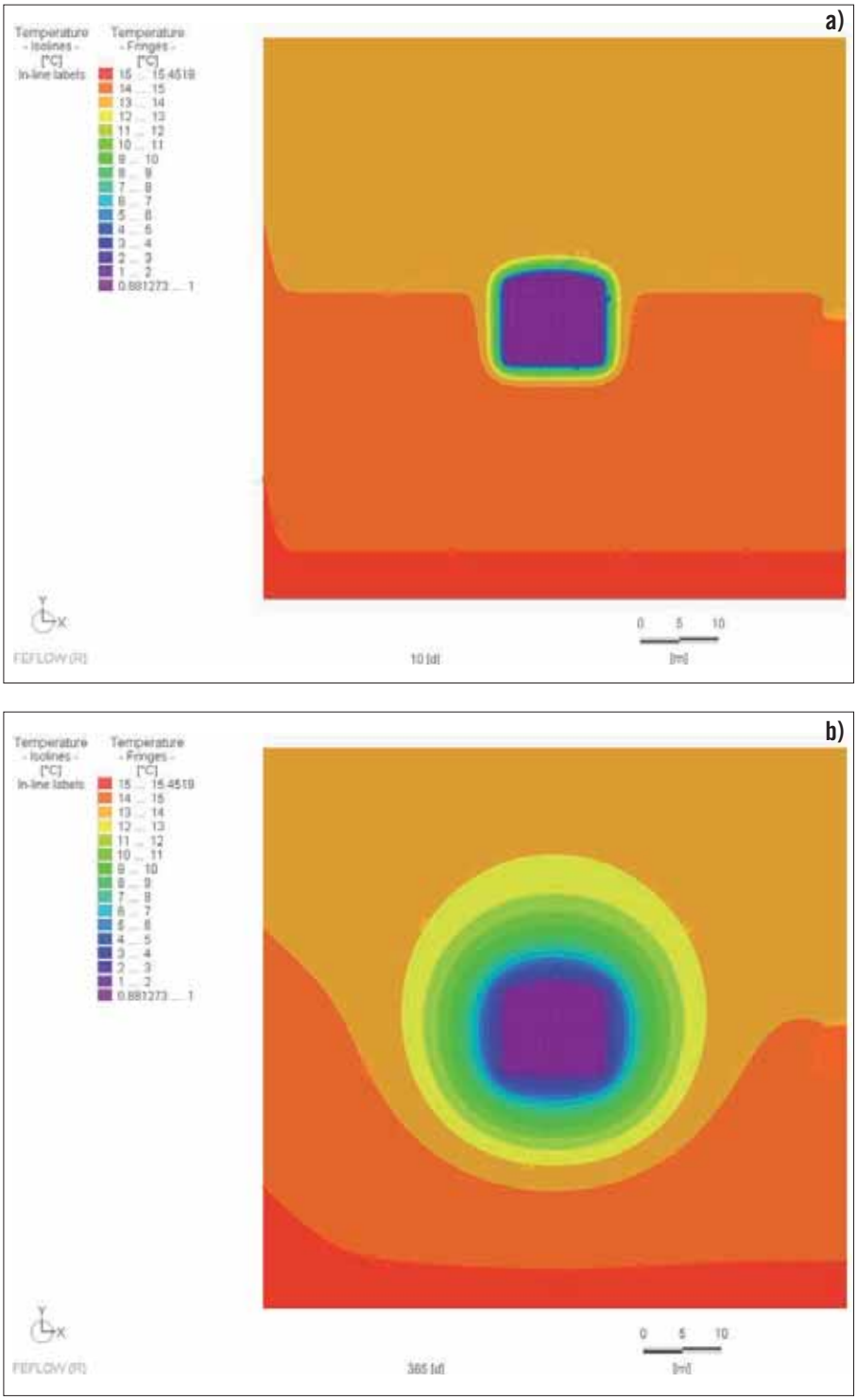


Figura 8: (a) Campo termico dopo 10 giorni e (b) dopo 365 giorni, ottenuto con il modello calibrato (conducibilità termica roccia λ=2,915 W/m/K; capacità termica volumetrica roccia c_V=6,203 MJ/m^3/K) (da Daz, 2017, tesi di laurea)

La distribuzione della temperatura risulta omogenea a partire dalla zona centrale in tutte le direzioni, rispettando il gradiente termico originario del sottosuolo. Nella situazione reale la propagazione del calore all'interno del complesso roccioso presenterà possibili naturali disomogeneità dovute a locali variazioni mineralogiche e stratigrafiche del materiale roccioso che possono condizionare localmente la direzione e l'intensità del flusso di calore.

A parità di distanza dalla cavità, l'equilibrio termico è raggiunto prima nelle sonde di parete rispetto a quelle del soffitto, anche se la differenza temporale è molto ridotta (meno di una settimana).

Si nota che, durante il primo anno di utilizzo della cella, intorno a essa si crea una zona a temperatura ridotta, che grazie alle caratteristiche termiche della roccia, si mantiene nel tempo.

L'isoterma 13°C (temperatura indisturbata) risulta a circa 15 m. di distanza dalla parete della cella. Estendendo la simulazione ad un funzionamento pluriannuale, si osserva che l'isoterma continua ad allontanarsi, ma sempre più lentamente.

4.3 Stima del fabbisogno energetico e confronto con un magazzino epigeo

Considerando una successione di vari periodi di conservazione delle mele all'interno della cella rappresentata (tendenzialmente conservate dall'ultima settimana di settembre all'ultima di agosto), è stato stimato il fabbisogno frigorifero pluriannuale della cella ipogea. Sono state tenute in considerazione le varie procedure di carico e scarico, eseguite dal Consorzio Melinda a seconda della domanda del mercato. La procedura di scarico dura circa 5 giorni e consiste nello spegnimento dell'impianto per 8 ore, durante cui la cella è aperta, alternato a una riaccensione per le successive 16 ore, in cui la cella viene richiusa.

Durante l'apertura la cella è sottoposta ai carichi termici dei macchinari, degli operatori e soprattutto allo scambio d'aria con l'esterno. Una volta svuotata la cella, l'impianto rimane in funzione, permettendo di ripristinare e incrementare l'accumulo termico nella roccia e sfruttarlo l'anno successivo.

La simulazione ha evidenziato che il fabbisogno energetico della prima fase di carico è molto più elevato di quello di mantenimento. Infatti, una volta creato il buffer termico a bassa temperatura nella roccia in prossimità della cella e non dovendo più smaltire il calore di respirazione delle mele, la richiesta frigorifera diminuisce sensibilmente. L'accumulo termico nella roccia mantiene costanti le condizioni attorno alla cella, limitandone le dispersioni per conduzione attraverso l'ammasso circostante.

Anche le successive fasi di carico e scarico, sebbene aumentino la temperatura dell'aria in cella, grazie alla loro brevità non alterano significativamente la temperatura dell'ammasso roccioso e sono quindi quasi trascurabili anche sul computo energetico. Dopo il primo anno di utilizzo, l'inerzia termica della roccia si oppone a variazioni del carico frigorifero per brevi periodi: una porzione dell'energia frigorifera immessa in cella dall'impianto viene immagazzinata nella roccia e utilizzata in un secondo periodo. Questo suggerisce che il sistema ipogeo assorba facilmente anche fenomeni di spegnimento per guasto improvviso del sistema.

È stato infine eseguito anche un confronto diretto tra i fabbisogni frigoriferi ed elettrici del magazzino ipogeo con un deposito epigeo refrigerato sito in Livo (TN), di proprietà del Consorzio Melinda. Sebbene ristrutturato diverse volte nel corso degli anni, il magazzino epigeo dimostra un fabbisogno specifico frigorifero circa del 20% superiore a quello del magazzino ipogeo e un fabbisogno elettrico addirittura superiore del 48% (Daz, 2017). La potenza richiesta all'impianto frigorifero mostra oltre al picco iniziale, come per l'impianto ipogeo, anche un picco durante la stagione estiva a causa delle elevate temperature esterne.

È questo che differenzia sostanzialmente il deposito epigeo da quello ipogeo. L'accumulo termico nella roccia a temperatura poco superiore rispetto a quella in cella rende le condizioni circostanti il deposito costantemente favorevoli al mantenimento pluriannuale. Al contrario, l'aria attorno a un deposito tradizionale segue l'andamento stagionale della temperatura, che nella stagione estiva è ben superiore a quella di conservazione.

5. CONCLUSIONI

Concludendo, i risultati sperimentali ottenuti hanno permesso di definire la caratterizzazione termofisica della roccia presente nella miniera di Rio Maggiore e di valutare l'evoluzione del campo termico all'interno dell'ammasso roccioso. La roccia costituente l'ammasso è risultata estremamente adatta per la realizzazione dei magazzini ipogei, grazie alle sue elevate proprietà termiche e al fatto che esse non vengano alterate dai processi di alterazione termica a cui sono sottoposte per la realizzazione della frigoconservazione, compreso quelli di congelamento/scongelamento. Le simulazioni condotte hanno permesso di stimare il funzionamento e i consumi energetici, anche confrontandoli con quelli di un magazzino epigeo, dedicato anch'esso alla conservazione delle mele, evidenziando consumi nettamente inferiori.

L'ottimo esempio di riutilizzazione di cavità sotterranee messo in atto dal Consorzio Melinda e Tassullo Materiali spa dimostrano le elevate potenzialità di rivalorizzazione delle varie tipologie di cavità preesistenti, dove possibile, altrimenti destinate all'abbandono e al degrado. L'esperienza Melinda-Tassullo evidenzia che l'impiego del sottosuolo per lo stoccaggio di alimenti per la conservazione anche pluri-stagionale può costituire una delle future pratiche virtuose finalizzate all'attuazione delle politiche di risparmio energetico e di miglioramento della sostenibilità ambientale della produzione industriale, giacché richiede ridotti dispendi energetici, consente di preservare nel tempo le qualità organolettiche del cibo, ed evita l'occupazione di territorio in superficie.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Consorzio Melinda della Val di Non, la Tassullo Materiali Spa, , Miniera di San Romedio s.r.l. e il Polo Tecnologico per l'Energia srl di Lavis (TN) per la disponibilità dei dati e alla divulgazione delle informazioni contenute nel presente articolo.

BIBLIOGRAFIA

Carmody J., Sterling R. (1984), *Design Considerations for Underground Buildings. Underground Space, Vol. 8, Nos. 5-6, pp. 352-362, 1984.*

Choi S.O., Park H.D., Park Y.J., Kim H.Y., Jang H.D. (2000), *Test running of an underground food storage cavern in Korea.* Tunnelling and Underground Space Technology 15 (1), pp. 91-95.

Daz S. (2017), *La conservazione ortofrutticola in ambiente refrigerato: stato dell'arte e approfondimento sul caso ipogeo di Melinda.* Tesi inedita di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica. DII - Università degli Studi di Padova

De Lullo A. (2016), *Caratterizzazione Termofisica Del Magazzino Ipogeo Per La Frigoconservazione Di Rio Maggiore (Val Di Non – Tn).* Tesi inedita di laurea magistrale in Ingegneria Civile Geotecnica. Dipartimento ICEA - Università degli Studi di Padova.

Fuganti A. (1964), *La geologia dei dintorni di Mollaro (Trentino Occidentale).* Studi Trentini Sci. Nat. 73-110.

Fuganti A., Odorizzi S., Franzinelli A. (2013), *La miniera di Dolomia di Rio Maggiore. Val di Non (Trento).* Atti Dell' Accademia Roveretana Degli Agiati, Atti dell'Accademia Roveretana degli Agiati III B.

Golder Associates per Tassullo Materiali (2009), Studio di Impatto Ambientale. Progetto preliminare.

Jamshidi A., Nikudel M.R., Khamehchiyan M. (2013), *Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model.* Cold Regions Science and Technology 92, pp. 29-36.

Liu Q., Huang S., Kang Y., Liu X. (2015), *A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw.* Cold Regions Science and Technology 120, pp. 96-107.

Melinda, «Il sistema di frigoconservazione ipogeo,» [Online]. Available: www.melinda.it/static/upload/il-/ilsistema-di-frigoconservazione-ipogeo.pdf.

Park H.D., Synn J.H., Park Y.J., Kim H.Y. (1999), *A pilot study on the design of an underground food storage cavern in Korea.* Tunnelling and Underground Space Technology 14 (1), pp. 67-73.

Park J., Hyun C.U., Park H.D. (2014), *Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action.* Bulletin of Engineering Geology and the Environment 74 (2), pp. 555-565.

Prosser G. (2000), *The development of the North Giudicarie fault zone (Insubric line, Northern Italy).* J. Geodyn. 30, 229-250.

Singh T.N., Sinha S., Singh V.K. (2005), *Prediction of thermal conductivity of rock through physico-mechanical properties. Building and Environment 42* (2007), pp. 146-155.

Sugai Y., Sasaki K., Yoshimura K., Yukitake T., Muta S. (2010), *Pilot study on the construction of several temperature-controlled multi-purpose rooms in a disused tunnel.* Tunnelling and Underground Space Technology 32 (2012), pp.180–189.

Zevgolis I.E., Mavrikos A.A., Kaliampakos D.C. (2004), *Construction, storage capacity and economics of an underground warehousing-logistics center in Athens, Greece.* Tunnelling and Underground Space Technology 19, pp. 165-173.

Zhang S., Lai Y., Zhang X., Pu Y., Yu W. (2004), *Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition.* Tunnelling and Underground Space Technology 19, pp. 295-302.

Il sistema ipogeo di "Kolymbethra - Porta V" nel Parco Archeologico della Valle dei Templi di Agrigento: un esempio di fruizione turistica di una cavità artificiale

The hypogeum system of "Kolymbethra - Porta V" in the archaeological and landscape park of the Valley of the Temples in Agrigento: an example of tourist use an artificial cavity

Giuseppe Lombardo
Giovanni Noto
Marco Interlandi
Elisabetta Agnello
Eugenio Vecchio

Associazione Agrigento Sotterranea
Email: lombardog@libero.it

Parole chiave *(Keywords)*: cavità artificiali *(Artificial cavities)*, Ipogei di Agrigento *(hypogeum of Agrigento)*, Parco della Valle dei Templi *(Park of the Valley of the Temples)*

RIASSUNTO

Il sistema ipogeo di "Kolymbethra – Porta V", ricadente all'interno del perimetro del Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento, è caratterizzato da una cavità, di origine antropica, avente uno sviluppo planimetrico di circa 185 metri che, per la particolare posizione geografica rispetto al "tessuto archeologico" in cui ricade, rappresenta una "emergenza" sia sotto l'aspetto archeologico che speleologico. Infatti parte della cavità ricade all'interno del "Giardino della Kolymbethra", area compresa tra il tempio di Castore e Polluce e quello di Vulcano, nel cuore della Valle dei Templi di Agrigento che, nel 1999, è stato affidato dalla Regione Siciliana al FAI – Fondo Ambiente Italiano - per un periodo di venticinque anni.

Dopo una prima fase di studio della cavità, rintracciata durante una campagna di scavi archeologici effettuata nel 2006, si sono susseguiti degli interventi di disostruzione e scavo che hanno permesso di congiungere due rami della stessa cavità che in un primo momento risultavano separati fra loro per la presenza di notevoli quantità di materiale detritico. L'ipotesi di fruizione turistica della cavità è stata subito posta in risalto dalle particolari condizioni della cavità stessa: andamento sub-orizzontale, esistenza di un elevato numero di accessi, ottima circolazione di aria e buone condizioni di stabilità dell'ammasso roccioso in cui si apre la cavità ipogea.

Grazie alla fattiva collaborazione fra l'Ente Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi, il FAI e l'Associazione "Agrigento Sotterranea" è stato possibile redigere, in sinergia fra le diverse componenti, un progetto di fruizione del sito ipogeo, ponendo in maggiore attenzione gli aspetti legati alla sicurezza del percorso sotterraneo e alla salvaguardia degli ambienti ipogei, attraverso degli interventi a basso impatto che potessero rendere più agevole la visita all'interno della cavità. Attraverso la realizzazione di opere che hanno maggiormente interessato le aree di ingresso della cavità, nonché la sistemazione di alcuni tratti interni della galleria, è stato possibile rendere fruibile un bene di elevato valore archeologico e speleologico che dal mese di aprile 2017 risulta essere aperto al pubblico per le visite guidate.

ABSTRACT

The hypogeum system of "Kolymbethra - Porta V", is inside the perimeter of the Archaeological and Landscape Park of the Valley of the Temples in Agrigento. It is characterized by a cavity, of anthropic origin, having a planimetric development of about 185 meters and represents an "emergence" both from the archaeological and speleological point of view, due to the particular geographical position with respect to the "archaeological fabric" in which it is inserted. In fact, part of the cavity falls within the "Garden of the Kolymbethra", an area between the temple of Castore and Polluce and that of Vulcano, in the heart of the Valley of the Temples of Agrigento. In 1999, was entrusted by the Sicilian Region to the Italian Environment Fund (Italian acronym FAI – "Fondo Ambiente Italiano") - for a period of twenty-five years.

After an initial phase of study of the cavity, individuated during a campaign of archaeological excavations carried out in 2006, there have been some interventions of unblocking and excavation. These interventions made it possible to join two branches of the same cavity, which at first were separated from each other by the presence of considerable quantities of detrital material. The hypothesis of tourist use of the cavity was immediately emphasized by the particular conditions of the cavity itself: sub-horizontal trend, existence of a high number of accesses, excellent circulation of air and good stability conditions of the rock mass where opens the hypogea cavity.

Thanks to the active collaboration between the Archaeological and Landscape Park of the Valley of the Temples, the "FAI" and the "Agrigento Underground Onlus" Association, it was possible to draw up, in synergy between the various components, a project addressed to the use the underground site. For the drafting of the project considerable attention was paid to the aspects related to the safety of the underground path and to the protection of the hypogeal environments, through low impact interventions that could make the visit inside the cavity easier.

Through the works that have most affected the areas of entry to the cavity, as well as the arrangement of some internal parts of the gallery, it has been possible to make use of an asset of high archaeological and speleological value that from April 2017 is open to the public for guided tours.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il sistema ipogeo oggetto di studio ricade a sud dell'abitato di Agrigento, nel cuore del Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi (*Fig.* 1), in un contesto geografico posto fra la città di Agrigento e la fa-

scia costiera di San Leone, borgata marinara della città; più specificatamente il complesso ipogeo è ubicato nella zona compresa fra il Tempio dei Dioscuri e l'area del "Giardino della Kolymbethra". In particolare gli imbocchi della cavità sono posti in corrispondenza del pianoro calcarenitico su cui è stato edificato il Tempio dei Dioscuri, in corrispondenza delle strutture di "Porta V" e lungo le pendici settentrionali dello stesso pianoro, in corrispondenza dei terrazzamenti posti all'interno del vallone della Kolymbethra.

La cavità ricade quindi all'interno della zona "A" del Parco della Valle dei Templi (*Fig.* 2), sito archeologico risalente all'età greca; il parco è stato istituito con la Legge Regionale n. 20 del 3 novembre 2000 e già dal 1998 risulta essere inserito nella lista redatta dall'UNESCO dei luoghi *"patrimonio mondiale dell'umanità"*.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il pianoro morfologico all'interno del quale è stato edificato il sistema ipogeo "Kolymbethra – Porta V" è geologicamente costituito da litologie sedimentarie pleistoceniche di natura calcarenitica e limo-argillosa con rapporti eteropici fra i litotipi sopra detti; sia in affioramento che all'interno della cavità è rilevabile il graduale passaggio dalle calcareniti giallastre ben cementate alle sabbie limose giallo-grigiastre. Stratigraficamente nell'ambito di questa disposizione, in letteratura geologica, sono descritti almeno tre livelli calcarenitici, intervallati da spessori argillo-sabbiosi.

Questi terreni, cronologicamente ascrivibili al Pleistocene inferiore, costituiscono la cosiddetta *"Formazione di Agrigento"*, poggiante sulle argille plioceniche ad elevato contenuto fossilifero della *"Formazione Monte Narbone"*, estesamente affioranti a sud dell'area di studio.

Alla luce di quanto sopra affermato, procedendo dai termini più antichi verso i più recenti, la colonna stratigrafica-tipo della zona è costituita da argille e argille marnose di colore grigio-azzurro, contenenti intervalli maggiormente limosi e sabbiosi, ascrivibile alla "Formazione di Monte Narbone" (Pliocene medio-superiore). Al di sopra di tali depositi pliocenici argillosi è presente la "Formazione Agrigento" (Pleistocene inferiore), complesso geologico costituito essenzialmente da un membro argillo-sabbioso ed uno calcarenitico, con rapporti di eteropia di facies fra le due diverse componenti che, in molti casi, presentano in affioramento i termini di transizione fra i due litotipi: argille sabbiose e sabbie limose (Lombardo G., 1995). In particolare la componente pelitica della formazione è

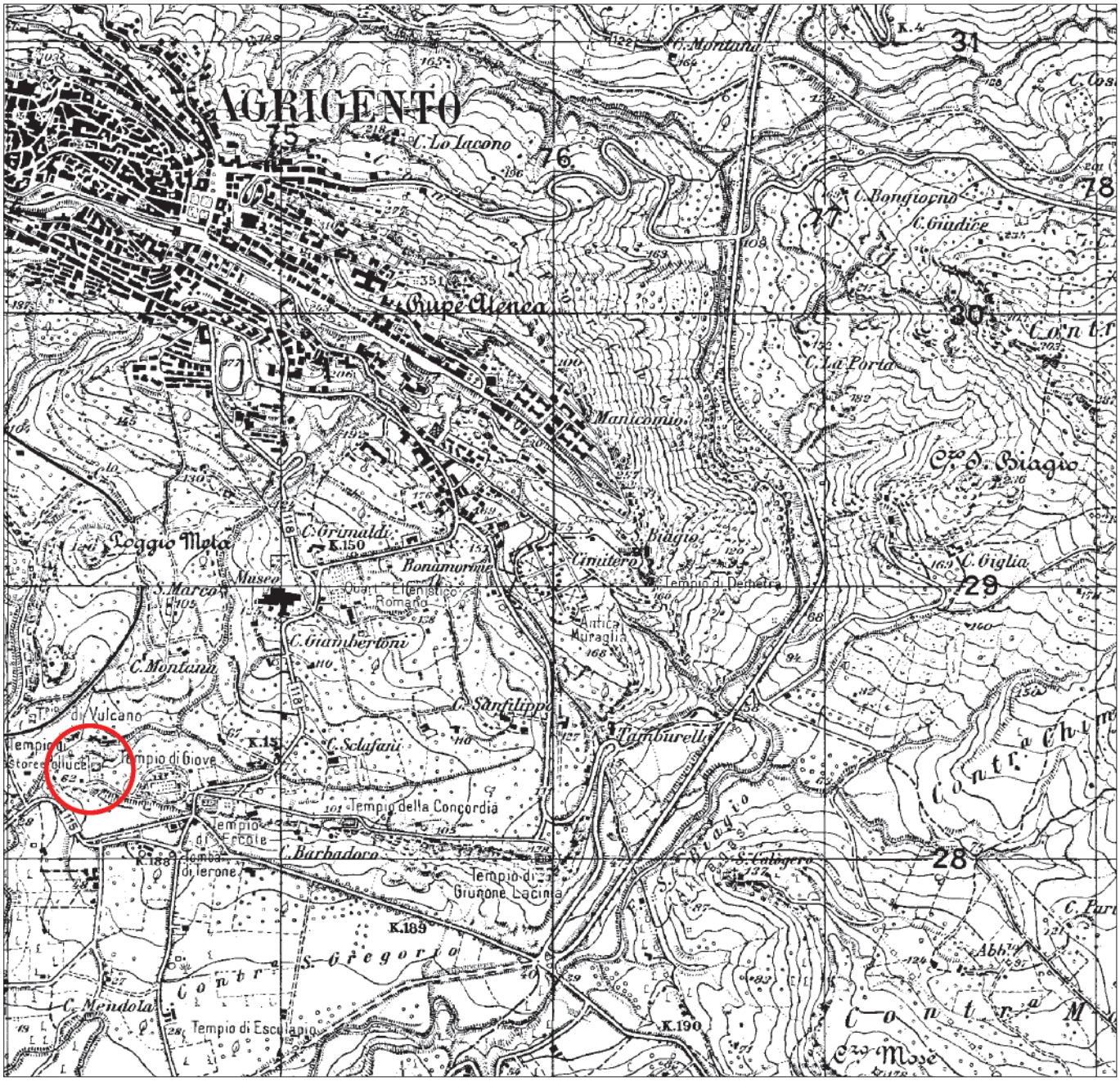


Figura 1 – Ubicazione dell'area di studio



Figura 2 – Vista panoramica dall'alto dell'area di studio

costituita da argille sabbiose e limi sabbiosi stratificati di colore grigio-azzurro, caratterizzati dalla presenza di numerosi fossili di piccoli lamellibranchi, spesso completamente frammentati con patine e piccoli noduli di ossidazione di colore rosso-bruno, a struttura omogenea (Lombardo G. & Brucculeri A., 1998). L'altra componente della Formazione di Agrigento è invece costituita da calcareniti giallastre, a grana grossolana, con elementi ciottolosi e numerosi bioclasti e fossili integri; il grado di cementazione è variabile ed in alcuni casi sono presenti in affioramento delle sabbie debolmente cementate mentre la stratificazione è tipicamente incrociata. Le calcareniti (*Fig.* 3) sono percorse frequentemente da linee di fessurazione beanti e non, in cui si riscontra una preferenziale via di circolazione delle acque di infiltrazione.



Figura 3 – Particolare del versante calcarenitico del vallone della Kolymbethra

Questa successione ricade in corrispondenza di una struttura monoclinalica immergente verso Nord, costituente il fianco meridionale di un'ampia piega sinclinale con asse Est-Ovest, a sua volta interessata da fenomeni tettonici distensivi, prevalentemente orientati in direzione Nord-Sud, verificatisi nel Pleistocene superiore. In particolare il substrato dell'area di Porta V - Tempio dei Dioscuri è caratterizzato dalla componente calcareniticosabbiosa della "Formazione Agrigento" che, soprattutto lungo la zona posta in corrispondenza del settore settentrionale dell'area di studio, è ampiamente rappresentata da ripidi versanti a morfologia molto accidentata che degradano fino alla zona della piccola piana alluvionale posta in corrispondenza del "Giardino della Kolymbethra": infatti la porzione altimetricamente più depressa di quest'area è occupata dai depositi colluviali messi in posto dai processi sedimentari legati all'esistenza del corso d'acqua che scorre alla base delle alture che la delimitano strutturalmente. Tali depositi, costituiti in massima parte da limi sabbiosi e conglomerati, risultano essere molto fertili e facilmente lavorabili: per

tale motivo l'area è intensamente coltivata ed il "Giardino della Kolymbethra" rappresenta uno spettacolare esempio di giardino mediterraneo, con coltivazioni di tipo agrumicolo.

Dal punto di vista idrogeologico i litotipi presenti nell'area possono essere distinti in due categorie aventi caratteristiche spiccatamente differenti. Come affermato in precedenza la cavità è stata scavata nel litotipo calcarenitico caratterizzato da una permeabilità primaria e secondaria elevata rispettivamente per porosità e fratturazione. Il litotipo argilloso, presente sia come substrato profondo sia intercalato alle calcareniti, per la sua natura litologica non si presta alla circolazione idrica sotterranea ma costituisce un netto limite di permeabilità. La particolare giacitura dei due differenti litotipi e l'interazione dei terreni calcarenitici con quelli argillosi consente così la formazione di falde idriche sotterranee che tendono, in linea generale, a determinare delle sorgenti "di trabocco" poste ai piedi dei versanti in corrispondenza dei "contatti" litologici permeabile-impermeabile. Occorre precisare che nell'area della Kolymbethra buona parte delle strutture ipogee realizzate in epoche passate per l'approvvigionamento idrico delle acque di falda sono ubicate proprio in corrispondenza di questo contatto litologico ed ancora oggi assolvono al compito per cui più di duemila anni fa sono state costruite[1] [2].

La cavità in studio, per ciò che riguarda il regime idraulico, si presenta per buona parte del suo andamento assolutamente "fossile", ovvero senza presenza d'acqua: si sottolinea come soltanto nella zona a ridosso del pozzo verticale vi sia, sia a sud che a nord, un notevole stillicidio che, nella zona poco distante dalla base del pozzo verticale, ha determinato la formazione di concrezioni carbonatiche parietali che hanno visibilmente diminuito la larghezza della cavità, determinando inoltre un esiguo accumulo d'acqua che, dopo pochi metri, viene assorbita dal piano di calpestio. (Lombardo G., Vecchio E., Baio A. 1999); (Lombardo 2000)

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA E DELLA CAVITÀ

Nel 2005, durante le attività tecniche inerenti il progetto "Scavi, fruizione e restauri dei ruderi di Porta V – Scavi, fruizione e restauri delle fortificazioni agrigentine", redatto dagli uffici dell'Ente Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento, e in particolar modo durante la fase di scavo archeologico, è stato riscontrato l'imbocco di un pozzo verticale (*Fig.* 4), completamente ricolmato ed intasato da una notevole quantità di materiale di riporto costituito essenzialmente da blocchi di dimensioni anche metriche di natura calcarenitica, frammisto a materiale archeologico. Un attento svuotamento di questo pozzo verticale, profondo dieci metri, ha permesso l'accesso all'interno di una cavità cunicolare caratterizzata da uno sviluppo planimetrico rivelatosi già da subito molto interessante. Dal suddetto pozzo, a sezione rettangolare, è stato possibile accedere ad una galleria che si sviluppa sia verso sud che verso nord. Il ramo meridionale della galleria presenta una larghezza media di circa 0,80 metri ed una altezza di circa 2,00 – 2,50 metri. La parte di galleria posta a ridosso del pozzo è interessata da un cospicuo stillicidio che determina la formazione di fanghiglia sul piano di calpestio per un tratto di circa 10,00 metri di sviluppo.

Spostandosi verso sud la galleria mantiene un andamento rettilineo con dimensioni costanti: in questa porzione della cavità, grazie ad un copioso stillicidio presente, è possibile riscontrare sia sulla volta che lungo le pareti, un notevole concrezionamento rappresentato da stalattiti e cannule di dimensioni decimetriche. Nella porzione terminale di questo ramo della cavità, che corrisponde in superficie alla zona di "Porta V", durante le fasi esplorative e di rilievo è stata riscontrata una notevole presenza di materiale detritico rappresentato da grossi blocchi di calcarenite, in alcuni casi squadrati, frammisto a materiale più fino limo-sabbioso: le dimensioni della cavità, durante le fasi della prima perlustrazione, tendevano a diminuire notevolmente fino a non rendere più possibile la progressione in sottosuolo (*Fig.* 5).

Spostandosi dal pozzo verticale lungo il ramo settentrionale della cavità, ad una distanza di circa 5,00 metri, si ha un notevole restringimento della sezione della galleria determinato da un cospicuo concrezionamento soprattutto lungo le pareti, grazie alla presenza di un notevole stillicidio; le acque presenti tendono ad accumularsi nella zona prossima a tale restringimento determinan-

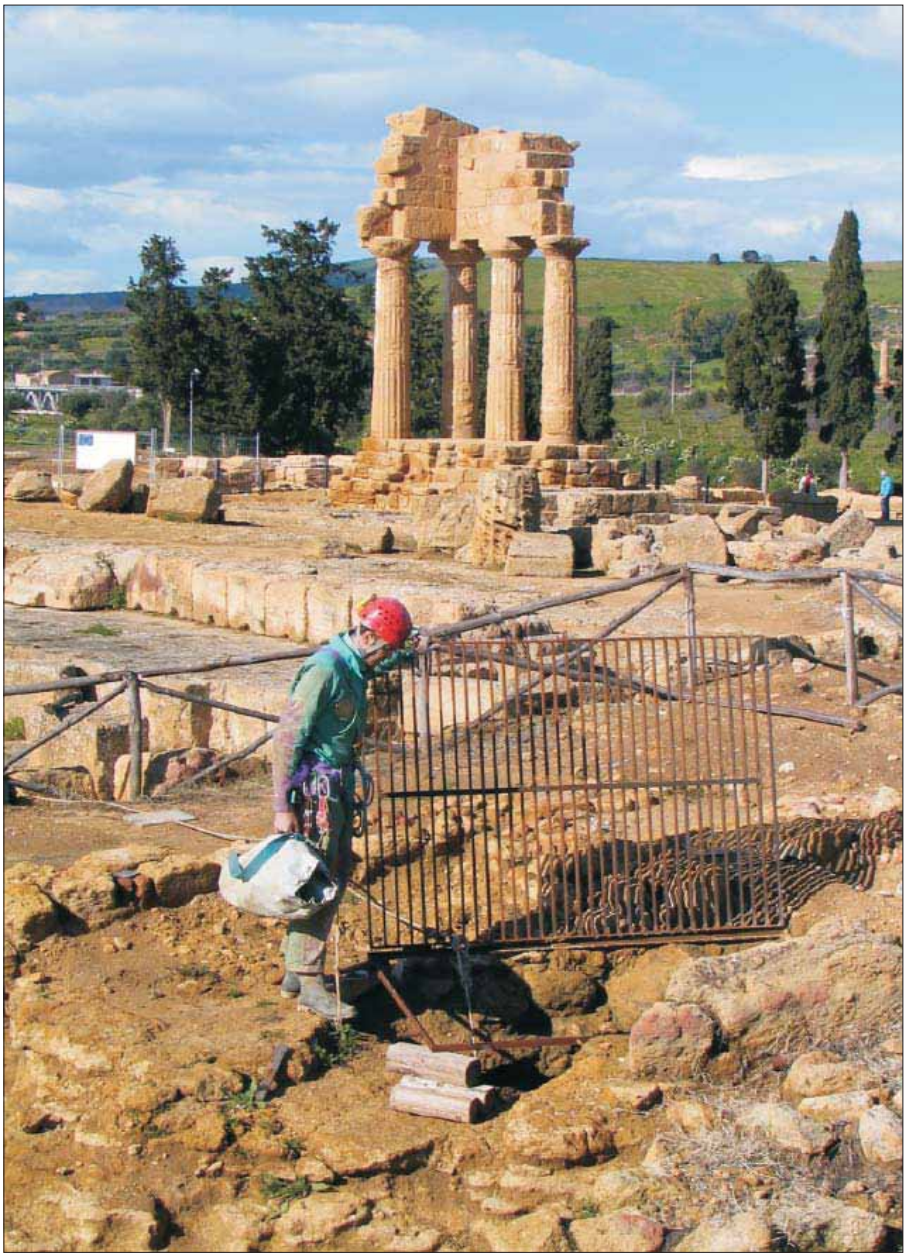


Figura 4 – Imbocco del pozzo con sullo sfondo il Tempio dei Dioscuri

do un piccolo accumulo in corrispondenza del piano di calpestio. Proseguendo verso nord la galleria mantiene un andamento costante, per poi piegare decisamente verso est fino alla zona in cui è presente una biforcazione, caratterizzata da un notevole restringimento delle dimensioni: uno dei due rami, a cui si accede attraverso un passaggio basso posto in corrispondenza del pavimento, presenta uno sviluppo esiguo e prosegue pochi metri per poi arrestarsi in corrispondenza di una zona interessata molto probabilmente da un pozzo ostruito e ricolmato dall'esterno. Il ramo principiale prosegue in direzione nord-est con un andamento debolmente meandriforme e nella parte terminale, così come visto nella porzione terminale del ramo meridionale della stessa cavità – area di "Porta V" –, le dimensioni della galleria tendono a diminuire a causa di una notevole quantità di materiale detritico, costituito da terreno frammisto a grossi blocchi calcarenitici.

presenti le "pedalore", ovvero incavi decimetrici posti lungo le pareti che permettevano di potere operare abbastanza agevolmente la discesa e la risalita all'interno della cavità.

La forte circolazione d'aria che interessava l'interno della galleria ha chiaramente indicato la presenza di un potenziale sbocco nella zona settentrionale del pianoro calcarenitico del Tempio dei Dioscuri e, per tale motivo, sono state effettuate ripetute ricognizioni nella zona in cui già in passato erano state portate avanti delle campagne di ricerca. In particolare l'attenzione è stata rivolta ad un'altra cavità artificiale presente in posizione di "mezzacosta" ubicata lungo il versante del vallone della Kolymbethra che già in passato era stata oggetto di esplorazione (Arnone L., 1952).

Questa cavità, dall'andamento sub-orizzontale presenta delle caratteristiche morfometriche molto simili a quelle riscontrate nella cavità che si apre nel pianoro del Tempio



Figura 5 – Fasi di scavo in corrispondenza dello sbocco di "Porta V"

Al termine dei rilievi topografici effettuati è stato possibile stabilire che la cavità presentava uno sviluppo complessivo di circa 123 metri ed un andamento praticamente sub-orizzontale in cui il dislivello, pari ad 11 metri, era determinato esclusivamente dalla presenza del pozzo d'ingresso: l'intero sviluppo della cavità era impostato nella calcarenite fossilifera pleistocenica della "Formazione di Agrigento" caratterizzata da una colorazione giallastra e da una stratificazione molto evidente. Fra le peculiarità riscontrate all'interno della galleria occorre ricordare la presenza lungo le pareti, in posizioni molto prossime alla volta, di nicchie scavate nella calcarenite per fare posto alle lucerne ad olio, mentre lungo le pareti verticali del pozzo sono

dei Dioscuri; in particolare il primo tratto della galleria presenta, per uno sviluppo di circa 30,00 metri, un'altezza di circa 2,00 metri: a distanze maggiori dall'imbocco la volta subisce un repentino innalzamento per giungere a dimensioni di circa 4,00 metri (*Fig.* 6). Anche in questa cavità la porzione terminale della galleria era caratterizzata da dimensioni che via via tendevano a diminuire a causa di una notevole quantità di materiale detritico costituito da terreno frammisto a grossi blocchi calcarenitici: durante le fasi di rilievo è stato riscontrata, anche in questo caso, una elevata circolazione d'aria in corrispondenza della porzione terminale della galleria.

Il rilievo plano-altimetrico anche di questa cavità ha permesso di potere stabilire le caratteristiche dimensionali dell'ipogeo che è risultato avere uno sviluppo di circa 52 metri e, anche in questo caso, il percorso ipogeo si presentava interamente scavato all'interno delle calcareniti pleistoceniche.

Dopo avere effettuato i rilievi plano-altimetrici delle due cavità, le stesse sono state messe in relazione fra loro attraverso una poligonale aperta effettuata utilizzando i due imbocchi degli ipogei: la procedura eseguita ha permesso di potere stabilire come le porzioni terminali delle due cavità fossero perfettamente allineate fra loro e che la distanza fra le stesse fosse di pochi metri: la sovrapposizione dei rilievi effettuati con la planimetria dell'area ha permesso di potere identificare le zone in corrispondenza delle quali era possibile ipotizzare la presenza degli sbocchi in superficie, sbocchi che alla data dei rilievi eseguiti risultavano completamente celati e quindi ostruiti.

Dopo avere effettuato ripetuti sopralluoghi nelle aree di interesse, sono stati effettuati dall'Ente Parco approfondimenti investigativi attraverso degli scavi archeologici che hanno preso inizio dalla zona posta a ridosso del costone di "Porta V": gli stessi hanno sùbito portato i frutti sperati ovvero il ritrovamento dell'imbocco della parte terminale della galleria che, a seguito dell'attività di scavo effettuata, è stata disostruita. Attraverso questo intervento si è potuto dimostrare come il ramo meridionale dell'ipogeo "Dioscuri", così come ipotizzato durante le fasi di rilievo e studio, era caratterizzato da una uscita in corrispondenza dei ruderi di "Porta V".

Terminati gli approfondimenti di scavo archeologico nella zona di "Porta V", l'interesse si è spostato lungo il versante meridionale del vallone della Kolymbethra nella zona in cui, attraverso la sovrapposizione dei rilievi delle cavità con le planimetrie dei luoghi, si è

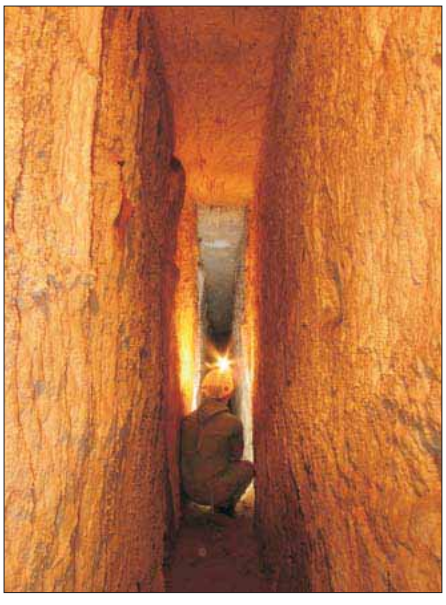


Figura 6 – Particolare degli ambienti interni del sistema ipogeo "Kolymbethra – Porta V"



Figura 7 – Particolare delle concrezioni presenti all'interno del sistema ipogeo "Kolymbethra – Porta V"

gento Sotterranea, è stato possibile redigere un progetto di fruizione sostenibile del bene speleologico, con l'obiettivo di mantenere inalterati i luoghi oggetto della visita e di permettere al potenziale visitatore di avere un'idea ben chiara di quella che è stata l'importanza degli Ipogei nella storia dell'antica Akragas, nonché far comprendere i principi su cui si basava l'escavazione delle gallerie e le motivazioni di tali realizzazioni.

Inoltre sono stati tenuti in debito conto altri fattori, altrettanto importanti rispetto a quelli visti in precedenza, ovvero l'ubicazione delle cavità rispetto al sito archeologico della Valle dei Templi, la facilità di raggiungimento dell'area nonché dalla possibilità di poter usufruire di servizi già esistenti, come ad esempio parcheggi, servizi igienici, ecc.

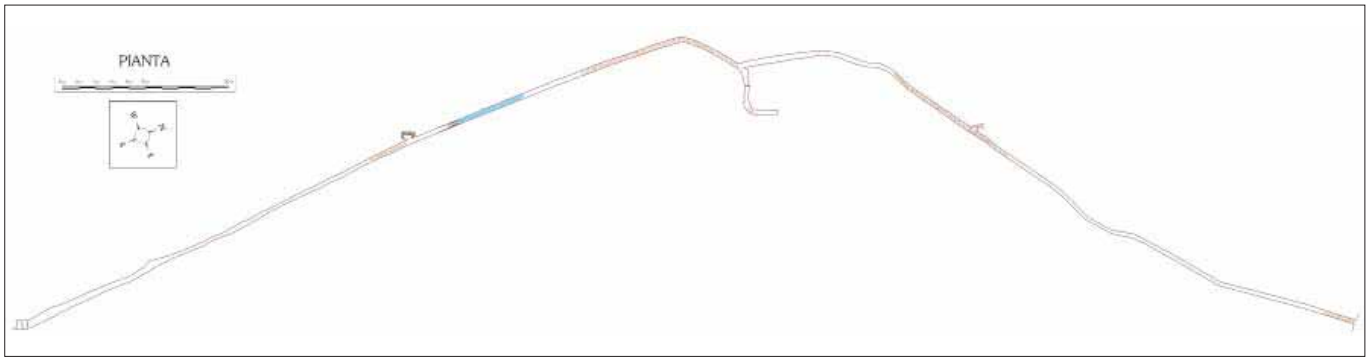


Figura 8 – Planimetria del sistema ipogeo "Kolymbethra – Porta V"

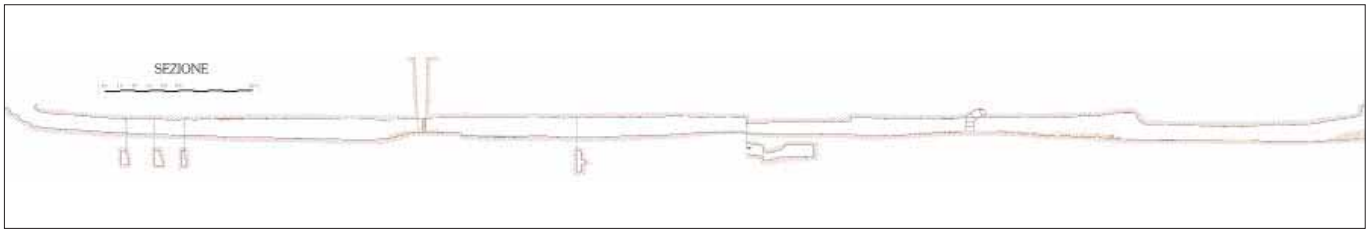


Figura 9 – Sezione del sistema ipogeo "Kolymbethra – Porta V"

ipotizzata la presenza di un pozzo verticale o comunque di un collegamento fra gli ambienti ipogei ed il soprasuolo.

Gli scavi archeologici condotti nell'area hanno permesso di identificare già durante le fasi di scavo, fra degli accumuli di grossi blocchi calcarenitici, delle forti correnti d'aria fresca che testimoniavano la presenza di un rilevante sistema ipogeo nel sottosuolo; dopo alcuni giorni di scavo la totale disostruzione di questa porzione di cavità ha permesso di collegare quanto già rilevato durante le prime fasi di ricerca.

L'attività di scavo archeologico all'interno degli ambienti ipogei è proseguita anche nelle zone in cui la presenza degli accumuli detritici sul piano di calpestio non permettevano l'agevole passaggio all'interno della cavità: tale attività di scavo è stata effettuata nell'ottica di una futura fruizione di questo patrimonio ipogeo, molto importante e rilevante sia per la consistenza planimetrica degli ambienti sia per la particolare posizione in cui lo stesso è ubicato rispetto alle maggiori strutture archeologiche della Valle dei Templi di Agrigento (*Figg.* 7, 8 e 9).

PROGETTO DI FRUIZIONE TURISTICA E INTERVENTI EFFETTUATI

L'Ipogeo sopra descritto, già alla data della sua scoperta nell'anno 2005, era caratterizzato da peculiarità che lo rendevano particolarmente vocato per la fruizione turistica. Per tale motivo, attraverso uno sforzo organizzativo tra l'Ente Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi, il Fondo Ambiente Italiano (FAI) – gestore del Giardino della Kolymbethra – e l'Associazione Agri-



Figura 10 – Particolare della passerella posizionata sul piano di calpestio

Gli interventi strutturali programmati per rendere agevoli le visite all'interno della cavità sono stati concentrati nelle zone degli ingressi e nelle porzioni di cavità interessate dalla presenza di fango lungo il piano di calpestio, il tutto funzionale al raggiungimento di una elevata sicurezza dei visitatori durante l'escursione. Si specifica che l'escursione speleologica è – generalmente - alla portata di tutti, senza limiti di età, trattandosi di una passeggiata all'interno di una cavità artificiale le cui dimensioni permettono di camminare in posizione eretta senza nessun pericolo.

In primo luogo, per migliorare la percorribilità interna, è stata operata la regolarizzazione del piano di calpestio attraverso la stesa dello stesso materiale sabbioso presente e, nei pochi tratti interessati dalla presenza di deboli ristagni di acqua, sono state collocate idonee passerelle tipo "*orsogrill*" in modo tale da rendere possibile la visita con maggiore sicurezza (*Fig.* 10).

In corrispondenza dell'imbocco di Porta V, dove in atto era presente una chiusura provvisoria in tavolato di legno, è stata prevista la collocazione di una apposita cancellata in ferro (*Fig.* 11) e la sistemazione del sentiero di collegamento - circa 10 metri - fra l'imbocco e la pista di accesso all'area archeologica.

Per l'accesso alla cavità dal versante settentrionale ricadente nel giardino della Kolimbethra, in prossimità del vallone, sono stati posti in essere alcuni interventi di sistemazione, in particolare:

1. per l'imbocco presente a ridosso del centro accoglienza/biglietteria del FAI è stata realizzata una staccionata di protezione in legno e nella scala esistente intagliata nella calcarenite è stata operata una accurata pulizia delle "pedate" in modo da rendere più agevole l'uscita dalla cavità e quindi utilizzare tale imbocco come eventuale uscita di emergenza;
2. per l'imbocco che si affaccia sul vallone della Kolymbethra sono stati effettuati gli interventi più massicci che hanno previsto la realizzazione di una pista – segnata attraverso una staccionata in legno – che dal percorso principale del giardino giunge fino ai piedi del costone calcarenitico in cui si apre l'imbocco della cavità: il dislivello esistente fra tale sentiero e l'ingresso dell'ipogeo è stato superato attraverso la realizzazione di una apposita scala in legno (*Fig.* 12), realizzata in aderenza al costone, al fine di consentire ai visitatori l'accesso all'ipogeo nelle massime condizioni di sicurezza.

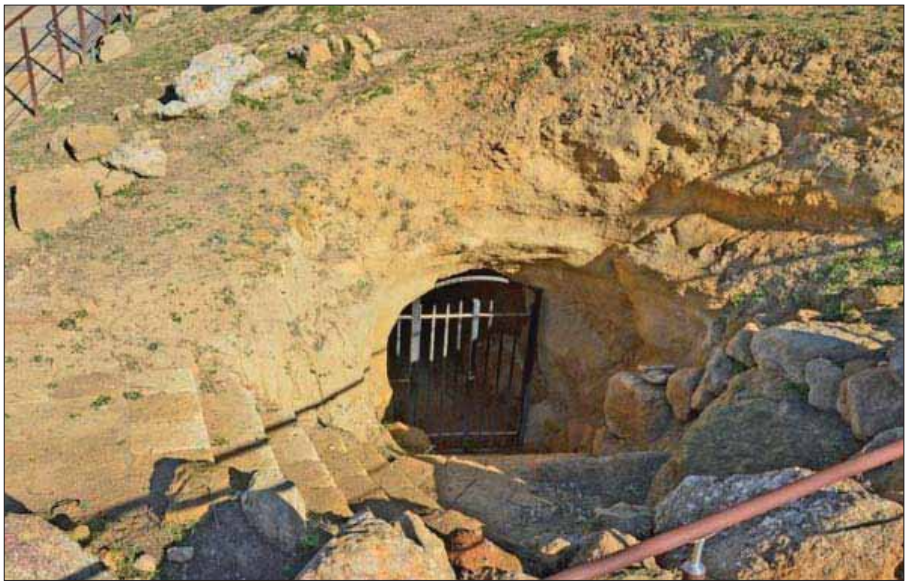


Figura 11 – Imbocco dell'ipogeo con cancellata in ferro in corrispondenza di Porta V



Figura 12 – Scala in legno posizionata a ridosso dell'imbocco dell'ipogeo nel vallone della "Kolymbethra



Figura 13 – Cartelli divulgativi posizionati all'ingresso del "Giardino della "Kolymbethra"

All'interno della cavità non è stato predisposto alcun impianto elettrico e di illuminazione, per mantenere inalterato lo stato dei luoghi, per l'elevato pregio archeologico che contraddistingue il sito; la visita all'interno dell'ipogeo viene quindi effettuata con l'ausilio di caschi di protezione muniti di lampade a LED che vengono forniti individualmente ai visitatori.

Nelle aree esterne sono state effettuate solo ed esclusivamente delle opere di sistemazione dei percorsi di accesso agli ingressi, in considerazione soprattutto del notevolissimo valore archeologico e paesaggistico dei luoghi in cui insistono le strutture – Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento; sono stati inoltre collocati, lungo i sentieri esterni, appositi cartelli (*Fig.* 13) con le indicazioni del percorso da seguire, la segnalazione di eventuali pericoli e le norme comportamentali da tenere da parte dei visitatori.

La visita, della durata di circa un'ora, si snoda all'interno del giardino della Kolymbethra e, partendo dalla biglietteria del FAI, si giunge fino alla zona altimetricamente più depressa – l'area della "grande gebbia": giunti all'ingresso dell'ipogeo presente a ridosso del vallone della Kolymbethra, si percorre la cavità da nord verso sud, per fuoruscire nella zona di "Porta V" e quindi far rientro nuovamente al "Giardino della Kolymbethra", lambendo l'area del Tempio dei Dioscuri.

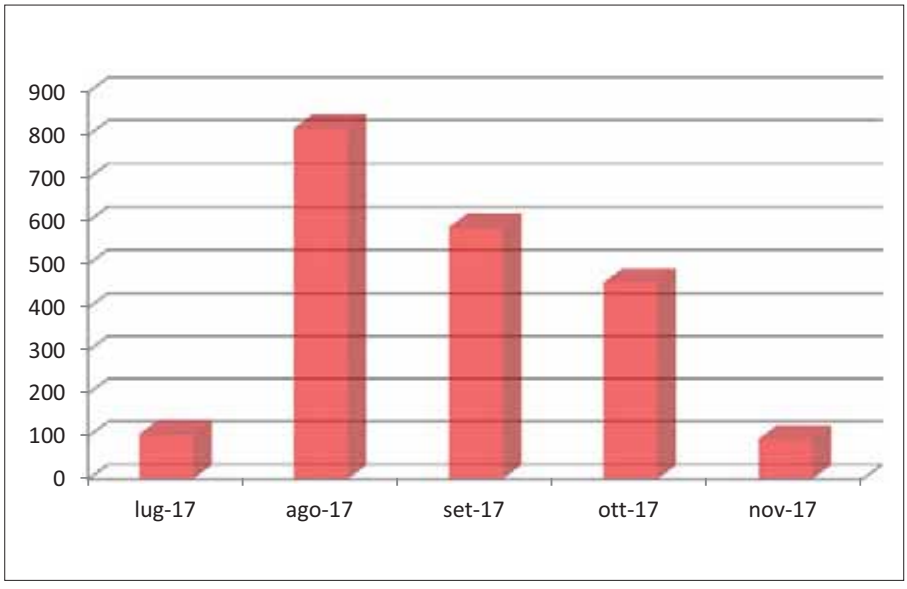


Figura 14 – Dati sulle presenze di visitatori da luglio a novembre 2017

L'inaugurazione di questa nuova proposta escursionistica all'interno dell'area della Kolymbethra è stata effettuata nel mese di aprile del 2017 e nell'arco del primo semestre di visite è stato possibile accompagnare più di duemila visitatori all'interno della cavità.

Nell'ambito della collaborazione con il FAI è stata inoltre pianificata una campagna pubblicitaria sulla nuova proposta di escursione ipogea, con la realizzazione di *bunner* pubblicitari sul portale web del FAI, nonché su quello dell'Associazione Agrigento Sotterranea; è in fase realizzativa un video promozionale sull'escursione speleologica.

CONCLUSIONI

Attraverso gli studi e le ricerche effettuate nell'arco di un decennio da un gruppo di appassionati – Gruppo Speleologico Agrigento prima e Agrigento Sotterranea poi – è stato possibile gettare le basi per la realizzazione di un progetto di fruizione di una delle strutture ipogee che caratterizzano il sottosuolo del capoluogo agrigentino, a più di cinquant'anni dalla prima ipotesi di turisticizzazione degli ipogei di Agrigento (Arnone L., 1952). Lo sforzo effettuato in maniera sinergica dall'Ente Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi, dal Fondo Ambiente Italiano (FAI) e dall'Associazione Agrigento Sotterranea, ha determinato la materializzazione di un'idea progetto che da moltissimi anni si tenta di portare avanti ad Agrigento. Questo risultato rappresenta un punto di partenza per altre iniziative analoghe che sono allo studio da parte dell'Associazione Agrigento Sotterranea, in un'ottica di valorizzazione del patrimonio sotterraneo agrigentino che caratterizza sia il centro storico della città che buona parte del paesaggio agricolo presente nella valle dei templi di Agrigento.

Attraverso la continua ricerca, sia speleologica che storica, che a tutt'oggi viene portata avanti dai soci in collaborazione con le istituzioni locali, la possibilità di valorizzazione di ulteriori strutture ipogee sembra ormai essere realizzabile.

BIBLIOGRAFIA

Arnone L. (1952), *Gli Ipogei di Agrigento - Riflessioni e considerazioni,* Edizione Azienda Autonoma Soggiorno e Turismo di Agrigento, Agrigento.

Lombardo G. (1995), *Gli Ipogei di Agrigento: aspetti geologici connessi alle strutture di elevata valenza archeologica.* - Boll. Ord. Reg. Geol. Sic. Ottobre-Dicembre, Palermo

Lombardo G., Brucculeri A. (1998), *Studio geologico finalizzato alla conoscenza del sottosuolo del Teatro Comunale "Pirandello" di Agrigento* - Boll. Ord. Reg. Geol. Sic. Ottobre-Dicembre, Palermo

Lombardo G., Vecchio E., Baio A. (1999), *Note descrittive sul sistema ipogeo "Sala-Perez - Giacatello" nel territorio del comune di Agrigento,* Opera Ipogea, Roma

Lombardo G. (2000), *Gli Ipogei del costone calcarenitico del Tempio di Vulcano - Agrigento.* - Atti del 3° Convegno Regionale di Speleologia della Sicilia, Palermo

Progetto Norchia ’16-’18. Scavi nella necropoli di Norchia, (VT), in località Guado di Sferracavallo

Simona Sterpa
archeologa e manager culturale
E-mail: sterpa70simona@gmail.com

Project Norchia ’16-’18. Excavations in the necropolis of Norchia, (VT), Guado di Sferracavallo locality

Parole chiave (key words): sito di Norchia (*site of Norchia*), scavi (*excavations*)

RIASSUNTO

Il progetto di recupero, valorizzazione e promozione storico-archeologica e paesaggistica del sito di Norchia (Viterbo) nasce in conseguenza allo stato di abbandono che da diverso tempo sta soffrendo l’intera zona. Per questo è nata la necessità di intervenire con opere di riqualificazione atte a migliorare e sviluppare il luogo in relazione e conformità con l’importanza culturale che riveste all’interno del territorio della Tuscia.

Il progetto è il risultato di varie sinergie che tra il 2013 sino ad oggi vedono coinvolti istituzioni sia pubbliche che private che collaborano e cooperano tra loro in piena concordanza e comunione di intenti ed interessi. Si tratta rispettivamente della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per l’area Metropolitana di Roma, la Provincia di Viterbo e l’Etruria Meridionale, del proprietario del terreno, la famiglia di Carlo Stelliferi, dell’Associazione Archeotuscia, concessionaria sino al 2018 dello scavo archeologico presso la località Guado di Sferracavallo, della società Trust di Scopo Sostratos nella figura del dott. Lorenzo Benini, finanziatore degli scavi archeologici, nonché della dott.ssa Sterpa Simona direttrice dello scavo archeologico come di tutte quelle attività rivolte per lo più alla conservazione, manutenzione, fruizione e promozione dello stesso sito archeologico. Con una zona archeologica potenzialmente così interessante ed unica nel suo genere è parso del tutto naturale cercare di proporre e realizzare un progetto che porti a migliorare la fruizione dell’area investigata includendo al suo interno tutti i luoghi di grande importanza storico-artistica e archeologica che sono presenti nel sito di Norchia. Infatti, tale progetto prevede lo sviluppo e promozione turistica dell’intera superficie interessata dalle antiche vestigia di epoca etrusco-romana e medievale cercando di renderla accessibile e fruibile per il pubblico visitante. Questo nostro progetto, iniziato grazie all’investigazione archeologica che ha interessato la località di Guado di Sferracavallo, in particolar modo per la tutela di alcune tombe saccheggiate ripetutamente dai clandestini nel passato ha portato ad importanti risultati che hanno permesso di recuperare notevoli corredi completi, di ritrovare architetture sepolcrali rare e significative come quella della Tomba a Casetta. Tutto il materiale è attualmente in fase di restauro ed è in corso lo studio di tutti i contesti, pubblicato quanto prima sarà poi esposto e reso fruibile a tutti e valorizzato nella consona sede museale.

ABSTRACT IN INGLESE

The project for recuperating and valorizing historic, archeological and landscape aspects of the site of Norchia grew from the state of abandonment in which the entire area had been suffering for some time. From this evolved the need to intervene with works of requalification in order to improve and develop the area in relation and conforming with the cultural importance that it has in the Tuscia territory. With such a potentially interesting and unique archeological area, it seemed natural to propose and work on a project that would better bring fruition to the area including some of the places of great historical-artistic and archeological importance that are present at Norchia. In fact, this project envisages the development and touristic promotion within the area of the ancient remains of the Etrusco-Roman and Medieval periods making them accessible to the public and to visitors. Our project began thanks to the archeological investigation of the Guado di Sferracavallo locality, in particular of several tombs that had been repeated violated by tomb robbers in the past.

The project is the result of various synergies from 2013 to the present in which public and private institutions collaborated and cooperated harmoniously and with common intents and interests. The Archeology, Belle Arti and Landscape Superintendents of the Metropolitan area of Rome and the Viterbo Province and Southern Etruria, the family of Carlo Stelliferi, owners of the land, Archeotuscia Association, concessionaries since 2018 of the archeological excavations at the locality known as Guado di Sferracavallo, the Sostratos Trust in the person of Dr. Lorenzo Benini, who financed the archeological digs, as well as Dr. Simona Sterpa, director of the archeological excavations and all other activities connected to the conservation, maintenance, use and promotion of the archeological site.

The archeological investigation in this area began thanks to the discovered an Etruscan tomb in a good state of conservation with the façade made like the roof of a house and at the center the representation of a false door and the remains of an inscription on the architrave. The entranceway, almost entirely filled with earth, presented a hole in the upper part of the door, perhaps an attempt by tomb robbers to enter the burial chamber.

Between 2013 and 2017, archaeological excavation campaigns have unearthed six hypogeal tombs with important part of the funerary kit, composed of many objects including ceramics and a bronze mirror dating from the end of the IV and the III century BC. One of the most important tombs that have been excavated in this area is the tom GDS03, with a large room which continues with a long rectangular corridor, with a large number of burials, 55 of them, made by excavating directly into the tufa platform and set mostly along the walls. It is the tomb with the largest number of burials excavated in Norchia, until this moment. A few *loculi* located near the entrance are of certain interest for they apparently belong to a later period in respect to the original construction of the funerary complex: they were created using the material for closing the more ancient burials.

In 2017, the results of investigations in the outside area in front of the tomb GDS 05 has shown evidence of an ancient path cut into the *tufo*. This was probably the original access road of the Guado di Sferracavallo used before the end of the IV century BC, the moment when the area underwent a transformation for the building of the tomb itself.

A study of the geological strata present in the area of Guado di Sferracavallo has allowed us to distinguish four different levels of geological nature, formed by layers of pyroclastic flows, that were used in the Etruscan period for making the tombs present in the area.

The importance of these archeological investigations which proceed annually with growing success are multiple for the results obtained and in the studies and the interest they enjoy. They have recuperated important and complete funerary kits dating from the end of the IV century BC and have found rare and significant burial architecture such as the Casetta Tomb. They have enriched the panorama of the economic dynamics, the ceramic production and the typical funerary rituals of Norchia already encountered in burials investigated during the last century. All the recuperated material is presently being restored and all the contexts are being studied and will soon be published, then they will later be exhibited and available to all in the usual museum setting.

All this clearly demonstrates the great potential still present in the necropolis of Norchia, where for over 30 years no findings have been made during legal excavations, and the inborn strength of the effective synergy between public institutions, the owner of the site, the availability of private financers and the competence of professional archeologists and topographers helped by volunteers.

INTRODUZIONE E UBICAZIONE DELL'AREA

La zona archeologica di Norchia (VT) si caratterizza per essere costituita da un altopiano tufaceo con la presenza di importanti fossi quali il Pile e Acqualta che confluiscono a valle sul torrente Biedano. Frequentata sin dall'epoca preistorica, fu soprattutto in epoca etrusca, a partire dal IV secolo a.C., quando il centro assunse una posizione di primo piano nell'Etruria meridionale interna, divenendo la base dell'espansione politico-militare di Tarquinia in direzione di Viterbo, del Tevere e dell'agro falisco (*Fig.* 1). Della frequentazione etrusca restano soprattutto le numerose e ricchissime necropoli, mentre la sede dell'abitato coincideva con la parte settentrionale del pianoro, dove si restrinse e si addensò successivamente l'insediamento medioevale, difeso da quattro fossati, da una torre e da una rocca. In effetti, tra l'VIII e il IX sec. d.C., Norchia diviene un insediamento fortificato di confine della Tuscia longobarda, poi un luogo di rifugio della popolazione costiera minacciata dalle incursioni saracene e una volta divenuta possedimento della Chiesa, fu rifondata come *castrum* da papa Adriano IV poco dopo la metà del XII secolo. Di tutto ciò restano gli imponenti ruderi della pieve romanica di S. Pietro e del castello, oltre a innumerevoli grotte abitative, pestarole, colombaie e vie cave.

La Tomba a Casetta si caratterizza per avere il tipico tetto a doppio spiovente, con le rifiniture degli architravi, columen e mutuli, il tutto impreziosito dalla rappresentazione della finta porta delimitata in alto da una modanatura rettangolare terminante con spigoli molto sporgenti chiamati proiecturae a becco di civetta. Nella cornice superiore, all'interno della specchiatura della porta, si trovano incise alcune lettere etrusche che si riferiscono ad una iscrizione non del tutto chiara a causa del deterioramento del tufo, che si sviluppa su tre linee e di cui sono identificabili solo alcuni caratteri che riportano il nome di VEL, il possibile destinatario della tomba, secondo una formula ben conosciuta in ambito funerario etrusco. Si tratta di un monumento i cui riferimenti tipologici vanno ricercati nelle tombe a tetto displuviato rinvenuti soprattutto nelle necropoli di Blera e San Giuliano. In effetti, quella che meglio si avvicina nelle forme alla Tomba a Casetta si trova nel nucleo ovest della necropoli di Pian del Vescovo a Blera, anch'essa di epoca ellenistica. Quest'ultima si presenta con un tetto a due spioventi, una falsa porta con proiecturae a becco di civetta ed il dromos realizzato nella parte sottostante la facciata. Allo stesso tempo, gli esempi più antichi di questo tipo di architettura funeraria vanno ricercati nelle necropoli di Tuscania, in località della Peschiera, e di nuovo a Blera, presso Pian del Vescovo, ma si presentano con strutture molto più complesse, generalmente sviluppate su tre lati e con una decorazione molto più ricca. Quindi è possibile affermare che le tombe rupestri del tipo "a casa" costituiscono una tipologia funeraria minoritaria, soprattutto se poste a confronto con quelle più comuni a dado, anche se continuativa nel tempo dal momento che vi sono esemplari datati dall'epoca arcaica a quella ellenistica. Con tutta probabilità sono da considerare come i diretti discendenti di altri tipi di manufatti ispirati alla forma di una casa come ad esempio le urne cinerarie ritrovate numerose a Caere e datate durante il periodo orientalizzante e che più tardi ritroviamo abbondantemente a Chiusi, o anche alcuni cippi che a Caere sono di tipo "femminile".

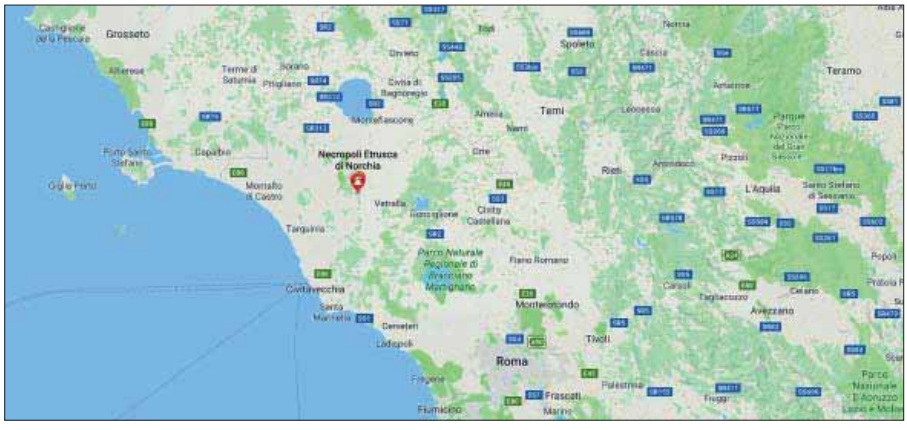


Figura 1 – Localizzazione dell'area archeologica di Norchia all'interno del territorio laziale

DESCRIZIONE DEL PROGETTO E DELLE ATTIVITÀ SVOLTE

A circa 1 km a nord del settore della necropoli di Norchia denominato Pile A, in località Guado di Sferracavallo, dominata a valle dal corso del Biedano e in altura dalla località il Casalone, si trova un cospicuo gruppo di tombe rupestri di epoca etrusca appartenenti per lo più al periodo ellenistico (*Fig.* 2). L'inizio dell'indagine archeologica in questa zona si deve alla ri-scoperta di un antico tumulo durante una ricognizione da parte dei soci dell'Associazione Archeotuscia di Viterbo, Mario Sanna e Luciano Ilari, nell'inverno del 2010 (Proietti, Sanna, 2013). Ciò che individuarono fu una tomba etrusca in buono stato di conservazione con la facciata conformata a tetto di una casa e al centro la rappresentazione di una finta porta e resti di iscrizione sull'architrave. Per una possibile interpretazione dell'iscrizione vedi: (Maras, Proietti, Sanna, 2012; Maras, 2012). Il vano d'accesso, quasi completamente riempito di terra, presentava un foro nella parte superiore della porta, interpretato come tentativo, da parte di clandestini, di accedere alla camera sepolcrale. Da ciò e dall'interessante struttura architettonica che presenta la sepoltura, insieme all'iscrizione con il nome del proprietario, è nato il progetto di indagare, tutelare e salvaguardare l'edificio funerario sotto le indicazioni dell'allora Soprintendenza Archeologica per l'Etruria Meridionale. Da allora sono state condotte rispettivamente una campagna di ripulitura nel 2014 e ben 3 di scavo archeologico, l'ultima conclusasi in agosto del 2017. L'area indagata si inquadra all'interno di uno dei complessi sepolcrali rupestri di epoca etrusca di Norchia, caratterizzata da tombe rupestri dislocate per lo più lungo gli impianti rocciosi che sorgono tutt'intorno al pianoro dell'antico abitato, in prossimità dei corsi d'acqua Pile, Bieda-

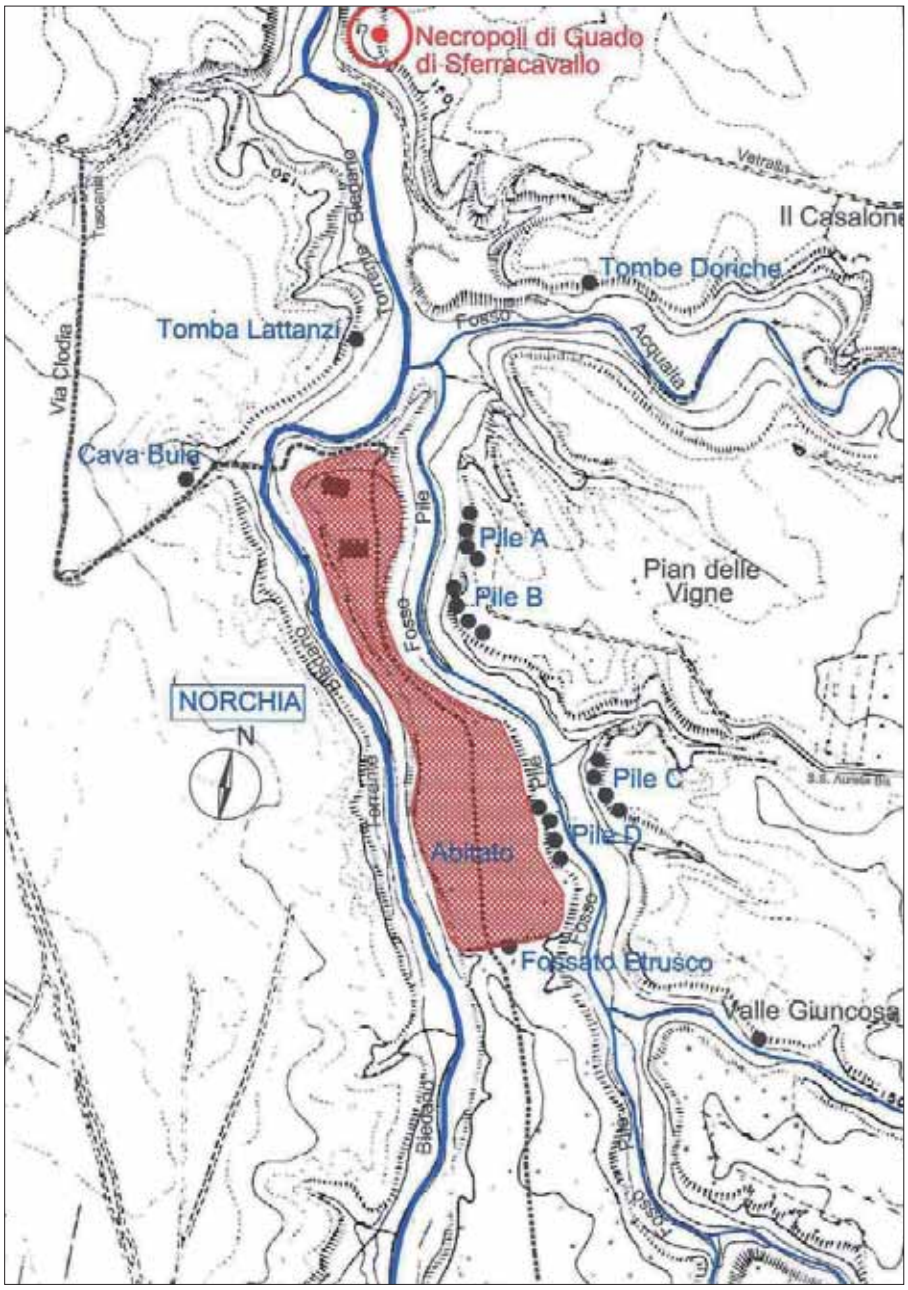


Figura 2 – Pianta generale dell'area archeologica di Norchia

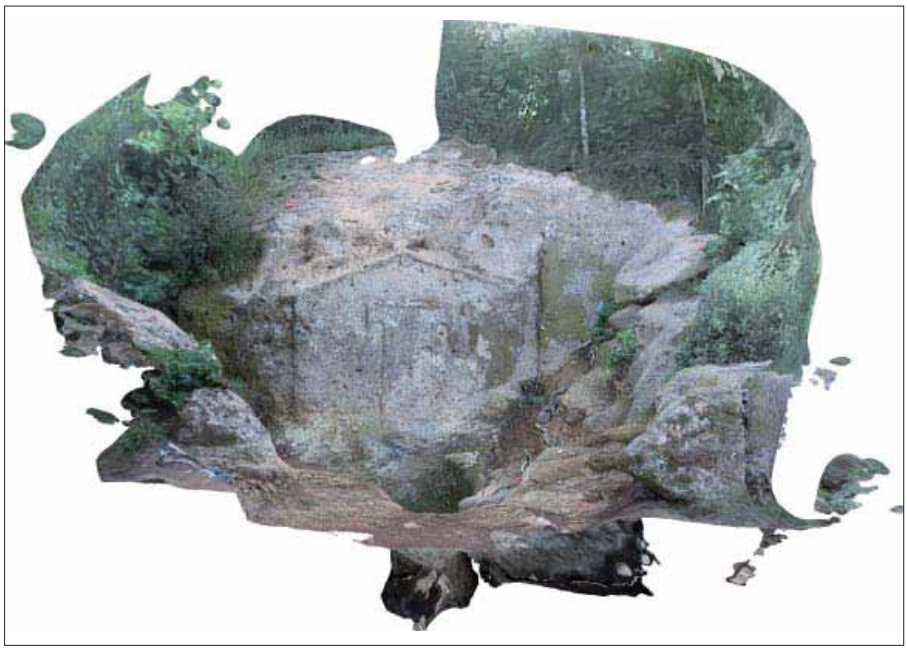


Figura 3 – Immagine in 3D della facciata della Tomba a Casetta, GDS 01

no e Acqualta. Proseguendo verso nord-est si incontrano le Tombe Doriche, la necropoli dell'Acqualta, sino a raggiungere la zona del Casalone e la Località Guado di Sferracavallo dove si trova la "Tomba a Casetta" (*Fig.* 3, Di Paolo Colonna, Colonna, 1978). Quest'ultima, investigata nell'estate del 2013, si presentava con un profondo e breve corridoio d'accesso alla camera sepolcrale, con un'unica banchina sul lato destro e una fossa rettangolare nel pavimento che restituì il corredo funerario, datato tra la fine del IV e gli inizi del III sec. a.C. (*Fig.* 4). Si tratta di 18 manufatti per lo più ceramici, e due frammenti di bronzo pertinenti ad uno strigile, restaurati e attualmente esposti presso il Museo Archeologico Nazionale della Rocca Albornoz di Viterbo, nel settore dedicato alle necropoli rupestri etrusche presenti nel territorio di Viterbo, tra cui anche Norchia (Binaco, 2012; Ceci, Proietti, Sanna, 2014, AA.VV., 2013).

Nel luglio del 2014 le indagini si sono concentrate in particolar modo nella zona antistante la facciata della tomba permettendo il ritrovamento di un altro dromos realizzato a destra quasi ad angolo con quello della Tomba a Casetta, e in linea con un grosso masso tufaceo che presenta una decorazione in facciata di difficile interpretazione a causa del cattivo stato di conservazione. I lavori di ripulitura terminarono con questo nuovo e importante rinvenimento, indagato successivamente nella campagna archeologica nei mesi di giugno e luglio del 2015 quando venne conclusa definitivamente l'indagine e lo studio della Tomba a Casetta e si iniziò lo scavo relativo alla tomba GDS 02 (Il termine GDS all'interno del testo corrisponde sempre alle iniziali della località dove si stanno realizzando gli scavi, ossia Guado di Sferrocavallo. *Fig.* 5, Di Paolo Colonna, Colonna, 1978, Di Paolo Colonna, 1978; Colonna, 2014; Kock, Mercklin, Weickert, 1915; www.fastionline.org/docs/FOLDER-it-2013-283:9; Benini, Binaco, Ceci, D'atri, Ioppolo, Mercuri, Proietti, Russo Tagliente, 2013; Ceci, Proietti & Sanna, 2014; Ceci, 2015). Questo nuovo sepolcro si presenta con un lungo dromos rettangolare che conduce ad una piccola camera a sepoltura singola e alta banchina sul lato destro, l'entrata era sigillata da un grosso blocco di tufo posto a chiusura del vano. Sul fondo accanto alla banchina si sono ritrovati ben 11 vasi in ceramica datati anch'essi tra la fine del IV ed il III sec a.C. Lo stretto collegamento tra le due tombe, entrambe a deposizione singola, lascia supporre un legame, probabilmente di parentela, tra i defunti, dei quali restano soltanto pochissimi frammenti ossei. Nel complesso questo ipogèo, rispetto alla Tomba a Casetta, appare più semplice sia nella struttura che nelle decorazioni e negli oggetti del corredo; allo stesso tempo le similitudi-

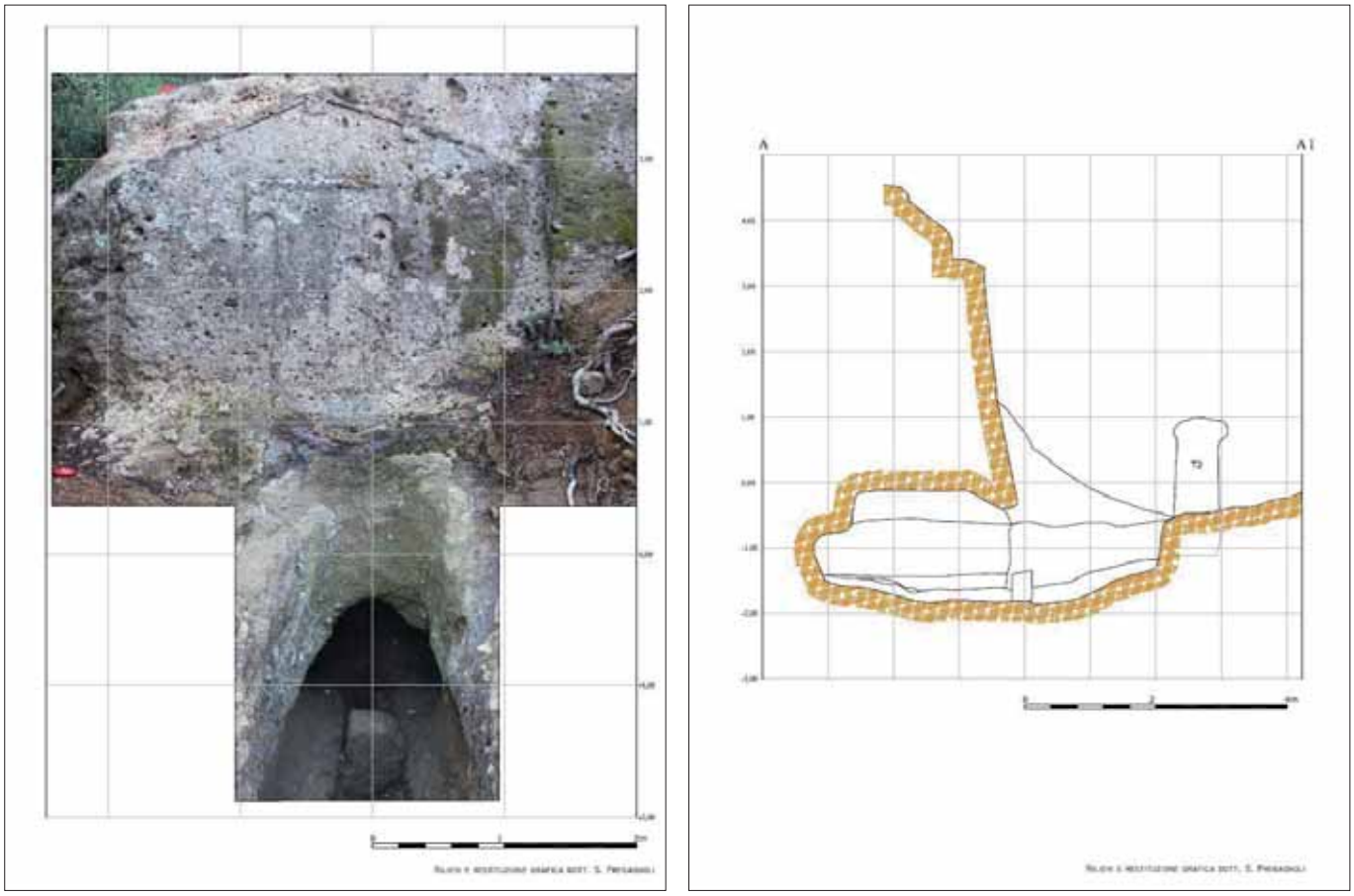


Figura 4 – Facciata e sezione della Tomba GDS 01

ni tanto nelle forme come nelle decorazioni degli oggetti dei due corredi potrebbero far ipotizzare che si tratti di un unico complesso funerario, anche se saranno necessari ulteriori ricerche archeologiche nonché studi più approfonditi per poterlo affermare con sicurezza. In effetti, dopo un esame preliminare di entrambe, è possibile constatare che tali tombe sono state realizzate una accanto all'altra, dando, all'area antistante i due dromoi, una forma ben precisa con pianta squadrata. Inoltre, entrambe le camere si presentano di modeste dimensioni e a deposizione singola, con il corredo della GDS 02 che si presenta del tutto simile a quello della GDS 01, come

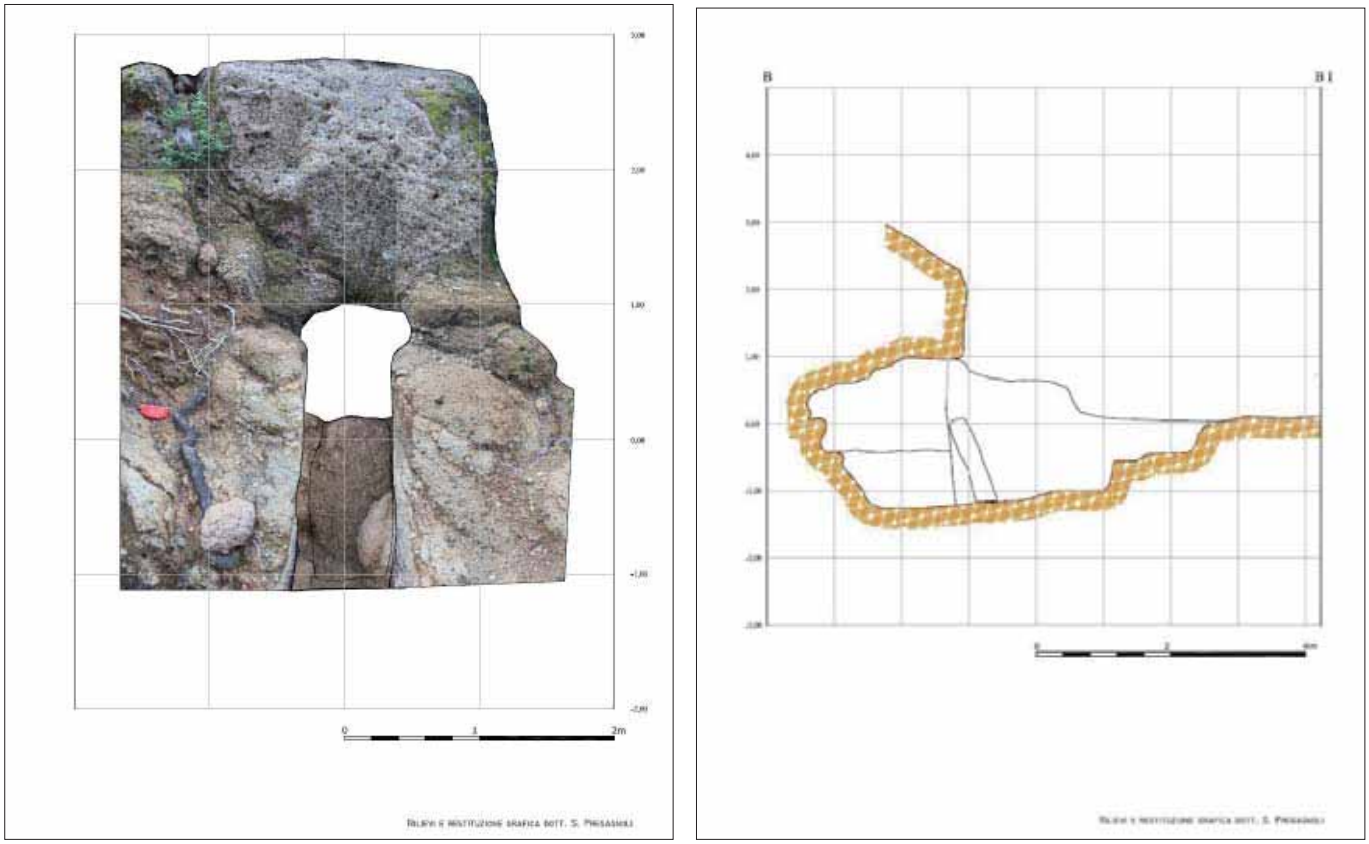


Figura 5 – Facciata e sezione della Tomba GDS 02



Figura 6 – Corredi funerari ritrovati all'interno degli ipogei: GDS 01 (in alto) e 02 (in basso)

dimostrano i due skyphoi a figure rosse affini nella forma. Se si osserva nel dettaglio le figure di quello rinvenuto nella GDS 01, oltre ad essere leggermente maggiori nelle dimensioni, si nota su un lato l'immagine di un uomo adulto con barba, mentre in quelli presenti nella GDS 02 si vede un uomo senza barba e con lineamenti meno marcati e più giovanili (*Fig.* 6). (Per maggiori informazioni su queste forme ceramiche vedi: Ambrosini, 2003; Di Paolo Colonna, Colonna, 1970; Di Paolo Colonna, Colonna (1978); Gilotta, 2000; Morel, 1981; Pianu, 1980).

L'indagine archeologica è proseguita nel 2016, tra giugno e agosto, in un'area limitrofa alle due sepolture scavate negli anni precedenti, riportando alla luce altre due tombe rispettivamente la GDS 03, conosciuta anche come la tomba dalle 55 sepolture, e la GDS 04 (*Fig.* 7, Sterpa, 2017a). La prima, che appariva violata, presenta sulla facciata la tipica decorazione con la porta finta etrusca, anche se mutila nella parte alta. Accanto vi è un masso crollato dove resta una piccola scaletta scavata nel tufo, probabilmente l'accesso alla parte superiore della tomba, destinata alle cerimonie funerarie. L'interno della tomba consiste in un grande vano raggiungibile tramite un dromos e chiuso originariamente da blocchi di tufo litoide, di cui ne resta solo uno. La camera è formata da un primo ambiente squadrato che prosegue con un lungo corridoio rettangolare, il tutto contraddistinto da una serie cospicua di sepolture, ben 55, ricavate scavando direttamente nel banco tufaceo e disposte per lo più lungo le pareti (*Figg.* 8, 9). Di un certo interesse risultano essere alcuni loculi ubicati in prossimità dell'entrata appartenenti probabilmente a un'epoca successiva rispetto alla costruzione originaria del complesso funerario e realizzate utilizzando proprio il materiale di chiusura appartenente alle sepolture più antiche. La tomba, già violata, è stata accuratamente ripulita e ciò ha portato al recupero di numeroso materiale pertinente ai corredi sconvolti, il cui studio



Figura 7 – Immagine della facciata delle tombe GDS 04 (a sinistra) e GDS 03 (a destra)

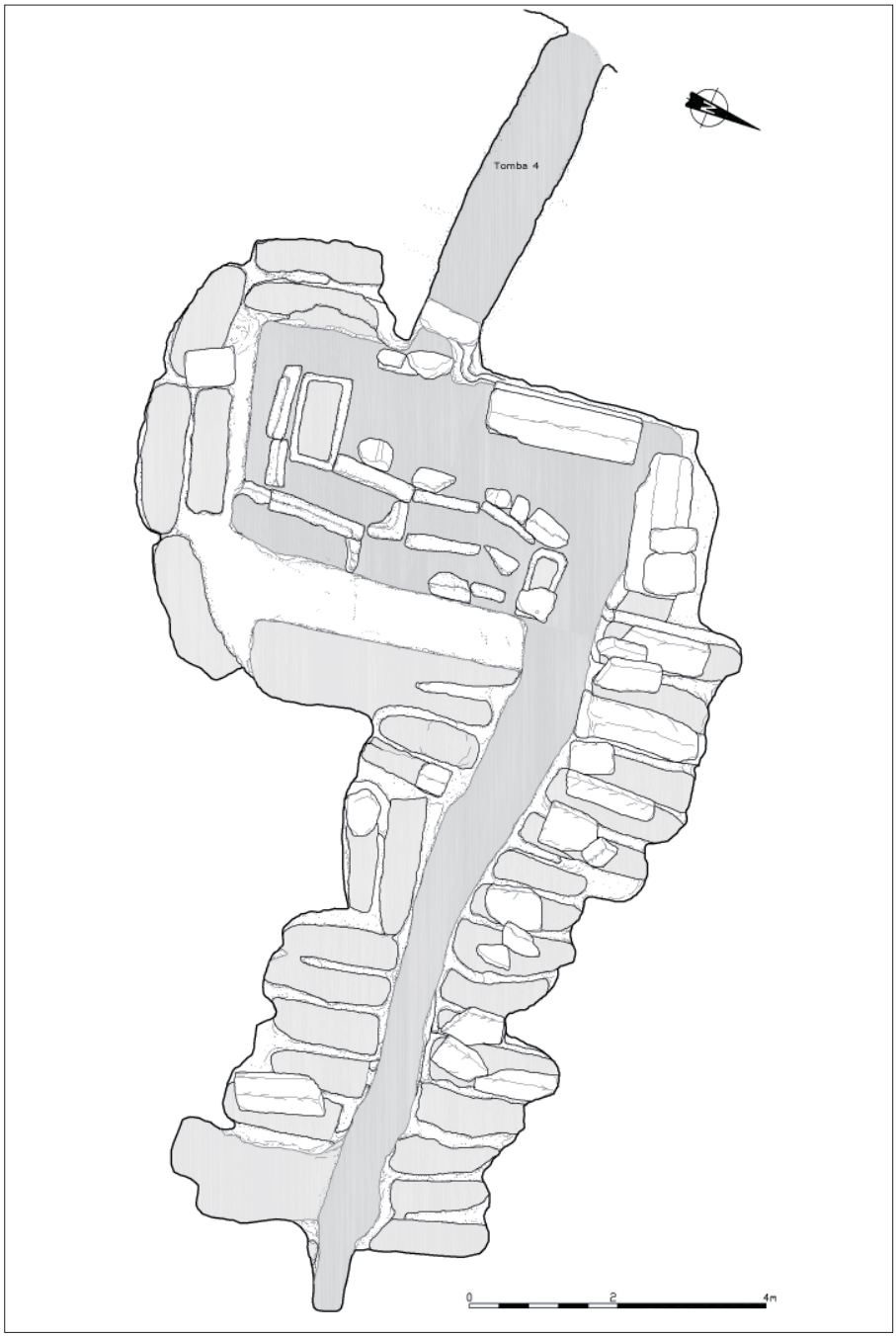


Figura 8 – Pianta dell'interno della tomba GDS 03

Nella campagna del 2017 si sono recuperate altre due tombe che erano state precedentemente saccheggiate e devastate dai clandestini, la tomba GDS 05 che ha comunque restituito un'inaspettata sorpresa e la tomba GDS 06 che si trova sul livello superiore. All'interno della stanza sepolcrale della prima, accessibile tramite un breve dromos, si è salvata la sola banchina di sinistra, dove era ancora conservato parte del corredo, composto da 20 oggetti tra materiale ceramico e uno specchio in bronzo, databile tra la fine del IV ed il III sec. a.C. Interessanti sono anche i risultati delle indagini dell'area esterna antistante la tomba, dove si è messo in evidenzia un antico percorso viario scavato nel tufo, probabilmente l'antica via di accesso e transito nella località Guado di Sferracavallo in uso almeno prima della fine del IV sec. a.C., momento in cui la zona subisce una profonda trasformazione per la realizzazione della tomba stessa. Il secondo ipogeo, invece, si trova nel livello superiore, rispetto alle sepolture sin ad ora investigate, con un dromos lungo e molto profondo e una camera sepolcrale grande che conteneva 21 sepolture realizzate scavando delle piccole fosse nel banco naturale o costruendo delle banchine dove poter deporre il defunto. Il materiale archeologico rinvenuto è assai scarso e alcuni frammenti di ceramica a vernice nera, insieme ad altri di sigillata, sembrano collocarla tra il III sec. a.C. e l'età romana (Sterpa, 2017b).

Uno studio relativo agli strati geologici presenti nella zona di Guado di Sferracavallo ha portato a distinguere almeno 4 livelli differenti di natura geologica, utilizzati in epoca etrusca per la realizzazione delle tombe presenti in quest'area, e formatisi a causa dei flussi piroclastici accumulatosi e trasformatosi nel corso del tempo (*Fig.* 11, Di Paolo Colonna, Colonna, 1978).

fornirà importanti dati per stabilire la cronologia della sepoltura, che continua in età romana come testimoniano alcune monete in bronzo. A pochi metri da questa tomba si trova l'altra scavata sempre nello stesso anno, la GDS 04, e contraddistinta da un grosso foro creato dai ladri per accedere direttamente alla camera funeraria, come dimostrano i resti di strutture tufacee semidistrutte, di difficile interpretazione e rinvenute all'interno dello stesso vano. Ma la vera e importante sorpresa si è avuta scavando il dromos: nell'ultimo strato di riempimento, accanto alla grossa pietra di chiusura della camera, sono stati ritrovati uno specchio in bronzo ed uno strigile di ferro insieme a 21 vasi, tra i quali spiccano due bellissime situle con beccuccio a volto di Sileno barbato, tipiche della fine del IV sec. a.C. (*Fig.* 10), (Ceci, Sterpa, 2017).

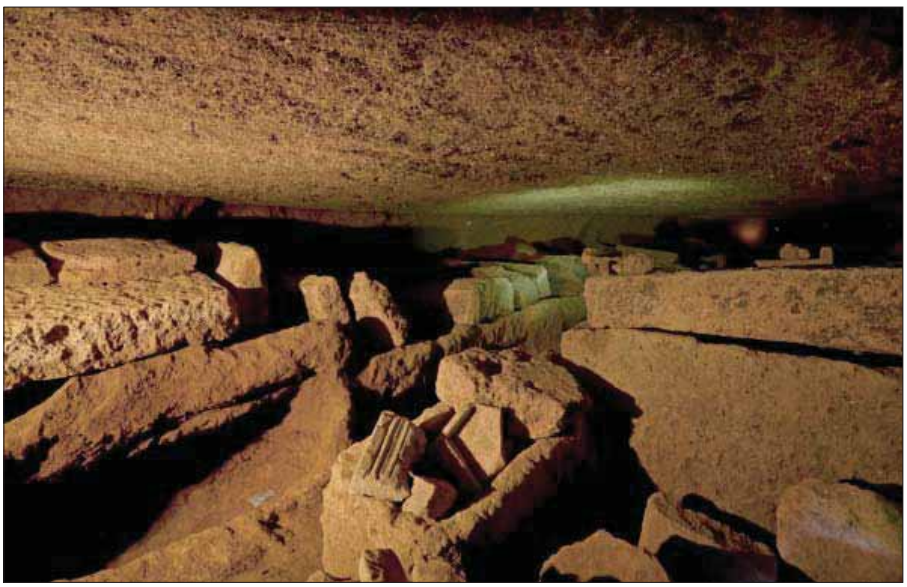


Figura 9 – Immagine dell'interno GDS 03



Figura 10 – Immagine del corredo GDS 04



Figura 11 – Immagine deli livelli geologici scavati per la realizzazione delle tombe

CONCLUSIONI

L'importanza di questa indagine archeologica, che procede annualmente riscuotendo sempre maggior successo sia nei risultati ottenuti che negli studi e nell'interesse che suscita, è molteplice dal momento che essa ha permesso di recuperare importanti corredi completi databili a partire dalla fine del IV a.C., di ritrovare architetture sepolcrali rare e significative come quella della Tomba a Casetta. Se ciò non fosse sufficiente, arricchisce il panorama sulle dinamiche economiche, le produzioni ceramiche e i rituali funerari tipici di Norchia già riscontrati nelle sepolture investigate nel secolo scorso (Ambrosini, 2014; Barbieri, 2003b; Barbieri, 2004-2005; Barbieri, Becker, Bernabei, Lo Bianco, Timperi, 2002-2003; Colonna, 2014). Tutto il materiale è attualmente in fase di restauro ed è in corso lo studio di tutti i contesti, pubblicato quanto prima sarà poi esposto e reso fruibile a tutti nella consona sede museale.

Tutto ciò dimostra chiaramente il gran potenziale ancora presente nella necropoli di Norchia, dove da più di 30 anni non si effettuavano ritrovamenti a seguito di scavi legali, e della forza insita nella sinergia fattiva tra le istituzioni pubbliche, il proprietario del sito, la disponibilità di finanziatori privati e le competenze dei professionisti archeologi e topografi aiutati dai volontari.

BIBLIOGRAFIA

Ambrosini L. (2014), *La necropoli rupestre di Norchia (Vt): stato della ricerca, in Etruria in progress. La ricerca archeologica in Etruria Meridionale*, a cura di L. Mercuri, R. Zaccagnini, Roma 2014, CNR edizioni, pp. 49-70, 427-513.

Barbieri G. (2003), *Considerazioni sulla ceramica in uso a Norchia nel III sec. a.C. attraverso un corredo inedito da una tomba del fosso del Pile*, in *RStLig*, 69, 2003, pp. 225-255.

Barbieri G. (2004-2005), *Norchia (Viterbo). Materiali inediti da un intervento di scavo nel dromos e nella camera funeraria della Tomba Prostila*, in *NSc*, 15-16, 2004-2005, pp. 5-20.

Barbieri G., Becker M. J., Bernabei M., Lo Bianco A., Timperi A. (2002-2003), *Blera, Viterbo. Località Casacce. Necropoli rupestre di epoca ellenistica*, in *NSc*, 13-14, 2002-2003, pp. 89-190.

Binaco P. (2012), *Norchia (Vt). Materiali dalla Tomba a Casetta di Sferracavallo*, in '*Archaeologiae. Research by Foreign Missions in Italy*', X, 1-2, 2012, pp. 31-55.

Benini L., Binaco P., Ceci F., D'Atri V., Ioppolo E., Mercuri L., Proietti L., Russo Tagliente A. (2013), *Dallo scavo al museo. La Tomba a Casetta dalla necropoli di Sferracavallo a Norchia, Viterbo Museo Nazionale etrusco della Rocca Albornoz*. Firenze 2013, pp. 9-30.

Ceci F. (2014), *Norchia fa il bis. Nuove scoperte dall'area della Tomba a Casetta di Sferracavallo*, in *Archeo* n. 358 del 2014, pp. 8-11.

Ceci F. (2015), *Quanti Amici per Vel*, in *Archeo* n. 365 del 2015, pp. 64-71.

Ceci F., Proietti L., Sanna M. (2014), *La Tomba a Casetta di Sferracavallo e il suo corredo: considerazioni preliminari*, in *Archeotuscia News*, Viterbo 2014, Vol. 10, 2014, pp. 24-29.

Ceci F., Sterpa S. (2017), *Norchia (Viterbo): la necropoli di Guado di Sferracavallo, tra nuove scoperte e progetti futuri*, in *Archeo* n. 384 del 2017, pp. 8-11.

Colonna G. (2014), *I nomi delle città dell'Etruria meridionale interna, in L'Etruria meridionale rupestre, Atti del convegno internazionale "L'Etruria rupestre dalla Protostoria al Medioevo. Insediamenti, necropoli, monumenti, confronti, Barbarano Romano-Blera*, 8-10 ottobre 2010, Palombi editori, 2014, pp. 90-114.

Di Paolo Colonna E., Colonna G. (1970), *Castel d'Asso*, voll. I-II, Roma 1970, pp.335-336, 343-347, tavv. CCCLXXXVIII e CCCXCV.

Di Paolo Colonna E., Colonna G. (1978), *Norchia 1*, voll. I-II, Roma, Iscima edizioni 1978, pp. 282, n. 5, p. 343, nn. 28-35, pp. 136-148.

Di Paolo Colonna E. (1978), *Necropoli rupestri nel Viterbese*. Istituto Geografico de Agostini edizioni, Novara 1978, pp. 30-35.

Kock H., Mercklin E.v., Weickert C. (1915), *Bieda*, in *Röm*. Mitt. XXX, 1915.

Gilotta F. (2000), *Ceramiche alto-adriatiche e vasi etruschi a figure rosse, in Adriatico tra IV e III sec. a.C. Vasi alto-adriatici tra Piceno, Spina ed Adria, atti del Convegno*, Ancona 1997, a cura di M. Landolfi, Roma, 2000, pp. 153-160.

Maras F.D. (2012), *Ager Tarquiniensis: Norchia*, in *StEtr*, R.E.E., LXXV 2012, pp. 246-248.

Maras D. F., Proietti L., Sanna M. (2012), *Ager Tarquiniensis: Norchia*, in *StEtr*, 75, 2012, pp. 245-248.

Morel J. P. (1981), *Céramique campanienne: Les formes*, édito dal École Française de ROME, 1981.

Pianu G. (1980), *Materiali del Museo Archeologico Nazionale di Tarquinia, 1. Ceramiche etrusche a figure rosse*, Roma, 1980.

Proietti L., Sanna M. (2013), *Tra Caere e Volsinii. La via Ceretana e le testimonianze archeologiche lungo il suo percorso, Tomba a Casetta*, Viterbo 2013, pp. 185-188.

Sterpa S. (2017a), *Norchia (VT): la Tomba a Casetta della necropoli etrusca di Guado di Sferracavallo*, n. 374, FastiOnLine 2017, pp. 1-16.

Sterpa S. (2017b), *La Necropoli di Guado di Sferracavallo ed ultime investigazioni*, in *Archeotuscia Special News*, n. 14, Viterbo 2017, pp. 12-17.

Le gallerie delle sorgenti termali di Porretta: rilievi, monitoraggi, azioni di valorizzazione

The tunnel of the thermal sources of Porretta: relief, monitoring, valorization actions

Stefano Vannini
Direttore della Concessione Mineraria Terme di Porretta
Email: vannini.stefano@gmail.com

Alessandro Stefani
Geologo
Email: alessandro.stefani7@studio.unibo.it

Parole chiave (*key words*): rilievi (*relief*), monitoraggi (*monitoring*), azioni di valorizzazione (*valorization actions*)

RIASSUNTO

Le sorgenti termali di Porretta (Comune di Alto Reno Terme, Provincia di Bologna) sono conosciute ed apprezzate fin dal II secolo dopo Cristo. Le acque termali sgorgano in più punti del territorio oggetto della concessione mineraria e posseggono caratteristiche chimico-fisiche differenti: tale diversità è alla base di quell'ampio spettro di applicazioni in campo medico e curativo che, nel corso dei secoli, ha reso famosa Porretta nel panorama del termalismo italiano. I primi studi sulla loro composizione e sugli effetti benefici che ne derivano iniziarono già nel 1300. Da allora le ricerche sono proseguite e continuano tuttora per ampliare le conoscenze del giacimento e delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso roccioso dal quale le sorgenti sgorgano. Molto utili allo scopo risultano tre gallerie scavate nella seconda metà dell''800 e nei primi anni del '900 nella roccia e ancora fruibili per studi e monitoraggi. Le particolari condizioni ambientali (presenza di metano e idrogeno solforato, assenza di illuminazione naturale, scarsità di ossigeno) hanno fatto delle gallerie una tipologia di cavità sicuramente singolare, un ambiente dove le condizioni chimico fisiche costituiscono importanti fattori limitanti che conferiscono all' ecosistema un grande interesse scientifico. Nel panorama nazionale non risultano attualmente note o descritte situazioni analoghe. Per le loro caratteristiche litologiche le rocce perforate (Arenarie di Suviana – SUV - sedimenti torbiditici deposti tra l'Oligocene ed il Miocene Inferiore) non presentano particolari problematiche di stabilità. Nell'articolo vengono descritte le attività di ricerca, monitoraggio e valorizzazione delle sorgenti e del particolare habitat presente nelle gallerie, attività sostenute con interesse e determinazione dal titolare della concessione di coltivazione del giacimento termale. Si studiano gli aspetti geostrutturali dell'area (in assetto tettonico alquanto complesso), idrogeologici (ancora non completamente certo il percorso di risalita dei fluidi idrotermali), idrochimici (i 28 elementi disciolti si presentano in concentrazioni differenziate nel tempo), microbiologici ed ambientali (notevole è l'ecosistema ipogeo presente in ambiente estremo). La ricerca multidisciplinare avviene attraverso una rete di specialisti di varia provenienza e status, raccolti nel cosiddetto "Cenacolo delle Sorgenti" e coordinati dalla Direzione Mineraria. Sono coinvolte in questa avventura tre università (UNIBO, UNIFI, UNIMORE), due Associazioni scientifiche (Unione Speleologica Bolognese, Associazione Fulvio Ciancabilla) ed anche volontari, fra cui alcuni dipendenti dell'Azienda termale. Gli studi effettuati negli ultimi tre anni hanno raggiunto obiettivi significativi, alcuni dei quali vengono illustrati nell'articolo assieme alle metodiche adottate nella campagna di approfondimento avviata. Una delle gallerie, scavata nella seconda metà del 1800 ed opportunamente messa in sicurezza, è aperta al pubblico con un piano di visite guidate tendenti a far conoscere le meraviglie del sottosuolo e le caratteristiche geologiche e microbiologiche di un ambiente ipogeo particolare. Esperienza utile altresì per sensibilizzare una platea più ampia possibile verso il termalismo ed i suoi benefici effetti. Anche di questa attività, che ha avuto un lusinghiero successo (1400 presenze in tre anni) si dà conto nell'articolo.

ABSTRACT

The thermal springs in Porretta (district of Alto Reno Terme, province of Bologna) have been well-known and appraised since the II century AD. The thermal waters pour from several points in the area, due to the mining concession and carry different chemical-physical characteristics: such diversity is the foundation of that wide scope of medical and therapeutic applications which, during the centuries, has made Porretta famous within the Italian thermal field. The first studies on their composition and curative effects that originate from it already began in 1300. Thenceforth, research studies have continued and are still carried on in order to widen knowledge about the deposit and the geological and structural characteristics of the rock mass from where the waters spring. For this purpose, three galleries appear to be very useful, dug during the second half of XIX century and the beginning of XX century and still available for studies and monitoring. The specific environmental conditions (the presence of sulphate methane and hydrogen, the lack of natural light, the scarcity of oxygen) have surely made the galleries a unique type of cave, an environment where chemical-physical conditions constitute important limiting factors, which give a great scientific interest to this ecosystem. Within the national panorama, similar situations are currently not to be known or described. For their lithological characteristics, the perforated rocks (sandstones from Suviana – SUV- turbiditic sediments deposited between the Oligocene and the Lower Miocene period) do not show any particular stability problem. In the article we describe research, monitoring and development activities on the springs and the specific habitat of the galleries; these activities are carried out with interest and dedication by the cultivation licensee of the thermal deposit. The features studied are those geo-structural of the area (in a fair complex tectonic structure), hydrogeological (it is still not certain the climbing-up path of the hydrothermal fluids), hydrochemical (the 28 liquefied elements are found in concentrations differentiated through time), microbiological and environmental (noteworthy the underground ecosystem found in an extreme environment). The multidisciplinary research is carried out through a net of experts from different fields and statuses, gathered together in the so-called "Cenacle of the springs" and coordinated by the Mineral Supervision. Three universities have been involved in this adventure (UNIBO, UNIFI, UNIMORE), together with two scientific associations (Unione Speleologica Bolognese and Fulvio Ciancabilla Association) and several volunteers, among which there are some employees from the thermal firm. Studies conducted during the last three years have achieved significant results, some of which are illustrated in the article together with the methodologies employed in the research programmes. One of the galleries, dug in the second half of 1800 and suitably made

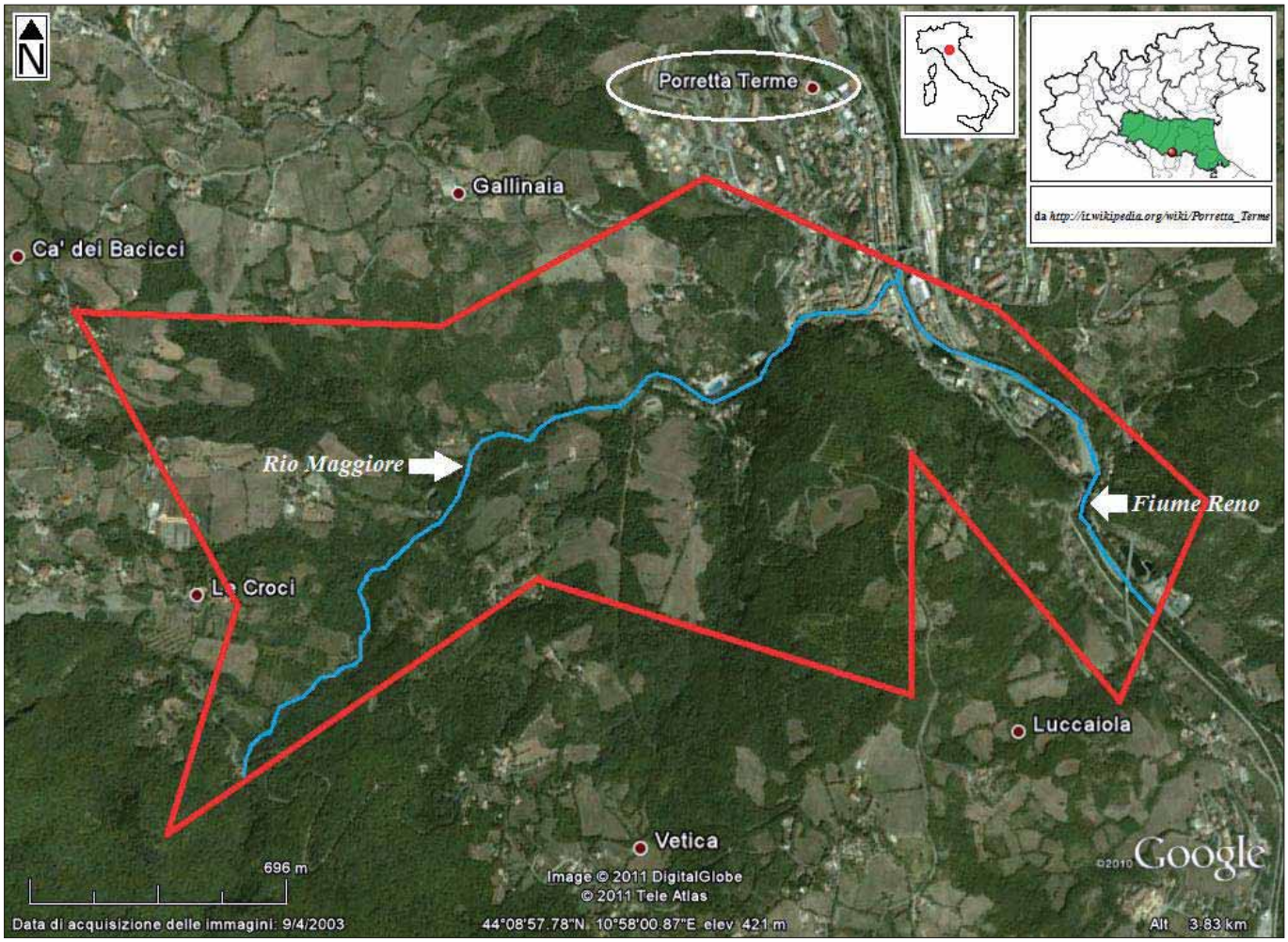


Figura 1 – Collocazione geografica e perimetro della concessione mineraria

safe, is open to the public with a schedule of guided tours, planned to let people know about the underground marvels and the geological and microbiological characteristics of a unique underground environment. This would also be a useful experience to make as many people as possible aware of thermalism and its salutary effects. In the article we account also for this activity, which has achieved a gratifying success (1,400 participations in three years).

INTRODUZIONE

Il giacimento termale Porrettano (Comune di Alto Reno Terme, Provincia di Bologna) è collocato nella alta valle del Fiume Reno a ridosso del versante settentrionale dell'appennino tosco emiliano tra i territori bolognese e pistoiese.

Avendo il giacimento di acqua termale caratteristiche di risorsa pubblica, la gestione delle pregiate scaturigini è stata affidata dall'Ente preposto (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale-ARPAE) ad un concessionario privato (TEMA srl) che, dopo significativi interventi di riqualificazione ha la responsabilità di sfruttarlo preservando qualitativamente e quantitativamente la risorsa (Vannini, 2017) (*Fig.* 1). Le sorgenti termali di Porretta sono conosciute ed apprezzate fin dal II secolo dopo Cristo; trattasi di 14 sorgenti di acqua termominerale calda ognuna con caratteristiche chimico-fisiche peculiari e differenti che caratterizzano la complessità e l'unicità del sistema.

Tale diversità è alla base di quell'ampio spettro di applicazioni in campo medico e curativo che, nel corso dei secoli, ha reso famosa Porretta nel panorama del termalismo italiano.

I primi studi sulla loro composizione e sugli effetti benefici che ne derivano iniziarono già nel 1300. Da allora le ricerche sono proseguite e continuano tuttora per ampliare le conoscenze del giacimento e delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso roccioso dal quale le sorgenti sgorgano (Ciancabilla *et al.*, 1972; Amadesi *et al.*, 1979; Bonoli *et al.*, 1995) Molto utili allo scopo risultano tre gallerie scavate nella seconda

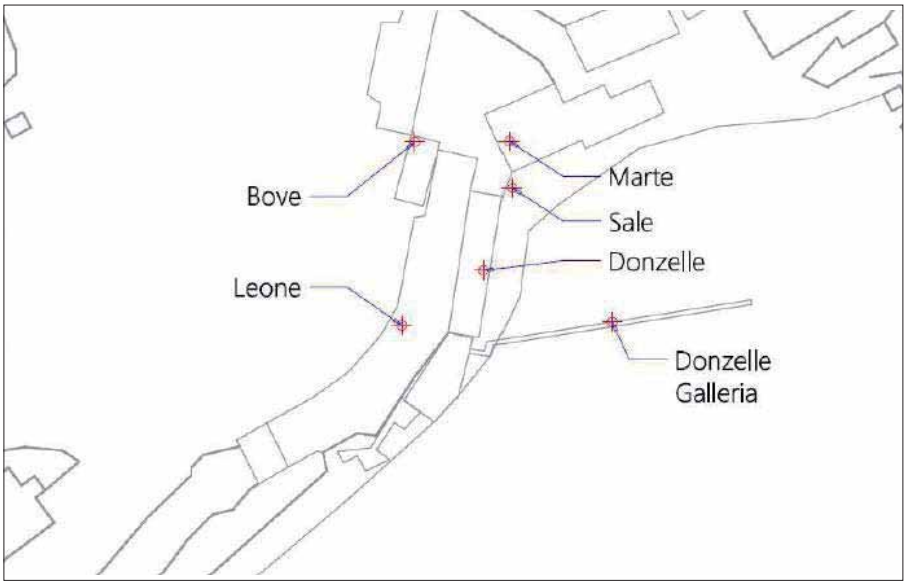


Figura 2 – Ubicazione sorgenti salsobromoiodiche

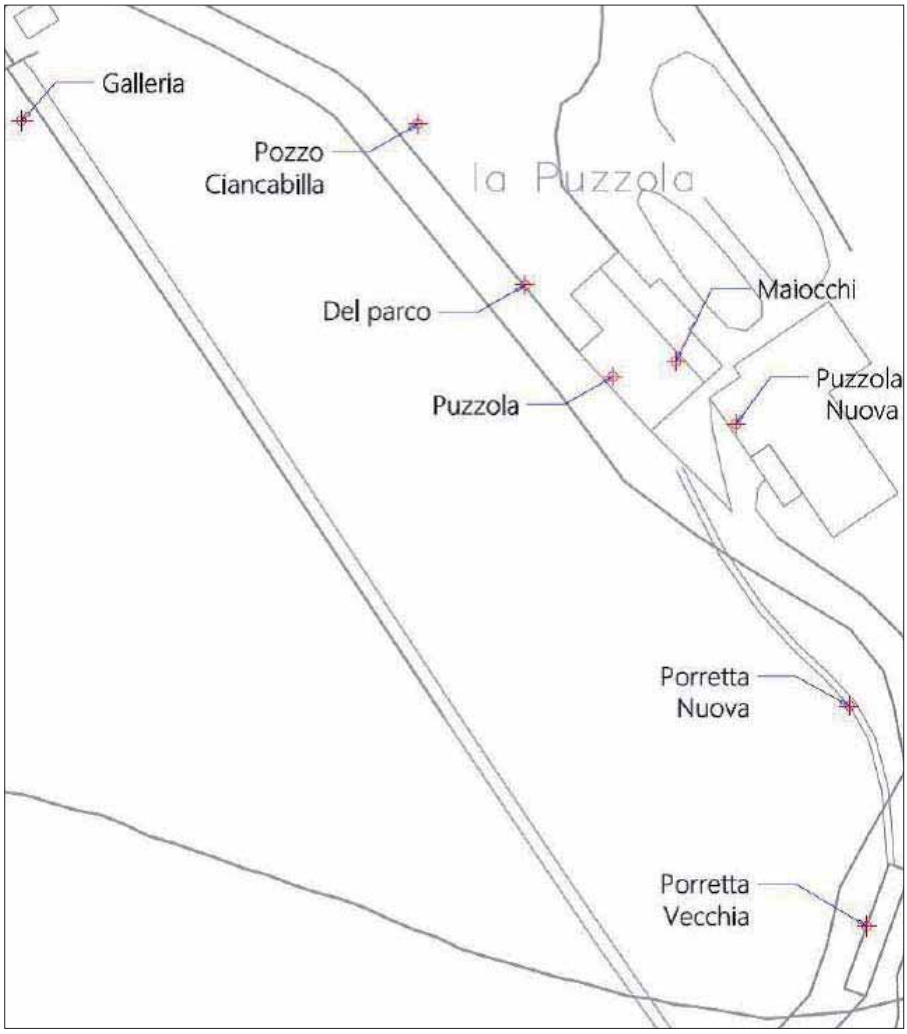


Figura 3 – Ubicazione sorgenti solfuree

metà dell''800 e nei primi anni del '900 nella roccia e ancora fruibili per studi e monitoraggi (Vannini *et al.*, 2017).

Le particolari condizioni ambientali (presenza di metano e idrogeno solforato, assenza di illuminazione naturale, scarsità di ossigeno) hanno fatto delle gallerie una tipologia di cavità sicuramente singolare, un ambiente dove le condizioni chimico fisiche costituiscono importanti fattori limitanti che conferiscono all' ecosistema un grande interesse scientifico (Rivalta, 2016).

LE SORGENTI

Gruppo delle sorgenti salso-bromo-iodiche (mesotermali con temperatura media di 35°C): sorgenti ad elevata salinità e temperatura, sono situate nella parte alta (sud-ovest) dell'abitato di Porretta immediatamente a ridosso del Rio Maggiore. Le sorgenti sono denominate: Bove, Marte, Sale, Leone, Donzelle Vecchia e, nella galleria, Donzelle Galleria 1, 2, 3 (*Fig.* 2).

Gruppo delle sorgenti solfuree (ipotermali con temperatura media di 26°C): acque a media salinità e temperatura, caratterizzate dalla presenza di acido solfidrico, si trovano a sud-est dell'abitato di Porretta, a sinistra del fiume Reno, dove sono ubicati gli stabilimenti termali. Le sorgenti sono: Puzzola, Maiocchi, Porretta Vecchia, Porretta Nuova, Puzzola Nuova, Galleria Della Madonna, Pozzo Ciancabilla e Del Parco (*Fig.* 3).

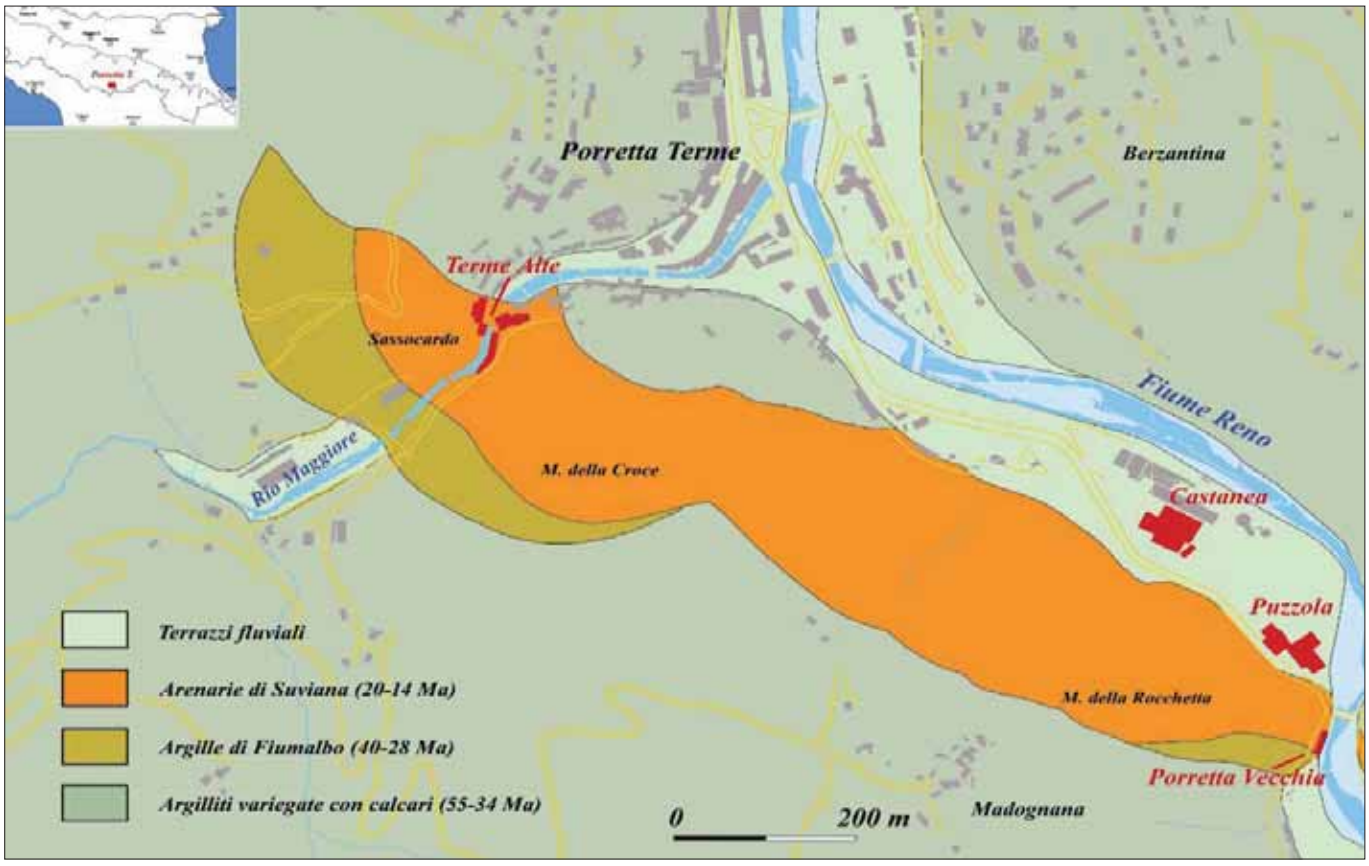


Figura 4 – Inquadramento geologico schematico delle sorgenti termali porrettane.
Terme Alte: sorgenti salsobromoiodiche (Leone, Bove, Marte, Donzelle Vecchia, Donzelle Galleria, Sale)
Puzzola-Porretta Vecchia: sorgenti solfuree (Porretta Vecchia e Nuova, Puzzola, Puzzola Nuova, Maiocchi, della Madonna, del Parco, Pozzo Ciancabilla)

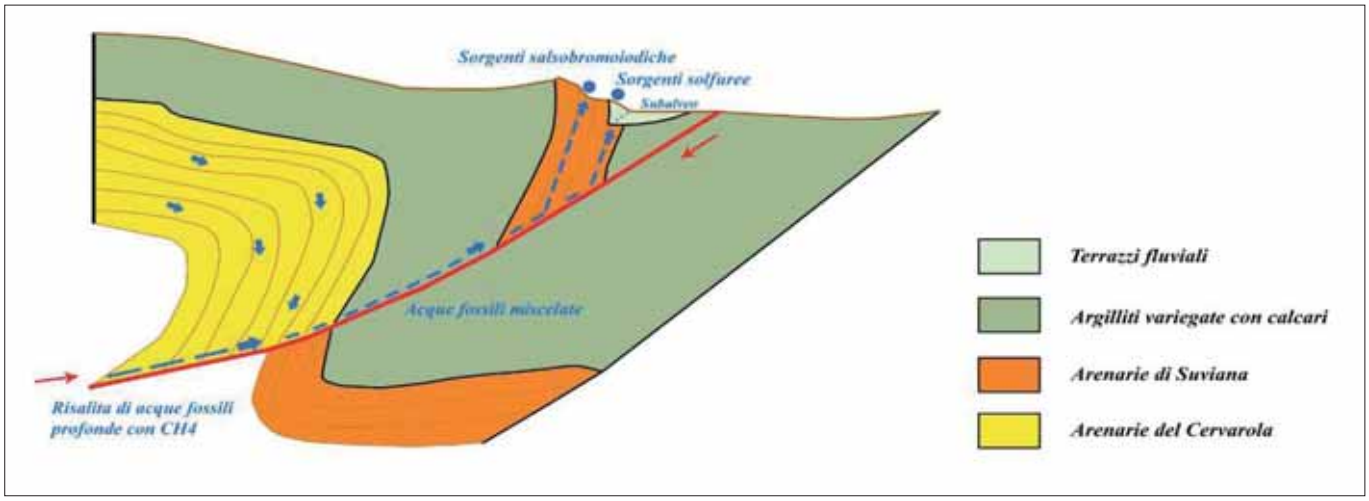


Figura 5 – Sezione geologica schematica illustrante la presunta circolazione sotterranea dei fluidi termali e la loro parziale miscelazione a varia profondità con acque meteoriche più fredde (da Ciancabilla, Bonoli, 2010, modificato)

CARATTERISTICHE CHIMICHE E FISICHE

Le acque salsobromoiodiche sono caratterizzate da un alto contenuto di cloruro di sodio e dalla presenza di iodio e bromo in quantità talvolta molto limitate, ma sufficienti da esercitare un effetto terapeutico. Le acque solfuree presentano composti solfurei, acido solfidrico libero o combinato, cui sono legate le proprietà curative. In tutte le sorgenti vi è presenza di metano, ammoniaca e solfati. Dall'analisi dei contenuti in cationi ed anioni di una sorgente salso bromo iodica e di una solfurea, si è notato che, nonostante le due acque abbiano proprietà terapeutiche diverse, esse appartengono allo stesso gruppo, ovvero quello delle clorurate sodiche. Tutte le acque di Porretta hanno dunque la stessa composizione di base.

GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA

Nel territorio ove è collocato il giacimento si distinguono diverse formazioni geologiche di origine marina con tettonica alquanto complessa (Regione Emilia-Romagna, 1995). L'area è interessata da 3 gruppi sovrapposti di unità originate da distinti domini paleogeografici (*Fig.* 4). La presenza delle acque idrotermali nel giacimento è legata alla formazione litologica delle Arenarie di Suviana, denominate storicamente "Arenarie di Porretta" che fungono come rocce serbatoio per la risorsa idrica sotterranea.

La formazione di Porretta si distingue, sia per la conformazione strutturale con andamento Appenninico (SE- NW), sia per la "particolare" morfologia caratterizzata da una maggiore acclività legata alla propria natura geologica.

La formazione è infatti costituita da torbiditi silicoclastiche del Miocene Superiore (20 milioni di anni- 15 milioni di anni) depositate in strati da decimetrici a metrici in cui è presente una marcata permeabilità secondaria per fratturazione. Gli strati torbiditici, che affiorano nell'area a monte dell'abitato di Porretta, presentano una giacitura fortemente inclinata (superiore ai 60°) per poi verticalizzarsi nel sottosuolo formando, dal punto di vista strutturale, una piega anticlinale rovesciata.

Le numerose discontinuità presenti tra i giunti di strato dei livelli torbiditici e la diversa porosità e cementazione dell'ammasso roccioso permettono la presenza di un vero e proprio acquifero di acqua idrotermale. I fluidi idrotermali sono originati da un serbatoio di acque fossili ospitate in acquiferi di origine sedimentaria di ambiente marino associati a giacimenti di idrocarburi e con alte mineralizzazioni a cloruri. Dai parametri fino ad ora rilevati (ed in corso di approfondimento con la collaborazione delle Università di Bologna, Firenze e Modena-Reggio Emilia), si presume che le acque porrettane abbiano una dominante provenienza crostale da acquiferi profondi marino sedimentari e possano provenire da una profondità compresa fra i 2.000 e i 5.000 m. La risalita, essenzialmente di tipo artesiano, favorita dalla presenza di gas metano, è dovuta ad una tettonica distensiva e ad un gradiente geotermico particolarmente sviluppato in questa porzione di territorio. Le sorgenti termominerali scaturiscono in superficie interamente nella formazione di Porretta a contatto con unità impermeabili quali le Argilliti variegate a calcari (AVC), costituendo, dal punto di vista idrogeologico, sorgenti per soglia di permeabilità sottoposta. La vena idrotermale principale segue il contatto tra le due formazioni in cui le argilliti fungono da acquicludo mentre le arenarie, estremamente tettonizzate, rappresentano il principale acquifero, contenente sistemi di circolazione superficiali e idrotermali. La risalita idrotermale subisce, presso la superficie, diversi fenomeni di miscelazione con acque fredde di ricarica laterali o ricarica attiva delle falde di subalveo determinando per alcune sorgenti una marcata mineralizzazione a solfuri a seguito di processi biochimici (Stefani, 2016) (*Fig.* 5).



Figura 6 – Alcune specie costituenti l'ecosistema ipogeo nella galleria Porretta Vecchia (dall'alto a sinistra: andoniscus dentiger, batteri solforiduttori, Physella acuta, Oxychilus



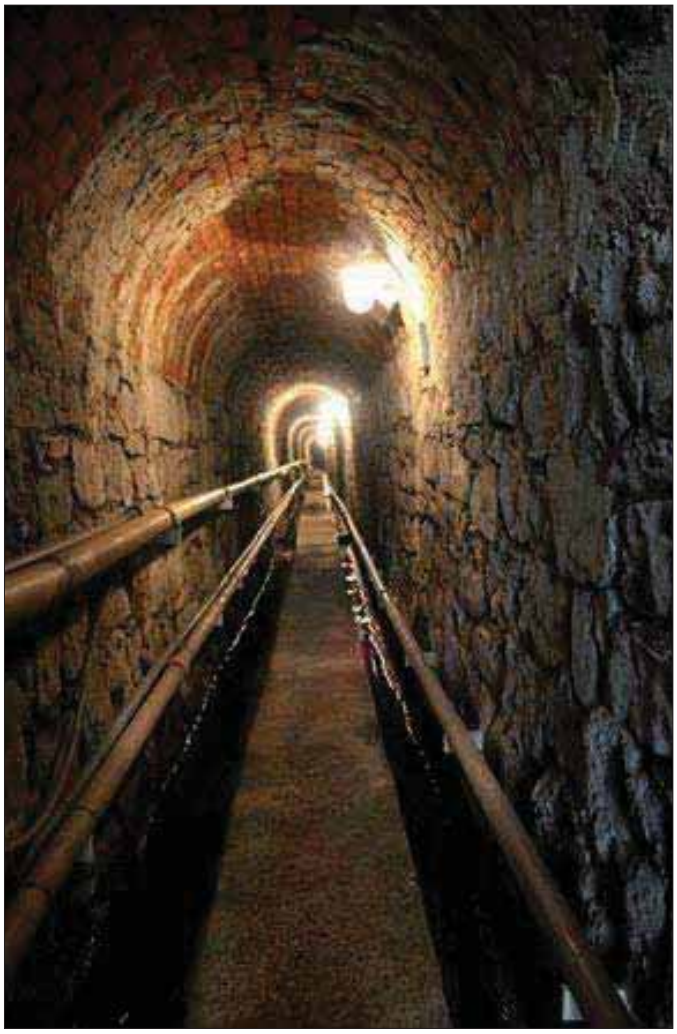


Figura 7 – La galleria delle sorgenti



Figura 8 – Il camino di sfiato



Figura 9 – Piccola sorgente e concrezioni minerali



Figura 10 – Esempio di sorgente con concrezioni minerali e batteri

LA RICERCA E IL MONITORAGGIO

Come accennato in precedenza, di recente è stata avviata una campagna di ricerca multidisciplinare con lo scopo di ampliare e attualizzare le conoscenze del bacino idrogeologico e ottimizzare la gestione della preziosa risorsa termale. Sono state coinvolte UNIBO, UNIFI e UNIMORE, l'Unione Speleologica Bolognese, Associazioni scientifiche, Professionisti del settore. Con tesi ed il supporto di docenti dell'Università di Bologna si sono approfonditi studi sui meccanismi di risalita delle acque termali e sul chimismo delle sorgenti, utilizzando i metodi più aggiornati.



Figura 11 – Sorgente termale con fenomeni di fuoriuscita di metano

Stanno proseguendo altri approfondimenti accademici sull'idrochimica e sulla geologia strutturale della formazione arenacea che favorisce con la sua fratturazione il percorso preferenziale delle sorgenti. È proseguita poi con una tesi di una studentessa di Ingegneria sulle radiazioni ionizzanti in una miniera termale con particolare riguardo al monitoraggio delle eventuali presenze di radon nelle cavità sorgentizie e nei vani tecnici. Particolare interesse soprattutto per quanto riguarda il monitoraggio degli ambienti ipogei che caratterizzano la galleria di origine antropica in argomento è stata la collaborazione con l'Unione Speleologica bolognese che ha messo a disposizione volontari in varie discipline fra cui un biologo esperto che ha monitorato l'ecosistema ipogeo presente nella galleria stessa. La convenzione sottoscritta si pone l'obiettivo di approfondire gli studi esistenti sul termalismo porrettano, con particolare riguardo alle gallerie artificiali della Porretta Vecchia e delle Donzelle, per dare un quadro conoscitivo ancor più preciso dell'andamento dell'intero giacimento. Si tratta infatti di una tipologia di cavità di alto interesse scientifico e sicuramente singolare, in quanto nel panorama nazionale non sono attualmente note o descritte situazioni analoghe. Mentre proseguono i rilievi ed i monitoraggi legati alla geologia ed idrogeologia presente in galleria, dalle prime indagini biologiche, si evidenzia l'esistenza di un semplice, ma efficiente ecosistema ipogeo, con la presenza di una piramide ecologica e quindi trofica, che, partendo da organismi produttori chemio autotrofi (Solfobatteri), passando ai fitofagi e detritivori (Isopodi, Gasteropodi, Ortotteri) arriva ai predatori con alcune specie di Ragni.

Tutto ciò è racchiuso in un ambiente dove le condizioni chimico fisiche (H2S) costituiscono importanti fattori limitanti che conferiscono a tale ecosistema un grande interesse che merita uno studio più approfondito (*Fig.* 6). Un altro programma di monitoraggio riguarda 4 delle 14 sorgenti presenti (due per tipologia di giacimento) mediante il rilevamento in continuo dei parametri più significativi per comprenderne l'evoluzione. Sono infatti state posizionate sonde multiparametriche che rilevano ogni 30 minuti la conducibilità elettrica, la temperatura ed il livello delle sorgenti rapportati con variabili esterne quali piovosità e livello idrometrico del fiume Reno. I primi risultati dimostrano l'estrema fragilità del sistema termale interessato direttamente da percolazioni di acque vadose, ma anche superficiali che non ne alterano però le proprietà curative.

LA GALLERIA E LA SUA VISITA

Allo scopo di convogliare le acque sgorganti dalla Sorgente Porretta Vecchia e di



Figura 12 – Piccolo lago di acqua termale



Figura 13 – Livello di grafite







Figura 14 – Varie tipologie di cristallizzazioni del quarzo di Porretta

unire due stabilimenti termali già all'epoca attivi, nel 1884 venne realizzato un cunicolo scavato nella roccia della lunghezza di 120 m con andamento sostanzialmente rettilineo. È quasi tutto rifasciato in muratura; la parte centrale si presenta in nuda roccia sulla volta, mentre le spalle sono in paramento di pietra. Vi era anche la recondita speranza di trovare altre sorgenti termali. Le aspettative furono premiate e si rinvennero alcune piccole scaturigini ed una significativa sorgente (Porretta Nuova), tuttora in esercizio (*Fig.* 7). A metà percorso fu realizzato anche un camino di sfiato dei gas presenti (metano e idrogeno solforato) che, sebbene in concentrazioni non pericolose per gli operatori, avevano necessità di una via d'uscita. Interessante è l'aspetto architettonico del manufatto, rotondeggiante, in pietra a vista e profondo una decina di metri (*Fig.* 8). Una prima, piccola sorgente fu individuata e per qualche tempo utilizzata. Ora non è più attiva, ma rappresenta un significativo esempio di struttura di captazione di acque termali. Interessante notare le concrezioni presenti, ricami di carbonato di calcio e solfati che dimostrano la ricchezza di Sali nelle acque (*Fig.* 9). Una seconda sorgente, a pochi metri lungo il percorso, ha una portata decisamente superiore e rappresenta bene la struttura "didattica" di una scaturigine termale. Da una crepa della roccia sgorga dal sottosuolo acque calda (24-25°) ricca di Sali e batteri solforiduttori. Le concrezioni giallastre al pelo dell'acqua ed i filamenti nerastri sott'acqua ne sono il segno tangibile (*Fig.* 10). La sorgente Porretta Nuova è ancora oggi utilizzata. Ha una temperatura superiore ai 27-28° ed è ricca di idrogeno solforato e di metano. La limpidezza dell'acqua che fuoriesce dalla roccia fa emergere l'ambiente subacqueo e consente di apprezzare il gorgoglìo del metano (*Fig.* 11). All'incirca a metà percorso appare uno slargo, un piccolo laghetto sotterraneo di acqua tiepida (21°), trasparente e completamente incastonato nella roccia. Non se ne conosce la passata utilizzazione. È comunque uno spettacolo suggestivo pensando che abbiamo oltre 30 metri di roccia sulla testa (*Fig.* 12). Nei 70 metri di cunicolo scavato direttamente nella roccia appaiono, qua e là, emergenze minerarie di sicuro interesse, di varia origine e frutto di processi complessi e diversi fra loro. La prima è una vena di grafite naturale con spalmature di solfato che attraversa la sommità della galleria. La grafite è un minerale costituito da laminette di carbonio naturale, compresso dalle forti spinte durante la formazione degli Appennini (*Fig.* 13). Nelle immediate vicinanze della grafite tre esempi della straordinaria varietà di cristallizzazione del quarzo. Famoso nel mondo mineralogico, il quarzo di Porretta può presentarsi in diverse varianti. In galleria



Figura 15 – Campioni di materiali diversi posti in ambiente estremo

abbiamo la macrocristallina, un aggregato di cristalli centimetrici trasparenti e, racchiusi in un guscio di solfato di calcio, piccoli cristalli lattei e opachi e una piccola faglia satura di quarzo microcristallino (*Fig.* 14). La visita si conclude con la suggestiva sorgente Porretta Vecchia, conosciuta dai romani, molto calda (29°), cristallina e ricca di idrogeno solforato. Al suo interno è stato posizionato un sensore che misura in continuo i parametri essenziali per monitorare anche la più piccola variazione delle caratteristiche dell'acqua termale.

All'interno della caverna, satura di gas (metano, idrogeno solforato e vapore acqueo) e a temperature elevate sono state posizionate anche tessere di materiale diverso (arenaria, gesso, marmo calcestruzzo, ecc.) per misurarne il livello di degradazione nel tempo. È una ricerca di un network di università, fra cui quella di Bologna, per valutare la resistenza dei materiali da costruzione in ambienti aggressivi (*Fig.* 15). Nel vano prospiciente la sorgente sono presenti due vasche in marmo di Carrara di epoca napoleonica, utilizzate per i bagni termali; anche gli arredi sono di quell'epoca (*Fig.* 16). Dopo opportuni interventi di messa in sicurezza la galleria è stata aperta a visite guidate per far conoscere le meraviglie presenti. È un viaggio all'indietro di milioni di anni e una scoperta di un ambiente naturale che ha destato un interesse sempre maggiore con una presenza di circa 1400 visitatori in tre anni (*Fig.* 17).



Figura 17 – Visitatori in galleria

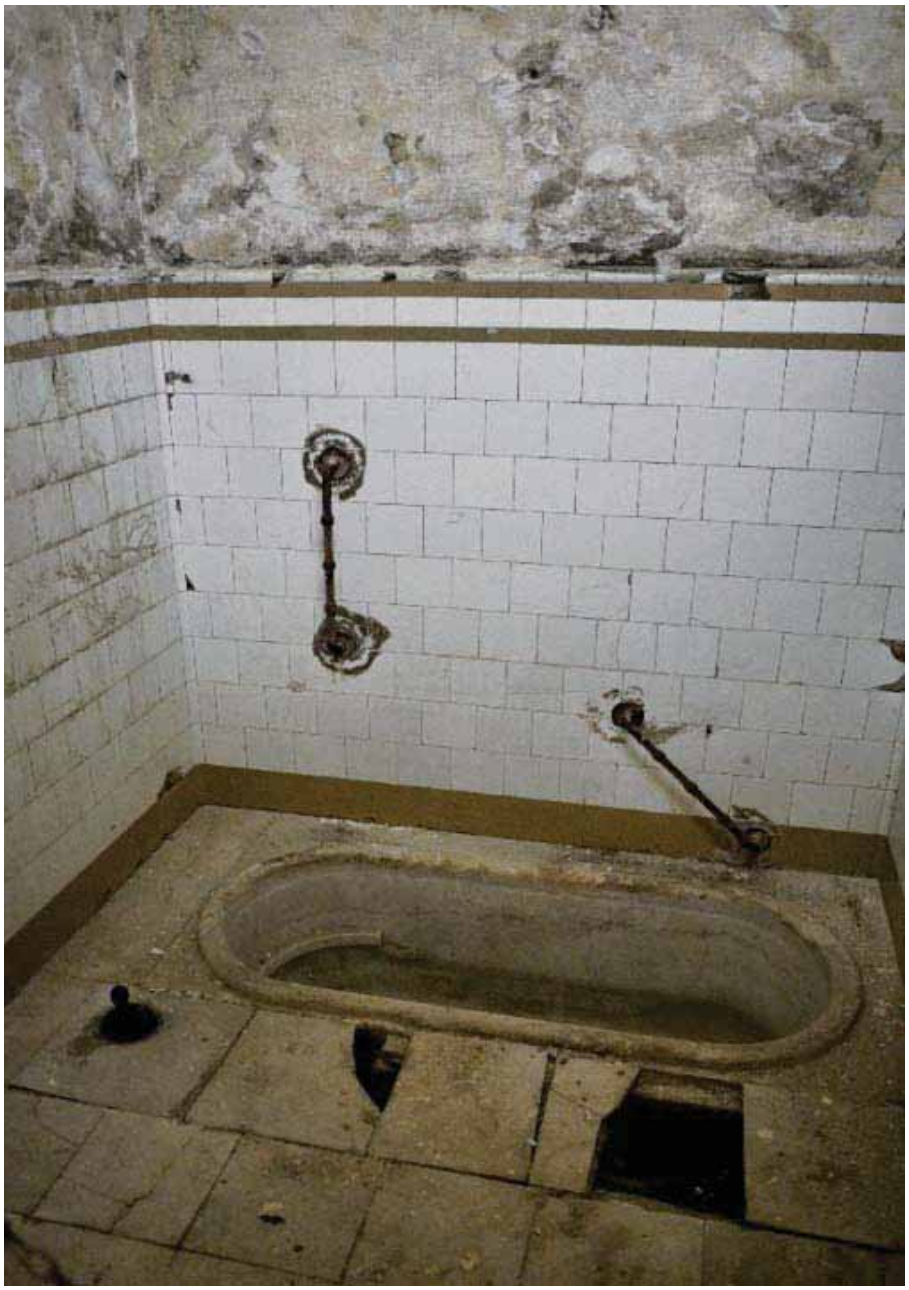


Figura 16 – Vasca termale del primo '800

BIBLIOGRAFIA

Ciancabilla F., Terzi L., Elmi C. (1972), *Indagine idrologica preliminare sulle acque termominerali di Porretta. Acque e Terme*, XIX, n. 3.

Amadesi E., Brighenti G., Ciancabilla F., Gondoni A., Vitali D. (1979), *Idrogeologia di un bacino termale: "Le acque di Porretta Terme" - Notiziario dell'Associazione Mineraria Subalpina* Anno V, n. 2.

Bonoli A., Ciancabilla F., Elmi C. (1995), *Le acque minerali di Porretta Terme - Quarry & Construction.*

Regione Emilia Romagna (1995), *Carta Geologica dell'appennino emiliano-romagnolo scala 1:10.000 Sezione 251030 (Lizzano in Belvedere).*

Ciancabilla N., Bonoli A. (2010), *Nuovi approfondimenti sulla termalizzazione e mineralizzazione delle acque termominerali di Porretta Terme. Il Geologo dell'Emilia-Romagna.*

Rivalta G (2016), *L'ecosistema ipogeo nelle gallerie sorgentizie delle Terme di Porretta (Bologna-Er). SottoTerra* (Unione Speleologica Bolognese).

Stefani A. (2016), *Inquadramento geologico ed idrogeologico del sistema idrotermale Porrettano Alto Reno Terme (Bologna). Tesi di Laurea.*

Vannini S. (2016), *Il giacimento di acque termominerali di Porretta - Rapporto sullo stato di fatto Relazione interna Terme di Porretta.*

Vannini S., Demaria D., Stefani A. (2017), *Le gallerie di captazione delle acque termali di Porretta (Appennino Bolognese).* Opera Ipogea. Rivista della Società Speleologica Italiana.

Vannini S. (2017), *Le sorgenti termali della Porretta - Appennino Welness - La rete del Benessere dell'Appennino Bolognese.*

Aspetti geomorfologici e cavità d'origine antropica del territorio dell'Ecomuseo della Tuscia Rupestre (Viterbo)

Andrea Sasso
Ecomuseo della Tuscia Rupestre
E-mail: info@emtr.it

Geomorphological features and artificial cavities in Tuscia Rupestre Ecomuseum area (Viterbo, Italy)

Parole chiave (*key words*): Lago di Vico *(Vico Lake)*, vulcano di Vico *(volcano of Vico)*, tombe etrusche (*etruscan tombs)*, ignimbriti (*ignimbritic deposits)*, ecomuseo *(ecomuseum)*, tufo rosso a scorie nere *(red tuff with black scoria)*

ABSTRACT

In Italy the geographical distribution of artificial cavities is strictly connected with geological and geomorphological features. Significant concentrations are in three regions: two groups in Sicily, two in Puglia and one in Lazio: the human cultures that grew up in these areas were deeply influenced by the geological conformation of the territory and, due this, they appear so close despite the distance among themselves.

In Lazio, especially in Tuscia (the northern part of the region), the wide distribution of artificial cavities is connected to the volcanos sabatinus (Lake of Bracciano), vulsinus (Lake of Bolsena), ciminus (Cimini mountains) and vicanus (Lake of Vico) and their ignimbritic deposits, that are characterized by a hard consistency.

This brief contribution is about the area where, about 151mA ago, were deposed by the volcan of Vico the ignimbritic layers: these rocks, thanks to specific characteristics, were digged, mined, regularised to create tombs, houses, buildings, defensive walls, aqueducts, sewers etc..

The geological and geomorphological homogeneity of the vican area is the reason why all the communities of this district, through space and time, evince hard analogies in the human activities and in the adaptation to the local resources, so much to showing a kind of "cultural landscape", taken to found an ecomuseum.

RIASSUNTO

Nel nostro Paese la distribuzione delle cavità realizzate dalle attività umane mostra delle significative concentrazioni geografiche strettamente connesse agli aspetti geologici e geomorfologici che caratterizzano quelle aree.

Si notano significative aree di concentrazione in tre regioni: due aree in Sicilia, due in Puglia ed una nel Lazio: le culture materiali che in esse si sono succedute nel tempo, sono state profondamente condizionate dalla conformazione del territorio e mostrano significative somiglianze tra di loro.

Nel Lazio, e in particolare nella Tuscia, assistiamo ad una notevole diffusione di strutture ipogee, quasi esclusivamente nelle porzioni di territorio dove i complessi vulcanici sabatino, vulsino, cimino e vicano hanno depositato prodotti che hanno raggiunto una consistenza litoide.

Questo breve intervento riguarda, nello specifico, le aree in cui sono stati depositati attorno a 151.00 anni fa i materiali espulsi dal complesso vulcanico vicano (*Fig.* 1). Queste rocce, per le loro caratteristiche fisico meccaniche, sono state nel tempo scavate,

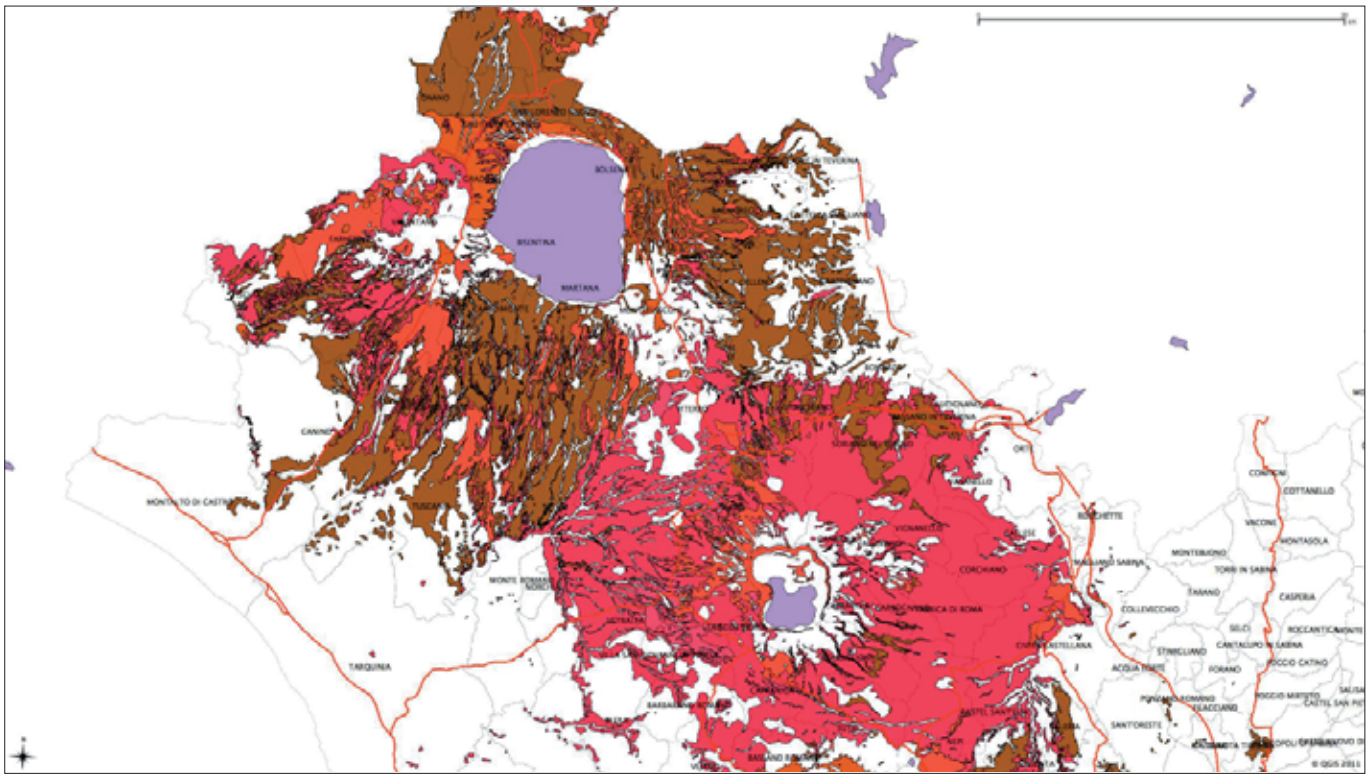


Figura 1 – Carta della distribuzione dei materiali vulcanici di consistenza litoide

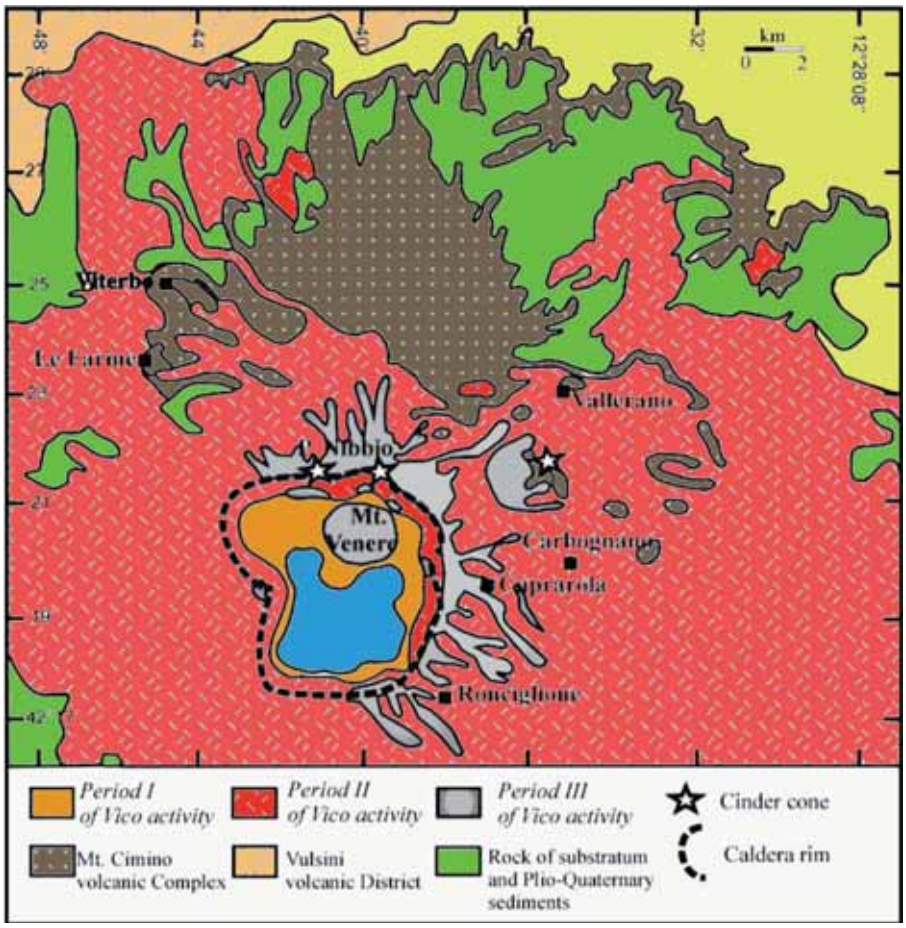


Figura 2 – Distribuzione dei prodotti emessi dal distretto vicano (rielab. da PERINI et al. 2004)

cavate, regolarizzate per creare strutture di diversa destinazione d'uso, funerario, infrastrutturale, abitativo, militare, idraulico e così via. L'uniformità geologica e dunque geomorfologica dell'area vicana, si traduce in una comune modalità nell'impiego e comunque nell'adattamento delle attività umane dell'area, tali da delineare una sorta di "paesaggio culturale" poi assunto quale motivo principale per l'istituzione di un ecomuseo.

1. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

Il distretto vulcanico vicano è situato nel Lazio settentrionale, in provincia di Viterbo e rappresenta il più piccolo edificio vulcanico della c.d "Provincia Magmatica Romana", comprendente anche i distretti Vulsino, Sabatino e i Colli Albani).

Al centro del distretto è uno stratovulcano con caldera centrale di sprofondamento (circa 7 km di diametro) con un cono più giovane sviluppatosi all'interno della caldera stessa, Monte Venere (Mattias & Ventriglia, 1970) (*Fig.* 2).

Il vulcanesimo vicano è caratterizzato da un magmatismo potassico ed ultrapotassico sotto saturo in silice (Perini *et al.*, 2000 e 2004).

La storia eruttiva di Vico può essere sinteticamente suddivisa in 3 periodi (Perini *et al.*, 2000; Perini *et al.*, 2004; Conticelli *et al.*, 2010): A, B e C, preceduti da una dubbia (trattandosi di prodotti molto antichi) fase iniziale di lave trachibasaltiche datate 990.000+- 20.000 anni riportate da Sollevanti, 1983 e Bertagnini & Sbrana, 1986:

A. il primo periodo coinvolge una fase iniziale effusiva intermittente con fasi esplosive di attività tra i 419.000 e i 400.000 anni;
B. il secondo periodo è la principale fase esplosiva ed ha avuto luogo dopo circa 100.000 di quiescenza, l'età di questo periodo va dai 305.000 anni +- 8.000 ai 138.000 anni +- 2.000;
C. il terzo periodo riguarda una fase effusiva e freatomagmatica con i coni di scorie di Poggio Nibbio e le lave di Monte Venere, questo periodo va da circa 138.000 a 95.000 anni +-10.000.

Ai fini del presente lavoro è di grande interesse un momento della seconda fase, avvenuto attorno a 151.000 anni fa, in cui una serie di potenti eventi esplosivi, succedutisi per circa 5000 anni, ha portato al collasso calderico a seguito dell'emissione di una quantità enorme di materiali, circa dieci chilometri cubi distribuiti su un'area di quasi 800 chilometri quadrati. Gran parte di queste emissioni, attribuite alla cosiddetta "Formazione di Sutri" (Perini, Conticelli & Francalanci, 1997; Bear *et al.*, 2009), ha costituito una coltre spessa anche 80-100 metri, formata da piroclastiti di diversa granulometria poi consolidatesi nel tempo a formare il cosiddetto "tufo rosso a scorie nere" (Mattias & Ventriglia, 1970), già definito "ignimbrite C (Locardi, 1965; Bertagnini & Sbrana, 1986) e "formazione di Sutri". Questa formazione ha profondamente caratterizzato gran parte dei territori posti radialmente attorno alla caldera policentrica di Vico, ed è rappresentata da una roccia, impropriamente definita "tufo", che contraddistingue dunque gran parte del paesaggio locale (*Fig.* 3). Caratteristica della geomorfologia vicana sono le "forre", profondi canaloni scavati dai corsi d'acqua nei periodi post glaciali, talora così in profondità da portare nuovamente all'affioramento gli strati rocciosi pliocenici, precedenti le fasi vulcaniche. Le caratteristiche meccaniche e fisiche di questa roccia la rendono facile all'escavazione e alla sua modellazione: per questo, sin dai tempi più antichi, in essa e con essa sono state realizzate abitazioni, sepolcri, innumerevoli strutture di diverso tipo ed utilizzo. In età preistorica, etrusca, romana, medievale e via via sino ad oggi, questa roccia ha costituito la matrice di tracce indelebili che, tutte assieme, contribuiscono a dare una fisionomia suggestivamente "antropizzata" ad un paesaggio naturale, quello della "Tuscia rupestre", assolutamente peculiare che ha ispirato numerosi artisti (Sasso, 2005, Sas-



Figura 3 – Il c.d. "tufo rosso a scorie nere"

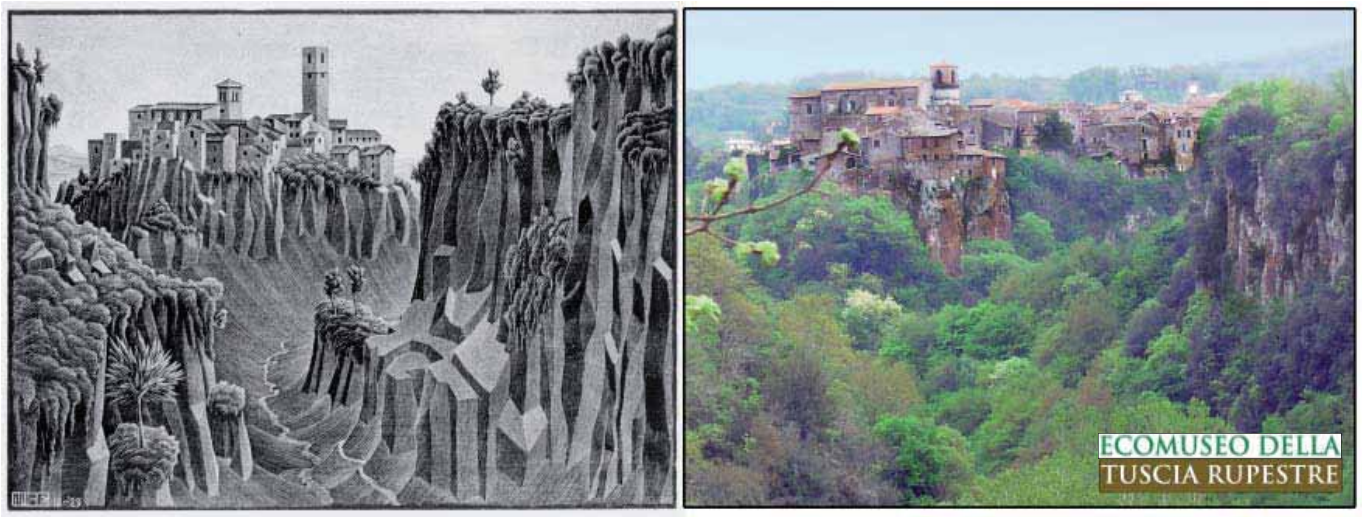


Figura 4 – Il caratteristico paesaggio della Tuscia Rupestre e la rappresentazione di M.C. Escher del 1929

so, 2010; Fattori C., Mancinella D., Sasso A., 2014) (*Fig.* 4).

Destano grande suggestione soprattutto le migliaia di cavità artificiali realizzate all'interno della roccia: semplici fosse o talora, come nel caso di alcuni sepolcri d'età etrusca, strutture rupestri provviste di un apparato decorativo e scenografico destinato ad aumentarne l'impatto visivo, soprattutto mediante un uso sapiente del chiaroscuro formato dall'alternanza vuoto/pieno.

2. L'ECOMUSEO DELLA TUSCIA RUPESTRE

La diffusione e l'uniformità degli aspetti geomorfologici di questo comprensorio, ma soprattutto le tracce lasciate in esso dall'Uomo nel tempo, sono alla base dell'istituzione di un museo diffuso, o "ecomuseo", fondato appunto sul paesaggio e sulle modalità insediative e operative condotte da tutte le generazioni di umani, nonché sulle stratificazioni culturali che vi si sono succedute. Ad oggi aderiscono all'Ecomuseo, istituito nel 2013, sette amministrazioni comunali della provincia di Viterbo (*Fig.* 5), i Comuni di Barbarano Romano, Blera, Capranica, Vejano, Vetralla, Villa San Giovanni in Tuscia e Lubriano. Sono in corso contatti con altre amministrazioni per aumentare il territorio ecomuseale. Il personale che vi opera volontariamente è impegnato nella ricognizione e nel censimento delle risorse geologiche, archeologiche ed architettoniche presenti in quest'area, coordinato dal soggetto promotore dell'Ecomuseo, l'Istituto

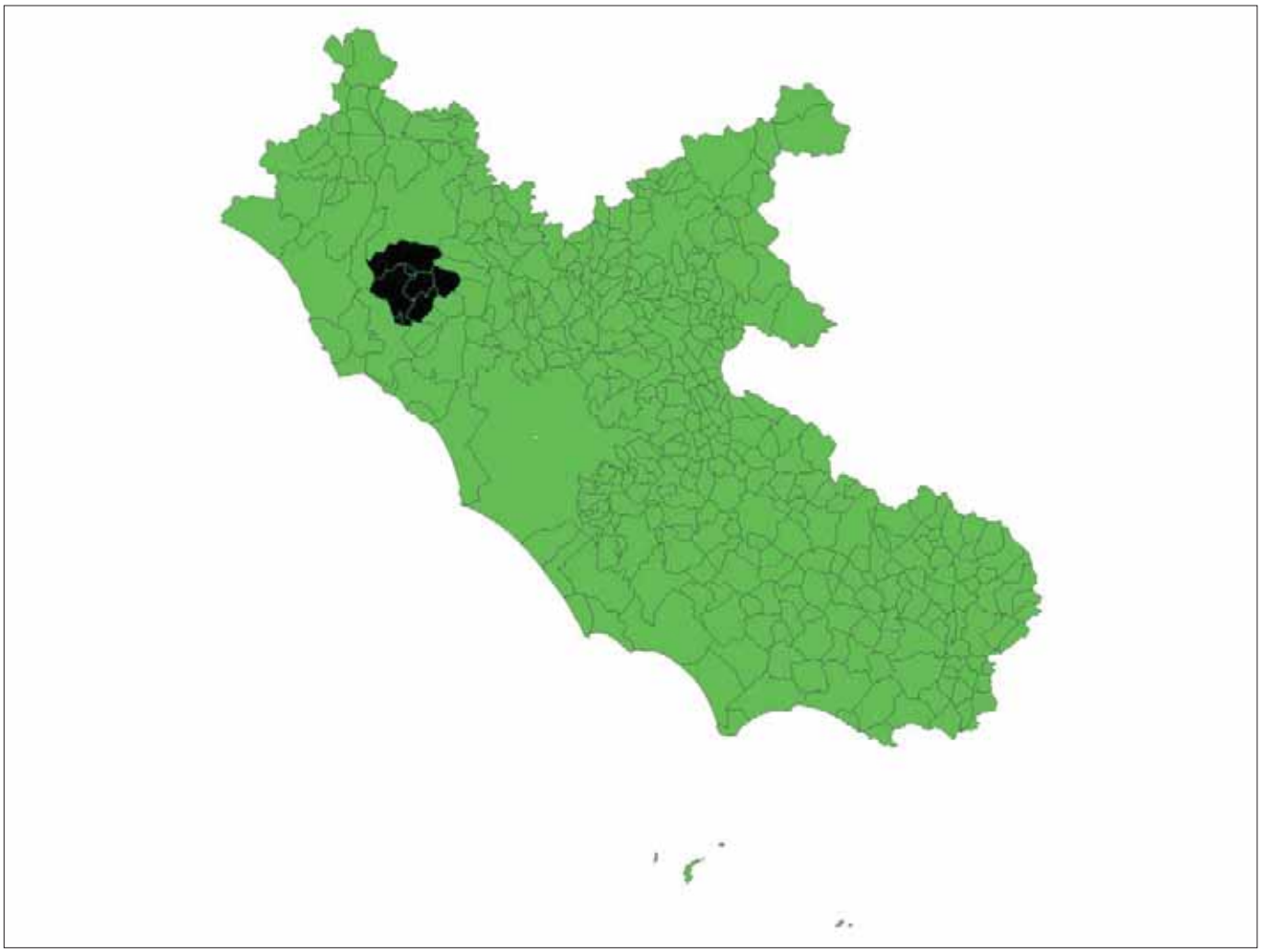


Figura 5 – Ubicazione dell'ecomuseo nel territorio regionale

Tabella 1 – Classificazione degli ipogei artificiali di interesse storico, archelogico e speleologico nell'EMTR e aree esterne geologicamente rilevanti strumentale del complesso delle cd. "tombe a portico" di San Giuliano

Cod	Sottotipologia	Presenza
	A Opere idrauliche	
A1	regimazione/bonifica	SI
A2	captazione	SI
A3	trasporto	SI
A4	cisterne	SI
A5	pozzi	SI
A6	opere di distribuzione	SI
A7	fognature	SI
A8	canali navigabili	NO
A9	ghiacciaie/neviere	NO (con riserva)
A10	condotti di funzione sconosciuta	SI
	B Opere insediative civili	
B1	insediamenti stabili abitativi	SI
B2	ricoveri temporanei/rifugi	SI
B3	opifici	SI
B4	magazzini	SI
B5	silos sotterranei	SI
B6	stalle	SI
B7	colombari	SI
B8	altri insediamenti	SI
	C Opere di culto	
C1	luoghi di culto	SI
C2	opere sepolcrali	SI
	D Opere militari	
D1	opere difensive varie	SI
D2	gallerie e camminamenti	N.D.
D3	gallerie di mina e contro-mina	NO
D4	postazioni di sparo	NO
D5	depositi	NO
D6	rifugi	NO
D7	rifugi per civili	NO
	E Attività estrattive	
E1	cave di inerti	SI
E2	miniere metallifere	NO
E3	miniere di altre sostanze	SI
E4	sondaggi minerari	SI
E5	coltivazioni sotterranee	NO
	F Vie di transito	
F1	gallerie stradali	SI
F2	cunicoli di transito	SI
F3	gallerie ferroviarie, tramviarie, di funicolari	NO
F4	pozzi non idraulici e discenderie	SI
	G altro	
G1		N.D.
G2		N.D.

Tuscia Rupestre, un organismo a base associativa senza scopo di lucro. Le attività, talora supportate da alcune amministrazioni locali, procedono anche con il censimento delle cavità naturali ed artificiali del comprensorio realizzandone, compatibilmente con i fondi disponibili, il rilevamento elettronico (laser 3D) e stereofotografico delle strutture rupestri a rischio di crollo (*Fig.* 6).

Viste le caratteristiche meccaniche della roccia ignimbritica, l'assoluta mancanza di manutenzione e di interventi di consolidamento conservativo determina spesso il crollo di queste particolari strutture, sottoposte agli agenti atmosferici e all'azione della vegetazione, come si è ad esempio assistito a Norchia con la celebre tomba etrusca del *Charun* nel 2009.

Nelle azioni poste in atto e previste dall'Ecomuseo, grande valore è dato dall'interazione geologia – geomorfologia – attività umane che, oltre ad un interesse meramente scientifico, assume un grande valore per la promozione del territorio: la suggestione dovuta a tale rapporto Uomo-Ambiente-Paesaggio-Prodotti è in grado di attirare potenziali flussi turistici interessati alle vacanze culturali, ambientali, alle produzioni locali e al paesaggio "rupestre" che fa da scenario alle risorse.

In questa sede, relativamente al tema del convegno, si enunciano sinteticamente i tipi di strutture ipogee individuati come meritevoli di un'indagine ed una documentazione approfondita nonché, in alcuni casi, di un'adeguata conservazione, propedeutica ad una loro fruizione "attenta" e rispettosa dei luoghi.

Sulla base della classificazione tipologica proposta dalla Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana (Galeazzi, 2013), delle migliaia di strutture ipogee conosciute, citiamo i tipi individuati, nella *Tab.* 1.

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Per le caratteristiche fisiche e meccaniche della roccia "tufacea", caratterizzata da una forte permeabilità e da una struttura ricca di microcavità, l'azione degli agenti atmosferici, in particolare acqua e vento, risulta estremamente efficace nella progressiva distruzione delle strutture. L'effetto crioclastico, che avviene nelle rocce imbevute d'acqua a basse temperature, è affiancato, nella distruzione profonda della roccia, dall'azione degli apparati radicali delle piante: la suggestione "romantica" delle rovine etrusche e romane avvolte dalla vegetazione lascia purtroppo il posto alla consapevolezza della progressiva scomparsa di tante strutture di rilevante interesse storico ed archeologico. La minaccia per gli ipogei è legata soprattutto alle parti esterne, esposte agli agenti atmosferici, che abbiano o no elementi decorativi architettonici: in taluni casi crolli evidenti minacciano la stabilità e accessibilità delle strutture anche in profondità.

Pochi siti rupestri hanno visto lavori di consolidamento delle strutture e oggi gran parte del patrimonio giace in un colpevole stato di abbandono, nonostante i flussi turistici che arrivano in molti dei siti, in incremento esponenziale, attratti non solo dalla bellezza dei luoghi ma anche dal concetto di "morte imminente" di borghi e monumenti sottoposti all'azione del tempo. Uno dei primi impegni del progetto ecomuseale, successivo alla catalogazione e documentazione dei beni sopra elencati, è quello di monitorare, censire e rilevare strumentalmente il maggior numero possibile di siti, segnalandone le condizioni di conservazione. Altro compito è quello di valutarne l'accessibilità e, di concerto con le istituzioni preposte alla salvaguardia nonché con i gestori (molti sono i siti in proprietà private) consentire la fruizione, almeno di

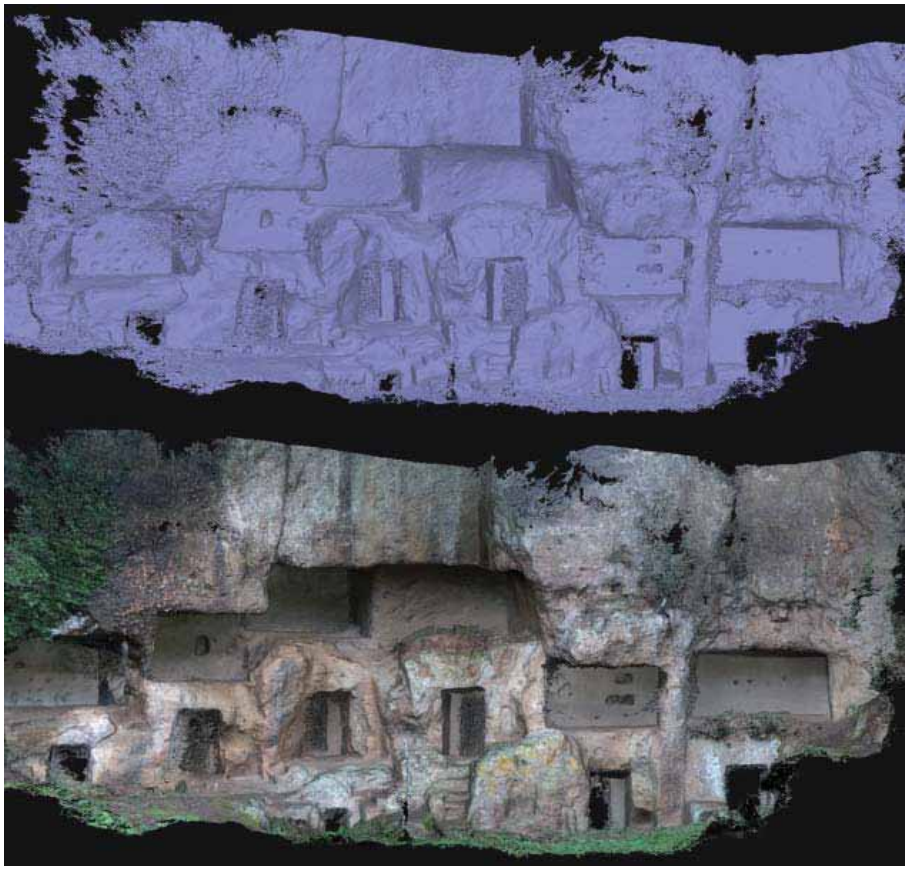


Figura 6 – Documentazione delle strutture rupestri: la restituzione grafica del rilievo

quelli accessibili. Vista la natura e l'aspetto paesistico dei luoghi, si punta all'apposizione di elementi informativi non invasivi e collegati alle funzionalità di smartphone e video-audio-guide. In una prima fase sono state organizzate inoltre numerose visite guidate, escursioni e iniziative di citizen science.

Il connubio geologia-ambiente-archeologia risulta essere in grado di attrarre flussi turistici di qualità che vanno gestiti in maniera sostenibile, per non compromettere la natura stessa dei luoghi: purtroppo questo sta accadendo in siti della medesima provincia, in cui il dissesto idrogeologico è divenuto l'elemento attrattivo di un turismo di massa assolutamente fuori luogo.

***

Si ringraziano i geologi Enrico Caprilli e Gabriele Trevi, nonché la Federazione Speleologica Hypogea per la collaborazione.

BIBLIOGRAFIA (IN ORDINE DIACRONICO)

Locardi E. (1965), *Tipi di ignimbriti di magmi mediterranei. Le ignimbriti del vulcano di Vico.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. 72, Firenze, pp. 55-173.

Mattias P. P., Ventriglia U. (1970), *La regione vulcanica dei monti Sabatini e Cimini,* Mem. Soc. Geol. It., 9, 331-384.

Colonna G. (1974), *La cultura dell'Etruria meridionale interna, con particolare riguardo alle tombe rupestri*, in "Atti VIII Conv. Naz. St.Etr. (Orvieto 1972), Firenze, pp. 253-263.

Sollevanti F. (1983), *Geologic, volcanologic and tectonic setting of the Vico-Cimino area, Italy.* J. Volc. Geoth. Res., 17, pp. 203-217.

Bertagnini A., Sbrana A. (1986), *Il vulcano di Vico: stratigrafia del complesso vulcanico e sequenze eruttive delle formazioni piroclastiche*, Mem. Soc. Geol. It, 35, 699-713.

Di Gennaro F. (1986), *Forme d'insediamento tra Tevere e Fiora dal Bronzo finale al principio dell'Età del Ferro,* Firenze.

Di Gennaro F. (1990), *Aspetti delle ricerche sull'assetto territoriale mediotirrenica in età* protostorica, in Gedenkschrift fur Jurgen Driehaus, Mainz am Rein, pp. 203-224.

Perini G., Conticelli S., Francalanci L. (1997), *Inferences of the volcanic history of the Vico volcano, Roman Magmatic Province, Central Italy: stratigraphic, petrographic and geochemical data,* . Mineral. Petrogr. Acta, XL, pp. 67-93.

Prola G., Sasso A. (1997), *Guida del Parco Regionale Marturanum*, Ed. Ente Parco Regionale Marturanum - Regione Lazio.

Perini G., Conticelli S., Francalanci L., Davidson J.P., 2000, *The relationship between potassic and calc-alkaline post-orogenic magmatism at Vico volcano, central Italy, in* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 95, 247-272.

Nappi G. (2002), *I laghi vulcanici dell'Italia centrale: origine ed evoluzione strutturale,* in "Proc. International Conference Residence Time in Lakes: Science, Management, Education", Bolsena (Viterbo-Italy) Sept 29th – Oct 3rd 2002, Bolsena (Vt), 116-128.

Nappi G., Valentini L., Mattioli M. (2004), *Ignimbritic deposits in central Italy: pyroclastic products of the quaternary age and Etruscan footpaths,* Field Trip Guide Book, P09 32° IGC, Florence (Italy) 20-28 August 2004, Firenze, p. 32.

Perini G., Francalanci L., Davidson J.P., Ponticelli S. (2004), *Evolution and genesisi of magmas from Vico volcano, central Italy: multiple differentiation pathways and variable parental magmas* (2004). Jourla of Petrology, vol. 45-1, 139-182.

Sasso A. (2005), *Limes 310. Idee per un Parco Geo - Archeologico interprovinciale in un territorio etrusco di confine: dalla Valle Tiberina alla costa tirrenica*, in "Atlante della Geodiversità del Lazio", Regione Lazio, Assessorato Ambiente e Cooperazione tra i Popoli - ARP, pp. 173-179.

Prola G., Sasso A. (2006), *Guida ai Servizi del Parco Regionale Marturanum*, Ed. Regione Lazio, Assessorato Ambiente, Roma.

Di Gennaro F., Barbaro B. (2008), *Tabella riassuntiva degli insediamenti dell'età del bronzo in Etruria meridionale*, in: Preistoria e protostoria in Etruria VIII, Milano-Macerata, vol. I, pp. 129-149.

Cimarelli C., De Rita D. (2008), *Note illustrative alla carta della geodiversità dei distretti vulcanici cimino e vicano, Ed. ARP - Regione Lazio.*

Sasso A. (2009), *Barbarano Romano*, in "La Valle del Mignone", Guide territoriali dell'APT di Viterbo.

Bear A.N., Cas R.A.F., Giordano G. (2009), *The implications of spatter, pumice and lithic clast rich proximal co-ignimbrite lag breccias on the dynamics of caldera forming eruptions: The 151ka Sutri eruption, Vico Volcano, Central Italy, in "*Journal of Volcanology and Geothermal Research", 181, 1-24.

Conticelli S., Laurenzi M.A., Giordano G., Mattei M., Avanzinelli R., Melluso L., Tommasinis., Boari E. (2010), *Leucite-bearing (kamafugitic/leucititic) and-free (lamproitic) ultrapotassic rocks associated shoshonites from Italy: constrainsts on petrogenesis and geodynamics*, in *"*Journal of the Virtual Explorer", vol. 36.

Sasso A. (2010), *I geoarcheositi*, in Fattori C., Mancinella D., "La Conservazione del Patrimonio Geologico del Lazio. Materiali, modelli, esperienze". Ed. ARP – Regione Lazio, Roma, pp. 199-201.

Di Gennaro F. (2012), *Conoscenze e obiettivi della protostoria medio-tirrenica quarant'anni dopo Luni e Narce*, in: Preistoria e Protostoria in Etruria X, Milano, Vol. II, pp. 529-546.

Di Gennaro F. (2012), I*n vetta all'Etruria prima degli Etruschi. Testimonianze dell'età del bronzo sul Monte Cimino (Soriano nel Cimino, VT)*, in: Preistoria e Protostoria in Etruria X, Milano, Vol. II, pp. 547-552.

Galeazzi C. (2013), *The typological tree of artificial cavities: a contribution by the Commission of the Italian Speleological Society*, in OPERA IPOGEA - Proceedings of the international workshop on speleology in artificial cavities, Torino/Italy – May 18-20, 2012, pp. 11-20.

Sasso A. (2014), *Sulle tombe a portico di San Giuliano* in "L'Etruria meridionale rupestre" - Atti del convegno internazionale "L'Etruria rupestre dalla Protostoria al Medioevo. Insediamenti, necropoli, monumenti, confronti" Barbarano Romano - Blera, 8-10 ottobre 2010, Ed. Palombi, Roma.

Fattori C., Mancinella D., Sasso A. (2014), *Siti Geologici di importanza Regionale e iniziative di valorizzazione dei Geo-Archeositi* , in "L'Etruria meridionale rupestre" - Atti del convegno internazionale "L'Etruria rupestre dalla Protostoria al Medioevo. Insediamenti, necropoli, monumenti, confronti" Barbarano Romano - Blera, 8-10 ottobre 2010, Ed. Palombi, Roma, pp. 533-536.

Fonseca F., Rossi R., Trevi G. (2017), *Note Illustrative della carta vulcanologica di Monte Venere e Poggio Nibbio (Vt)*, relazione per l'insegnamento di Vulcanologia della facoltà di Geologia dell'Università di Roma La Sapienza.

CONSIGLIO NAZIONALE DEI GEOLOGI

Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione

SIGEA 25° 1992-2017

Sala convegni CNR - Piazzale Aldo Moro, 7 - Roma
1° dicembre 2017 ore 9.30-18.30
Programma sessione orale

08.00-09.30 | Accredito in sala partecipanti registrati

09.30-10.00 | Apertura lavori e saluti delle Autorità
Antonello Fiore, presidente della SIGEA - Società Italiana Geologia Ambientale
Fabio Trincardi, direttore del Dipartimento Terra e Ambiente del CNR
Claudio Campobasso, direttore del Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia dell'ISPRA
Gino Mirocle Crisci, rettore dell'Università della Calabria
Roberto Troncarelli, presidente dell'Ordine dei Geologi del Lazio
Arcangelo Francesco Violo, segretario del CNG - Consiglio Nazionale dei Geologi

10.00-11.45 | **Sessione A - Censimento a catalogazione cavità**
Moderatore MARIO PARISE

10.00 | *Catasto Speleologico Nazionale delle Cavità Artificiali. Classificazione, interventi di tutela e monitoraggio conseguiti grazie ai dati speleologici, prospettive future* – Belvederi G., Betti M., Bixio R., Galeazzi C., Galeazzi S., Germani C., Mazzoli M., Meneghini M., Parise M. & Saj S.

10.20 | *Cave sotterranee nel Colle Aventino. Cartografia storica, documenti di archivio e nuove indagini geoarcheologiche* – Rustico L. & Narducci R.

10.35 | *Primo contributo alla realizzazione della Carta delle Cavità Sotterranee di Roma* – Bisconti F., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Huber T., Lanzini M., Nisio S., Paolucci R., Roma M., Stranieri I. & Succhiarelli C.

10.50 | *L'inventario delle cavità di origine antropica e la Banca Dati territoriale online del territorio della Città Metropolitana di Napoli* – Guarino P.M., Carta R., Niceforo D.M.A., Roma M., Mari R., Soravia M., Napolitano P., Palma G., Sgariglia F. & Santo A.

11.05 | *Opere belliche: classificazione dei rifugi per categoria tecnico-costruttiva e funzione d'uso* – Grassi L.

11.20 | *Cittaducale (Rieti): i rischi connessi all'esteso reticolo di cavità antropiche* – Damiani G., Menotti R. M., Millesimi F., Rinaldi C. & Sabatini F.

11.45-13.30 | **Sessione B - Analisi della pericolosità territoriale**
Moderatrice STEFANIA NISIO

11.45 | *Le condizioni di stabilità degli ipogei in ammassi rocciosi calcarenitici: rapporti tra geologia e propensioni al dissesto* – Andriani G.F. & Parise M.

12.05 | *L'utilizzo delle fotografie aeree dell'Aerofototeca Nazionale degli anni precedenti l'urbanizzazione del suburbio romano per l'individuazione e catalogazione di cavità di crollo connesse all'evoluzione perniciosa di cavità sotterranee legate ad attività estrattive* – Giannella G. & Rosa C.

12.20 | *Analisi geostrutturale su nuvola di punti acquisita con laser scanner 3d: applicazione alla grotta di Cocceio, in Bacoli (Campania, italia)* – B. Palma, M. Pagano, M. Parise & A. Ruocco

12.35 | *Il fattore NSHPE dei pilastri di cave sotterranee e il loro fattore di sicurezza a compressione desunto da anlisi di regressione multivariata* – Bruno G.

12.50 | *Studio numerico parametrico per la definizione di abachi per la valutazIone preliminare della stabilità di cavità sotterranee in calcarenite tenera* – Perrotti M., Lollino P., Fazio N.L., Pisano L., Vessia G., Parise M., Fiore A., Luisi M., Miccoli M.N. & Spalluto L.

13.05 | *Analisi sistemica per una valutazione della suscettibilità al dissesto di territori dell'Agro Nolano (provincia di Napoli) con presenza di cavità antropiche in tufo* – Caccavale G., Calcaterra D. & Ramondini M.

13.30-14.30 | Pausa pranzo

CONSIGLIO NAZIONALE DEI GEOLOGI

Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione

25° 1992-2017

Sala convegni CNR - Piazzale Aldo Moro, 7 - Roma
1° dicembre 2017 ore 9.30-18.30
Programma sessione orale

14.30-16.15 | **Sessione C - Tecniche e procedure di monitoraggio e consolidamento**
Moderatrice FRANCESCA BOZZANO

14.30 | *Sviluppi nelle tecniche e tecnologie di indagine, monitoraggio e consolidamento delle cavità in venti anni di applicazione nel laboratorio naturale dell'Orvieto ipogea* – Martini E., Soccodato C., Soccodato F.M. & Albano V.

14.50 | *Modello geologico e criteri di monitoraggio dell'evoluzione delle cavità nell'area orientale di Roma* – Bozzano F., Cammillozzi F., Esposito C., Mazzanti P. & Tosti S.

15.05 | *Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nei Comuni del Cratere Sismico Aquilano danneggiati dal sisma del 2009* – Pipponzi G., Mattucci F. & Ferrini E.

15.20 | *Le tecniche per operare in sicurezza in spazi confinati applicate nel progetto di studio e recupero "Forma acquae maxentii"* – Girardo L., Santucci E., Adornato S. & Basso S.

15.35 | *Un approccio numerico 3D per valutare l'evoluzione temporale della stabilità di cavità in sotterraneo interagenti con edifici* – Ciantia M., Castellanza R.P. & Di Prisco C.

15.50 | *Metodi integrati di caratterizzazione e monitoraggio per la valutazione della pericolosità di ipogei e reti caveali* – Argentiero I., Parisi A., Pellicani R. & Spilotro G.

16.15-18.00 | **Sessione D - Valorizzazione e fruizione**
Moderatore EUGENIO DI LORETO

16.15 | *La rete degli UNESCO Geoparchi Globali e esempi di valorizzazione delle cavità antropiche all'interno del Parco nazionale del Cilento e Vallo di Diano* – Aloia A.

16.35 | *Il sitema ipogeo di "Kolymbethra - Porta V" nel Parco Archeologico della Valle dei Templi di Agrigento: un esempio di fruizione turistica di cavità artificiale* – Lombardo G., Noto G., Interlandi M., Agnello E. & Vecchio E.

16.50 | *Potenzialità delle cavità ex-estrattive tra recupero ambientale e nuovi usi: applicazioni nel Parco dell'Appia Antica* – Dell'Aira P., Esposito C. & Guarini P.

17.05 | *Carta delle miniere della Nurra (Sardegna)* – Dore P. & Mezzolani S.

17.20 | *La gravina di Ginosa dopo i crolli di Via Matrice: una nuova vision ed una nuova strategia per attivare una rigenerazione possibile* – Parisi N.

17.35 | *Dalla patrimonializzazione alla valorizzazione dei trappeti ipogei di Terra d'Otranto* – Monte A.

18.00 | **Chiusura lavori a cura di Francesco Peduto, Presidente CNG**

Dalle ore 8.00 alle 18.30 presso il Foyer della Sala Convegni saranno allestiti spazi espositivi a cura degli sponsor

CONSIGLIO NAZIONALE DEI GEOLOGI

Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione

25° 1992-2017

Sala Arangioruiz CNR - Piazzale Aldo Moro, 7 - Roma
1° dicembre 2017 ore 10.00-18.00
Esposizione poster

10.00-18.00 | **Digital Gallery**
Proiezione poster in versione digitale e filmati

10.00-11.35 | **Sessione B - Analisi della pericolosità territoriale**

1b | *Ricostruzione del modello tridimensionale di una cavità sotterranea nel Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo (Napoli) mediante l'utilizzo di laser scanner manuale* – Allocca V., Angrisani A.C., Coda S., Danzi M., De Vita P., Del Vecchio U., Di Martire D., Massa D., Minin G., Nocerino G. & Calcaterra D.

2b | *Siti minerari dismessi in aree in frana: l'ex miniera di sale di Lungro (Calabria)* – Antronico L. & Gullà G.

3b | *Studio geologico dell'area che ospita le grotte di San Giorgio Lucano, finalizzato alla geoconservazione* – Bentivenga M., Capece A., Guglielmi P., Martorano S. & Palladino G.

4b | *La presenza di acque nelle cavità sotterranee di Roma* – Bersani P. & Nisio S.

5b | *Lavori di indagine e di rimozione delle macerie del crollo di Via Matrice nella Gravina di Ginosa* – Bisignano M., Debernardis M., Lauriero N., Pepe P., Perrucci A., Risimini I. & Tancredi S.

6b | *Nuove metodologie di rilievo di ambienti ipogei tramite laser scanner: l'esempio di una cavità artificiale in provincia di Napoli* – Danzi M., Del Vecchio U. & Minin G.

7b | *Metodologie di indagini geognostiche dirette ed indirette per l'individuazione e la determinazione delle geometrie di cavità antropiche profonde in ambito urbano. Il caso di studio di Altamura (BA) nell'ambito dei lavori di "Mitigazione del rischio idrogeologico connesso alla presenza di una rete caveale nel Comune di Altamura* – Debernardis M., Manicone D., Martimucci V., Pepe P., Specchio V., Tancredi S. & Verni V.

8b | *Studio geologico-geotecnico dell'ambiente ipogeo sottostante l'Ospedale Civile di Ragusa (RG)* – Di Raimondo S. & Zocco M.

9b | *Analisi numerica tridimensionale dei fattori di controllo di un processo di sinkhole in area urbana* – Fazio N.L., Perrotti M., Lollino P., Parise M., Vattano M., Madonia G. & Di Maggio C.

10b | *I granai sotterranei della Table du Jugurta (Krumira - Tunisia settentrionale)* – Ferrini G. & Moretti A.

11b | *Relazioni tra caratteristiche petrografiche e parametri geotecnici nelle rocce tenere carbonatiche in Puglia* – Festa V., Fiore A., Luisi M., Miccoli M. N. & Spalluto L.

12b | *Studio numerico agli elementi finiti per la determinazione delle condizioni di stabilità per chiese rupestri scavate in rocce tenere nel territorio pugliese* – Luisi M., Fiore A., Miccoli M. & Spalluto L.

13b | *L'esperienza di ANAS nell'interferenza delle infrastrutture stradali con cavità naturali o antropiche* – Micheli A. & Martino M.

14b | *L'ipogeo di captazione della sorgente Mazzoccolo in Formia (Lazio meridionale): caratteristiche, storia e vulnerabilità di un'opera idraulica di epoca romana ancora funzionante* – Miele P.

15b | *Considerazioni sulla stabilità morfologica della cavità rocciosa che ospita l'eremo (IX sec.) dedicato a S. Michele Arcangelo - Monti Aurunci (Lazio meridionale)* – Miele P.

16b | *Criteri di verifica dei pilastri di cave sotterranee di pozzolana abbandonate* – Mizzoni M., Giannella G., Virgili F. & Vittori E.

17b | *La riscoperta delle cave di Monteverde Vecchio, Roma* – Morabito A., Rossi D. D., Lanzini M.

18b | *Fattori geologico-tecnici nella realizzazione di cavità artificiali* – Parise M.

19b | *Classificazione degli ambienti sotterranei e analisi della fratturazione della "Ricerca Buca del Serpente" (Campiglia Marittima, Toscana)* – Poggetti E. & Tinagli L.

20b | *Preesistenze di natura antropica in una delle regioni più antiche delle Catacombe dei SS. Marcellino e Pietro a Roma* – Ricciardi M. & Giuliani R.

21b | *Sinkhole in aree urbane: lo stato delle conoscenze nella provincia di Napoli* – Santo A., De Falco M., Forte G., Guarino P.M. & Scotto di Santolo A.

11.45-13.20 | **Sessione C - Tecniche e procedure di monitoraggio e consolidamento**

1c | *Cavità di orgine antropica e sicurezza degli edifici scolastici nella città di Roma: i casi di studio di via Asmara (Municipio II) e via Diana (Municipio V)* – Argentieri A., Di Nezza M., Di Filippo M., Piro M., Rotella G., Cecchini F. & Margottini S.

2c | *Interventi di bonifica di cavità antropiche in ambito urbano finalizzate alla Mitigazione del rischio idrogeologico connesso alla presenza di una rete caveale ubicata in contesto urbano nel Comune di Altamura* – Antonino D., Barozzi D., De Venuto G., Fiore A., Specchio V., Pepe P., Martimucci V., Verni V., Tancredi S. & Debernardis M.

3c | *Nuovi studi sulle necropoli etrusche di Tarquinia (VT) con GPR e Geoelettrica* – Brancaleoni G., Castellaro S. & Perricone L.

4c | *Il metodo B&B ottimizzato per la definizione dell'area tributaria dei pilastri in cave sotterranee* – Bruno G., Bobbo L. & Fidelibus M.D

5c | *Monitoraggio di alcuni Qanat circostanti l'area di Yazd e simulazione delle loro caratteristiche idrogeologiche* – Burri E., Del Bon A., Ferrari A., Ghafori H., Yazdi A.A.S., Khaneiki L.M., Pierleoni A. & Ragni P.

6c | *Miglioramento delle proprietà meccaniche di calcareniti con trattamenti chimici* – Castellanza R.P., Frigerio G., Seidler C. & Di Prisco C.

7c | *Analisi qualitativa dei fenomeni di instabilità ed interventi per la riqualificazione ambientale delle spiagge di Fontania (Gaeta-Latina)* – Falconi I.

8c | *Le tecniche geofisiche al servizio dell'archeologia preventiva* – Filippini P., Vercelli C., Figliozzi E. & Volpe N.

9c | *GIS e drone per la gestione emergenziale delle cavità sotterranee* – Gagliano F. M.

10c | *Collasso di ipogei in un centro storico ad elevata valenza paesaggistica (Castro Marina - LE), tecniche di monitoraggio e modellazione per il recupero strutturale* – Lazzari S.

11c | *Esperienze nell'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto nell'esplorazione, documentazione e monitoraggio cavità artificiali* – Mazzoli M., Bonfà I. & Marsala F.

12c | *Esplorazione e documentazione di cavità artificiali sommerse* – Mazzoli M., Galeazzi C. & Vitelli M.

13c | *Rilievo 3D di cavità ipogee per la corretta pianificazione di emergenza* – Muscio V.

14c | *Consolidamento di cavità e monitoraggio della rupe di Orvieto (Terni)* – Ventura P.

15c | *Analisi di stabilità e progetto esecutivo per il consolidamento di cavità urbane nel centro storico di Ragusa Ibla (RG)* – Zocco M. & Licitra C.

14.30-16.05 | **Sessione D - Valorizzazione e fruizione**

1d | *Valorizzazione e tutela delle cavità antropiche identificate quali geositi nel Parco Nazionale del Pollino-UNESCO Geoparco Mondiale* – Bloise L.

2d | *Tutelare e valorizzare il sottosuolo: la ricostruzione 3D della miniera di grotta della "Buca della Faina di Poggio dell'Aione"* – Brocchini D., Deravignone L. & Poggetti E.

3d | *La città di Shahrood (Iran) ed il suo approvvigionamento idrico tramite i Qanat* – Burri E., Del Bon A., Doulati A.F., Ferrari A., Karami G.H. & Ragni P.

4d | *Gli ipogei in Puglia tra conservazione e innovazione* – Calderazzi A., Pagliarulo R. & Strafella F.

5d | *Gli ipogei di San Dana (LE). Un sistema rupestre marginale nel Salento meridionale* – Calò S. & Longo D.

6d | *Privata Traiani Domus (Roma). Elaborazioni 3D, ricerca e fruizione* – Carnabuci E., Calò S. & Santucci E.

7d | *La valorizzazione del patrimonio minerario ipogeo di età preindustriale dell'area sudorientale della Provincia di Livorno* – Cascone G., Casini A., Tinagli L. & Borzatti A.

8d | *Il sentiero dell'acqua di Sinalunga (Siena, Toscana)* – Censini G., Dore P. & Dallocchio E.

9d | *Il complesso ipogeo in località San Fortunato - Marsciano (PG)* – Chiaraluce V.

10d | *Gli ipogei di Bagnoregio e Civita (Viterbo): una ricchezza (quasi) sconosciuta* – Di Buduo G.M., Chiaraluce V., Costantini L. & Ponziani T.

11d | *Monitoraggio delle cavità sotterranee di Roma: aspetti di pericolosità e di conservazione della biodiversità* – Di Loreto E., Liperi L., Nisio S., Pizzoli I., Roscioli F., Santini E. & Tommasini A.

12d | *Siracusa ipogea* – Di Maio A.M., Bordone G., Giompapa M., Miraglia C. & Arena L.

13d | *Conservazione alimentare in ambiente ipogeo: l'esempio delle cave in sotterraneo della Val di Non* – Galgaro A., Cultrera M., De Carli M., De Lullo A., Fauri M., Daz S., Dalla Santa G., Cosa S., Scotton P., Conforti F. & Fuganti A.

14d | *Opere belliche: l'esperienza del bunker e dei rifugi antiaereo di Villa Torlonia (Roma)* – Grassi L. & Placidi M.

15d | *Un'antica fortificazione sul mare: il forte di Baia* – Landi V. & Santanastasio R.

16d | *Il recupero e la valorizzazione del rifugio antiaereo dei Savoia a Villa Ada (Roma)* – Morabito A. & Tessari R.

17d | *Soluzioni insediative ipogee e rupestri casi studio in Sicilia* – Musotto L.

18d | *Gli ipogei di Agrigento* – Noto G.

19d | *Aspetti geomorfologici e cavità d'origine antropica del territorio dell'Ecomuseo della Tuscia Rupestre* – Sasso A.

20d | *Progetto Norchia '16-'18. Scavi nella necropoli di Guado di Sferracavallo - Norchia (VT)* – Sterpa S.

21d | *Caratteristiche geoarcheologiche dei pozzi d'acqua del centro urbano storico e della piana di Palermo* – Todaro P.

22d | *Le gallerie delle sorgenti termali di Porretta. Rilievi, monitoraggi, azioni di valorizzazione* – Vannini S.

16.15-18.00 | **Sessione A - Censimento e catalogazione cavità**

1a | *Leggere le grotte: da Sant'Ilario sullo Ionio (RC) nuovi spunti per il culto delle acque* – Agostino R. & Pizzi F.

2a | *Note preliminari sulle indagini speleologiche e geologiche dell'Acquedotto "Fontana" di Velletri (Roma)* – Bersani P., Germani C., Galeazzi C., Bottiglia R. & Galeazzi S.

3a | *Altamura memoria del paesaggio: le cave per l'estrazione del materiale lapideo. Dal censimento alla valorizzazione dei percorsi dell'industria estrattiva* – Capurso E. & Ninivaggi T.

4a | *Censimento di cavità antropiche nell'arcipelago Pontino attraverso l'applicazione di metodi di rilievo speditivi e fotogrammetrici avanzati* – Carlomagno A., Fantini A., Gazzetti C., Loy A., Marino L., Sarandrea P. & Verbena G.

5a | *Il c.d. cunicolo superiore del Muro Etrusco a Todi (PG)* – Chiaraluce V.

6a | *Cavità sotterranee nell'area Portuense a Roma* – Cianfriglia L., Matteucci R., Rosa C. & Sebastiani R.

7a | *Roma, vaste aree di cavità sotterranee scomparse. Il caso della catacomba di San Felice sulla via Portuense* – Ciotoli G. & Nisio S.

8a | *Analisi contestuale di cavità di origine antropica nel Parco Archeologico delle Terme di Baia (Campania, Italia)* – Corvi M., Damiano N., Guarino P. M. & Guidone I.

9a | *Censimento e catalogazione delle cavità di origine antropica mediante prospezioni geofisiche integrate nell'area de "Il Piano" (Isola d'Elba, Italia)* – Di Filippo M., Di Nezza M., Cecchini F., Margottini S., De Martino C., Pazzi V., Carlà T., Bardi F., Marini F., Fontanelli K., Intieri E. & Fanti R.

10a | *Censimento e interesse storico e speleologico delle fortificazioni militari della Nurra (Sardegna)* – Dore P. & Dallocchio E.

11a | *Censimento e mappatura della rete di cavità che sottende il paese di Castelnuovo, San Pio delle Camere (AQ)* – Durante F., Pipponzi G., Del Monte E., Ghinelli A., Ilic V., Nocentini M. & Tallini M.

12a | *Cavità sotterranee di orgine antropica in Francia* – Felici M. L.

13a | *La carta archeologica delle cavità antropiche antiche nel settore nord-est del Suburbio di Roma* – Filippini P., Clementini M., Borzetti M.R., Vercelli C., De Caterina S. & Figliozzi E.

14a | *Le cavità di origine antropica in Liguria: stato dell'arte, prospettive di ricerca e proposte per la valorizzazione* – Bixio R., Faccini F., Maifredi A., Perasso L., Saj S. & Traverso M.

15a | *Cavità carsiche e accumuli di frana in area urbana* – Pascale S. & Lorenzo P.

16a | *Documentazione archeologica attraverso la mappatura dell'habitat rupestre medievale nel comparto costiero adriatico a sud-est di Bari* – Rotondo R.

17a | *Gli ipogei di orgine antropica nell'area costiera di Rocavecchia (prov. di Lecce)* – Sammarco M., Calò S. & Parise M.

18a | *I rifugi antiaerei realizzati durante il Secondo conflitto Mondiale in Puglia* – Santo A.R., Fiore A., Parise M. & Selleri G.

19a | *Censimento delle cavità naturali e artificiali della Riserva Naturale Regionale Lago di Vico* – Sasso A.

20a | *Le cave di pozzolana a Roma e nel territorio nel Settecento nelle fonti documentarie* – Verdi O. & Giannella G.

CONSIGLIO NAZIONALE DEI GEOLOGI

Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione

SIGEA 25° 1992-2017

Comitato Scientifico

Gioacchino Francesco Andriani (Università di Bari)
Mario Bentivenga (Università della Basilicata – Sigea)
Claudio Berardi (Regione Basilicata)
Michele Betti (Comm. Nazionale Cavità Artificiali – Società Speleologica Italiana)
Francesca Bozzano (Università di Roma La Sapienza)
Giovanni Bruno (Politecnico di Bari – Sigea)
Gennaro Capasso (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale)
Raffaele Carbone (Sigea)
Nicola Casagli (Cattedra UNESCO, Università di Firenze)
Riccardo Pietro Castellanza (Università degli Studi di Milano Bicocca)
Angelo Corazza (Dipartimento Protezione Civile – Sigea)
Giancarlo Ciotoli (CNR – IGAG)
Vera Corbelli (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale)
Eugenio Di Loreto (Regione Lazio – Sigea)
Claudio Di Prisco (Politecnico di Milano)
Francesco Faccini (Università di Genova – Sigea)
Gianluca Ferri (Ufficio Dissesti Idrogeologici e Sottosuolo Comune di Roma)
Antonello Fiore (Autorità di Bacino della Puglia – Sigea)
Alessandro Flora (Università di Napoli)
Carla Galeazzi (EGERIA Centro Ricerche Sotterranee – Hypogea – Sigea)
Daniele Giordan (CNR – IRPI)
Giuseppe Gisotti (Sigea)
Maurizio Lanzini (Sigea)
Gioacchino Lena (Sigea)
Lorenzo Liperi (Regione Lazio)
Piernicola Lollino (CNR-IRPI)
Endro Martini (Alta Scuola – Sigea)
Luciano Masciocco (Università di Torino – Sigea)
Roberto Mazza (Università Roma Tre)
Mario Mazzoli (ASSO – Hypogea)
Antonio Monte (CNR – IBAM)
Adriano Morabito (Roma Sotterranea – Hypogea)
Stefania Nisio (Ispra)
Mario Parise (Università di Bari – Sigea)
Gabriele Ponzoni (CNG)
Alessandro Reina (CNG – Politecnico di BA)
Gabriele Scarascia Mugnozza (Università di Roma La Sapienza)
Giuseppe Spilotro (Università della Basilicata – Sigea)
Arcangelo Francesco Violo (CNG – Consiglio Nazionale dei Geologi)

Segreteria organizzativa

Eugenio Di Loreto
Ilaria Falconi
Antonello Fiore
Carla Galeazzi
Giuseppe Gisotti
Maurizio Lanzini
Arcangelo Francesco Violo

La **SIGEA** si occupa dello studio e della diffusione della geologia ambientale, materia che può essere definita come: "applicazione delle informazioni geologiche alla soluzione dei problemi ambientali".

È un'associazione culturale senza fini di lucro, riconosciuta dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare come "associazione di protezione ambientale a carattere nazionale" con decreto 24 maggio 2007 (G.U. n. 127 del 4/6/2007) e successivi D.M. Ha sottoscritto un protocollo d'intesa con l'Arma dei Carabinieri, il 20/12/2017, per la collaborazione a svolgere attività di monitoraggio al fine di segnalare criticità in materia di dissesto idrogeologico e di impatto ambientale.

Agisce per la promozione del ruolo delle Scienze della Terra nella protezione della salute e nella sicurezza dell'uomo, nella salvaguardia della qualità dell'ambiente naturale ed antropizzato e nell'utilizzazione più responsabile del territorio e delle sue risorse. È aperta a tutte le persone e gli Enti (persone giuridiche) che hanno interesse alla migliore conoscenza e tutela dell'ambiente.

Cosa fa SIGEA

- **Favorisce** il progresso, la valorizzazione e la diffusione della Geologia Ambientale, mediante gli "eventi" sotto riportati, diffondendoli attraverso la rivista trimestrale "Geologia dell'Ambiente", il sito web e la newsletter.
- **Promuove** il coordinamento e la collaborazione interdisciplinare nelle attività conoscitive ed applicative rivolte alla conoscenza e tutela ambientale; per questo scopo ha costituito le **Aree Tematiche** "Patrimonio Geologico", "Dissesto Idrogeologico", "Geoarcheologia", "Educazione Ambientale", "Caratterizzazione e bonifica dei siti inquinati", "Protezione Civile", "Aree Protette".
- **Opera** sull'intero territorio nazionale nei settori dell'educazione e divulgazione scientifica, della formazione professionale, della ricerca applicata, della protezione civile,attivandosi in varie tematiche ambientali, quali previsione, prevenzione e riduzione dei rischi geologici, bonifica siti contaminati, studi d'impatto ambientale, tutela delle risorse geologiche e del patrimonio geologico, geologia urbana, pianificazione territoriale, pianificazione del paesaggio, geoarcheologia, e in altri settori correlati con le suddette finalità, attivandosi anche mediante le sue Sezioni regionali, mediante corsi, convegni, escursioni di studio, interventi sui mezzi di comunicazione di massa.
- **Informa** attraverso il periodico trimestrale "Geologia dell'Ambiente", che approfondisce e diffonde argomenti di carattere tecnico-scientifico su tematiche geoambientali di rilevanza nazionale e internazionale; la rivista è distribuita in abbonamento postale ai soci e a Enti pubblici e privati.
- **Interviene** sui mezzi di comunicazione di massa, attraverso propri comunicati stampa, sui problemi attuali che coinvolgono l'ambiente geologico.
- **Collabora con gli Ordini professionali, con il mondo universitario e con altre Associazioni** per lo sviluppo delle citate attività, in particolare nella educazione, informazione e formazione ambientale: con CATAP (Coordinamento delle associazioni tecnico-scientifiche per l'ambiente e il paesaggio) cui SIGEA aderisce, Associazione Idrotecnica Italiana, Federazione Italiana Dottori in Agraria e Forestali, Italia Nostra, Legambiente, WWF, ProGEO (International Association for Geological Heritage), Alta Scuola, Associazione Idrotecnica Italiana, Accademia Kronos, ecc.
- **Collabora anche a livello internazionale,** in particolare con ProGEO, con la quale ha organizzato il 2° Symposium internazionale sui geositi tenutosi a Roma nel maggio 1996 e il 7° Symposium sullo stesso argomento a Bari per settembre 2012; inoltre è attiva per svolgere studi, censimenti e valorizzazione dei geositi.

Servizi offerti ai soci SIGEA

- Ricevere la rivista trimestrale "Geologia dell'Ambiente" in formato cartaceo o digitale ed altre eventuali pubblicazioni dell'Associazione.
- Ricevere mediante newsletter informazioni di prima mano sulle attività della SIGEA e di altre Associazioni collegate.
- Ricevere gratuitamente, a seconda della disponibilità e in formato PDF, numeri arretrati della nostra rivista e di Atti di Convegni organizzati da SIGEA; l'elenco dei numeri della rivista e dei suoi supplementi con i relativi articoli si trova nel nostro sito.
- Partecipare ai Convegni, ai Corsi e altre iniziative a pagamento organizzati dall'Associazione, con lo sconto applicato ai soci.
- Disponibilità per candidature, in rappresentanza di Sigea, in comitati e Commissioni di studio presso Enti Pubblici nazionali e locali.
- Disporre di condizioni vantaggiose per l'acquisto dei volumi della "Collana SIGEA di Geologia Ambientale" (sconto del 30% sul prezzo di copertina, più spese di spedizione di euro 5 forfettarie) dell'Editore Dario Flaccovio di Palermo: info@darioflaccovio.it, www.darioflaccovio.it.

È fondamentale che nell'ordine che il socio effettuerà dal sito internet dell'Editore, nella sezione NOTE, venga riportata la frase: "SOCIO SIGEA convenzione con Dario Flaccovio Editore sconto 30%; spese di spedizione 5 euro".

Volumi finora pubblicati: 1. *Difesa del territorio e ingegneria naturalistica*; 2. *Ambiente urbano. Introduzione all'ecologia urbana*; 3. *Le cave. Recupero e pianificazione ambientale*; 4. *Geotermia. Nuove frontiere delle energie rinnovabili*; 5. *Geologia e geotecnica stradale. I materiali e la loro caratterizzazione*; 6. *Contratti di fiume. Pianificazione strategica e partecipata dei bacini idrografici*; 7. *Le unità di paesaggio. Analisi geomorfologica per la pianificazione territoriale e urbanistica*; 8. *Difesa delle coste e ingegneria naturalistica. Manuale di ripristino degli habitat lagunari, dunari, litoranei e marini*; 9. *Il paesaggio nella pianificazione territoriale. Ricerche, esperienze e linee guida per il controllo delle trasformazioni*; 10. *Il dissesto idrogeologico. Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio; 11. Calamità naturali e coperture assicurative*.