

Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA
Società Italiana di Geologia Ambientale - APS



Fondatore *Giuseppe Gisotti*

Supplemento al n. 3/2026 ISSN 1591-5352

GIORNATA DI STUDI

**Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia:
aspetti paesaggistici, risorse idriche e sviluppo sostenibile del territorio**
Celebrazione della giornata internazionale UNESCO dedicata alle grotte e al carsismo

ROMA 11 SETTEMBRE 2026



COMITATO SCIENTIFICO

Mauro Chiesi (+), Antonello Fiore, Luca Guerrieri, Laura Meelli, Mario Parise, Fabio Stoch



INSIEME PER PROMUOVERE LA CULTURA GEOLOGICA E LA TUTELA DELL'AMBIENTE

RICORDA DI
RINNOVARE
L'ISCRIZIONE
PER IL 2027



ALLA SIGEA - APS



Sostieni la SOCIETÀ ITALIANA DI GEOLOGIA AMBIENTALE - APS

Iscriviti o rinnova la tua adesione. Per aderire alla SIGEA - APS è sufficiente compilare la scheda di iscrizione, scaricabile dal sito web www.sigea-aps.it, e versare la quota associativa, pari a un importo di euro 30,00, a mezzo bonifico bancario BancoPosta, IBAN: IT 87 N 07601 032000000086235009, intestato a Società Italiana di Geologia Ambientale.

È possibile effettuare il rinnovo dell'adesione anche inquadrando i QR code dedicati.

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

Associazione di protezione ambientale individuata
con decreto ministeriale del 24 maggio 2007 e
con successivo D.M. 238 del 28/07/2023 ai sensi
dell'articolo 13, della legge 8 luglio 1986, n. 349

Fondatore Giuseppe Gisotti

PRESIDENTE
Antonello Fiore

CONSIGLIO DIRETTIVO NAZIONALE

Lorenzo Cadrobbi, Daria Duranti, Antonello Fiore
(*Presidente*), Adele Garzarella, Giuseppe Gisotti
(*Presidente Onorario*), Marianna Morabito, Stefania
Nisio, Fabio Oliva, Michele Orifici (*Vice Presidente*),
Vincent Ottaviani (*Vice Presidente*), Paola Pino d'Astose,
(*Tesoriere*), Luciano Masciocco, Sabina Porfido,
Livia Soliani, Salvatore Valletta (*Segretario*)

Geologia dell'Ambiente
Periodico trimestrale della SIGEA - APS

Supplemento al N. 3/2026
Anno XXXIV • luglio-settembre 2026

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

DIRETTORE RESPONSABILE
Antonello Fiore

CONDIRETTORE RESPONSABILE
Eugenio Di Loreto

COMITATO SCIENTIFICO

Mario Bentivenga, Aldino Bondesan, Francesco
Cancellieri, Rachele Castro, Massimiliano Fazzini,
Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado, Emanuela
Guidoboni, Salvatore Lucente, Fabio Luino, Endro
Martini, Luciano Masciocco, Davide Mastroianni,
Antonio Paglionico, Mario Parise, Giacomo Prosser,
Giuseppe Spilotto, Vito Uricchio, Gianluca Valensise

COMITATO DI REDAZIONE

Eugenio Di Loreto, Maria Luisa Felici,
Giacomo Milazzo, Michele Orifici,
Vincent Ottaviani, Salvatore Valletta

REDAZIONE

SIGEA - APS c/o Fidaf - Via Livenza, 6 00198 Roma
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 a un giudizio di uno o più referees

UFFICIO GRAFICO

Pino Zarbo (Fraserighe Book Farm)
www.fraserighe.it

PUBBLICITÀ
SIGEA - APS

STAMPA

Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

La quota di iscrizione alla SIGEA-APS per il 2026
è di € 30 e dà diritto a ricevere la rivista
"Geologia dell'Ambiente".

Per ulteriori informazioni consulta il sito web
all'indirizzo www.sigea-aps.it

Sommario

Premessa

LAURA MELELLI

8

Il libro di pietra, il più grande archivio ambientale

PAOLO FORTI

9

Le forme carsiche nella Carta Geomorfologica d'Italia: linee guida alla loro rappresentazione

MAURIZIO D'OREFICE, ROBERTO GRACIOTTI

12

Oltre la dimensione fisica: il carsismo come infrastruttura culturale nei paesaggi appenninici

SARA CARALLO

15

Oltre la superficie: la geofisica per lo studio del carsismo

ANTONIO BRATUS, PAOLO PAGANINI, MICHELE POTLECA

18

Sinkholes in Italia: dal carsismo alle forme pseudo-carsiche-rischio e prevedibilità

STEFANIA NISIO

21

Impatto ambientale delle attività estrattive nella importante area carsica delle Alpi Apuane

ALESSIA NANNONI, LEONARDO PICCINI

25

Idrodinamica e monitoraggio degli acquiferi carsici

LEONARDO PICCINI, ALESSIA NANNONI

28

Dove l'acqua incontra il mare: deflusso idrico e sorgenti sottomarine nel carsismo costiero

STEFANO FURLANI

31

Rapporti tra carsismo, idrogeologia e tettonica: un nuovo approccio multidisciplinare per lo studio della tettonica attiva. L'esempio della faglia di Posta Fibreno (Marsica occidentale e Lazio meridionale)

MICHELE SAROLI, MATTEO ALBANO, MATTEO FIORUCCI,
MARCO MORO, EMANUELA FALCUCCI, STEFANO GORI,
FABRIZIO GALADINI, ENRICA ZULLO, MARCO PETITTA

36



Sistemi carsici, spartiacque ipogei; tutela della diversità delle risorse idriche: il caso del Sistema di Monte Vermicano (Monti Ernici, Lazio)	
STEFANO GAMBARI	39
Il paesaggio dell'acqua e la memoria idrologica delle "fogge" nella Murgia meridionale pugliese: la gestione storica della risorsa idrica nella pianificazione urbanistica del Comune di Martina Franca	
CRISTINA COMASIA ANCONA	45
La revisione della scheda di censimento del Catasto delle cavità naturali e artificiali della Federazione Speleologica Pugliese: uno strumento interdisciplinare per la tutela e la gestione degli ambienti carsici	
CRISTINA COMASIA ANCONA, EMANUELA DEROSI, FABIO FIORITO, PAOLO GIULIANI, RAFFAELE LOMBARDI, FRANCESCO LORUSSO, AURELIO MARANGELLA, VINCENZO MARTIMUCCI, MARCO PETRUZZELLI, GIANLUCA RUSSO	48
La Grotta Mangiapane di Custonaci (Trapani): analisi swot e matrice tows per un geomorfosito culturale di importanza internazionale	
ALBERTO BERTINI	52
La geologia dei vini come fattore di sviluppo turistico delle aree carsiche	
MARGHERITA BONAMICO, EUGENIO DI LORETO, SANDRO ROTA	58
Campo Soriano: un caso studio per la tutela dei geositi carsici attraverso la collaborazione tra ISPRA e Regione Lazio	
ELISA BRUSTIA, MAURO LUCARINI, DARIO MANCINELLA, DIEGO MANTERO, PAOLO MASTROBATTISTA, LUCA OLIVETTA, ROBERTO POMPILI, PAOLO PRIMERANO, MAURIZIO TESTARDI	62
Contaminanti, la minaccia nascosta per gli ambienti sotterranei	
ELEONORA CIALENTE, ENRICO LUNGI	65

Un esempio di carsismo nel Lazio: le doline di Artena MARIA LUISA FELICI, GIULIO CARATELLI	67
Inghiottitoio del Roccone nel territorio di Vita (TP): studio dell'ipogeo carsico e della sua interazione con il bacino idrografico di riferimento ROBERTO GRAMMATICO, ROSARIO BONVENTRE, LUIGI FONTANA	69
Recenti ricerche carsiche in siti del territorio pugliese ISABELLA SERENA LISO, FARAJ MOHAMMED MOSTAFA, MICHELE ONORATO, MARIO PARISE	71
L'acquifero carbonatico del pozzo Burano nella regione Marche ENDRO MARTINI	75
Animale di grotta dell'anno in Italia: una campagna di comunicazione-azione per la conoscenza e la tutela della biodiversità sotterranea SERGIO ORSINI, FERDINANDO DIDONNA, LUISA DAINELLI, GIUSEPPE NICOLSI	79
Le aree carsiche protette nelle evaporiti messiniane della Sicilia MARCELLO PANZICA LA MANNA	82
L'area carsica di Monte Acquapuzza (Monti Lepini) MARIA PIRO	85
Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia: "Monumento Naturale Grotta Aosi" - Comune di Prossedi (LT) ANTONIO TROTTA	87
Paesaggio e testimonianze storico-culturali del "Costone Murgiano" (Puglia) PIETRO UBBRIACO	89
Il monitoraggio delle sorgenti in rocce carbonatiche: alcuni esempi nel Piemonte centro-meridionale BARTOLOMEO VIGNA	92



Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA) - APS

Con il Patrocinio di:



GIORNATA DI STUDI

**Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia:
aspetti paesaggistici risorse idriche
e sviluppo sostenibile del territorio.
Celebrazione della giornata internazionale
UNESCO dedicata alle grotte e al carsismo.**

**ROMA 11 SETTEMBRE 2026, ORE 9.00-14.00 – PALAZZETTO MATTEI,
IN VILLA CELIMONTANA (VIA DELLA NAVICELLA, 12)**



Foto di Davide Delconibus - Incastri
(Vincitrice al Concorso fotografico SIGEA - edizione studenti 2016)

Informazioni: <https://sigea-aps.it/eventi/conoscenza-e-tutela-degli-ambienti-carsici-in-italia-roma-11-settembre-2026>

Comitato scientifico: **Mauro Chiesi (†), Antonello Fiore, Luca Guerrieri, Laura Melelli, Mario Parise, Fabio Stoch**

Segreteria organizzativa: **Eugenio Di Loreto, Maria Luisa Felici, Luca Guerrieri, Vincenzo Iurilli, Marianna Morabito**

GIORNATA DI STUDI

Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia: aspetti paesaggistici risorse idriche e sviluppo sostenibile del territorio. Celebrazione della giornata internazionale UNESCO dedicata alle grotte e al carsismo.

PROGRAMMA

- 08.45 – 09.15 Registrazione dei partecipanti
- 09.15 – 09.20 Presentazione giornata
Antonello Fiore (Presidente Società Italiana di Geologia Ambientale SIGEA-APS)
- 09.20 – 09.50 Relazioni di apertura lavori
Claudio Cerreti (Presidente Società Geografica Italiana)
Sergio Orsini (Presidente Società Speleologica Italiana)
Roberto Troncarelli (Presidente del Consiglio Nazionale dei Geologi)
- 09.50 – 12.15 PRIMA PARTE
Moderatrice **Laura Melelli** (AIGeo - Associazione Italiana di Geografia fisica e Geomorfologia – Università di Perugia)
- 09.50 – 10.20 **Il libro di pietra, il più grande archivio ambientale**
Paolo Forti (Università degli Studi di Bologna)
- 10.20 – 10.35 **Le forme carsiche nella Carta Geomorfologica d'Italia: linee guida alla loro rappresentazione**
Maurizio D'Orefice & Roberto Graciotti (già ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)
- 10.35 – 10.50 **Oltre la dimensione fisica: il carsismo come infrastruttura culturale nei paesaggi appenninici**
Sara Carallo (Società Geografica Italiana - Università degli Studi Roma Tre)
- 10.50 – 11.05 **Oltre la superficie: la geofisica per lo studio del carsismo**
Antonio Bratus, Paolo Paganini, Michele Potleca (OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale)
- 11.05 – 11.20 **Sinkholes in Italia: dal carsismo alle forme pseudo-carsiche – rischio e prevedibilità** **Stefania Nisio**
(ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)
- 11.20 – 11.35 **Impatto ambientale delle attività estrattive nella importante area carsica delle Alpi Apuane**
Alessia Nannoni (Università degli Studi di Firenze)
- 11.35 – 12.15 Discussione e chiusura lavori prima parte **Laura Melelli** (AIGeo - Associazione Italiana di Geografia fisica e Geomorfologia – Università di Perugia)
- 12.15 – 14.00 SECONDA PARTE
- 12.15 – 12.30 **Idrodinamica e monitoraggio degli acquiferi carsici**
Leonardo Piccini (Università degli Studi di Firenze)
- 12.30 – 12.45 **Dove l'acqua incontra il mare: deflusso idrico e sorgenti sottomarine nel carsismo costiero**
Stefano Furlani (Università degli Studi di Trieste)
- 12.45 – 13.00 **Rapporti tra carsismo, idrogeologia e tettonica: un nuovo approccio multidisciplinare per lo studio della tettonica attiva. L'esempio della faglia di Posta Fibreno (Marsica occidentale, Lazio Meridionale)**
Michele Saroli (Università degli Studi di Cassino e del Lazio meridionale)
- 13.00 – 13.15 **Sistemi carsici, spartiacque ipogei; tutela della diversità delle risorse idriche: il caso del Sistema di Monte Vermicano (Monti Ernici, Lazio)**
Stefano Gambari (Circolo Speleologico Romano)
- 13.15 – 14.00 Discussione e chiusura lavori seconda parte **Sergio Orsini** (Presidente Società Speleologica Italiana)

Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia: aspetti paesaggistici risorse idriche e sviluppo sostenibile del territorio. Celebrazione della giornata internazionale UNESCO dedicata alle grotte e al carsismo.

ALTRI CONTRIBUTI PRESENTI NEL VOLUME DEI RIASSUNTI

Il paesaggio dell'acqua e la memoria idrologica delle fogge nella Murgia meridionale pugliese: la gestione storica della risorsa idrica nella pianificazione urbanistica del Comune di Martina Franca

Cristina Comasia Ancona

La revisione della scheda di censimento del Catasto delle cavità naturali e artificiali della Federazione Speleologica Pugliese: uno strumento interdisciplinare per la tutela e la gestione degli ambienti carsici

Cristina Comasia Ancona, Emanuela Derossi, Fabio Fiorito, Paolo Giuliani, Raffaele Lombardi, Francesco Lorusso, Vincenzo Martimucci, Marco Petruzzelli, Gianluca Russo, Aurelio Marangella

La grotta Mangiapane di Custonaci (Trapani): analisi swot e matrice tows per un geomorfosito culturale di importanza internazionale

Alberto Bertini

La geologia dei vini come fattore di sviluppo turistico delle aree carsiche

Margherita Bonamico, Eugenio Di Loreto, Sandro Rota

Campo Soriano: un caso studio per la tutela dei geositi carsici attraverso la collaborazione tra ISPRA e Regione Lazio

Elisa Brustia, Mauro Lucarini, Dario Mancinella, Diego Mantero, Paolo Mastrobattista, Luca Olivetta, Roberto Pompili, Paolo Primerano, Maurizio Testardi

Contaminanti, la minaccia nascosta per gli ambienti sotterranei

Eleonora Cialente, Enrico Lunghi

Un esempio di carsismo nel Lazio: le doline di Artena

Maria Luisa Felici, Giulio Caratelli

Inghiottitoio del Roccone nel territorio di Vita (TP): studio dell'ipogeo carsico e della sua interazione con il bacino idrografico di riferimento

Roberto Grammatico

Recenti ricerche carsiche in siti del territorio pugliese
Isabella Serena Liso, Mostafa Faraj Mostafa Mohammed, Michele onorato, Mario Parise

L'acquifero carbonatico del pozzo Burano nella regione Marche

Endro Martini

Animale di grotta dell'anno in Italia: una campagna di comunicazione-azione per la conoscenza e la tutela della biodiversità sotterranea

Sergio Orsini, Ferdinando Didonna, Luisa Dainelli, Giuseppe Nicolosi

Le aree carsiche protette nelle evaporiti messiniane della Sicilia

Marcello Panzica La Manna

Approccio semplificato alla valutazione della stabilità spondale in funzione del time lag: metodologia e applicazione alle sponde del Po a Torino

Lorenzo Peretti

L'area carsica di Monte Acquapuzza (Monti Lepini)

Maria Piro

Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia "Monumento Naturale Grotta Aosi"

Antonio Trotta

Paesaggio e testimonianze storico-culturali del "Costone Murgiano" (Puglia)

Pietro Ubbriaco

Il monitoraggio delle sorgenti in rocce carbonatiche: alcuni esempi nel Piemonte centro-meridionale

Bartolomeo Vigna

Aiutaci a promuovere la CULTURA GEOLOGICA e la TUTELA DELL'AMBIENTE



DESTINA IL 5 x MILLE alla Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

C.F. 04336801008

www.sigea-aps.it - info@sigeaweb.it

Premessa

Perché dedicare una giornata agli ambienti carsici? Che cosa rende questi territori così importanti da meritare, oggi, un'attenzione che vada oltre il loro pur indiscusso interesse scientifico?

La risposta è nella natura stessa di tali ambienti, dove la componente geologica, il paesaggio, l'acqua e la vita sono profondamente interconnessi tra il mondo epigeo e quello ipogeo. In una prospettiva sistemica, gli ambienti carsici rappresentano infatti un prezioso archivio delle dinamiche ambientali "firmando" il paesaggio in modo riconoscibile e distintivo rispetto ad altri agenti del modellamento.

In un contesto come quello attuale, segnato dai cambiamenti climatici, l'alterazione dei regimi delle precipitazioni, con la maggiore frequenza di eventi estremi alternati a fasi siccitose, rende centrale la conoscenza e la salvaguardia delle risorse idriche sotterranee. In questo quadro, gli ambienti carsici svolgono un ruolo fondamentale nella disponibilità e nella regolazione delle risorse idriche in molte realtà del territorio italiano. La particolare vulnerabilità degli acquiferi carsici li rende sensibili alle pressioni antropiche e richiede un livello di conoscenza adeguato a orientarne la gestione e la tutela.

A questi aspetti scientifici si affianca una importante dimensione culturale. Il carsismo ha spesso condizionato nel tempo l'insediamento, l'uso delle risorse, le attività produttive e le modalità di frequentazione del territorio. Le cavità naturali custodiscono inoltre testimonianze di interesse archeologico e paleontologico, mentre numerosi paesaggi carsici costituiscono oggi importanti elementi del patrimonio culturale e naturalistico e rappresentano una risorsa per la fruizione e la valorizzazione sostenibile dei territori.

Alla luce di queste considerazioni, la conoscenza dei territori carsici assume un valore strategico. La loro complessità richiede infatti un approccio multidisciplinare, capace di integrare osservazioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e biologiche con gli aspetti territoriali, paesaggistici e culturali e di aggiungere metodi di indagine innovativi a quelli più tradizionali.

È in questo quadro che si colloca la Giornata di Studi *Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia: aspetti paesaggistici, risorse idriche e sviluppo sostenibile del territorio*, (Roma, 11 settembre 2026). L'iniziativa, promossa dalla Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA) si collega alla Giornata Internazionale delle Grotte e del Carsismo (IDCK - International Day of Caves and Karst) proclamata nel 2025 dall'UNESCO su proposta dell'Unione Internazionale di Speleologia (UIS).

Il volume raccoglie i contributi raccolti in occasione della Giornata e restituisce, attraverso differenti approcci metodologici e contesti territoriali, la complessità delle questioni connesse al patrimonio carsico italiano. La conoscenza di questi ambienti, la loro vulnerabilità e i rischi a essi connessi, nonché le strategie per la loro tutela e gestione sono il filo conduttore del volume. Ne emerge una visione articolata del patrimonio carsico, colto nelle sue molteplici dimensioni scientifiche, ambientali e territoriali.

Più specificatamente la raccolta si apre con il contributo di P. Forti, figura di riferimento per il carsismo e la speleologia, che introduce le caratteristiche salienti della *morfogenesi carsica*, fornendo il quadro concettuale per la lettura dei processi e delle forme che caratterizzano questi particolari ambienti.

La vulnerabilità e il funzionamento degli *acquiferi carsici* sono approfonditi nei contributi di S. Gambari, A. Nannoni e L. Piccini, L. Piccini e A. Nannoni, nei quali trovano spazio temi relativi all'idrodinamica, al monitoraggio e alla tutela della risorsa idrica sotterranea con un approfondimento di M. Saroli et al. per la relazione con i fattori strutturali.

La *fragilità* degli ambienti carsici è affrontata da E. Cialente e E. Lunghi, mentre la componente del *rischio* geomorfologico trova spazio nel contributo di S.

Nisio, dedicato ai fenomeni di sprofondamento e al rapporto tra carsismo, forme pseudo-carsiche, rischio e prevedibilità.

I temi della *tutela* e della *gestione del patrimonio carsico* sono sviluppati nei contributi di C.C. Ancona et al., E. Brustia et al., M. Panzica La Manna, A. Trotta, che affrontano, attraverso differenti esperienze e approcci, le problematiche connesse alla conservazione, alla valorizzazione e alla gestione sostenibile degli ambienti carsici. La dimensione culturale del paesaggio carsico è sviluppata nei contributi di C.C. Ancona, A. Bertini, M. Bonamico et al., S. Carallo, P. Ubbriaco, che evidenziano, attraverso diverse prospettive, le relazioni tra carsismo, paesaggio, storia, cultura e presenza antropica.

Una specifica attenzione è dedicata agli *ambienti carsici costieri* nel contributo di S. Furlani, che ne evidenzia le peculiarità idrologiche e le complesse relazioni tra circolazione delle acque sotterranee e ambiente marino.

La prospettiva si amplia ulteriormente con il contributo di S. Orsini et al., dedicato alla *biodiversità* sotterranea in ambiente carsico, che sottolinea il ruolo degli ecosistemi ipogei quali componenti essenziali, e spesso poco conosciute, della diversità biologica.

Le *tecniche di indagine* dell'ambiente ipogeo, dalle metodologie più consolidate alle applicazioni innovative, sono illustrate nei contributi di A. Bratus et al. e B. Vigna, che evidenziano il ruolo delle metodologie geofisiche e delle tecniche di rilevamento nella ricostruzione di sistemi sotterranei complessi.

Infine, la *rappresentazione cartografica* è affrontata da M. D'Orefice e R. Gracioti, con riferimento alla legenda dedicata alla nuova Carta Geomorfologica d'Italia a scala 1: 50.000.

Completano il volume alcuni casi di studio, proposti da M.L. Felici e G. Caratelli; R. Grammatico et al., I.S. Liso et al., E. Martini, M. Piro, che consentono di approfondire specifici contesti territoriali.

Nel loro insieme, i contributi restituiscono quindi un quadro articolato nel quale la conoscenza del patrimonio carsico si configura come condizione preliminare per una sua efficace tutela. Questa impostazione assume particolare significato nel più ampio contesto del riconoscimento internazionale della geodiversità e del patrimonio geologico. Gli ambienti carsici rappresentano una delle espressioni più significative di tale patrimonio, per la stretta relazione tra fattori strutturali, processi geomorfologici, caratteristiche climatiche e biodiversità.

È naturale quindi collegare la Giornata Internazionale delle Grotte e del Carsismo a quella Internazionale della Geodiversità, celebrata il 6 ottobre e istituita dall'UNESCO nel 2021. Entrambe rappresentano importanti occasioni per richiamare l'attenzione della comunità scientifica e della società civile sul valore di un patrimonio meno percepibile rispetto a quello biologico o storico-culturale, ma essenziale per comprendere il funzionamento degli ecosistemi e dei territori.

La realizzazione della Giornata di Studi e la pubblicazione di questo volume sono state rese possibili grazie alla collaborazione e al sostegno delle istituzioni e delle associazioni che hanno concesso il proprio patrocinio, contribuendo a rafforzare il carattere interdisciplinare dell'iniziativa e il dialogo tra ricerca scientifica, istituzioni, professioni e associazionismo. Tra queste, ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, il Consiglio Nazionale dei Geologi, la Società Geografica Italiana, l'Associazione Italiana di Geografia Fisica e Geomorfologia (AIGeo) e la Società Speleologica Italiana (SSI).

Un doveroso ringraziamento va alla SIGEA e in particolare al Presidente Antonello Fiore, la cui volontà e competenza sono state fondamentali per l'organizzazione di questa giornata e la realizzazione di questo volume.

Laura Meelli

AIGeo - Associazione Italiana di Geografia fisica e Geomorfologia -
Università di Perugia

Il libro di pietra, il più grande archivio ambientale

Paolo Forti
Istituto Italiano di Speleologia,
Dipartimento BIGEA
Università di Bologna
E-mail: paolo.forti@unibo.it

The “stone book”, the largest environmental archive

Parole chiave: Grotte, Speleotemi, Ricostruzioni paleo ambientali e paleoclimatiche
Key words: Caves, Speleothems, Paleoenvironmental and paleoclimatic reconstructions

Le cavità naturali sono tra i più longevi componenti del paesaggio perché nella quasi totalità dei casi sono ambienti caratterizzati da bassissima energia (cinetica e termica) e scarsissima frequentazione da parte di grandi animali, minimizzando quindi ogni fattore di erosione e degrado. Sono pertanto delle perfette “trappole di accumulo” per sedimenti fisici, biologici e depositi chimici che vengono quindi conservati inalterati per periodi estremamente lunghi (anche molti milioni di anni). Per questo motivo, negli ultimi 30-40 anni, le grotte si sono diventate lo strumento più potente per effettuare ricerche in molte discipline scientifiche (soprattutto, ma non solo, ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali) soprattutto grazie ai depositi chimici e/o fisici che ospitano (Tab. 1).

La maggior parte delle informazioni è contenuta nelle bande di accrescimento degli speleotemi e i dati vengono “estratti” attraverso analisi ad alta risoluzione della loro morfologia, tessitura, composizione chimica e/o isotopica. Spesso a ogni banda corrisponde a un anno solare, ma è impossibile trasforma-

re direttamente la cronologia relativa in una datazione assoluta. Dato però che le bande di accrescimento sono necessariamente ordinate (quelle superiori sono sempre più recenti di quelle sottostanti) e forniscono, quindi, direttamente una cronologia relativa degli eventi registrati.

Non è però possibile ricavare automaticamente una cronologia assoluta basandosi su quella relativa e questo perché vi sono vari fenomeni che lo rendono impossibile: i principali, che si possono citare, sono: la mancanza di chiare bande di accrescimento, i periodi

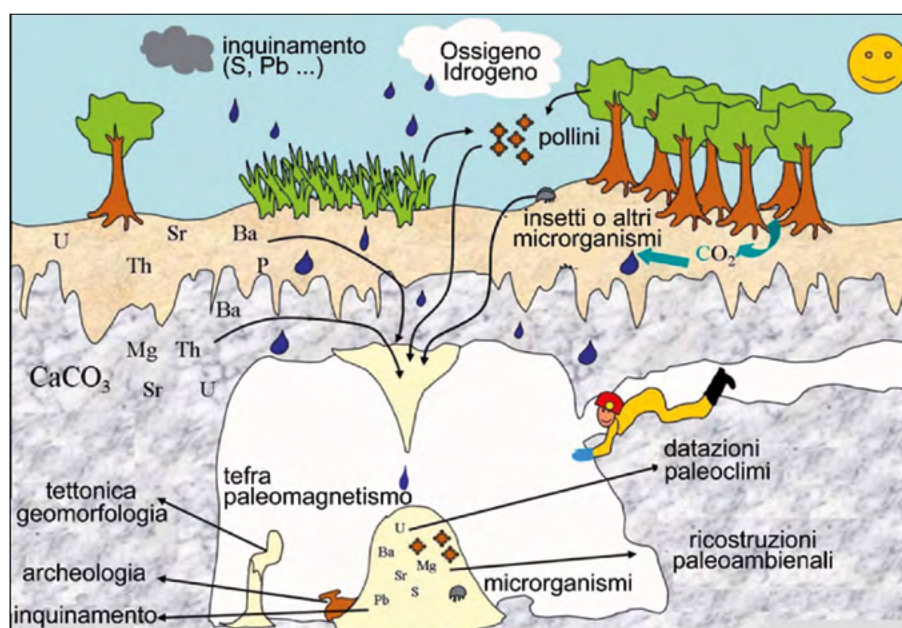


Figura 1. Tutto quello che accade nell'area in cui si apre una grotta viene infatti puntualmente registrato cronologicamente all'interno delle bande di accrescimento degli speleotemi

Tabella 1. Grotte, Speleotemi, Ricostruzioni paleo ambientali e paleoclimatiche

Discipline scientifiche		Campi di interesse
Archeologia		reperti archeologici, pitture rupestri, graffiti
Biologia		strategie evolutive, microbiologia, ambienti chemio-autotrofici
Fisica		meteorologia, climatologia
Ingegneria		grandi vuoti, giacimenti. Grotte turistiche
Medicina		Speleoterapia, psicologia, psichiatria
Geologia	Geomorfologia	Carsismo, speleogenesi, ricostruzioni paleo-ambientali
	Geochemica	Isotopi stabili, datazioni assolute
	Geofisica	maree terrestri, terremoti
	Idrogeologia	acquiferi carsici, acquiferi termali
	Mineralogia	minerali di grotta, bio-minerali, processi di bassa entalpia
	Paleontologia	Tane, trappole di accumulo
	Sedimentologia	sedimenti fisici, speleotemi
	Stratigrafia	sequenze stratigrafiche
	Geologia strutturale	elementi strutturali
	Vulcanologia	Morfologia delle colate, strutture profonde

di stop nel concrezionamento o di parziale ridissoluzione, e infine la presenza di bande intra-annuali.

Va detto comunque che le concrezioni sono facilmente databili con altre metodologie.

Per trasformare una cronologia relativa in una assoluta, infatti, si possono usare vari metodi tra cui i più importanti sono: paleomagnetismo, ^{14}C , $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, la risonanza di spin elettronico, la luminescenza etc. Ciascuno di questi metodi ha i suoi specifici problemi e limiti: per esempio con la luminescenza laser, è possibile risalire dall'intensità relativa delle singole bande alla concentrazione degli acidi umici e fulvici in ognuna di esse. Pertanto sulla base dei cicli solari e delle temperature medie annue locali è teoricamente possibile ricostruire in dettaglio la cronologia dello speleotema, dato che la sensibilità teorica di questo metodo permetterebbe datazioni entro le 24 ore. In realtà vi sono molti fattori che impediscono praticamente di raggiungere tale precisione su lassi di tempo ampi.

Entrando poi nello specifico dei vari problemi che possono essere risolti dallo

studio degli speleotemi si può ricordare che utilizzando semplicemente l'analisi degli isotopi stabili degli elementi costituenti gli speleotemi è possibile avere informazioni non solo sulla temperatura di deposizione, ma anche sapere se il processo è stato di tipo evaporativo o diffusivo. E ancora la semplice presenza di concrezioni gravitative sommerse, o quella di fori di litodomi e/o concrezionamento subacqueo su speleotemi subaerei è poi una evidenza diretta delle variazioni subite nel tempo dal livello marino.

Le glaciazioni, poi, possono aver causato rotture peculiari di stalagmiti e stalattiti e anche il loro trasporto all'interno di lingue glaciali o il loro accumulo in condizioni instabili.

Lo studio delle stalagmiti in aree sismiche, partendo dalle dislocazioni del loro asse di crescita o da alcune loro particolari rotture, ha permesso anche di ottenere dati fondamentali sui terremoti estendendo il loro catalogo ben oltre il limite sino ad allora imposto dalla documentazione scritta degli stessi e rendendo così oggettivamente più realistica

la stima del rischio sismico di una data area. Infine il diametro di equilibrio di una stalagmite di norma dipende solo dalla quantità d'acqua che gli gocciola sopra: pertanto improvvise e/o progressive variazioni nel gocciolamento sono registrate all'interno della struttura della stalagmite: quando l'effetto è "globale" per tutte le stalagmiti di una data cavità, allora siamo in presenza di una evidente variazione climatica.

Negli anni passati la quasi totalità degli studi ambientali sono stati effettuati solo analizzando speleotemi di CaCO_3 . Negli ultimi anni, però, si è dimostrato che vari minerali di grotta possono essere sensibili indicatori delle variazioni avvenute nell'ambiente carsico. Per esempio nelle grotte laviche di Juju Island in Corea del Sud è stato dimostrato che la formazione di calcite (a causa dell'aumento del pH dell'acqua di infiltrazione) prevale nei periodi secchi mentre lo sviluppo dell'opale (per la diminuzione del pH) prevale nei periodi piovosi. Ancora più interessante è risultato il rapporto che si instaura tra i depositi di calcite e gesso all'interno delle

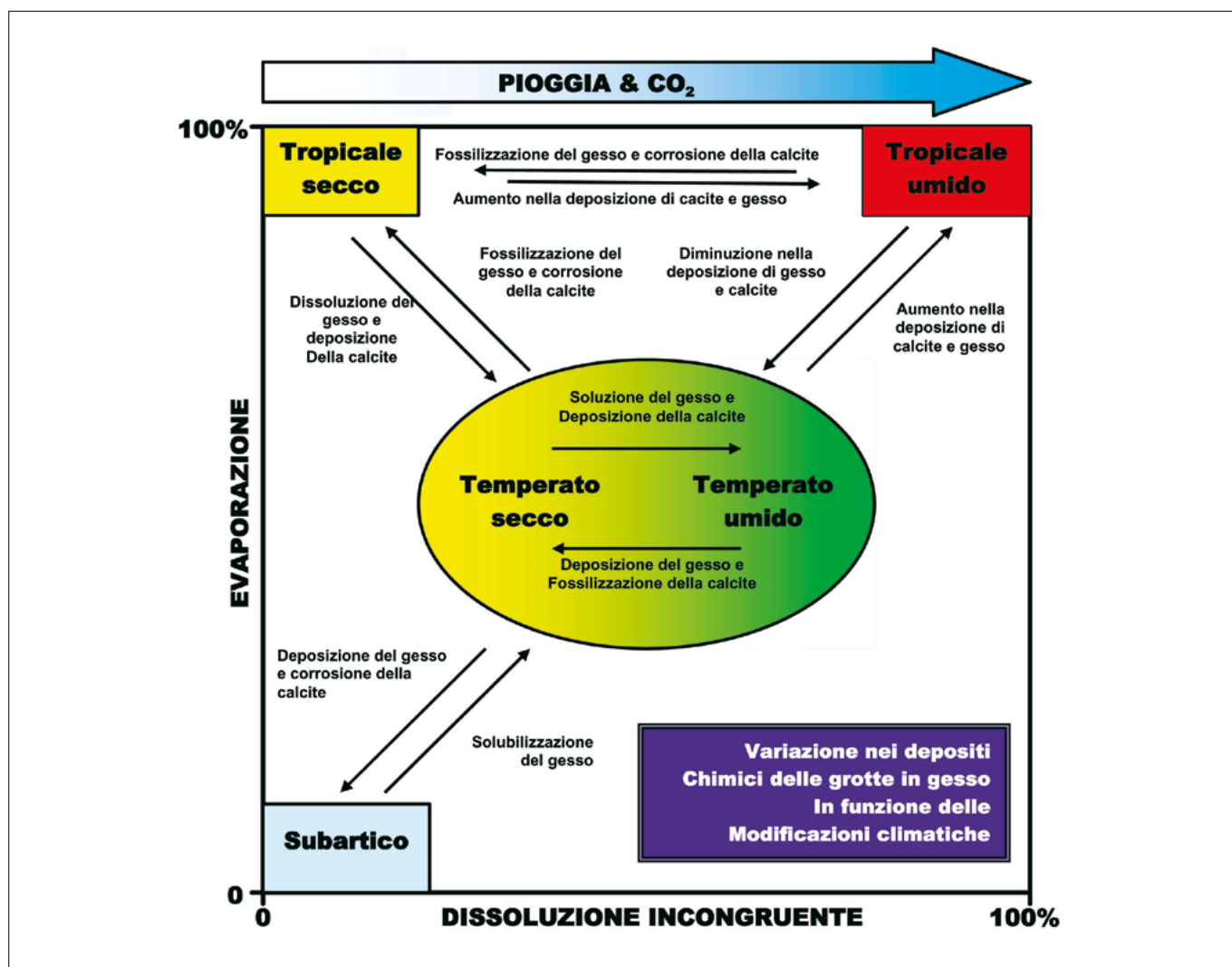


Figura 2. Schema che predice le modificazioni nel rapporto tra gesso e calcite negli speleotemi presenti nelle grotte in gesso in funzione delle modificazioni subite dal clima dell'area in cui si apre la cavità oggetto dello studio

grotte in roccia gessosa presenti in tutto il mondo, che permettono di identificare con precisione i cambiamenti climatici avvenuti durante il loro sviluppo. Infatti la deposizione del gesso avviene per evaporazione e prevale quindi nei periodi caldi, mentre quella della calcite si ha per diffusione della CO_2 e prevale nei climi umidi (Fig. 2).

I materiali, solidi o liquidi, inglobati dagli speleotemi durante il loro sviluppo sono poi fonti di dati paleo-ambientali e paleoclimatici attraverso studi sulle inclusioni fluide o i pollini e i minerali di neoformazione.

Le inclusioni fluide sono parte dell'acqua da cui si sono sviluppati gli speleotemi e che è rimasta intrappolata al loro interno, spesso sono bifasiche (acqua e gas): la loro composizione isotopica fornisce dati sul clima nella zona di ricarica (o dell'acquifero termale), mentre la loro chimica permette di definire l'evoluzione idrologica nel tempo dell'acquifero stesso.

Invece lo studio dei pollini inglobati nelle concrezioni ci dà informazioni sulla vegetazione e quindi sui climi esistenti nell'area quando gli speleotemi erano in formazione.

Una decina di anni fa si è anche, per la prima volta, iniziato a cercare microrganismi ancora viventi all'interno delle grandi inclusioni fluide presenti nei gessi giganti della Grotta dei Cristalli di Naica (Messico). Lo studio del loro DNA ha evidenziato l'esistenza di oltre 30 organismi nuovi per la scienza, che sono evidentemente rimasti incapsulati, e quindi inattivi, all'interno cristalli da 10 a 50.000 anni suggerendo quindi la possibilità che fenomeni simili possano essere avvenuti anche al di fuori delle cavità naturali terrestri.

Risultato davvero eccezionale e che rende non più ipotetiche ma reali le prossime ricerche di eventuali organismi estremofili possibilmente sopravvissuti sul suolo di Marte.

Le concrezioni di grotta si sono poi dimostrate essere anche molto sensibili all'impatto umano sulle cavità sotterranee: il primo minerale antropogenico, osservato già nei primi anni '60 del secolo scorso, è stata la mellite ($\text{Al}_2[\text{C}_6(\text{COO})_6] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) della Grotta Romanelli in Puglia, che si è sviluppata dove i nostri progenitori cuocevano i loro cibi su un letto di terra rossa. Infine, le modificazioni climatiche causate dalle potenti lampade utilizzate per illuminare le grotte turistiche possono diventare talmente grandi da cambiare il tipo stesso di minerale che permette-

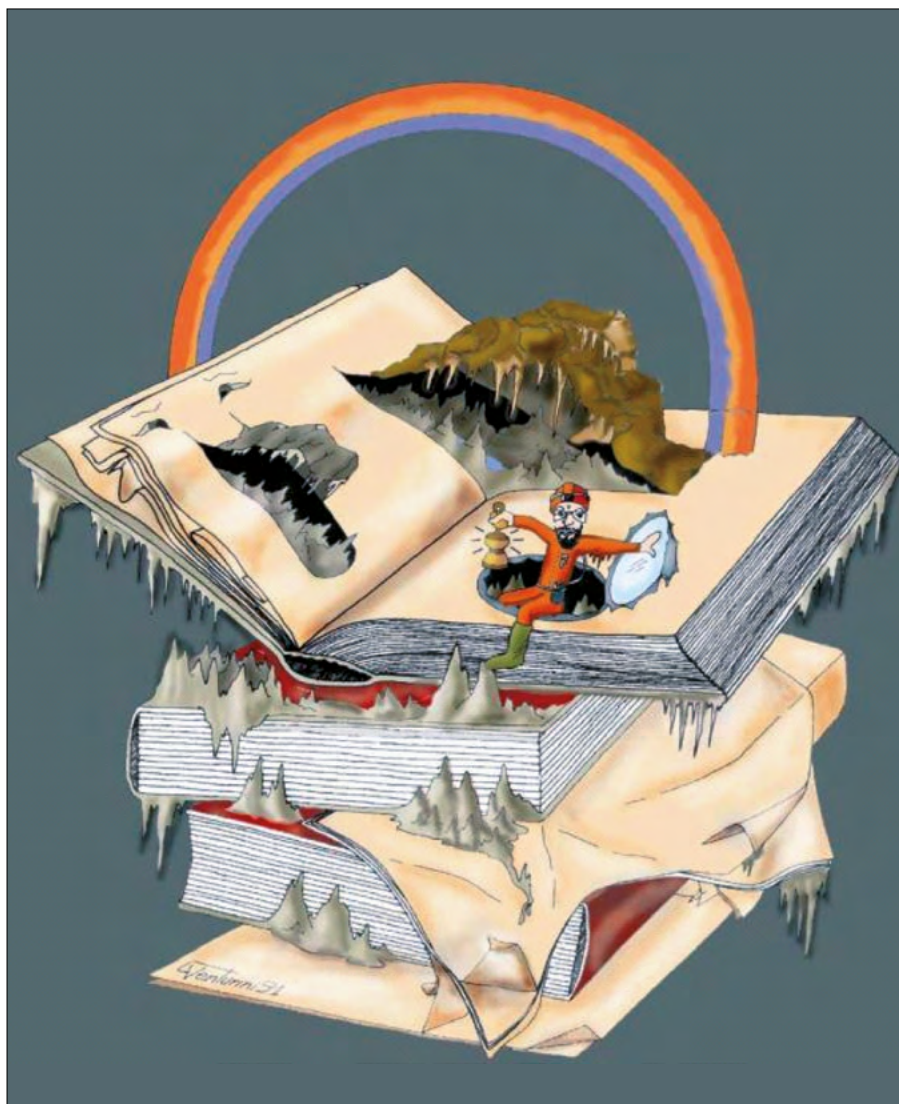


Figura 3. Interpretazione artistica delle grotte, viste come vere e proprie "enciclopedie di pietra", realizzata nel 2020 da Corrado Venturini per la locandina che annunciava una conferenza sulle ricerche scientifiche in grotta tenutosi al Dipartimento BIGEA dell'Università di Bologna

va lo sviluppo degli speleotemi, come è stato verificato negli anni '70 del secolo scorso, quando eccentriche di aragonite hanno iniziato a svilupparsi sull'apice di una stalattite monocristallina di calcite a seguito dell'innalzamento della temperatura ambientale e la diminuzione di umidità relativa dovute al posizionamento di una potente lampada all'interno della Grotta di Castellana a meno di mezzo metro alla concrezione. Al termine di questa breve, e sicuramente largamente incompleta, rassegna sugli studi ambientali possibili grazie alle grotte e ai materiali accumulatisi al loro interno è bene spendere poche parole anche sui limiti temporali che tali studi possono investigare.

Ad oggi, sicuramente, il quaternario è l'ambito in cui le tecnologie appena descritte vengono maggiormente impiegate, considerato il tempo medio di sopravvivenza delle normali cavità naturali. Ma in un prossimo futuro sarà possibile espandere di molto tale limite anche tenendo conto del fatto che esi-

stano grotte, come quelle nelle quarziti dei Tepui Venezuelani, che sono forse le più antiche del mondo e che ospitano concrezioni di opale di centinaia di milioni di anni, e che, teoricamente quindi, contengono quindi preziosi dati ambientali su un periodo altrettanto lungo.

Pertanto le grotte in generale, ed in particolare gli speleotemi da loro ospitati, sono sicuramente tra i più interessanti e dettagliati archivi ambientali, ma, purtroppo, ancora non sappiamo estrarre le informazioni da questi libri di pietra in tutto il loro dettaglio!

Per ora, infatti, riusciamo a leggerne solo i titoli dei capitoli e qualche paragrafo, ma in un futuro non certo troppo lontano, quando sapremo interpretarne correttamente tutte le pagine, allora l'importanza delle cavità naturali aumenterà moltissimo toccando anche nuovi e affascinanti campi di ricerca, teoricamente lontani dall'ambito del carsismo, come l'astro-biologia e la biomineralogia.

Le forme carsiche nella Carta Geomorfologica d'Italia: linee guida alla loro rappresentazione

Karst Landforms in the Geomorphological Map of Italy: Guidelines for their representation

Parole chiave: forme carsiche, cartografia geomorfologica, Programma CARG, Linee guida del Servizio Geologico d'Italia

Key words: karst landforms, geomorphological mapping, CARG Programme, Geological Survey of Italy Guidelines

Maurizio D'Orefice

Geologo – già ISPRA – Servizio geologico d'Italia, Roma

E-mail: mauriziodoreface@gmail.com

Roberto Graciotti

Geologo – già ISPRA – Servizio geologico d'Italia, Roma

E-mail: roberto.graciotti@virgilio.it

La carta geomorfologica rappresenta uno degli strumenti più efficaci per la descrizione, l'analisi e l'interpretazione delle forme che modellano il paesaggio. Essa sintetizza, sulla base di indagini di terreno e di laboratorio, le caratteristiche fisiche del rilievo terrestre, restituendone i principali caratteri morfografici e morfometrici e interpretandone l'origine in relazione ai processi geomorfici, sia endogeni sia esogeni, che li hanno

generati nel tempo. Consente inoltre di ricostruire la successione cronologica delle forme e di distinguere tra elementi attivi e inattivi, offrendo così un quadro evolutivo del territorio.

In questo contesto, il processo morfogenetico carsico assume un ruolo di rilievo nella cartografia geomorfologica e, in particolare, in quella ufficiale prodotta nell'ambito del Programma CARG (Cartografia Geologica e Geotematica

alla scala 1:50.000), coordinato e gestito dall'ISPRA – Servizio Geologico d'Italia. La notevole diffusione dei litotipi carbonatici, e in minor misura di quelli evaporitici, sul territorio nazionale (Fig. 1), unitamente all'eccezionale varietà delle forme carsiche, sia superficiali sia sotterranee, rendono il carsismo uno degli elementi più significativi e caratterizzanti del paesaggio italiano. Doline, campi solcati, piani carsici, inghiottitoi, grotte e articolati sistemi ipogei costituiscono infatti un patrimonio geomorfologico di straordinaria rilevanza scientifica, ambientale e paesaggistica, spesso contraddistinto da elevati livelli di spettacolarità e da un marcato valore culturale, archeologico e antropologico (Fig. 2).

Le forme carsiche, risultato di dinamiche morfoevolutive complesse e di lunga durata, fortemente controllate da fattori litologici, tettonico-strutturali, idrologici, climatici e biologici, si inseriscono in contesti morfogenetici peculiari, caratterizzati dalla prevalenza dei processi di dissoluzione chimica, da specifiche modalità di circolazione delle acque superficiali e sotterranee e da frequenti relazioni genetiche e funzionali tra forme superficiali e sistemi ipogei, non sempre direttamente riconoscibili e tracciabili nella loro completezza. Ne deriva un'elevata variabilità morfografica, morfometrica e morfogenetica, cui si associano ulteriori elementi che rendono non agevole una rappresentazione cartografica univoca e standardizzata. Tra questi elementi si possono citare la diffusa presenza di morfotipi poligenetici, la tendenza delle forme a distribuirsi in modo discontinuo e articolato, con elevata densità areale e frequenti fenomeni di coalescenza, la presenza di limiti spesso incerti e di diversi stati evolutivi,

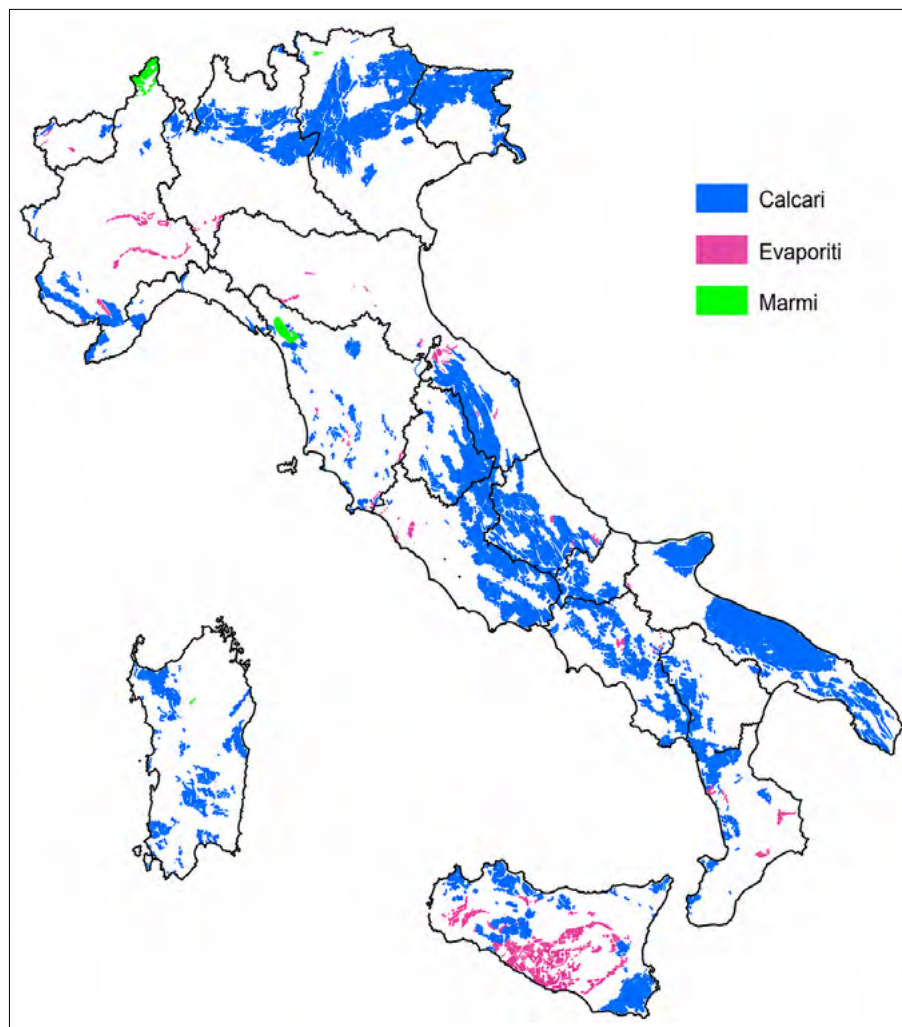


Figura 1. Carta degli affioramenti di rocce carsificabili in Italia (modificata da Sivelli e De Waele, 2013)

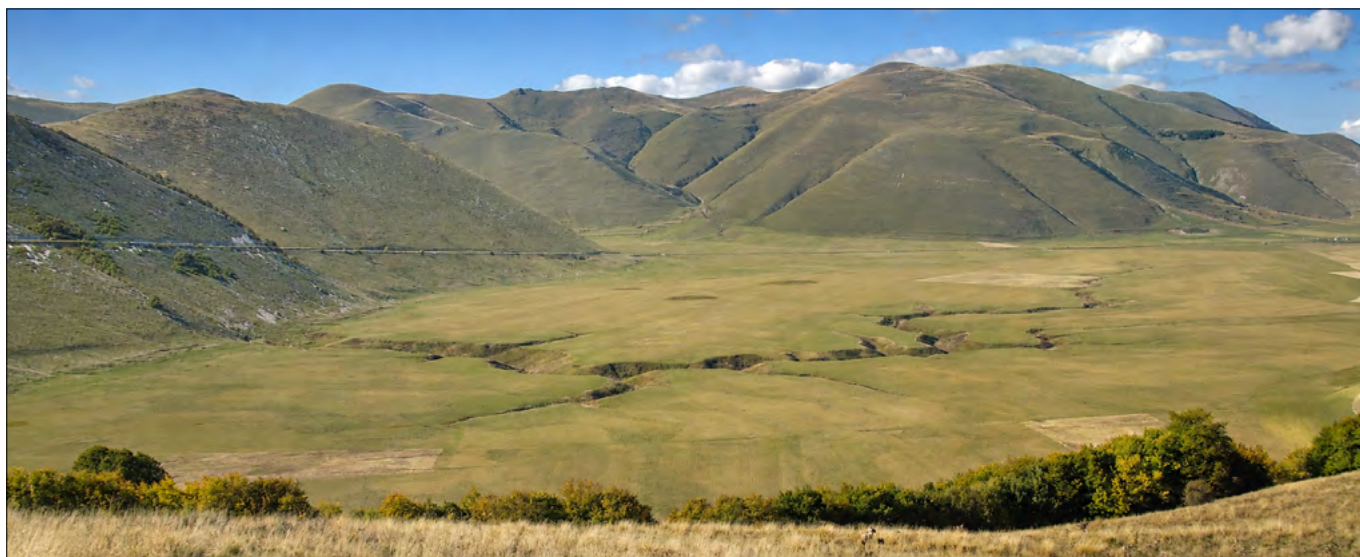


Figura 2. Vista panoramica del settore meridionale del Piano Grande di Castelluccio di Norcia, suggestivo esempio di paesaggio carsico dell'Appennino centrale. Al centro della piana è evidente il tracciato del Fosso dei Mergani, che lungo il margine occidentale (sulla sinistra della figura) s'immerge nell'omonimo inghiottitoio

oltre ai vincoli imposti dalla scala di rappresentazione.

In questo quadro di marcata eterogeneità morfologica e di complessità rappresentativa, le linee guida pubblicate agli inizi degli anni Novanta nel Quaderno n. 4 del Servizio Geologico d'Italia (Brancaccio *et al.*, 1994) hanno costituito un primo importante riferimento per la definizione di uno schema di legenda e di criteri di rilevamento e rappresentazione cartografica omogenei e unitari a scala nazionale, applicabili non solo al carsismo, ma all'insieme dei processi che modellano il rilievo terrestre.

Successivamente, con l'obiettivo principale di aggiornare e integrare il repertorio delle entità geomorfologiche (forme di erosione e di accumulo, con relativi depositi associati e processi morfogenetici) previste nel Quaderno n. 4, è stato pubblicato il Quaderno n. 13 (Campobasso *et al.*, 2018, 2021). Tale aggiornamento, pur mantenendo i principi generali e gli standard di riferimento originari, si inserisce nella prospettiva di realizzare carte geomorfologiche a scale di maggior dettaglio rispetto al 1:50.000, proponendo criteri di rappresentazione cartografica sempre più orientati anche a finalità geologico-applicative. In quest'ottica rientrano le aree carsiche, le quali hanno acquisito un crescente interesse nel contesto della pianificazione territoriale, essendo considerate elementi di rilievo ai fini della valutazione del rischio idrogeologico. Ciò avviene in particolare nei Piani Regolatori comunali, nei Piani Territoriali di Coordinamento provinciali e regionali e nel campo delle opere pubbliche, in relazione sia al rischio di crollo associato alla presenza di cavità

prossime alla superficie, sia al regime idrologico delle principali risorgenze carsiche. Un'attenzione specifica è inoltre dedicata alle condizioni di instabilità delle aree carsiche negli studi di microzonazione sismica, condotti dai comuni italiani ricadenti nelle zone a maggiore pericolosità sismica.

In coerenza con i principi e le finalità della cartografia geomorfologica, basata sulla rappresentazione degli elementi direttamente osservabili in superficie, la legenda del Quaderno n. 13, in continuità con quella precedente, adotta un approccio centrato sulle forme e sui depositi epigei. Tale impostazione prescinde pertanto dalla distinzione tra carsismo epigeo e ipogeo, in quanto una parte significativa dei fenomeni carsici si sviluppa in profondità e non è quindi direttamente rappresentabile nella cartografia geomorfologica ufficiale. Tra le forme epigee sono, comunque, inclusi anche i punti di accesso al reticolo carsico sotterraneo; rispetto alla classificazione tradizionale, essa distingue, tuttavia, solo tra ingresso di grotta e di abisso, escludendo gli elementi privi di diretta manifestazione superficiale, come la proiezione in superficie dei tracciati ipogei o le informazioni accessorie sulle modalità di circolazione sotterranea delle acque, pur rilevanti in ambito speleologico.

La nuova legenda recepisce e integra le esperienze di cartografia geomorfologica in aree carsiche, nonché i principali impianti simbolici proposti in letteratura (tra cui Monroe, 1970; Bini *et al.*, 1986; Bondesan *et al.*, 1992; Field, 1999; Waltham *et al.*, 2005; Gutiérrez & Cooper, 2008), che hanno costituito il riferimento per numerosi studi e realizzazioni cartografiche a grande e media

scala in Italia. Pur riprendendo in larga parte la simbologia del Quaderno n. 4, il nuovo schema introduce al contempo diversi elementi innovativi, alla luce delle più recenti conoscenze scientifiche e delle proposte classificative, con particolare riferimento alle doline e alle microforme carsiche, incluse quelle costiere (De Waele & Furlani, 2013). In particolare, le doline sono classificate distinguendo quelle di dissoluzione, di crollo, alluvionali e di subsidenza in roccia (Fig. 3), con ulteriori specificazioni legate alla genesi e ai materiali di copertura, mentre la descrizione degli aspetti geometrici è demandata al *database* associato alla carta, che costituisce un significativo valore aggiunto per la cartografia geomorfologica ufficiale. Sono inoltre distinte diverse tipologie di campo solcato, descritte in funzione dello stadio evolutivo dell'area carsica e delle microforme prevalenti, anch'esse documentate nel *database*. Tra le innovazioni figurano alcune mesoforme di particolare interesse morfologico, quali città o castelli di roccia, rilievi carsici isolati e blocchi peduncolati. Ulteriori specificazioni riguardano le valli carsiche di tipo cieco e di sorgente, per le quali il simbolo lineare è stato associato rispettivamente a quello di *ponor* o di sorgente carsica.

Il simbolo di nicchia o riparo è esteso anche alle forme a controllo strutturale sviluppate lungo il versante, attraverso una simbologia lineare; nel *database* è indicata anche l'eventuale frequentazione antropica, poiché i ripari sottoroccia risultano spesso associati a siti archeologici preistorici di significativa rilevanza. La legenda introduce inoltre i simboli di sorgente carsica, distinti in intermittente e perenne, oltre all'*estavelle*. Tra le

FORME CARSICHE⁽⁴⁾

FORME DI EROSIONE

Sigla	Nome forma	Attività		Simbolo (gradazioni di arancione)			Note Informazioni in BD
		A	R	poligono	linea	punto	
CA 1	Campo di doline <i>Doline field</i>	X					Database: indicare la frequenza, dimensione, forma e profondità media delle doline; l'orientamento degli assi maggiori delle doline; la presenza di allineamenti di doline e loro orientamento; le tipologie prevalenti.
CA 2	Uvala, grande conca carsica, depressione di origine mista <i>Uvala, great karstic cavity, mixed origin depressions</i>	X					Si considerano con questo simbolo anche le cavità originate dal concorso di più processi come ad esempio le conche glacio-carsiche o le conche nivo-carsiche. Database: specificare se il bordo è con margine: a - ben definito; b - mal definito.
CA 3	Dolina di dissoluzione <i>Solution doline</i>	X					Database: indicare il tipo di bordo: d - ben definito; e - mal definito. Forma della dolina: a - a scodella; b - a piatto; c - troncoconica; d - a imbuto.
CA 4	Dolina a pozzo di crollo <i>Collapse doline</i>	X					Database: tipo di bordo: d - ben definito; e - mal definito. Classificare la copertura rocciosa in: a - roccia carsificabile; b - roccia non carsificabile.
CA 5	Dolina di crollo in depositi coesivi <i>Cover collapse doline</i>	X					Database: tipo di bordo: d - ben definito; e - mal definito. Descrivere spessori e tipologia dei materiali di copertura.
CA 6	Dolina alluvionale <i>Cover sagging doline</i>	X					Database: tipo di bordo: d - ben definito; e - mal definito. Descrivere lo spessore e la tipologia dei materiali di copertura.
CA 7	Dolina di subsidenza in roccia <i>Rock sagging doline</i>	X	X				Database: tipo di bordo: b - ben definito; e - mal definito. Classificare la copertura rocciosa in: a - roccia carsificabile; b - roccia non carsificabile.

Figura 3. Estratto della legenda delle forme carsiche pubblicata nel Quaderno n. 13 del Servizio Geologico d'Italia (Campobasso et al., 2021) e curata da S. Furlani, A. Bondesan, M. D'Orefice e R. Graciotti

forme di accumulo sono previsti i simboli di fondo di dolina con depositi di terra rossa e con prevalenza di prodotti eluvio-colluviali, mentre tra le concrezioni sono considerate anche le dighe di travertino.

Nei casi in cui la natura del substrato non sia chiaramente definibile in carta, è prevista l'indicazione, mediante una lettera, per le forme paracarsiche in gessi/anidriti (G) e in salgemma (S), utile a segnalare la possibile presenza di processi ipercarsici.

La legenda del Quaderno 13 è comunque in continua evoluzione e i nuovi fogli avviati con la ripartenza del Programma CARG, porteranno all'introduzione di ulteriori modifiche e integrazioni. Nel complesso, le soluzioni adottate consentono già oggi una rappresentazione più aggiornata e sistematica delle forme carsiche, in li-

nea con le attuali esigenze conoscitive. L'integrazione con il *database* ne amplia le potenzialità descrittive, rendendo la legenda uno strumento utile sia in campo scientifico sia applicativo.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- BINI A., MENEGHEL M., SAURO U. (1986), *Proposta di legenda per una cartografia geomorfologica delle aree carsiche*, Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 25, 59 pp.
- BONDESAN A., MENEGHEL M., SAURO U. (1992), *Morphometric analysis of dolines*. Journal of Speleology, 21, 1-55.
- CAMPOBASSO C., CARTON A., CHELLI A., D'OREFICE M., DRAMIS F., GRACIOTTI R., GUIDA D., PAMBIANCHI G., PEDUTO F., PELLEGRINI L. (2018), *Aggiornamento ed integrazioni delle Linee Guida al Rilevamento della Carta Geomorfologica d'Italia alla scala 1:50.000. Carta Geomorfologica d'Italia - 1:50.000. Quaderni serie III (1),*

ver. 1.0 del Serv. Geol. d'It., pp. 95, Roma.

CAMPOBASSO C., CARTON A., CHELLI A., D'OREFICE M., DRAMIS F., GRACIOTTI R., GUIDA D., PAMBIANCHI G., PEDUTO F., PELLEGRINI L. (2021), *Aggiornamento ed integrazioni delle Linee Guida al Rilevamento della Carta Geomorfologica d'Italia alla scala 1:50.000. Carta Geomorfologica d'Italia - 1:50.000. Quaderni serie III (1),* ver. 2.0 del Serv. Geol. d'It., pp. 151, Roma.

DE WAELE J., FURLANI S. (2013), *Seawater and biokarst effects on coastal karst*. In: SCHROEDER J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, 6, Elsevier, Amsterdam: 341-350.

FIELD M.S. (1999), *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology*, U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment, EPA/600/R-99/006, Digital version by Karst Waters Institute pp. 201.

GUTIÉRREZ F., COOPER H.A. (2008), *Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas*, Environmental Geology, 53: 1007-1022.

MONROE W. (1970), *A glossary of karst terminology*. Geological Survey Water Supply Paper, 1899-K, pp. 29.

SIVELLI M., DE WAELE J. (Eds.) (2013), *A journey across speleological Italy. Map in scale 1:500,000*, Speleologia 68, Società Speleologica Italiana.

WALTHAM T., BELL F.G., CULSHAW M. (2005), *Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*, Springer, Berlin, pp. 384.

Oltre la dimensione fisica: il carsismo come infrastruttura culturale nei paesaggi appenninici

Beyond the physical dimension: karst as a cultural infrastructure in Apennine landscapes

Sara Carallo
Società Geografica Italiana
E-mail: sara.carallo@uniroma3.it

Parole chiave: Carsismo, paesaggio culturale, Monti Lucretili, mobilità pastorale, saperi locali

Key words: Karst, cultural landscape, Monti Lucretili, pastoral mobility, local knowledge

INTRODUZIONE

Gli ambienti carsici sono generalmente interpretati come sistemi geomorfologici e idrogeologici caratterizzati dalla dissoluzione delle rocce carbonatiche e dalla conseguente formazione di peculiari morfologie superficiali e sotterranee (Mecchia *et al.*, 2003; Cosentino *et al.*, 2010). Tale prospettiva ha consentito di approfondire la conoscenza dei processi fisici che modellano il territorio e delle dinamiche che regolano la circolazione delle acque, contribuendo in maniera significativa agli studi geologici, geomorfologici e ambientali. Meno frequente risulta invece l'attenzione rivolta alle relazioni che, nel lungo periodo, si instaurano tra gli ambienti carsici e le comunità che li abitano e li frequentano. Nei contesti montani dell'Appennino centrale le forme generate dai processi carsici, la localizzazione delle sorgenti, la presenza di conche e pianori, la distribuzione delle aree pascolive e le varie forme di mobilità umana e animale hanno infatti contribuito a lasciare tracce profonde nel paesaggio contemporaneo e a definire relazioni territoriali che si sono consolidate nel corso dei secoli e che continuano ancora oggi a influenzare la percezione e la frequentazione della montagna. Il contributo propone una lettura del carsismo come infrastruttura culturale attraverso il caso dei Monti Lucretili, sistema montuoso carbonatico situato nel settore nord-orientale della Campagna Romana (De Angelis, 1995; Cosentino *et al.*, 2010). Attraverso l'integrazione di fonti geostoriche, cartografiche e orali, il lavoro intende evidenziare come la relazione tra risorse idriche, pascoli e percorsi abbia contribuito alla formazione di un paesaggio culturale nel quale elementi naturali e pratiche umane risultano strettamente intrecciati.

METODOLOGIA E AREA DI STUDIO

La ricerca si inserisce nell'ambito delle attività sviluppate nel progetto PNRR CHANGES (Dipartimento Studi Umanistici, UniRoma Tre, gruppo di ricerca Sara Carallo, Carla Masetti, Emeri Farinetti) e del progetto Rete regionale dei tratturi della transumanza della Società Geografica Italiana e adotta un approccio interdisciplinare fondato sull'integrazione di fonti e metodologie differenti (Carallo, Impei, 2024; Sardella *et al.*, 2026). L'analisi, portata avanti dal 2023 al 2025 ha previsto la consultazione e la georeferenziazione della cartografia storica, con particolare riferimento al Catasto Gregoriano e alla cartografia dell'Istituto Geografico Militare, la raccolta e l'organizzazione in ambiente GIS delle informazioni territoriali, la realizzazione di sopralluoghi sistematici e il censimento di sorgenti, fontanili, architetture rurali e percorsi agro-pastorali. A tali attività si affiancano circa cinquanta interviste rivolte a pastori, agricoltori e abitanti locali, finalizzate alla raccolta di informazioni relative all'uso storico delle risorse idriche, alla mobilità pastorale e alla conoscenza del territorio. Ulteriori dati sono stati acquisiti attraverso attività partecipative, laboratori territoriali e iniziative di citizen science che hanno coinvolto complessivamente oltre un centinaio di persone.

L'area di studio coincide con il Parco Naturale Regionale dei Monti Lucretili, istituito nel 1989 e situato tra la Città Metropolitana di Roma Capitale e la provincia di Rieti. Il massiccio, caratterizzato dalla prevalenza di litologie carbonatiche, presenta una diffusa presenza di fenomeni carsici che si manifestano attraverso doline, conche, pianori d'altitudine, cavità e sistemi di circolazione

idrica sotterranea. All'interno di questo contesto assume particolare interesse il settore compreso tra Monte Gennaro, Monte Pellicchia, Campitello e Valle Cavallera, dove si concentra una fitta rete di percorsi storici, pascoli d'altitudine, sorgenti e strutture pastorali (De Angelis, 1995).

DAL SUBSTRATO CARSICO ALLA COSTRUZIONE DELLO SPAZIO PASTORALE

La ricostruzione dei percorsi agro-pastorali, realizzata attraverso l'integrazione di fonti cartografiche storiche, sopralluoghi e testimonianze orali, mostra come le principali direttrici di attraversamento convergano verso le aree caratterizzate dalla presenza di pascoli e punti d'acqua permanenti. Tale distribuzione suggerisce l'esistenza di una stretta relazione tra le emergenze idriche e l'organizzazione storica degli spostamenti stagionali del bestiame.

In ambienti carsici caratterizzati da una marcata permeabilità dei substrati, la disponibilità dell'acqua costituisce infatti un elemento strategico per la frequentazione delle aree montane. Sorgenti e fontanili hanno rappresentato per secoli nodi fondamentali all'interno della rete territoriale pastorale, condizionando la scelta degli itinerari, la durata delle soste e la localizzazione delle strutture funzionali alle attività di allevamento. La presenza di fonti quali Campitello, Cavallera, Capo d'Acqua e di numerose altre emergenze idriche distribuite lungo i principali percorsi testimonia il ruolo svolto dall'acqua come fattore di organizzazione dello spazio pastorale. Tale relazione emerge con particolare evidenza lungo il percorso della Scarpellata, antica via di accesso ai pascoli del Pratone e di Campitello.

La stessa denominazione conserva la memoria di una direttrice di mobilità storica utilizzata per la conduzione delle greggi verso le aree sommitali del massiccio, confermando il profondo intreccio tra morfologia e pratiche pastorali (Carallo, Impei, 2024). L'importanza di queste risorse emerge anche dalle fonti storiche. Già nel Seicento Giovanni Faber descriveva il Monte Gennaro sottolineando la presenza di abbondanti sorgenti e la straordinaria disponibilità di acque limpide che caratterizzavano il massiccio, evidenziando una peculiarità ambientale che ancora oggi costituisce uno degli elementi distintivi del paesaggio lucretile (Faber, 1628, in De Angelis, 1995). Tale osservazione appare particolarmente significativa poiché testimonia una percezione consolidata della centralità dell'acqua ben prima della formazione delle moderne conoscenze idrogeologiche. Le architetture rurali censite nel corso della ricerca si collocano frequentemente in prossimità delle principali direttrici pastorali e delle sorgenti, suggerendo una relazione funzionale tra disponibilità dell'acqua e organizzazione delle attività economiche tradizionali. In questo senso il carsismo può essere interpretato come una vera e propria infrastruttura territoriale che ha orientato nel tempo la costruzione di reti di mobilità e di utilizzo delle risorse. La lettura integrata della cartografia storica e dei dati raccolti sul terreno consente inoltre di osservare come molte delle direttrici pastorali storiche coincidano oggi con sentieri escursionistici e percorsi di fruizione lenta. Questa continuità riflette la permanenza di una struttura territoriale originatasi dall'interazione tra caratteristiche geomorfologiche, disponibilità delle risorse e pratiche di frequentazione della montagna. I percorsi contemporanei ripropongono infatti, spesso inconsapevolmente, itinerari che per secoli hanno consentito l'accesso ai pascoli e alle sorgenti, confermando la capacità del paesaggio di conservare nel tempo le tracce delle relazioni tra ambiente e società umane.

LA TOPONOMASTICA COME ARCHIVIO DEL PAESAGGIO CARSICO

Se la distribuzione delle sorgenti e dei percorsi consente di leggere il ruolo svolto dal carsismo nell'organizzazione materiale del territorio, i nomi dei luoghi e le fonti orali permettono di coglierne la dimensione culturale. La toponomastica rappresenta una forma di sedimentazione delle conoscenze

territoriali attraverso la quale le comunità locali hanno identificato, descritto e trasmesso nel tempo informazioni essenziali per la frequentazione della montagna (Carallo, Masetti, 2026). Alcuni toponimi conservano tracce dirette delle modalità d'uso del territorio e delle pratiche economiche che lo hanno caratterizzato nel tempo. È il caso della già citata Scarpellata, che Gelsomino interpreta come una "via scalpellata", ricavata nella roccia e utilizzata per la conduzione delle greggi verso i pascoli alti (Gelsomino, 1995). Lo studioso ricorda come da Marcellina una mulattiera basolata percorresse questa valle consentendo il trasferimento stagionale degli animali e come fino all'Ottocento vi si svolgesse una processione di pastori diretta alla Madonna del Pratone. Accanto ai nomi legati alle emergenze idriche, la toponomastica conserva anche una lettura minuta delle forme del rilievo. Termini come fosso, morra, morrone, morretta, morgia e peschio rimandano a solchi vallivi, impluvi, alture, sassi e rupi, mostrando come il lessico locale abbia registrato anche la materialità geomorfologica del paesaggio. Denominazioni quali Fonte Campitello, Fonte Cavaleria, Fonte Crapara e Fontanelle si inseriscono dunque in una più ampia geografia vernacolare che connette forme del terreno, punti d'acqua e pratiche pastorali (Gelsomino, 1995). Le testimonianze raccolte nel corso delle attività di ricerca confermano la persistenza di forme di conoscenza profondamente radicate nell'esperienza diretta del territorio. Pastori e abitanti locali mostrano una conoscenza dettagliata delle sorgenti, delle variazioni stagionali della portata delle acque, delle caratteristiche dei pascoli e delle relazioni tra condizioni climatiche e disponibilità delle risorse. Si tratta di un patrimonio di saperi costruito attraverso l'osservazione continuativa dell'ambiente e trasmesso nel corso delle generazioni, spesso al di fuori di forme codificate di documentazione. Particolarmente significativo risulta il tema della disponibilità idrica. Numerose testimonianze richiamano la progressiva riduzione della portata di alcune sorgenti e una crescente irregolarità nella distribuzione delle precipitazioni. Pur non configurandosi come dati quantitativi in senso stretto, tali osservazioni rappresentano importanti indicatori territoriali, poiché consentono di comprendere come i cambiamenti climatici vengano percepiti e interpretati dalle comunità che frequentano quotidianamente gli ambienti montani. La

memoria delle condizioni passate costituisce infatti un elemento fondamentale per valutare le trasformazioni in atto e per individuare le aree maggiormente esposte alle criticità future. Le pratiche di lettura del territorio sviluppate dalle comunità pastorali hanno contribuito a trasformare elementi naturali in riferimenti culturali condivisi, producendo un patrimonio immateriale che integra e completa le evidenze materiali ancora oggi riconoscibili nel paesaggio dei Monti Lucretili.

DAL PATRIMONIO TERRITORIALE ALLA FRUIZIONE SOSTENIBILE

La ricostruzione delle relazioni tra carsismo, mobilità pastorale e saperi locali consente dunque di individuare elementi utili alla comprensione delle dinamiche contemporanee e alla definizione di strategie di gestione maggiormente consapevoli delle specificità territoriali. Nei Monti Lucretili, come in molte altre aree interne dell'Appennino, una parte significativa delle conoscenze legate all'uso delle risorse idriche e alla lettura del territorio rischia oggi di diventare sempre meno accessibile a causa della progressiva trasformazione delle pratiche economiche tradizionali. In tale contesto, le attività sviluppate hanno consentito di sperimentare modalità di ricerca fondate sul coinvolgimento diretto delle comunità locali. La raccolta delle testimonianze orali, il censimento partecipato degli elementi del patrimonio territoriale, le attività di cartografia collaborativa e i laboratori realizzati sul territorio hanno favorito l'emersione di conoscenze spesso assenti nella documentazione ufficiale ma ancora vive nella memoria degli abitanti. Questo approccio ha permesso di integrare informazioni di carattere storico, geografico e culturale all'interno di un quadro interpretativo più ampio, capace di restituire la complessità delle relazioni tra ambiente e società. Particolare interesse assume il ruolo della cartografia come strumento di connessione tra conoscenze esperte e saperi locali. La rappresentazione dei percorsi pastorali, delle sorgenti, dei fontanili e delle architetture rurali contribuisce a rendere nuovamente leggibili relazioni territoriali che nel tempo sono divenute meno evidenti. La mappa si configura così come uno spazio di confronto tra differenti forme di conoscenza e come uno strumento capace di supportare processi di tutela e gestione del patrimonio. Questa prospettiva assume una particolare rilevanza nel



caso degli ambienti carsici, caratterizzati da un elevato grado di fragilità e da equilibri ambientali spesso delicati. La comprensione delle relazioni storiche tra risorse idriche, mobilità e pratiche di utilizzo dello spazio consente infatti di interpretare il territorio come un sistema complesso nel quale componenti fisiche e componenti antropiche risultano strettamente integrate. In tale quadro, la fruizione sostenibile non può limitarsi alla valorizzazione dei singoli elementi del patrimonio, ma deve fondarsi sulla capacità di riconoscere e trasmettere le relazioni che ne hanno determinato la formazione. Tale prospettiva si colloca nel più ampio quadro delle ricerche dedicate alla protezione del patrimonio culturale rispetto ai cambiamenti climatici e ai rischi naturali e antropici (Sarrella *et al.*, 2026). L'idea di carsismo come infrastruttura culturale proposta in questo contributo consente quindi di leggere tali relazioni come parte di un unico processo territoriale attraverso il quale le comunità hanno costruito modalità specifiche di utilizzo, rappresentazione e interpretazione della montagna. Le forme del rilievo e la mobilità pastorale appaiono dunque come componenti interdipendenti di un paesag-

gio culturale stratificato nel tempo. La ricerca mostra inoltre come la combinazione tra fonti storiche, strumenti cartografici, rilevamenti sul terreno e partecipazione delle comunità locali possa offrire nuove chiavi di lettura per la comprensione degli ambienti carsici contemporanei. In questa prospettiva, la tutela del patrimonio geografico e geologico coinvolge anche il riconoscimento dei saperi e delle pratiche che hanno contribuito a costruirne il significato. I Monti Lucretili rappresentano, da questo punto di vista, un contesto particolarmente significativo per osservare come il carsismo continui ancora oggi a influenzare le modalità attraverso cui il territorio viene percepito e frequentato.

BIBLIOGRAFIA

- CARALLO S., IMPEI F. (2024), *Tracce di transumanza sui Monti Ernici, sui Monti Lucretili e sui Monti Sabini. Fonti ed immagini di un progetto di ricerca*. Società Geografica Italiana, Roma.
- CARALLO S., MASETTI C. (2026, in corso di stampa), *La toponomastica dei Monti Lucretili. Chiavi di lettura di un paesaggio storico*, in *Toponimi, percezioni e rappresentazioni territoriali*.
- COSENTINO D., CIPOLLARI P., PASQUALI V. (2010), *Carta della geodiversità del settore*

Sabino-Lucretile-Cornicolano. Note illustrative. Roma.

DE ANGELIS G. (a cura di) (1995), *Monti Lucretili. Parco regionale naturale. Invito alla lettura del territorio*. 5ª edizione, Tivoli.

FABER J. (1628), *Animalia Mexicana*. Roma.

GELSOMINO R. (1995), *Toponomastica dei Monti Lucretili*, in DE ANGELIS G. (a cura di), *Monti Lucretili. Parco regionale naturale. Invito alla lettura del territorio*. 5ª edizione, Tivoli.

MECCHIA G., MECCHIA M., PIRO M., BARBATI M. (2003), *Le grotte del Lazio. I fenomeni carsici, elementi della geodiversità*. Regione Lazio, Roma.

SARDELLA A., CARALLO S., DI CIACCIO F. *et al.* (2026), *Recovery of terraced landscapes as a distinctive sign of land culture and protection from hydrogeological risk*, in DI CIACCIO F., FIORINI L., TUCCI G. (a cura di), *Methodologies and Strategies for Cultural Heritage Protection and Conservation Against Climate Changes, Natural and Anthropical Risks*. Springer, Cham.

Oltre la superficie: la geofisica per lo studio del carsismo

Antonio Bratus
Paolo Paganini
Michele Potleca

Istituto Nazionale di Oceanografia
e di Geofisica Sperimentale

E-mail: abratus@ogs.it

Beyond the Surface: Geophysics for the Study of Karst

Parole chiave: Carsismo, Carso Classico, LiDAR, Tomografia di Resistività Elettrica (ERT), FullWaver, SLAM, Grotta dell'Orso, Dolina Cerbenjak

Key words: Karst, Classical Karst, LiDAR, Electrical Resistivity Tomography (ERT), FullWaver, SLAM, Grotta dell'Orso, Cerbenjak doline

Il contributo illustra due approcci complementari per lo studio avanzato di aree carsiche e cavità sotterranee, focalizzati sulla valorizzazione del patrimonio speleologico noto e sull'individuazione di strutture ipogee inesplorate. Tramite casi studio nel Carso Classico triestino, si confrontano metodologie fisiche differenti volte a migliorare la conoscenza di ambienti complessi. Le grotte presentano infatti geometrie intricate, logistica complessa ed elevata umidità, fattori che ostacolano il rilievo topografico (Kershaw, 2012); tuttavia, una dettagliata comprensione morfo-speleologica è essenziale per ricostruirne l'evoluzione e la storia idrologica (Ford & Williams, 2007).

Se negli ultimi decenni il sistema DistoX (Heeb, 2014) ha soppiantato la topografia tradizionale a bussola e cordella metrica (Bagliani *et al.*, 1992), la ricerca moderna si affida a telerilevamenti avanzati. Fotogrammetria digitale e scansione laser (TLS) offrono modelli 3D ad alta risoluzione (Potleca, 2008; Paganini & Pavan, 2012; Konsolaki *et*

al., 2020; De Waele *et al.*, 2018), ma un recente progresso è segnato dai sistemi di mappatura mobile (MMS) basati su tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), che consentono acquisizioni continue in movimento senza treppiede (Zlot & Bosse, 2014).

In ambienti ipogei privi di segnale GNSS, la tecnologia SLAM integra dati inerziali (IMU) e geometrici (LiDAR) per stimare la traiettoria e ricostruire lo spazio (Di Filippo *et al.*, 2023). Tali rilievi LiDAR ad alta densità supportano oggi approfondite analisi geomorfologiche e strutturali (De Waele *et al.*, 2018; Gallay *et al.*, 2015). Questa metodologia definisce il primo caso studio della Grotta dell'Orso (TS), dove la fusione di dati laser terrestri e aerei in un modello 3D unificato ha permesso un'analisi morfo-geometrica esaustiva, superando i limiti dei precedenti rilievi discreti.

L'approccio combinato tra Airborne Laser Scanning (ALS) e Terrestrial Laser Scanning (TLS) ha inoltre consentito la ricostruzione accurata dello spessore della volta della grotta, un

parametro precedentemente noto solo con bassa precisione; la nuvola di punti finale risultante supporta così la stampa 3D, la visualizzazione in realtà virtuale e l'esplorazione interattiva basata sul web, fornendo una copia digitale completa per scopi scientifici, didattici e di turismo sostenibile.

Di contro, la caratterizzazione geometrica e strutturale dei sistemi carsici richiede anche l'esplorazione indiretta del sottosuolo, elemento fondamentale per comprendere l'evoluzione geomorfologica su scala macroscopica, la circolazione idrica sotterranea e la stabilità complessiva degli ammassi rocciosi. In questo contesto, l'identificazione e la corretta interpretazione delle anomalie ipogee costituiscono ancora una fonte di incertezza, rendendo necessario l'impiego di metodologie geofisiche di superficie in grado di discriminare accuratamente tra cavità aperte, strutture carsiche occluse e macro-porosità riempite da sedimenti. Tra queste tecniche, la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) 2D e 3D si è affermata nel tempo come uno degli strumenti più efficaci per la modellazione e la mappatura delle strutture carsiche, grazie alla sua elevata sensibilità ai forti contrasti di resistività esistenti tra l'ammasso carbonatico compatto e le discontinuità che lo intersecano (Chalikakis *et al.*, 2011).

L'interpretazione dei dati ERT in ambiente carsico rimane tuttavia complessa a causa dell'elevata eterogeneità del sottosuolo; in particolare, la presenza di riempimenti argillosi all'interno di cavità e condotti può generare anomalie conduttive tali da mascherare la presenza di vuoti reali o simulare zone intensamente fratturate, introducendo significative ambiguità interpretative. Per ridurre tali incertezze risulta essenziale ottimizzare la geometria dei dispositivi elettrodi e integrare differenti approcci geofisici, al fine di migliorare la risoluzione spaziale e la capacità di

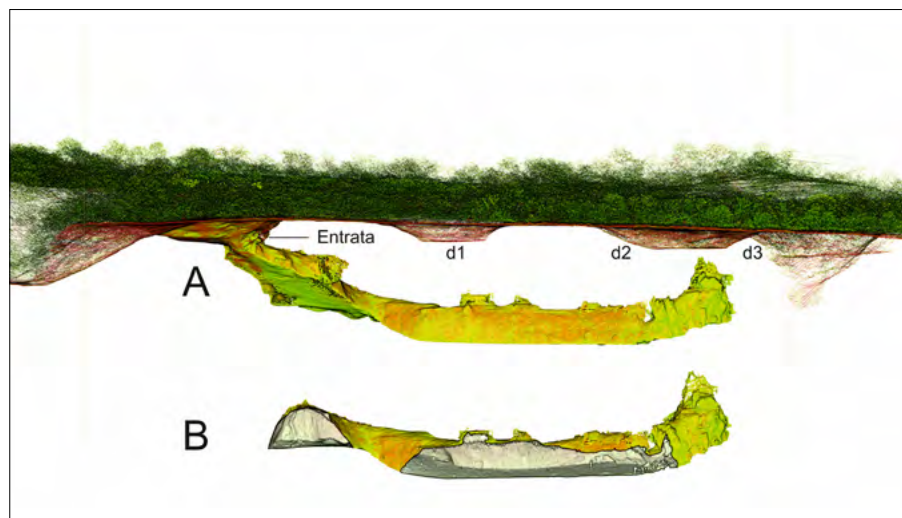


Figura 1. Vista prospettica (prospetto ovest) del modello tridimensionale integrato: (A) sezione in cui si evidenzia la fusione geometrica tra i dati acquisiti in cinematico tramite tecnologia SLAM e il rilievo LiDAR aereo, esaltando le doline di dissoluzione superficiali (d1 e d2 e la stretta vicinanza geometrica con la dolina di crollo (d3) in corrispondenza del settore terminale della galleria ipogea; (B) sezione inferiore modellata in spaccato per mostrare lo sviluppo volumetrico interno della cavità. La nuvola di punti è renderizzata con una scala di colore definita in base all'intensità del segnale di ritorno (riflettanza)

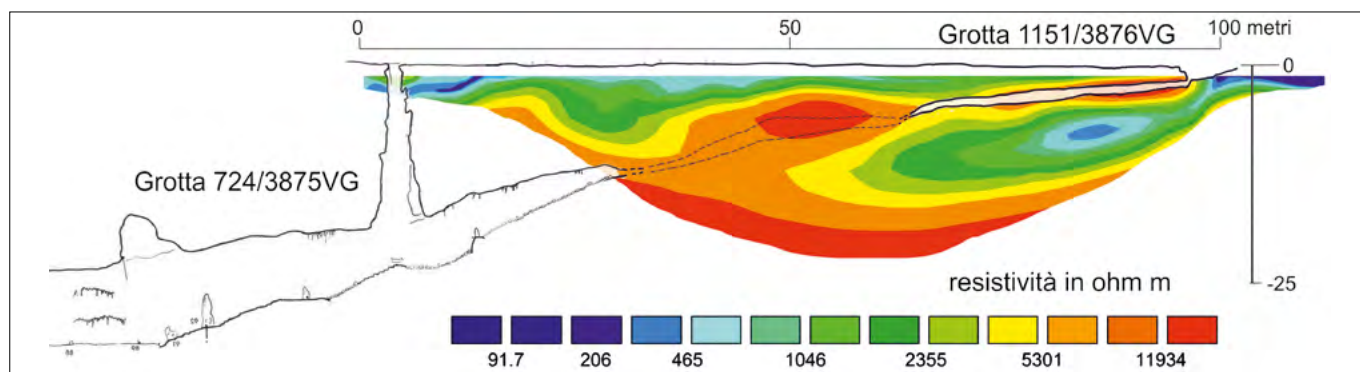


Figura 2. Modello 2D di resistività elettrica del sottosuolo elaborato nel 2001. Si evidenzia un'anomalia ad alta resistività in possibile continuità strutturale tra la Grotta Costantino Doria (724/3875VG) e la Grotta 3 a Est di Borgo Grotta Gigante (1151/3876VG). Sulla porzione laterale destra del profilo, aree a bassa resistività (conduttive) indicano depositi sedimentari incoerenti di riempimento carsico

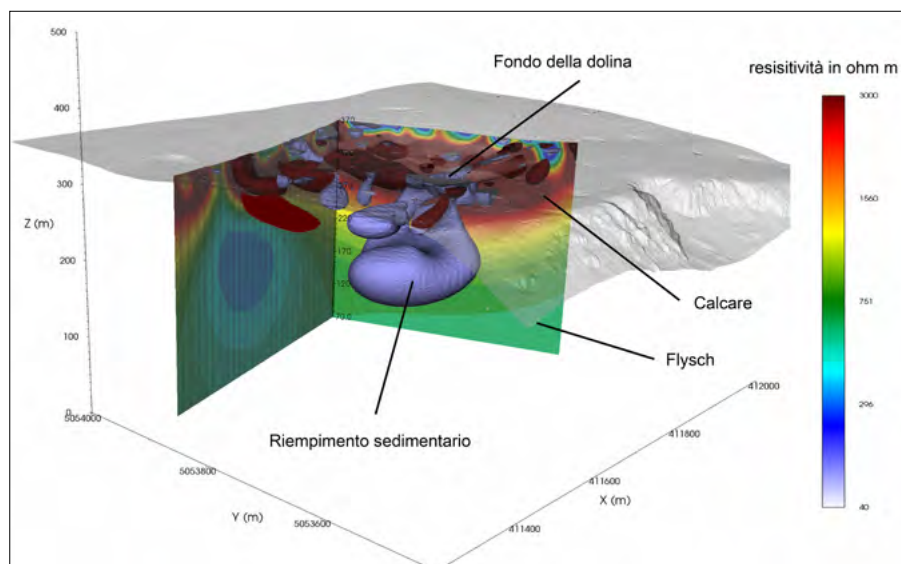


Figura 3. Modello di resistività 3D dell'area della dolina Cerbenjak, elaborato nel 2026, che ha consentito di acquisire informazioni inedite sulla struttura profonda del sottosuolo e sulla distribuzione delle principali anomalie carsiche, identificando potenziali strutture ipogee, condotti e zone di alterazione con riempimento sedimentario

definire la reale natura delle strutture ipogee (Baradello *et al.*, 2003).

L'introduzione di sistemi di acquisizione wireless basati su nodi indipendenti, come la tecnologia FullWaver associata a trasmettitori ad alta potenza, consente l'implementazione di acquisizioni tridimensionali della resistività (ERT 3D) ad elevata flessibilità geometrica e notevole profondità investigativa (Bratus *et al.*, 2025).

Tale approccio favorisce la realizzazione di framework multi-dimensionali innovativi, particolarmente adatti ad ambienti carsici complessi e logisticamente impegnativi (Bratus *et al.*, 2026), migliorando significativamente la capacità di distinguere tra cavità reali e corpi sedimentari conduttivi e fornendo indicazioni di elevato valore per l'esplorazione speleologica.

L'integrazione di queste tecnologie avanzate di rilievo e prospezione geofisica evidenzia come la ricerca carsologica moderna possa operare simultaneamente e proficuamente su due fronti: da un lato la ricostruzione digitale e la valorizzazione di ambienti già acces-

sibili, dall'altro l'indagine indiretta del sottosuolo finalizzata alla scoperta di strutture ancora sconosciute.

I risultati complessivi, sviluppati in collaborazione con i ricercatori dell'Università degli Studi di Trieste, dimostrano il potenziale di questi approcci convergenti nel ridefinire la comprensione dell'evoluzione geomorfologica e geologica del Carso Triestino, aprendo nuove e stabili prospettive per le strategie future di esplorazione dell'ambiente ipogeo.

BIBLIOGRAFIA

- BAGLIANI F., COMAR M., GHERBAZ F., NUSSDORFER G. (1992), *Manuale di rilievo ipogeo*. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Trieste.
- BARADELLO L., BRATUS A., NIETO YABAR D., PAGANINI P., PALMIERI F. (2003), *Integrated geophysical methods to define hypogeous karstic features*. Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Trieste n. 49.
- BRATUS A., SOUZA DO ARAUJO O., BERTOLINI G., BERTONE N., BORGATTI L., FORTE E., GIORGI M., PELLEGRINI F., SPAGNI R., ZAMBRINI R. (2025), *A three-dimensional resistivity approach: the Ca' Lita landslide experiment*, Atti del Conve-
- gno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida (GNGTS), Sessione 2.1, OGS, Trieste.
- BRATUS A., FORTE E., GIORGI M. (2026), *The Frostini project: A framework enabling 4D electrical resistivity investigations on a rock glacier*. EGU General Assembly 2026, Vienna, Austria, EGU26-12129.
- CHALIKAKIS K., PLAGNES V., GUERIN R., VALOIS R., BOSCH F. (2011), *Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview*. Hydrogeol. J., n. 19.
- DE WAELE J., FABBRI S., SANTAGATA T., CHIARINI V., COLUMBU A., PISANI L. (2018), *Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy)*. Geomorphology n. 319.
- DI FILIPPO A., MAROTTA F., CHIAPPINI S. (2023), *Performance assessment of handheld mobile mapping systems in underground and confined environments*. Remote Sensing n. 15.
- FORD D., WILLIAMS P. (2007), *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester.
- GALLAY M., KAŇUK J., HOCHMUTH Z., MENEELY J. D., HOFIERKA J., SEDLÁK V. (2015), *Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia*. International Journal of Speleology n. 44.
- HEEB B. (2014), *The next generation of DistoX*. CREG Journal n. 88.
- Kershaw B. (2012), *Managing cave survey information*. Helictite n. 41.
- KONSOLAKI A., VASSILAKIS E., GOULIOTIS L., KONTOSTAVLOS G., GIANNPOULOS V. (2020), *High resolution digital 3D modelling of subsurface morphological structures of Koutouki Cave*. Greece, Acta Carsologica n. 49.
- PAGANINI P., PAVAN A. (2012), *Rilievo laser scanner della Grotta Gigante*. Progressione n. 58.
- POTLECA M. (2008), *Il laser scan a supporto delle analisi geologiche e geomorfologiche*. Università degli Studi di Trieste, Trieste.
- BORNEO, In: *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*, pp. 23-29.
- ZLOT R., BOSSE M. (2014), *Efficient large-scale three-dimensional mobile mapping for underground mines*. Journal of Field Robotics n. 31.



Lavoriamo per la TUTELA dell'AMBIENTE in BASILICATA

***L'ambiente è di tutti:
proteggiamolo insieme
con azioni quotidiane***

Sinkholes in Italia: dal carsismo alle forme pseudo-carsiche-rischio e prevedibilità

Stefania Nisio

ISPRA- Dipartimento per il servizio Geologico d'Italia

E-mail: stefania.nisio@isprambiente.it

Sinkholes in Italy: from karst to pseudo-karst – hazard assessment and predictability

Parole chiave: Sinkhole naturali; fenomeni carsici; piping e suffosione; idrogeologia; pericolosità da sinkhole

Key words: Natural sinkholes; karst processes; piping and suffosion; hydrogeology; sinkhole hazard

ABSTRACT

Italy represents one of the European countries most affected by sinkhole phenomena because of its complex geological, tectonic, and hydrogeological framework. Sinkholes occur in a wide range of geological settings, from classical karst terrains developed in carbonate and evaporitic rocks to non-karst environments characterized by thick sedimentary covers where internal erosion processes dominate. Based on the Italian National Sinkhole Database, which currently includes approximately 14,300 natural sinkholes, this review focuses exclusively on natural sinkholes related to karstification and piping processes. Particular attention is given to the geological factors controlling their development, their spatial distribution across the Italian territory, and the implications for hazard assessment and predictability. The Italian case is especially significant because it highlights the coexistence of classical karst sinkholes and pseudo-karst sinkholes generated by deep piping processes, often associated with confined aquifers, artesian groundwater circulation, and deep gas emissions. Understanding the mechanisms responsible for their formation is fundamental for improving susceptibility analyses, risk mitigation strategies, and land-use planning.

1. INTRODUCTION

Sinkholes are among the most widespread and potentially damaging geological hazards. They are generally defined as closed depressions formed by dissolution, collapse, subsidence, or internal erosion processes affecting the ground surface. Their dimensions may vary from a few meters to several hundreds of meters in diameter and depth, and their evolution may be either gradual

or sudden. In many cases, sinkholes develop without obvious precursory signs, making prediction particularly difficult.

Traditionally, sinkholes have been associated with karst environments, where groundwater dissolves soluble rocks such as limestone, dolomite, gypsum, and salt. However, numerous studies conducted in Italy demonstrate that sinkhole formation is not restricted to classical karst terrains. Similar landforms may develop in volcanic districts, alluvial plains, and intramontane basins through mechanisms controlled by internal erosion, piping, and groundwater circulation.

The Italian peninsula offers a particularly suitable environment for sinkhole development because of its geological diversity. Carbonate massifs, evaporitic formations, volcanic terrains, extensive alluvial plains, and tectonically active basins coexist within a relatively limited territory (Nisio, 2008; Nisio *et al.* 2026; Ciotoli *et al.* 215; Calligaris *et al.* 2020; Ruggieri, 2022; Venti *et al.*, 2026). This complexity has favoured the development of a remarkable variety of sinkhole types, making Italy a natural laboratory for studying both karst and pseudo-karst processes.

The national inventory developed by ISPRA since 2000 represents one of the largest sinkhole databases in Europe and provides an important basis for understanding sinkhole distribution, genetic mechanisms, and associated hazards.

2. GEOLOGICAL FRAMEWORK AND SINKHOLE DISTRIBUTION IN ITALY

The geological evolution of Italy is closely related to the interaction between the African and Eurasian tectonic plates. The formation of the Alps and Apennines, together with long-term tectonic

activity, generated a highly heterogeneous geological framework characterized by carbonate platforms, evaporitic successions, volcanic districts, foredeep deposits, and extensional basins.

This structural complexity exerts a primary control on groundwater circulation, fluid migration, and dissolution processes. Carbonate and evaporitic formations provide ideal conditions for karstification, while thick sedimentary covers and confined aquifers create favorable conditions for piping-related phenomena.

The Italian National Sinkhole Database reveals a highly heterogeneous spatial distribution of sinkholes (Nisio, 2013) (*Fig. 1*). Classical karst sinkholes are concentrated mainly in the carbonate plateaus of Friuli Venezia Giulia and Veneto, as well as in the Murge and Gargano regions of southern Italy (Parise, 2011; Calligaris *et al.*, 2020). More generally, classical karst landscapes characterized by abundant solution and collapse sinkholes are widely developed throughout the Apennine carbonate platform domains, particularly within the Latium–Abruzzi platform (Spiniello *et al.*, 2026), the Murge and Gargano areas of Apulia, the Friuli Karst, and several carbonate sectors of Sicily. In contrast, piping sinkholes are particularly widespread in the Tyrrhenian regions of Lazio, Campania, Abruzzo, Umbria and Tuscany, where thick alluvial and pyroclastic covers overlie buried carbonate bedrock (Nisio 2003, 2008; Nisio *et al.*, 2026; Ciotoli *et al.*, 2015; Venti *et al.*, 2026). Conversely, only limited and localized occurrences have been documented in the Adriatic foredeep sectors of eastern Abruzzo and the Marche Region, where different stratigraphic and hydrogeological conditions appear to be less favourable to the development of deep piping processes.



Figure 1. Distribution of natural sinkholes recorded in the Italian National Sinkhole Database. The map highlights the widespread occurrence of sinkholes throughout Italy, with major concentrations in carbonate karst regions and in central Tyrrhenian lowlands affected by piping and internal erosion processes

es (Prinzi *et al.*, 2026). The distribution of these phenomena demonstrates that sinkhole occurrence is strongly influenced by geological and hydrogeological conditions rather than by surface morphology alone. Consequently, susceptibility assessment requires a detailed understanding of subsurface processes and groundwater dynamics (*Fig. 1*).

3. KARST SINKHOLES

Karst sinkholes are generated by the dissolution of soluble rocks under the action of slightly acidic meteoric and groundwater (Cvijic', 1893; Sweeting, 1972; Sauro 2003, 2012; Cooper *et al.*, 1998; Cooper, 2008; De Waele & Gutiérrez, 2022). Carbon dioxide dissolved in infiltrating water promotes chemical

weathering and progressive removal of carbonate or evaporitic material, creating underground cavities and depressions that may eventually reach the surface.

Solution sinkholes are the most typical karst landforms. They form where soluble bedrock is exposed or covered by only a thin layer of soil (Waltham *et al.*, 2005). The gradual dissolution of rock produces shallow depressions with smooth slopes and rounded morphology. Their evolution generally occurs over long timescales and reflects the intensity of groundwater circulation and the structural characteristics of the bedrock.

These sinkholes are particularly abundant in the carbonate plateaus of northeastern Italy and in the karst regions of Apulia, where thousands of do-

lines testify to long-lasting dissolution processes.

Where soluble bedrock is overlain by unconsolidated sediments, karst cavities may progressively enlarge due to ongoing dissolution. The resulting ground deformation may occur as gradual sagging or subsidence sinkholes, characterized by progressive settlement and accommodation of the overburden, or evolve into cover-collapse sinkholes when the sedimentary cover loses mechanical support and collapses abruptly into the underlying cavity (Nisio 2008, 2023; Gutierrez *et al.*, 2014). This process produces cover-collapse sinkholes, characterized by steep walls and sudden formation. Compared with solution sinkholes, cover-collapse sinkholes pose a greater hazard because of their rapid development and the possibility of catastrophic ground failure.

The occurrence of cover-collapse sinkholes depends on the thickness and mechanical properties of the cover deposits, the geometry of underground cavities, and groundwater fluctuations. These factors determine the stability of the overburden and the probability of collapse (Gutiérrez *et al.* 2008, 2014).

4.PSEUDO KARST SINKHOLES- PIPING SINKHOLES

One of the most distinctive aspects of the Italian sinkhole landscape is the widespread occurrence of sinkholes generated by suffosion or piping processes (Castiglioni, 1986; Nisio, 2003). These phenomena are not directly related to classical karstification but are produced by internal erosion affecting thick sedimentary covers (Vitek, 1983, Nisio 2003; Halliday 2007; Oliveira *et al.*, 2019). Because their morphology closely resembles that of karst sinkholes, they are commonly regarded as pseudo-karst landforms.

Piping consists of the progressive removal of fine-grained particles by groundwater flow. Over time, the erosion of sediments creates subsurface conduits and cavities that propagate upward until the ground surface collapses. Unlike karst sinkholes, where dissolution is the dominant mechanism, piping sinkholes are mainly controlled by mechanical erosion processes.

Deep piping sinkholes represent one of the most characteristic natural hazards of central Italy. They occur within thick clayey and silty deposits, often exceeding several tens or even hundreds of meters in thickness. These deposits commonly

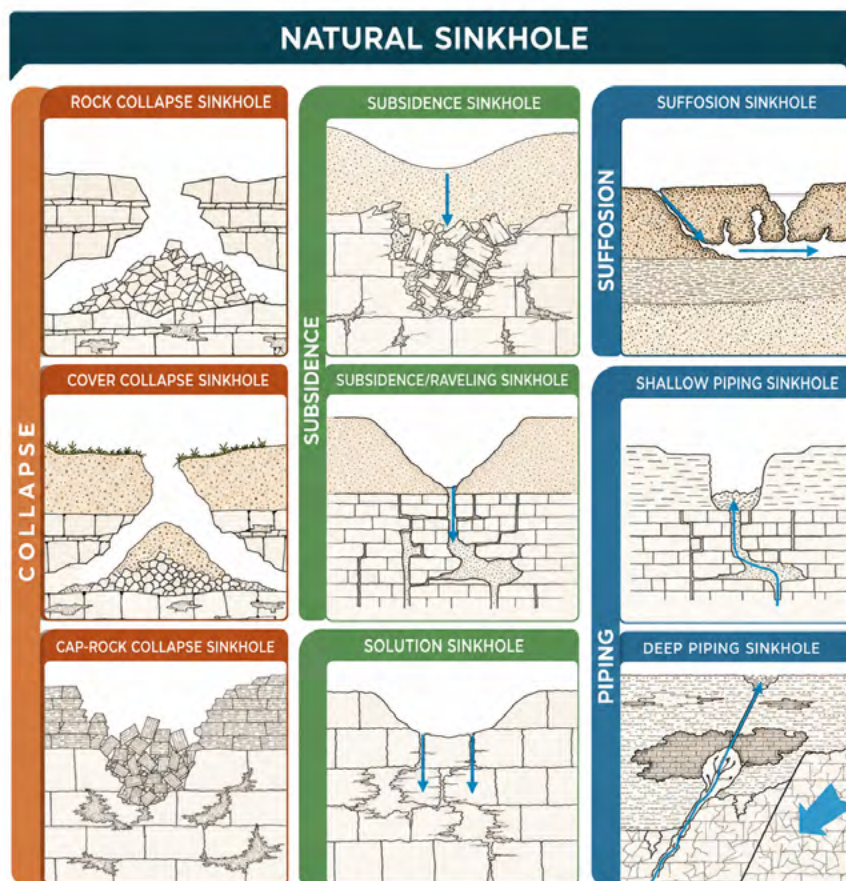


Figure 2. Process-based classification of natural sinkholes proposed for the Italian territory. The scheme illustrates the main genetic mechanisms responsible for sinkhole formation, including rock collapse, cover collapse, cap-rock collapse, subsidence, solution, suffosion, shallow piping and deep piping processes

overlie buried carbonate aquifers subjected to confined hydraulic conditions.

A distinctive feature of deep piping sinkholes is the presence of mineralized groundwater and deep-origin gases, mainly carbon dioxide and hydrogen sulphide. Groundwater rises through faults and fractures under artesian pressure, generating a combination of chemical dissolution, mechanical erosion, and sediment mobilization (Forti, 2002). This mechanism, known as the Artesianism/Gas model, plays a fundamental role in the initiation and evolution of many Italian sinkholes (Nisio *et al.* 2007; Nisio 2003, 2008; Caramanna *et al.*, 2008).

The interaction between upward groundwater flow, gas emissions, and sediment erosion promotes the progressive formation of underground voids. Once these voids reach a critical size, the overlying sediments collapse, producing large sinkholes that may suddenly appear at the ground surface.

Many of the most famous sinkholes of Lazio, including those occurring in the Pontina Plain and other intramontane basins, have been interpreted according to this model (Nisio, 2008; Nisio *et al.* 2026; Vitale *et al.*, 2026). Their occurrence demonstrates that sinkholes can develop even in areas where soluble

bedrock lies at considerable depth below the surface.

Shallow piping sinkholes occur where a relatively thin cohesive cover overlies permeable sediments or bedrock. Pressurized groundwater initiates erosion at the contact between different geological layers. Continued sediment removal progressively enlarges the underground void until a collapse mechanism similar to cover-collapse sinkholes takes place.

Although generally smaller than deep piping sinkholes, these features may develop rapidly and constitute an important hazard in agricultural and urbanized areas.

Based on the dominant genetic mechanism, natural sinkholes in Italy can be classified into collapse, subsidence, solution, suffosion and piping sinkholes (Fig. 2). This process-based classification allows the distinction between sinkholes generated by dissolution and roof collapse in karst terrains and those associated with internal erosion processes occurring within thick sedimentary covers. In particular, the distinction between shallow and deep piping sinkholes is fundamental in the Italian context, where deep-seated groundwater circulation and artesian conditions frequently control sinkhole development.

5. HAZARD ASSESSMENT AND PREDICTABILITY

Predicting sinkhole occurrence remains a major scientific challenge because sinkhole formation results from the interaction of multiple geological, hydrogeological, and environmental factors. Nevertheless, hazard assessment can be significantly improved through the identification of predisposing and triggering conditions.

Among the principal predisposing factors are the presence of soluble rocks, extensive fracture systems, confined aquifers, thick fine-grained covers, abundant groundwater circulation, and deep gas emissions. These conditions create favorable environments for both karstification and piping processes.

Triggering factors include intense rainfall events, groundwater-level fluctuations, prolonged droughts followed by rapid recharge, earthquakes, and surface loading. These factors can accelerate ongoing subsurface processes and induce sudden collapse.

For hazard assessment purposes, the distinction between karst and piping sinkholes is fundamental because the monitoring strategies differ considerably. Karst sinkholes require detailed characterization of soluble bedrock and cavity systems, whereas piping sinkho-

les require investigation of sediment properties, hydraulic gradients, groundwater pressure, and internal erosion processes.

The Italian National Sinkhole Database provides an essential tool for susceptibility analysis because it allows the identification of recurrent spatial patterns and the reconstruction of previous events. Integrating geological mapping, geophysical surveys, hydrogeological monitoring, and historical inventories represents the most effective approach for improving sinkhole predictability.

6. CONCLUSIONS

The Italian territory hosts a remarkable variety of natural sinkholes generated by both karst and pseudo-karst processes. Classical karst sinkholes are associated with the dissolution and collapse of carbonate and evaporitic rocks, whereas piping sinkholes originate from internal erosion processes affecting thick sedimentary covers.

The Italian experience demonstrates that sinkhole occurrence cannot be interpreted solely through traditional karst models. In many lowland areas, especially in central Italy, deep piping processes represent the dominant mechanism controlling sinkhole formation. The interaction among groundwater circulation, artesian conditions, deep gas emissions, and sediment erosion creates geological conditions that are unique at the European scale.

A comprehensive understanding of these processes is fundamental for hazard assessment, risk mitigation, and territorial planning. Future research should focus on improving monitoring techniques and developing predictive models capable of integrating geological, hydrogeological, and geotechnical information. Such an approach would significantly enhance the ability to identify sinkhole-prone areas and reduce the impact of future events on society and infrastructure.

REFERENCES

- CALLIGARIS C., ZINI L., NISIO S., PIANO C. (2020), *Sinkholes in the Friuli Venezia Giulia Region: state of the art of the territorial analyses in the evaporites*. Springer Book "Applied Geology: Approaches to Future Resource, Springer Chapter 5, 73-90 DOI:10.1007/978-3-030-43953-8_5; ISBN 978-3-030-43952-1.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G., NISIO S. (2008), *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Journal of Natural Hazard, 45, 145-172, DOI 10.1007/s, 11069-007-9165-7.
- CASTIGLIONI G.B. (1986), *Geomorfologia*. Opere UTET di geografia e discipline affini; 436 pp.
- CIOTOLI G., FINOIA M.G., LIPERI L., MELONI F., NISIO S., TONELLI V., ZIZZARI P. (2015), *Sinkhole susceptibility map of the Lazio Region, central Italy*. Journal of Maps 12-2, 287-294, 1/2015
- COOPER A.H., CALOW R.C. (1998), *Avoiding gypsum geohazards: guidance for planning and construction*. Technical report WC/98/5 British Geological Survey, UK. 57p.
- COOPER A.H. (2008), *The GIS approach to evaporite karst geohazards in Great Britain*. Environmental Geology. Vol 53, 981-992 (also digital publication 2007 DOI 10.1007/s00254-007-0724-8).
- CVIJIC J. (1893), *Das Karstphänomen. Versuch einer morphologischen Monographie*. Geographischen Abhandlung, Wien V(3):218-329.
- DE WAELE J., GUTIÉRREZ F. (2022), *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*. Wiley & Sons Ltd. DOI:10.1002/9781119605379; 902pp.
- FORTI P. (2002), *Evoluzione ipercarsica all'interno di acquiferi termali e in rapporto a possibili problemi di suffossione*. In: *Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana*. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 11-26.
- GUTIÉRREZ F., GUERRERO J., LUCHA P. (2008), *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*. Environmental Geology, 53, 993-1006.
- GUTIÉRREZ 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 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- HALLIDAY, W.R. (2007), *Pseudokarst in volcanic terrains*. Acta Carsologica 36(1), 103-118.
- NISIO S. (2003), *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. Il Quaternario, 16 (1) 2003, 121-132.
- NISIO S. (2008), *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV; 475pp.
- NISIO S. (2013), *Il database nazionale dei fenomeni di sprofondamento*. Atti Conv. "Studi ed interventi per il risanamento delle cavità antropiche e naturali, aspetti geologici, geotecnici e sismici". Altamura (BA), 9 dicembre 2010 – Geologia dell'ambiente suppl. al n. 2/2013, 28-32.
- NISIO S. (2023), *I sinkhole stato delle conoscenze e problematiche aperte*. Geologia dell'Ambiente 3/2023 ISSN 1591-5352, 91-96.
- NISIO S., CARAMANNA G., CIOTOLI G. (2007), *Sinkholes in Italy: first results on the inventory and analysis*. In: PARISE & GUNN (eds) *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society, London, Special Publications, 279, 23-45. DOI: 10.1144/SP279.40305-8719/07/\$15.00 #The Geological Society of London 2007.
- NISIO S., MADONNA S., GENTILI F., RUGGIERO L. (2026), *Sinkholes in volcanic areas of Central and Southern Italy: inventory update and occurrence of natural and anthropogenic processes*. Rendiconti online, 69/2026 DOI: <https://doi.org/10.3301/ROL.2026.13>.
- OLIVEIRA S., MOURA D., BOSKI T., HORTA J. (2019), *Coastal paleokarst landforms: A morphometric approach via UAV for coastal management (Algarve, Portugal case study)*. Ocean & Coastal Management, 167. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.10.025>
- PARISE M. (2011), *Surface and subsurface karst geomorphology in the Murge (Apulia, Southern Italy)*. Acta Carsologica, 40(1), 79-93.
- PRINZI E.P., NISIO S., DI MARTIRE D., ALLOCCA V., GUERRIERO L., NOCENTINI M., CIPRIANI A. (2026), *Sinkholes in gypsarenites embedded within siliciclastic successions: the Belforte del Chienti example (Italy)*. Rendiconti online della Soc. Geol. D'It., 70/2026, <https://doi.org/10.3301/ROL.2026.24>.
- RUGGIERO, R. (2022), *Karst Areas of Sicily*. In: *Karst of Sicily. Cave and Karst Systems of the World*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07406-6_2.
- SAURO U. (2003), *Dolines and Sinkholes: aspects of evolution and problems of classification*. Acta carsologica 32/2, 41-52.
- SAURO U. (2012), *Closed depressions in karst areas*. In: *Encyclopaedia of caves*. 140-155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383832-2.00133-X>.
- SPINIELLO O., NISIO S., ANNUNZIATELLIS A. & ZINI L. (2026), *GIS-based sinkhole susceptibility mapping in a karst mountain environment: the Vallepiedra area and the Holy Trinity Sanctuary (Monti Simbruini, Central Italy)*. Rendiconti online, 69/2026 DOI: <https://doi.org/10.3301/ROL.2026.17>.
- SWEETING M.M. (1972), *Karst landforms*. The McMillan Press. SBN 333011651. Pp. 353.
- VENTI F., CIOTOLI G., MADONNA S., NISIO S. (2026), *Natural Sinkholes in Umbria (Central Italy): Regional-Scale Susceptibility Assessment*. Rendiconti online, 70/2026 DOI: <https://doi.org/10.3301/ROL.2026.28>.
- VITALE V., MADONNA S., NISIO S., ANNUNZIATELLIS A. (2026), *The "Piscine" coastal depressions of the southern Pontine Plain (Central Italy): evidence from historical cartography and GIS analysis*. Rendiconti online 69/2026, DOI: <https://doi.org/10.3301/ROL.2026.10>.
- VITEK J. (1983), *Classification of pseudokarst forms in Czechoslovakia*. International Journal of Speleology, 13, 1-18.
- WALTHAM, T., BELL, F., CULSHAW, M. (2005), *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer, Berlin.
- WARREN, J.K. (2006), *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer, Berlin, ISBN 3-540-20725-2 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1-382 pp., <https://doi.org/10.1007/b138363>.

Impatto ambientale delle attività estrattive nella importante area carsica delle Alpi Apuane

Alessia Nannoni

Dipartimento di Scienze della Terra,
Università degli Studi di Firenze
E-mail: alessia.nannoni@unifi.it

Leonardo Piccini

Dipartimento di Scienze della Terra,
Università degli Studi di Firenze
E-mail: leonardo.piccini@unifi.it

Environmental impact of quarrying in the notorious karst area of the Apuan Alps

Parole chiave: idrologia dei contaminanti, acquiferi carsici, attività estrattiva, marmo
Key words: contaminant hydrology, karst aquifer, quarrying, marble

INTRODUZIONE

Gli acquiferi carsici costituiscono un reservoir fondamentale di acqua destinata al consumo umano. È stato infatti stimato che circa il 25% della popolazione mondiale si rifornisce di acqua derivante da acquiferi carsici. A titolo esemplificativo, gli acquedotti di importanti città europee come Roma e Vienna distribuiscono acqua drenata da questo tipo di acquiferi (Goldscheider *et al.*, 2020).

Generalmente, i sistemi carsici si caratterizzano per l'elevata qualità e per la quantità della risorsa idrica disponibile. Tuttavia, gli acquiferi carsici si contraddistinguono anche per l'elevata vulnerabilità all'inquinamento che, insieme agli effetti dei cambiamenti climatici, obbliga ad un'adeguata valutazione e protezione della risorsa idrica (Iván & Mádl-Szőnyi, 2017).

La presenza di vie di infiltrazione e di circolazione rapida comporta che i contaminanti entrino facilmente in questi acquiferi, soprattutto in concomitanza con precipitazioni abbondanti. Varie attività antropiche possono impattare gli acquiferi carsici, talvolta anche in modo irreversibile, fra le quali spicca l'attività

estrattiva. La produzione di materiale lapideo ha storicamente sempre giocato un ruolo fondamentale nello sviluppo della società, inoltre i recenti progressi tecnologici e la crescente richiesta per la costruzione di infrastrutture ha comportato un continuo aumento dei volumi estratti negli ultimi cento anni (Carmignani *et al.*, 2007; Carrasqueira *et al.*, 2024).

L'intensificarsi della produzione e il conseguente aumento esponenziale dei materiali di scarto hanno comportato crescenti problemi ambientali sia di natura geomorfologica e idrogeologica che in termini di inquinamento delle acque sotterranee e superficiali.

LA PROBLEMATICAMBIENTALE DEL DISTRETTO MARMIFERO APUANO

Le Alpi Apuane costituiscono una delle aree carsiche più importanti d'Italia, con una superficie approssimativa di 140 km² di affioramenti di rocce carbonatiche e più di 1300 grotte conosciute (Piccini *et al.*, 2019).

Gli acquiferi carsici apuani raccolgono ingenti quantità di acqua in virtù

dell'elevato coefficiente di infiltrazione e delle abbondanti precipitazioni che cadono in questa zona montuosa annualmente. Tuttavia, una buona parte di questi acquiferi è anche caratterizzata da elevata carsificazione e da zone saturate ad elevata trasmissività e basso immagazzinamento, pertanto l'acqua di infiltrazione si muove rapidamente attraverso gli acquiferi (Nannoni & Piccini, 2022; Piccini *et al.*, 2022).

Conseguentemente, soltanto alcune delle sorgenti carsiche apuane sono captate a scopo idropotabile e riforniscono d'acqua la popolazione della Versilia, che nel periodo estivo può superare i due milioni e mezzo di abitanti grazie al flusso di turisti. La protezione della risorsa idrica di queste poche sorgenti idropotabili è pertanto critica per la corretta gestione del territorio (Doveri *et al.*, 2018).

Una peculiarità delle Alpi Apuane è la diffusa ed intensiva estrazione del famoso marmo di Carrara per uso ornamentale ed industriale. L'attività estrattiva ha comportato numerosi problemi ambientali, dalla devastazione paesaggistica (con più di 150 cave tra cui la maggior parte sono ad alta quota) e geo-

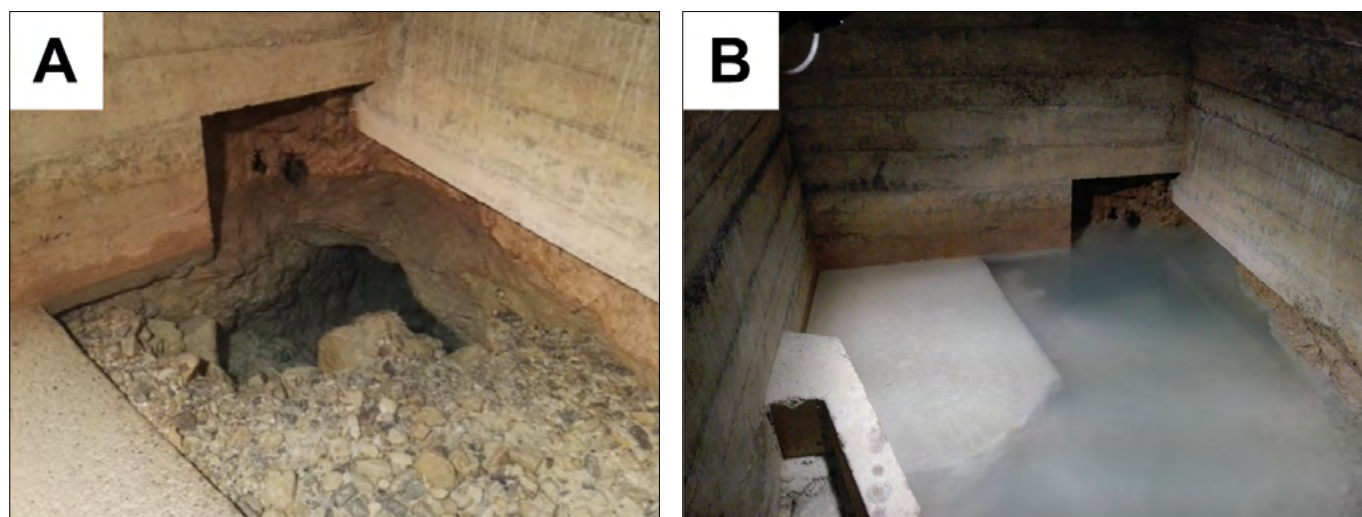


Figura 1. (A) Sorgente carsica Tana dei Tufi in condizioni di magra; (B) medesima sorgente contaminata dalla marmettola a seguito di un evento di piena

morfologica (distruzione di forme e depositi glaciali, forme carsiche e ostruzione delle grotte), all'aumento del rischio idrogeologico, fino all'inquinamento di aria e acqua. L'estrazione intensiva del marmo comporta la creazione di enormi volumi di materiali di scarto. Fra questi, la cosiddetta "marmettola" rappresenta una delle problematiche ambientali più importanti. Questa è una polvere fine di calcite che viene prodotta durante le operazioni di estrazione e di ritaglio dei blocchi di marmo e si può considerare come un sedimento fine di origine antropica. Quando questa polvere non viene raccolta e smaltita opportunamente, in caso di piogge si mescola con l'acqua creando una fanghiglia biancastra che si infila rapidamente negli acquiferi carsici apuani. Una volta infiltrata, questa miscela causa numerosi problemi: l'effetto più evidente è l'intorbidimen-

to delle acque sotterranee e superficiali (Fig. 1).

Ci sono anche altri fattori possibili da considerare come l'inquinamento chimico dell'acqua a causa dei mezzi di scavo, l'accumulo di ingenti volumi di sedimenti antropici nei complessi carsici (che potenzialmente potrebbero causare l'ostruzione delle vie di circolazione sotterranee), l'aumento della velocità del flusso idrico nei corsi d'acqua superficiali per impermeabilizzazione degli alvei fluviali. Recentemente è stato scoperto che la marmettola compromette anche l'habitat di alcune specie di fauna ipogea (Piccini *et al.* 2019).

La problematica della marmettola è divenuta importante con l'introduzione del taglio a catena diamantata come tecnica per l'estrazione dei blocchi. Infatti, con questa tecnologia sono aumentati drasticamente i volumi di roccia estratti

e con essi la quantità di polvere di marmo prodotta. Una frazione della marmettola viene dispersa nell'ambiente per infiltrazione, ruscellamento e per i venti. L'ammontare di tale frazione dipende dall'efficienza in cava nel recuperare la polvere per poi smaltirla opportunamente.

STUDI RECENTI SULLA CONTAMINAZIONE DA MARMETTOLA

La tematica dell'inquinamento da marmettola delle sorgenti apuane è storicamente nota da molti decenni; tuttavia, il primo studio sul tema risale al 2001 quando furono studiati eventi di torbidità a seguito di forti piogge presso la sorgente del Cartaro Grande (Drysdale *et al.*, 2001). Fu stimato che il trasporto solido annuale di questa sorgente poteva arrivare anche a 1000

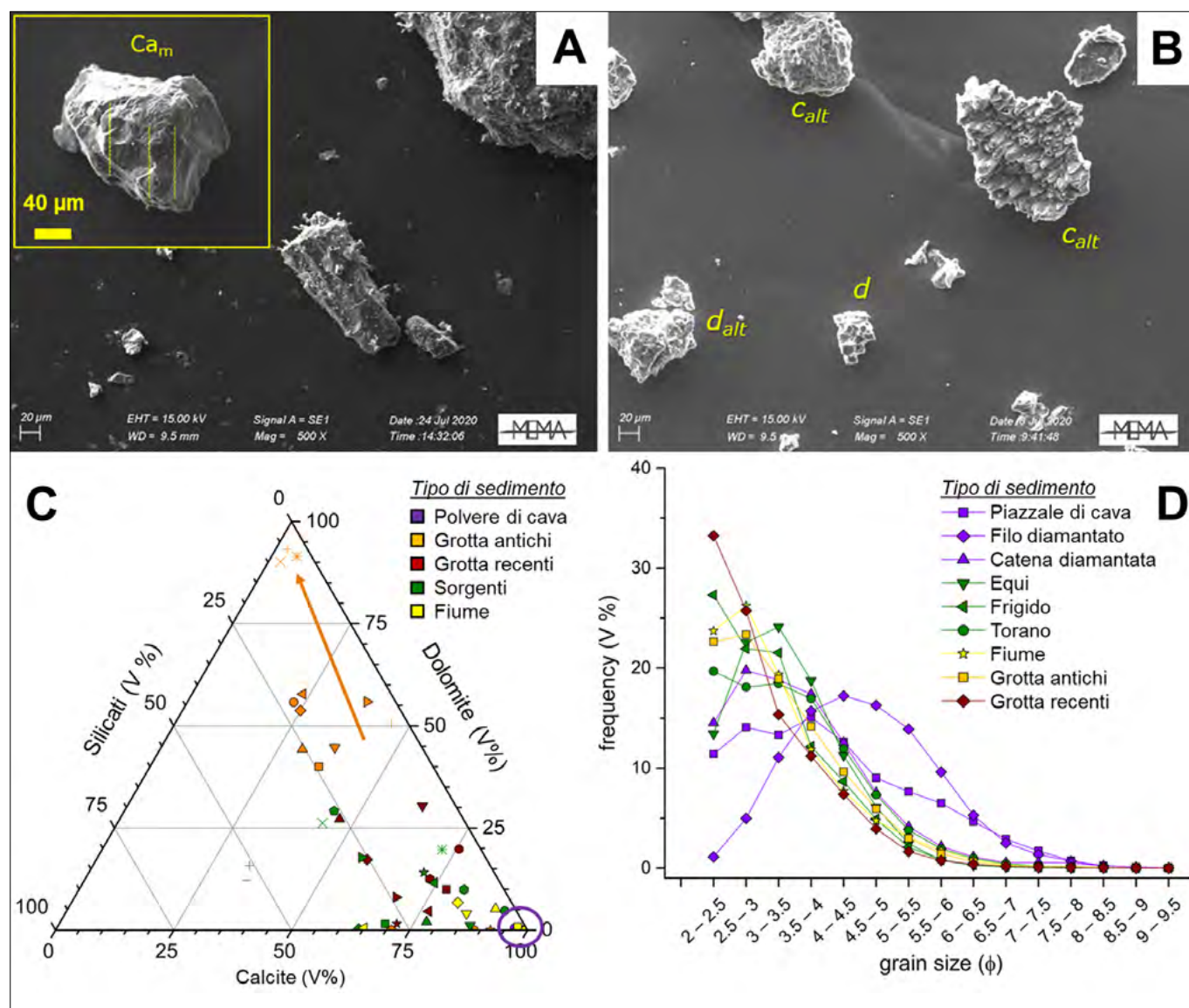


Figura 2. (A) Immagine SEM-EDS che mostra un sedimento di cava, si notano granuli con spigoli vivi e microforme probabilmente causate dai macchinari di taglio (Ca_m). (B) Immagine SEM-EDS che mostra un sedimento di grotta antico prelevato in un condotto vadoso inattivo, i granuli di calcite (Ca_{alt}) e dolomite (d , d_{alt}) presentano le tipiche morfologie da dissoluzione naturale. (C) Diagramma triangolare che mostra la composizione mineralogica dei vari tipi di sedimento (le polveri di cava sono indicate dal cerchio viola) con i sedimenti antichi che spiccano per la composizione più dolomitica. (D) Diagramma con le distribuzioni granulometriche di vari sedimenti

tonnellate, una quantità enorme rispetto alla media dei sistemi carsici di tutto il mondo. Più recentemente, sono stati avviati degli studi per capire i meccanismi di trasporto e immagazzinamento della marmettola all'interno degli acquiferi carsici apuani. Piccini *et al.* (2019) hanno presentato un monitoraggio della torbidità di un'importante sorgente carsica impattata dalla marmettola, la sorgente di Equi.

Questo studio ha posto le basi per analizzare il rapporto fra eventi di precipitazione, torbidità e trasporto solido sospeso alla sorgente carsica. Dal 2017, l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT) ha avviato un progetto di monitoraggio multiparametrico dell'inquinamento da marmettola delle principali sorgenti carsiche apuane e dei più importanti corsi d'acqua apuani (progetto "CAVE"). Il risultato più importante di questo progetto è l'implementazione di una rete di monitoraggio i cui dati sono visualizzabili su una piattaforma online ("SIRA") che mostra i parametri monitorati in tempo reale, oltre a fornire un sistema di allerta per l'intorbidimento delle sorgenti e dei corsi d'acqua monitorati. Infine, recentemente è stato proposto un approccio multidisciplinare per la caratterizzazione sedimentologica e mineralogica della marmettola e dei sedimenti naturali che si rinvenivano nei sistemi carsici apuani (Nannoni *et al.*, 2021) con lo scopo di distinguere i sedimenti di origine antropica, la marmettola, da quelli di origine naturale.

Lo studio delle caratteristiche morfologiche e chimico-mineralogiche fornisce informazioni su come i sedimenti clastici, marmettola inclusa, si muovono nel sistema. In linea generale, infatti, la dinamica di trasporto e di deposizione dei sedimenti all'interno degli acquiferi carsici è controllata dall'eterogeneità del flusso idrico nei vari compartimenti idrogeologici, dall'epicarso fino alla sorgente.

Lo studio sedimentologico della marmettola è stato condotto mediante il campionamento di sedimenti clastici nei principali bacini estrattivi apuani, comprendendo polveri di marmo prodotte dal taglio a catena e a filo diamantato, depositi di piazzale di cava, sedimenti di grotta (condotte vadose attive e inattive), sorgenti carsiche e fiumi contaminati.

I campioni sono stati analizzati con SEM-EDS, microscopio ottico e diffrattometria per correlare forma, dimensione e composizione chimico-

mineralogica dei granuli. Le polveri di cava risultano costituite quasi esclusivamente da calcite, mentre gli altri sedimenti presentano proporzioni variabili di calcite, dolomite e silicati (Fig. 2).

L'analisi integrata ha evidenziato caratteristiche morfologiche distintive: i granuli di marmettola sono spigolosi, regolari e presentano micromorfologie superficiali peculiari, mentre quelli di origine naturale mostrano forme dovute ai processi di alterazione. Nei sedimenti recenti di grotta, sorgente e fiume è stato riconosciuto un grado variabile di contaminazione antropica, con casi, come la sorgente del Cartaro, in cui i depositi risultano praticamente indistinguibili dalla marmettola pura. Dal punto di vista granulometrico, le polveri di cava sono mediamente più fini rispetto agli altri sedimenti (Fig. 2); i depositi più grossolani si trovano nelle condotte vadose attive, in relazione alle elevate velocità di flusso.

Le distribuzioni dimensionali e morfologiche delle polveri prodotte dal taglio a catena diamantata risultano particolarmente simili a quelle dei sedimenti di sorgenti e fiumi contaminati, confermando che l'infiltrazione della marmettola negli acquiferi è strettamente legata alle operazioni di taglio, soprattutto quando le fratture aperte intercettate dalla catena consentono l'immissione diretta della polvere nel sistema carsico.

CONCLUSIONI

L'attività estrattiva del marmo nelle Alpi Apuane rappresenta una risorsa economica di primaria importanza, ma comporta anche significativi impatti sugli acquiferi carsici, tra cui la dispersione della marmettola.

Le ricerche degli ultimi anni hanno permesso di comprendere meglio i meccanismi di infiltrazione, trasporto e deposizione di questo sedimento antropico, dimostrando che una parte rilevante della contaminazione delle acque sotterranee è direttamente connessa alle moderne tecniche di escavazione e alla gestione dei siti estrattivi.

L'integrazione tra monitoraggio idrologico e la caratterizzazione sedimentologica-mineralogica ha fornito strumenti efficaci per distinguere la marmettola dai sedimenti naturali e per ricostruirne il percorso all'interno degli acquiferi. Queste conoscenze rappresentano una base scientifica essenziale per valutare il grado di contaminazione delle sorgenti. Ulteriori studi saranno necessari per approfondire la dinamica

di contaminazione e, idealmente, identificare i distretti estrattivi che causano le maggiori criticità negli acquiferi apuani. La tutela degli acquiferi carsici apuani richiede pertanto un approccio integrato, che coniughi il monitoraggio continuo della qualità delle acque con una gestione più sostenibile delle attività estrattive, finalizzata a ridurre la dispersione della marmettola nell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- CARMIGNANI L., CONTI P., FANTOZZI P., MANCINI S., MASSA G., MOLLI G., VASELLI L. (2007), *I marmi delle Alpi Apuane*. Geoitalia, 21, 19–30.
- CARRASQUEIRA J., AFONSO C., GIL M.M., BERNARDINO R., GAMBOA R., BARROSO S.D., BERNARDINO S. (2024), *Digging deeper: assessing the impact of limestone exploitation and use worldwide*. *Environments*, 11(12), 283.
- DOVERI M., PICCINI L., MENICHINI M. (2018), *Hydrodynamic and geochemical features of metamorphic carbonate aquifers and implications for water management: the Apuan Alps (NW Tuscany, Italy) case study*. In: YOUNOS T., SCHREIBER M., KOSIČ FICCO K. (Eds), *Karst Water Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 68. Springer, Cham, 209–249. doi:10.1007/978-3-319-77368-1_8.
- DRYSDALE R., PIEROTTI L., PICCINI L., BALDACCI F. (2001), *Suspended sediments in karst spring waters near Massa (Tuscany, Italy)*. *Environmental Geology*, 40(8), 1037–1050.
- GOLDSCHIEDER N., CHEN Z., AULER A.S., BAKALOWICZ M., BRODA S., DREW D., *et al.* (2020), *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1661–1677.
- IVÁN V., MÁDL-SZÖNYI J. (2017), *State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook*. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 112.
- NANNONI A., PICCINI L. (2022), *Mixed recharge and epikarst role in a complex metamorphic karst aquifer: the Pollaccia system, Apuan Alps (Tuscany, Italy)*. *Hydrology*, 9(5), 83. doi:10.3390/hydrology9050083.
- NANNONI A., PICCINI L., COSTAGLIOLA P., BATISTONI N., GABELLINI P., CIONI R., PRATESI G., BUCCI S. (2021), *Innovative approaches for the sedimentological characterization of fine natural and anthropogenic sediments in karst systems: the case of the Apuan Alps (Central Italy)*. *Frontiers in Earth Science*, 9, 672962.
- PICCINI L., DI LORENZO T., COSTAGLIOLA P., GALASSI D.M.P. (2019), *Marble slurry's impact on groundwater: the case study of the Apuan Alps karst aquifers*. *Water*, 11(12), 2462.
- PICCINI L., NANNONI A., POGGETTI E. (2023), *Hydrodynamics of karst aquifers in metamorphic carbonate rocks: results from spring monitoring in the Apuan Alps (Tuscany, Italy)*. *Hydrogeology Journal*, 31(2), 241–255.

Idrodinamica e monitoraggio degli acquiferi carsici

Hydrodynamic and monitoring of karst aquifers

Leonardo Piccini

Dipartimento di Scienze della Terra,
Università degli Studi di Firenze
E-mail: leonardo.piccini@unifi.it

Alessia Nannoni

Dipartimento di Scienze della Terra,
Università degli Studi di Firenze
E-mail: alessia.nannoni@unifi.it

Parole chiave: idrogeologia, acquifero carsico, sorgente carsica, monitoraggio
Key words: hydrogeology, karst aquifers, karst spring, monitoring

INTRODUZIONE

Negli acquiferi carsici gran parte dell'acqua è immagazzinata in cavità prodotte da processi di dissoluzione, spesso organizzate in reti continue, e che solitamente interessano rocce carbonatiche solubili come calcari, dolomie, marmi, calcareniti o al più marne con basso contenuto argilloso. Il concetto di acquifero può essere esteso anche a rocce evaporitiche come i gessi, sebbene le peculiarità di queste rocce rendono rara la presenza di veri corpi acquiferi, le cui acque sono inoltre di difficile utilizzo a causa dell'elevato contenuto in solfato di calcio. L'estensione globale delle rocce carbonatiche, che coprono circa il 13% della superficie dei continenti, e la relativa abbondanza di queste in aree caratterizzate da climi umidi, fanno di questi acquiferi una fondamentale risorsa idrica per usi civili (Goldsheider *et al.*, 2020). Per contro, le caratteristiche idrodinamiche di questi acquiferi, caratterizzati da rapidi tempi di flusso e scarsa capacità di immagazzinamento, ne fanno una risorsa soggetta a una marcata stagionalità e, allo stesso tempo,

molto vulnerabile a eventuali fenomeni d'inquinamento (Doveri *et al.*, 2018).

CARATTERISTICHE DEGLI ACQUIFERI CARSICI

Negli acquiferi carsici, alla porosità determinata da processi di dissoluzione (carsismo) si accompagna quasi sempre una porosità secondaria legata a fratturazione, che in certi casi può essere comparabile a quella per dissoluzione. Solitamente trascurabile è invece la porosità primaria interstiziale, se non nel caso di calcareniti recenti e poco cementate o nel particolare caso dei travertini. Un carattere comune alla maggior parte delle aree carsiche è l'elevato coefficiente d'infiltrazione, che spesso arriva al 100% della precipitazione efficace, cioè al netto della evapotraspirazione. Ciò è dovuto alle particolari caratteristiche della superficie topografica, spesso caratterizzata da scarsa vegetazione e dalla presenza di cavità aperte in forma di fessure, fori, o dalla presenza di depressioni chiuse (doline) o veri e propri inghiottitoi che limitano molto il ruscellamento superficiale (White, 2002).

Nelle aree carsiche il concetto di acquifero va esteso all'intero corpo roccioso, a partire cioè dalla superficie sino alle zone profonde dove i vuoti sono perennemente riempiti di acqua (zona satura). In genere si distinguono quattro zone sovrapposte dotate di peculiari caratteristiche idrodinamiche (Fig. 1). A livello superficiale si colloca l'epicarso, il cui spessore varia da pochi metri a qualche decina di metri. Questa zona è caratterizzata da una elevata porosità e da una elevata permeabilità con una componente orizzontale spesso dominante. Questa fascia ha il fondamentale compito di assorbire le acque di precipitazione e di rilasciarle in modo ritardato alle zone sottostanti (Nannoni e Piccini, 2022). Al di sotto dell'epicarso si trova una zona caratterizzata da bassa porosità ma elevata permeabilità verticale localizzata in linee di flusso a pelo libero (percolazione o ruscellamento) che hanno il compito di drenare le acque raccolte dall'epicarso. Lo spessore di questa zona, chiamata zona vadosa, può variare da pochi metri sino a qualche migliaio di metri nel caso dei carsi di alta montagna con un livello di base associato alla quota delle sorgenti di fondovalle.

Oltre una certa profondità, la cui quota è determinata dal livello di base idrogeologico locale, le cavità presenti nell'ammasso roccioso sono riempite di acqua (zona satura), qui, a fronte di una porosità in grande che può essere anche molto bassa, si ha una permeabilità elevata legata alla presenza di grandi condotti, ma con componente prevalentemente orizzontale. Il limite superiore di questa zona, detta freatica, è soggetto a variazioni stagionali e occasionali, il che permette di definire una ulteriore zona, di transizione tra vadosa e freatica, detta pertanto epifreatica, che ha caratteristiche peculiari e dove spesso si concentra il massimo sviluppo di condotti carsici.

Le acque sotterranee sono immagazzinate in modo permanente nella zona satura ma sono di difficile sfruttamento diretto, mentre a livello dell'epicarso e della zona epifreatica si ha un imma-

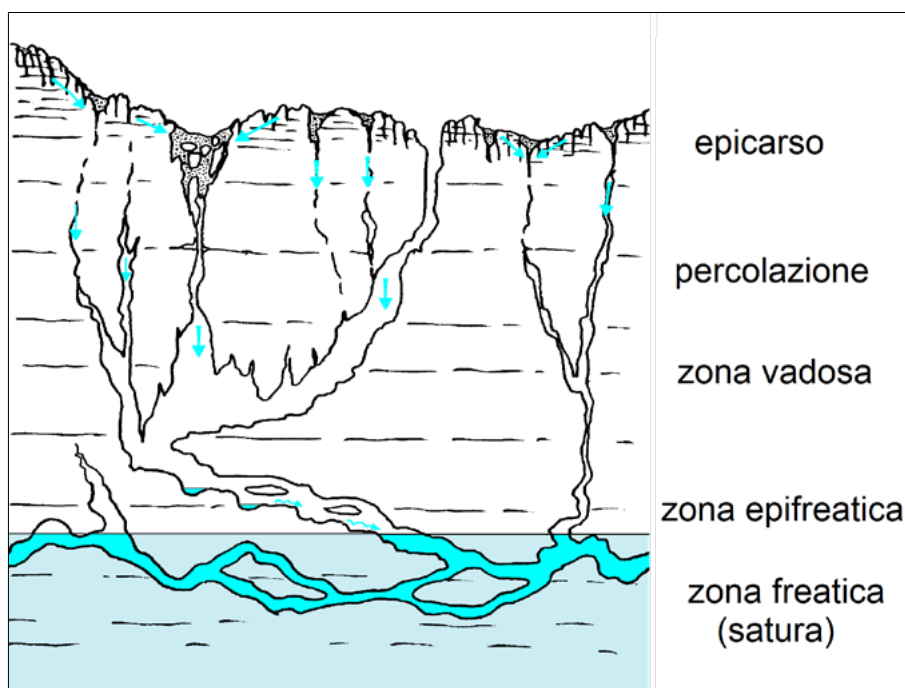


Figura 1. Schema delle zone che contraddistinguono un tipico acquifero carsico caratterizzate da diverse modalità di flusso e immagazzinamento

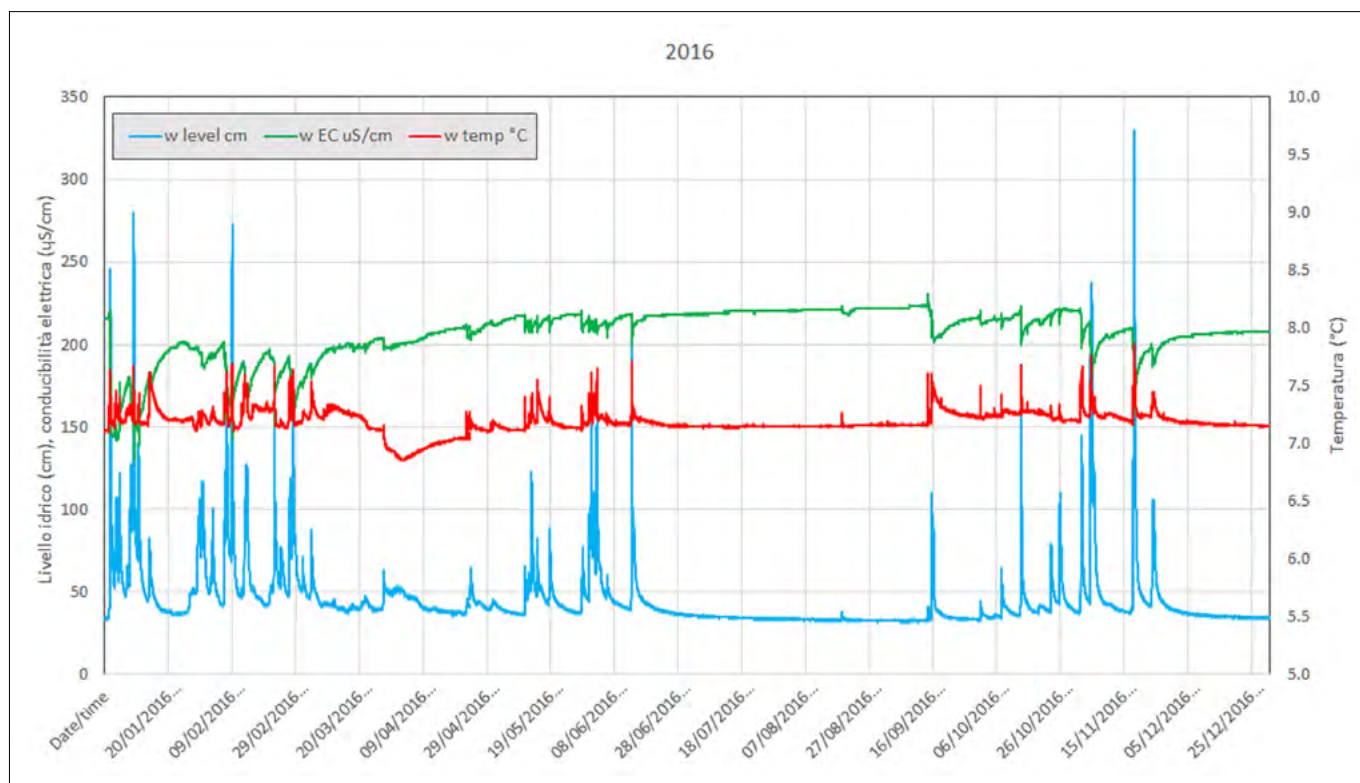


Figura 2. Idrogramma che mette a confronto livello idrico, temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua di una sorgente caratterizzata da un flusso a pelo libero con rapido arrivo delle acque d'infiltrazione (sorgente Fontanacce, Alpi Apuane)

gazzinamento maggiore ma di carattere temporaneo o al massimo stagionale. La zona vadosa invece non contiene risorse idriche significative e comunque queste sono molto difficili da utilizzare. Le risorse idriche degli acquiferi carsici sono quindi solitamente sfruttate attraverso la captazione di sorgenti, il cui regime è principalmente determinato dalle caratteristiche dell'epicarso e della zona epifreatica (Bonacci, 1993; Stevanović, 2015).

IL MONITORAGGIO DEGLI ACQUIFERI CARSI

Lo studio degli acquiferi carsici si avvale oggi di tecniche diverse da quelle che si applicano agli acquiferi a porosità primaria dei depositi alluvionali o costieri e anche a quelli rocciosi per fratturazione. Questi ultimi, infatti, vengono solitamente indagati attraverso i piezometri, per il monitoraggio delle variazioni del livello della tavola d'acqua, o attraverso prospezioni geofisiche, come le indagini sismiche o geolettriche, tutte metodologie che hanno difficile applicazione per gli acquiferi carsici.

Per gli acquiferi carsici l'approccio più efficace è dunque quello del monitoraggio in continuo di parametri chimico-fisici presso le emergenze naturali, cioè le sorgenti alimentate direttamente dall'acquifero. I parametri più semplici da monitorare ma anche i più significativi sono: la portata, la temperatura e la conducibilità elettrica. La portata si

ottiene con metodi indiretti attraverso la misura di un livello idrico tramite sensori di pressione, immersi, o a ultrasuoni. I valori di portata si ricavano o grazie alla presenza di una vasca di raccolta dotata di soglia a stramazzo, o con una funzione di trasformazione ottenuta attraverso più misure istantanee di portata messe in relazione con l'altezza del livello dell'acqua rispetto ad una quota di riferimento. La temperatura è fornita direttamente da un sensore immerso in acqua, spesso accoppiato ad un sensore che misura anche la conducibilità elettrica.

Da diversi anni, la sensoristica in commercio offre sonde multiparametriche dotate di rilevatori di pressione, temperatura e conducibilità elettrica, di elevata autonomia sia per quanto riguarda la durata delle batterie, sia per la loro capacità di registrazione di dati in forma digitale. Queste sonde hanno rivoluzionato le indagini sulla dinamica delle sorgenti carsiche permettendo di delineare alcuni comportamenti comuni in particolari condizioni idro-strutturali oltre che climatiche (Kresic e Stevanović, 2009).

Un monitoraggio adeguato dovrebbe avere una durata minima di un anno, ma possibilmente di almeno due o tre anni, con un periodo di acquisizione delle misure tra orario a preferibilmente inferiore. L'interpretazione dei dati, visualizzati in forma di grafici (idrogrammi) e analizzati con procedure

statistiche, può riguardare sia le variazioni stagionali, sia il comportamento della sorgente in risposta ad eventi di precipitazione particolarmente intensi e concentrati nel tempo. Le variazioni di portata di una sorgente sono la risposta, attenuata e modulata, agli eventi infiltrativi, cioè alle precipitazioni o all'infiltrazione di acque di fusione nel caso di carsi di alta montagna. Partendo dal presupposto che le acque di precipitazione abbiano una conducibilità molto bassa (solitamente pochi ms/cm), le variazioni di conducibilità sono invece attribuibili al tempo e alle modalità di flusso delle acque sotterranee. In condizioni di flusso prevalentemente a pelo libero, come avviene nella zona vadosa, si osservano diminuzioni di conducibilità associate a eventi infiltrativi e quindi all'aumento della portata (Fig. 2). Viceversa, aumenti della conducibilità associati ad aumenti di portata indicano solitamente fenomeni di "pistonaggio" (Fig. 3), in cui cioè un aumento repentino del carico idraulico mobilita acque residenti nell'acquifero da più tempo e quindi maggiormente mineralizzate (Vigna e Banzato, 2015). Sorgenti caratterizzate infine da portate regolari e lievi variazioni di conducibilità e di carattere solo stagionale, quindi slegate dagli eventi infiltrativi, indicano una circolazione lenta e diffusa in grado di smorzare qualsiasi segnale esterno di carattere meteorologico. L'interpretazione della temperatura è spesso più

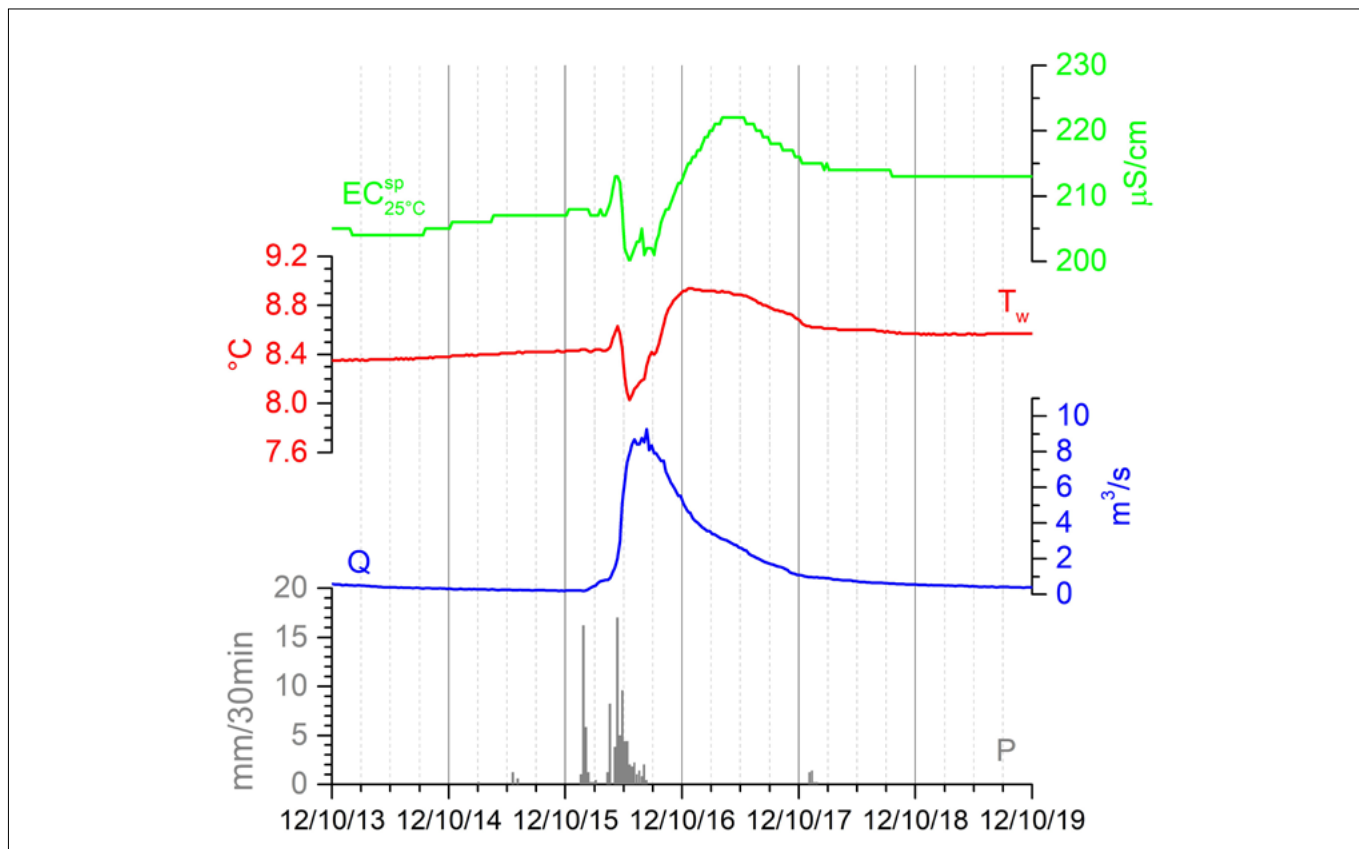


Figura 3. Idrogramma relativo ad un evento di piena di una sorgente caratterizzata da due fenomeni di "pistonaggio" in sequenza, che mobilitano acque più mineralizzate di quelle che emergono in condizioni di bassa portata provenienti da settori diversi dell'acquifero, intervallati da una breve diluizione legata ad apporti superficiali (sorgente Pollaccia, Alpi Apuane)

complessa, specie se non associata alla conducibilità per la semplice ragione che è raro conoscere la temperatura delle acque d'infiltrazione, rendendo quindi complesso interpretare un segnale in uscita senza conoscere quello in entrata. Studi recenti mostrano che le variazioni di temperatura sono legate alle modalità di transito e a fenomeni di rimescolamento sia lungo la zona vadosa sia lungo quella freatica. Gli unici segnali facilmente interpretabili sono le diminuzioni di temperatura dovute alle fasi di fusione di un manto nevoso.

CONCLUSIONI

Il monitoraggio dei principali parametri fisici delle sorgenti carsiche, per quanto di semplice applicazione, permette di definire le principali caratteristiche idrodinamiche delle sorgenti e pertanto dell'acquifero che le alimenta. Studi di questo genere sono ormai imprescindibili per una corretta gestione di una captazione idropotabile di una grossa sorgente. Studi più raffinati, relativi ad analisi chimiche, eventualmente estese agli elementi in tracce, e ad analisi degli isotopi stabili di Idrogeno (deuterio) e ossigeno, possono permettere di definire meglio le aree di ricarica ed eventualmente il contributo di settori diversi, specie per le sorgenti di grande portata.

BIBLIOGRAFIA

- BONACCI O. (1993), *Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers*. Hydrol. Sci. J., 38(1): 51-62 (doi: 10.1080/02626669309492639).
- DOVERI M., PICCINI L., MENICHINI M. (2018), *Hydrodynamic and geochemical features of metamorphic carbonate aquifers and implications for water management: The Apuan Alps (NW Tuscany, Italy) case study*. In: YOUNOS T, SCHREIBER M, KOSIČ FICCO K (eds) *Karst Water Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 68. Springer, Cham. p. 209-249 (doi: 10.1007/978-3-319-77368-1_8).
- GOLDSCHIEDER N., CHEN Z., AULER A.S., BAKALOWICZ M., BRODA S., DREW D., HARTMANN J., JIANG G., MOOSDORF N., STEVANOVIĆ Z., VENI G. (2020), *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. Hydrogeol. J., 28(5): 1661-1677 (doi: 10.1007/s10040-020-02139-5).
- KRESIC N., STEVANOVIĆ Z. (2009), *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability*. Butterworth-Heinemann.
- NANNONI, A.; PICCINI, L. (2022), *Mixed Recharge and Epikarst Role in a Complex Metamorphic Karst Aquifer: The Pollaccia System, Apuan Alps (Tuscany, Italy)*. Hydrology 9(5), 83 (doi: 10.3390/hydrology9050083).
- STEVANOVIĆ Z. (2015), *Characterization of Karst Aquifer*. In: STEVANOVIĆ Z (ed) *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. Prof. Pract. In: Earth Sci. Springer, Cham. p 47-125 (doi: 10.1007/978-3-319-12850-4_3).
- VIGNA B., BANZATO C. (2015), *The hydrogeology of high-mountain carbonate areas: an example of some Alpine systems in southern Piedmont (Italy)*. Environ. Earth Sci. 74: 267-280 (doi: 10.1007/s12665-015-4308-8).
- WHITE W. B. (2002), *Karst hydrology: recent developments and open questions*. Eng. Geol., 65(2-3): 85-105 (doi: 10.1016/s0013-7952(01)00116-8).

Dove l'acqua incontra il mare: deflusso idrico e sorgenti sottomarine nel carsismo costiero

Stefano Furlani

Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze, Università degli Studi di Trieste

E-mail: sfurlani@units.it

Where freshwater meets the sea: water outflow and submarine springs in coastal karst

Parole chiave: sorgenti sottomarine, carsismo costiero, rilievi a nuoto, mar Mediterraneo
Key words: submarine springs, coastal karst, swim surveys, Mediterranean sea

SOMMARIO

Il Mar Mediterraneo ospita alcune delle più estese e spettacolari aree carsiche costiere al mondo, dove la stretta relazione tra i rilievi costieri e il mare dà origine a sistemi idrogeologici di straordinaria complessità. In questi ambienti, le acque meteoriche si infiltrano rapidamente nel sottosuolo, percorrono articolate reti di condotti e cavità e raggiungono il mare attraverso sorgenti sottomarine, dando vita a un delicato equilibrio tra acque dolci e acque marine.

L'articolo analizza i processi che regolano il deflusso idrico nei sistemi carsici costieri, illustrando l'origine, il funzionamento e la distribuzione delle sorgenti sottomarine, nonché i fattori che ne influenzano portata, salinità e dinamica. Il lavoro si focalizza nel bacino del Mediterraneo, dove la lunga evoluzione geologica, le oscillazioni del livello del mare durante il Quaternario e la diffusa presenza di rocce carbonatiche

hanno favorito lo sviluppo di vasti acquiferi carsici e di numerose emergenze sottomarine, molte delle quali ancora poco conosciute. Non ultimo, numerose aree carsiche del Mediterraneo sono state osservate con un approccio di rilevamento a nuoto.

Attraverso esempi tratti da diverse regioni mediterranee, l'articolo evidenzia il valore scientifico e ambientale di questi sistemi, il loro ruolo nella gestione delle risorse idriche e nella conservazione degli ecosistemi costieri, nonché le sfide poste dalla loro esplorazione e tutela. L'incontro tra acqua dolce e acqua marina rivela così un mondo nascosto, in cui geologia, idrologia e mare si intrecciano dando origine a fenomeni di grande fascino e di fondamentale importanza per la comprensione dell'evoluzione del carsismo costiero.

INTRODUZIONE

Le aree carsiche costiere rappresentano uno dei contesti idrogeologici più

affascinanti e complessi del pianeta, dove l'interazione tra acque sotterranee e l'ambiente marino dà origine a processi unici. In questi sistemi, le acque meteoriche che si infiltrano negli ammassi carbonatici alimentano estesi acquiferi carsici, caratterizzati da una circolazione idrica rapida e altamente eterogenea, fino a raggiungere il mare attraverso sorgenti costiere e sottomarine. Queste emergenze costituiscono il punto di incontro tra due domini apparentemente distinti – quello continentale e quello marino – ma in realtà strettamente connessi da una rete di condotti e cavità sviluppatasi nel corso di milioni di anni.

Il bacino del Mediterraneo rappresenta uno degli esempi più significativi di questa interazione. La diffusa presenza di rocce carbonatiche, la lunga evoluzione tettonica e le ripetute oscillazioni del livello del mare durante il Quaternario hanno favorito la formazione di vasti sistemi carsici costieri (Antonoli *et al.*, 2015), spesso caratterizzati da sorgenti sottomarine, localmente note come *vrulje*, *vruljas* nel mondo slavo-fono, *citri* nel Mar Ionio, ecc, a seconda delle diverse tradizioni geografiche (Fig. 1). Questi sistemi costituiscono un elemento chiave del ciclo idrologico costiero e rivestono un'importanza crescente per la gestione delle risorse idriche, la tutela degli ecosistemi marini e la comprensione degli effetti dei cambiamenti climatici e dell'innalzamento del livello del mare. Higgins (1980) ha messo in evidenza una stretta correlazione tra alcune forme costiere, come i solchi marini (*tidal notches*) e la presenza delle sorgenti sottomarine negli ambienti carsici della Grecia. Furlani *et al.* (2014) e Antonoli *et al.*, (2015) hanno confermato questa correlazione in numerose parti del Mediterraneo, tra cui l'Adriatico orientale. Recentemente infatti, nell'ambito del programma di

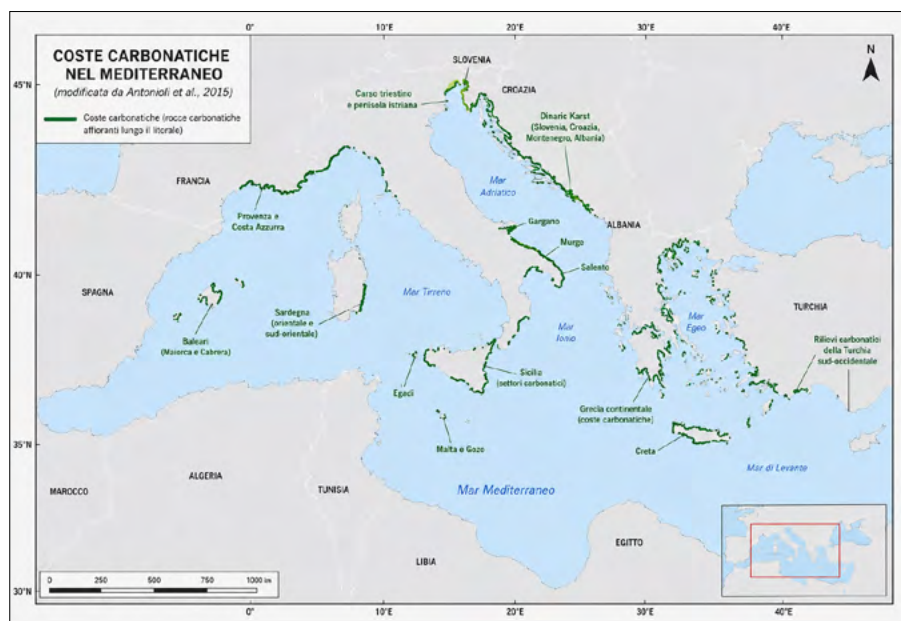


Figura 1. Carta che illustra la distribuzione delle coste carbonatiche nel Mar Mediterraneo (modificata da Antonoli *et al.* 2015)

rilevamento Geoswim (Furlani, 2020; Furlani e Antonioli, 2023), sono stati raccolti molti dati fisico/chimici sulle sorgenti sottomarine in diverse aree del Mediterraneo con acquisizione a nuoto, per mappare e censire le sorgenti che defluiscono lungo ampi settore costieri.

L'obiettivo di questo articolo è fornire una sintesi dei principali processi che regolano il deflusso delle acque nei sistemi carsici costieri, con particolare attenzione ai meccanismi di formazione e funzionamento delle sorgenti sottomarine, ai metodi impiegati per il loro studio e al loro significato idrogeologico ed evolutivo. Attraverso una panoramica dei più significativi esempi nel Mar Mediterraneo, si intende evidenziare come il confine tra terra e mare sia, nel carsismo, un ambiente dinamico e permeabile, in cui l'acqua continua a modellare il paesaggio anche al di sotto della superficie del mare.

IL MAR MEDITERRANEO

Il Mar Mediterraneo è un bacino semichiuso situato tra le placche euroasiatica e africana e rappresenta una delle regioni geologicamente più complesse della Terra (Mather, 2009). La sua configurazione attuale è il risultato della convergenza a lungo termine tra queste due placche tettoniche, che ha determinato processi di subduzione, collisione continentale, estensione di retroarco e la formazione di numerosi bacini sedimentari e province vulcaniche attive. Questo assetto tettonico ha generato un contesto geologico estremamente eterogeneo, caratterizzato da piattaforme carbonatiche, bacini marini profondi, prismi di accrezione ed estesi sistemi di faglie (Anzidei *et al.*, 2014). Dal punto di vista idrogeologico, la regione mediterranea ospita un'ampia varietà di sistemi acquiferi costieri e offshore, sviluppati prevalentemente in formazioni carbonatiche fratturate e depositi sedimentari porosi. La circolazione delle acque sotterranee è fortemente controllata dall'eterogeneità litologica, dalle discontinuità strutturali e dall'interazione tra acque dolci e acque marine. Tali processi sono inoltre influenzati dalla variabilità climatica, dalle variazioni del livello del mare e dalle crescenti pressioni antropiche. Per questi motivi il Mediterraneo è a tutti gli effetti un laboratorio naturale per lo studio della dinamica delle acque sotterranee, della risalita e della fuoriuscita sottomarina delle acque dolci (submarine groundwater discharge) e della vulnerabilità degli acquiferi costieri ai processi di salinizza-

zione nel contesto degli attuali e futuri cambiamenti ambientali.

I SISTEMI CARSICI COSTIERI DEL MEDITERRANEO

I sistemi carsici costieri costituiscono uno degli elementi idrogeologici più caratteristici del bacino del Mediterraneo, dove l'ampia diffusione di successioni carbonatiche mesozoiche e cenozoiche ha favorito lo sviluppo di alcuni dei più estesi e complessi acquiferi carsici del mondo (Mather, 2009). La loro distribuzione interessa gran parte delle coste mediterranee, sebbene con caratteristiche geologiche e idrogeologiche differenti in funzione dell'evoluzione tettonica e sedimentaria delle diverse regioni. Lungo la sponda orientale dell'Adriatico si sviluppa il Carso Dinarico, probabilmente il sistema carsico più esteso e meglio sviluppato del Mediterraneo, che si estende dal Golfo di Trieste fino all'Albania attraverso la

Slovenia, la Croazia, la Bosnia-Erzegovina e il Montenegro (Mather, 2009). In questa regione gli spessori delle successioni carbonatiche superano localmente diversi chilometri e ospitano acquiferi altamente permeabili caratterizzati da una rete estremamente sviluppata di fratture, condotti e grandi cavità sotterranee (Fig. 2). La circolazione idrica è prevalentemente concentrata lungo percorsi preferenziali che alimentano grandi e numerose sorgenti costiere e sottomarine distribuite lungo l'intero margine adriatico.

Sul versante occidentale dell'Adriatico, l'Italia meridionale rappresenta un'altra importante provincia carsica. Gli acquiferi carbonatici della Puglia, del Promontorio del Gargano e dell'Altopiano delle Murge costituiscono sistemi idrogeologici di primaria importanza, alimentati dalle precipitazioni che infiltrano rapidamente attraverso rocce carbonatiche intensamente fratturate. In queste aree il deflusso sotterraneo



Figura 2. Sorgente costiera impostata su una frattura lungo la costiera del Golfo di Trieste

converge verso la costa, dando origine a numerose sorgenti costiere e fenomeni di deflusso sotterraneo, diffusi sia lungo le coste adriatiche che ioniche. La limitata elevazione topografica e la forte connessione idraulica con il mare rendono questi acquiferi particolarmente vulnerabili ai processi di intrusione salina, soprattutto nelle aree interessate da intenso sfruttamento delle risorse idriche.

Analogamente, la penisola ellenica è caratterizzata da estesi massicci carbonatici fortemente tettonizzati, che ospitano complessi sistemi acquiferi carsici localizzati sia nella Grecia continentale sia nelle numerose isole dell'Egeo e dello Ionio. In queste aree, la frammentazione tettonica e i forti dislivelli topografici determinano sistemi di flusso estremamente dinamici, spesso associati a grandi sorgenti costiere e sottomarine. Tra gli esempi più significativi si annoverano i sistemi carsici di Creta e del Peloponneso, dove le interazioni tra circolazione sotterranea, tettonica attiva e variazioni del livello marino hanno dato origine a fenomeni idrogeologici di notevole complessità.

Lungo il margine orientale del Mediterraneo, i rilievi carbonatici della Turchia meridionale, in particolare nella regione dei Monti del Tauro, ospitano acquiferi carsici caratterizzati da elevati gradienti idraulici e da un'intensa circolazione sotterranea che alimenta numerose sorgenti costiere (*cit.*). Sistemi analoghi sono presenti anche lungo le

coste del Libano e localmente in Siria, dove la presenza di rocce carbonatiche favoriscono lo sviluppo di significative risorse idriche sotterranee, nonostante il clima relativamente arido (*cit.*).

Anche le principali isole del Mediterraneo presentano acquiferi carsici. Nelle Isole Baleari, in particolare a Maiorca, nelle isole maltesi (Furlani *et al.*, 2017), in Sicilia e in Sardegna, le successioni carbonatiche ospitano sistemi acquiferi spesso caratterizzati da una forte connessione tra ambiente continentale e marino. In questi contesti, la limitata estensione territoriale e la ridotta disponibilità di risorse idriche superficiali rendono le acque sotterranee la principale fonte di approvvigionamento idrico, aumentando la vulnerabilità degli acquiferi agli effetti combinati dell'intrusione marina, dell'innalzamento del livello del mare e dei cambiamenti climatici.

Nonostante le differenze geologiche e morfostrutturali tra le diverse aree del Mediterraneo, tutti i sistemi carsici costieri condividono caratteristiche idrogeologiche comuni, quali l'elevata permeabilità secondaria, la presenza di reti di drenaggio sotterraneo altamente anisotrope, la rapida risposta agli eventi meteorici e l'intensa interazione tra acque dolci e acque marine. Tali peculiarità favoriscono la formazione di sorgenti costiere e sottomarine, rendendo il Mediterraneo una delle aree a maggiore concentrazione di fenomeni di deflusso sottomarino a scala globale.

IL RILEVAMENTO A NUOTO DELLE SORGENTI COSTIERE

La descrizione delle caratteristiche geomorfologiche ed idrogeologiche del Mediterraneo si basa sui metodi di rilevamento proposti da Furlani (2020) e Furlani e Antonioli (2023), raccolti, in gran parte, nell'ambito del progetto Geoswim, che ha lo scopo di rilevare estesi tratti di coste rocciose mediante snorkeling, ovvero a nuoto con maschera e pinne, raccogliendo dati e immagini della zona intertidale e dati idrogeologici legati alla presenza di sorgenti costiere (Fig. 2). A tal scopo, è stato attrezzato un barchino, denominato ISR (Instrumental Supported Raft) che può essere spinto o trainato, ed ospita la strumentazione necessaria al rilevamento.

Sul barchino è stata installata anche una sonda multiparametrica CTD-diver della Eijkelkamp, per misurare temperatura (T) e conducibilità dell'acqua (EC). La precisione indicata dal produttore è di ± 0.1 °C (T) e $\pm 1\%$ (EC). I dati idrologici sono stati raccolti con lo scopo di identificare e localizzare le sorgenti costiere lungo la costa grazie ad abbassamenti repentini nei valori di temperatura e conducibilità. Procedendo ad una velocità di 2-3 km/h, lo strumento può essere interessato da una forte inerzia termica che rallenta l'equilibratura termica del CTD Diver. Anche la determinazione del valore reale di EC può essere condizionato da un sottile film di acqua marina che può fornire valori leggermente sfalsati

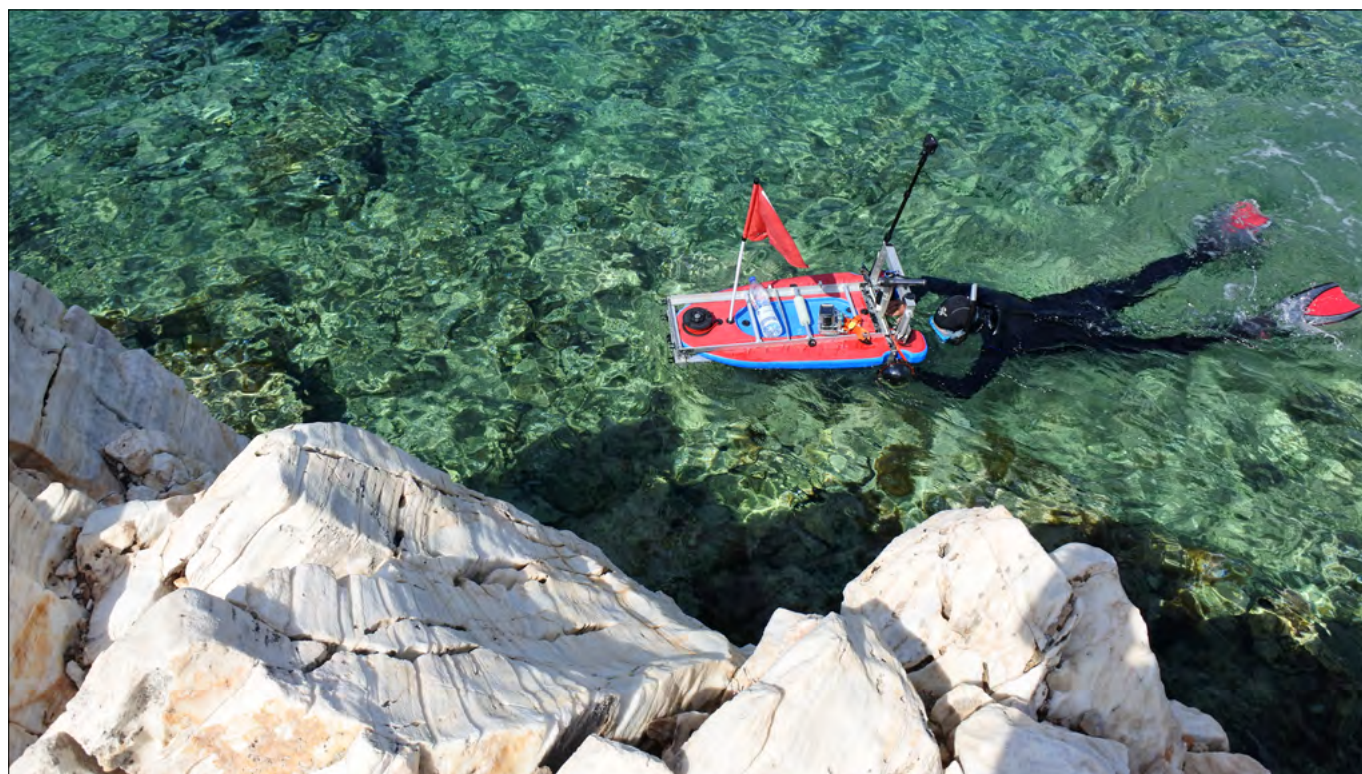


Figura 3. Il barchino, ISR (Instrumental Supported Raft) usato nei rilevamenti costieri

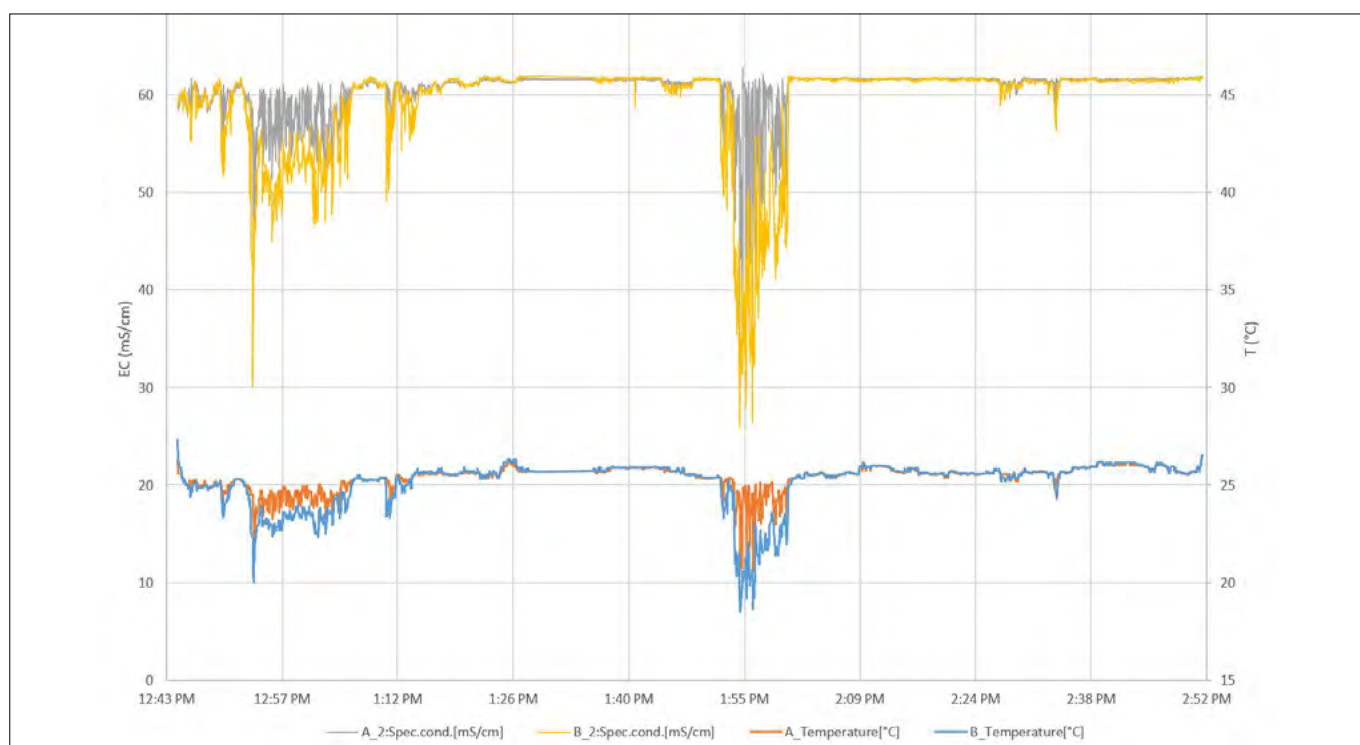


Figura 4. Anomalie di temperatura e conducibilità elettrica che individuano la posizione delle sorgenti costiere

anche in corrispondenza delle sorgenti. La sonda CTD è stata sincronizzata con i dati GPS in modo da ottenere la posizione corretta delle anomalie. Il rilievo è condotto nuotando mediamente ad una distanza di 1 m dalla riva.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I sistemi carsici costieri del Mediterraneo rappresentano uno degli esempi più significativi di interazione tra processi geologici, idrogeologici e marini. La complessa evoluzione tettonica del Mar Mediterraneo, unita all'ampia diffusione delle successioni carbonatiche e alle ripetute oscillazioni del livello del mare durante il Quaternario, ha favorito lo sviluppo di acquiferi carsici altamente permeabili, caratterizzati da una stretta connessione tra ambiente continentale e marino. Le sorgenti costiere e sottomarine costituiscono l'espressione più evidente di questa connessione e rappresentano elementi fondamentali per comprendere il funzionamento idrodinamico degli acquiferi, il bilancio idrico delle aree costiere e gli scambi tra acque dolci e acque marine.

L'analisi dei principali sistemi carsici mediterranei evidenzia come, pur nella grande varietà di contesti geologici e geomorfologici, essi condividano caratteristiche comuni quali un'elevata permeabilità secondaria, una rete di drenaggio sottomarino fortemente anisotropa e una risposta estremamente rapida agli eventi meteorici. Queste peculiarità rendono gli acquiferi costieri particolarmente sensibili alle variazioni climatiche,

all'innalzamento del livello del mare e alle pressioni antropiche, tra cui il crescente sfruttamento delle risorse idriche e i fenomeni di intrusione salina.

Negli ultimi anni, l'introduzione di metodologie di rilevamento diretto lungo costa, come l'approccio Geoswim, ha consentito di ampliare significativamente le conoscenze sulla distribuzione e sulle caratteristiche delle sorgenti costiere e sottomarine. Il rilievo a nuoto, integrato con misure multiparametriche ad alta risoluzione e sistemi di posizionamento satellitare, permette infatti di acquisire dati continui lungo estesi tratti di costa, superando molti dei limiti dei tradizionali rilievi puntuali e fornendo un quadro più completo della variabilità spaziale del deflusso sottomarino.

La crescente disponibilità di tecnologie innovative, quali sensori miniaturizzati, droni, rilievi batimetrici ad alta risoluzione e tecniche geofisiche e geochemiche, apre oggi nuove prospettive per lo studio dei sistemi carsici costieri. L'integrazione di questi approcci con modelli idrogeologici tridimensionali consentirà di comprendere con maggiore accuratezza il funzionamento degli acquiferi e di prevederne la risposta ai futuri cambiamenti ambientali.

In un contesto di progressivo innalzamento del livello del mare e di crescente pressione sulle risorse idriche costiere, la conoscenza delle sorgenti sottomarine assume un'importanza strategica non solo dal punto di vista scientifico, ma anche per la gestione sostenibile degli acquiferi, la tutela degli

ecosistemi marini e la pianificazione delle aree costiere. Il Mediterraneo, per la straordinaria concentrazione di sistemi carsici e per la varietà dei contesti geologici presenti, continuerà a rappresentare un laboratorio naturale privilegiato per lo studio delle interazioni tra acque sotterranee e ambiente marino, offrendo importanti indicazioni per affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici e dalla crescente vulnerabilità delle coste.

BIBLIOGRAFIA

- ANTONIOLI F., LO PRESTI V., ANZIDEI M., DEIANA G., DE SABATA E., FERRANTI L., FURLANI S., MASTRONUZZI G., ORRÙ P., PAGLIARULO R., ROVERE A., SANNINO G., SANDÒ P., SCICCHITANO G., SPAMPINATO C.R., VACCHI M., VECCHIO A. (2015), *Tidal notches in the Mediterranean Sea. Quaternary*. Science Review, 119, 1-19.
- ANZIDEI, M.; LAMBECK, K.; ANTONIOLI, F.; FURLANI, S.; MASTRONUZZI, G.; SERPELLONI, E.; VANNUCCI, G. (2014), *Coastal Structure Sea-Level Changes and Vertical Motion of the Land in the Mediterranean*. Geol. Soc. Lond. 2014, 388, 453-479.
- FURLANI S. (2020), *Integrated observational targets and instrumental data on rock coasts through snorkel surveys*. Marine Geology, 245, 106191, 1-15.
- FURLANI S., ANTONIOLI F. (2023), *The swim-survey archive of the Mediterranean rocky coasts: Potentials and future perspectives*. Geomorphology, 421, Article 108529.
- HIGGINS, C.G. (1980), *Nips, Notches, and the solution of coastal limestone: an overview of the problem with examples from Greece*. Estuarine and Coastal Science 10, 15-30.
- MATHER, A. (2009). *The Physical Geography of the Mediterranean*. OUP Oxford: Oxford, UK, 2009; ISBN 978-0-19-160841-4.



Parco Naturale Regionale
Dune Costiere
da Torre Canne a Torre San Leonardo

**"Una passeggiata tra dune,
ulivi e memorie antiche."**

Il Parco naturale regionale Dune Costiere è un mosaico di paesaggi e tradizioni: dalle zone umide che accolgono fenicotteri, aironi e altre specie migratorie, agli ulivi millenari e alle masserie che raccontano la storia agricola del territorio, dove si produce ancora olio extravergine di qualità. È un luogo di turismo lento e sostenibile, con percorsi ciclabili, trekking, laboratori e incontri con le comunità locali. Ogni stagione regala un'esperienza diversa, tra natura incontaminata, cultura, sapori e ospitalità autentica.

**Fatti catturare dall'atmosfera che si
vive camminando tra dune costiere,
zone umide, oliveti monumentali e
testimonianze archeologiche**



Parco Naturale Regionale Dune Costiere

S.O.: Ex Macello in C.da Li Cuti (ex SS 16) 72017 - Ostuni (BR)
Casa del Parco - Ex Stazione di Fontevicchia
C.G: N 40°46'52.9" - E 17°30'57.3"

Tel. 0831 152 6854

www.parcodunecostiere.it

PRENOTA LA TUA ESPERIENZA NEL PARCO!



Rapporti tra carsismo, idrogeologia e tettonica: un nuovo approccio multidisciplinare per lo studio della tettonica attiva. L'esempio della faglia di Posta Fibreno (Marsica occidentale - Lazio meridionale)

Michele Saroli^{1,2,3}, Matteo Albano³, Matteo Fiorucci^{1,2}, Marco Moro³, Emanuela Falcucci³, Stefano Gori³, Fabrizio Galadini³, Enrica Zullo³, Marco Petitta⁴

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Cassino (FR), Italia

² European University of technology, EUT+, European Union, Cassino (FR), Italia

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italia
Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia

E-mail: michele.saroli@unicas.it

Relationships between karst, hydrogeology, and tectonics: a new multidisciplinary approach to the study of active tectonics. The example of the Posta Fibreno fault (western Marsica - southern Lazio)

Parole chiave: carsismo, idrostrutture carbonatiche, faglie attive, Lago di Posta Fibreno, morfotettonica

Key words: karst, carbonate hydrostructures, active faults, Posta Fibreno Lake, morphotectonics

INTRODUZIONE

Nei sistemi carbonato-carsici faglie e fratture controllano l'infiltrazione, il drenaggio sotterraneo e la distribuzione delle principali forme carsiche, soprattutto in contesti tettonicamente attivi (Shanov e Kostov 2015). In tali ambienti, l'evoluzione del carsismo può quindi fornire indicazioni utili sull'assetto strutturale e sulla storia tettonica recente. Questo contributo sintetizza un nuovo approccio, basato sull'interazione tra carsismo, idrogeologia e tettonica, applicato all'idrostruttura della Marsica occidentale per lo studio della tettonica attiva. L'area, significativa per analizzare i rapporti tra la tettonica recente, la morfogenesi carsica e gli acquiferi carbonatici, comprende il Monte Morrone e la depressione tettono-carsica del Lago di Posta Fibreno, alimentato dalle omonime sorgenti e che rappresenta uno dei principali recapiti della circolazione idrica sotterranea regionale dell'Appennino centro-meridionale (Saroli *et al.*, 2022).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

La geologia dell'area è caratterizzata da successioni carbonatiche meso-

cenozoiche della piattaforma laziale-abruzzese, affioranti nel rilievo di Monte Morrone, che costituiscono la principale area di ricarica dell'acquifero. Verso sud-ovest, tali unità sono in contatto con successioni terrigene mioceniche impermeabili e con depositi continentali plio-quadernari. L'assetto tettonico è invece caratterizzato dalla faglia Val Roveto-Atina, struttura regionale a direzione NW-SE, di cui la faglia di Posta Fibreno costituisce un segmento meridionale (Fig. 1a). Questa struttura delimita il rilievo carbonatico rispetto alla depressione del lago, controllando la compartimentazione dell'acquifero e la migrazione del livello di base carsico-idrogeologico.

Il contrasto di permeabilità, insieme all'assetto strutturale, condiziona la localizzazione delle sorgenti di superficie, ubicate a circa 300 m s.l.m., e delle sorgenti sublaquali (doline-sorgenti) di Posta Fibreno, che insieme sono caratterizzate da portate medie elevate, fino a circa 9,8 m³/s (Capelli *et al.*, 2012) (Fig. 1a).

Le evidenze geomorfologiche e di terreno suggeriscono un'attività recente del sistema di faglie del Fibreno (Fig. 1a, 1b e 1c). Questa è indicata come presun-

ta responsabile del terremoto di luglio 1654, che danneggiò gravemente Posta Fibreno e i centri limitrofi. A supporto di questa ipotesi concorrono anche la distribuzione degli effetti macrosismici, le evidenze morfologiche locali e l'evoluzione storica della dolina di collasso di La Prece, localizzata presso il Lago di Posta Fibreno, che avrebbe assunto la forma attuale dopo il 1600 (Saroli *et al.*, 2012).

MATERIALI E METODI

Lo studio ha integrato rilievi geostretturali e geomorfologici, fotointerpretazione, ortofoto multitemporali, modelli digitali del terreno e analisi GIS, con l'obiettivo di valutare il rapporto tra tettonica recente, sviluppo delle forme carsiche e circolazione idrica sotterranea. Il riconoscimento delle forme carsiche è stato effettuato mediante fotointerpretazione e carte topografiche a scala 1:5.000, il modello digitale TanDEM-X, rilievi *in situ* e dati geologici pregressi (Cipriani 2020; Cipriani e Roncace 2020). Le elaborazioni spaziali sono state sviluppate in ambiente QGIS. I rilievi geostretturali hanno evidenziato sistemi di fratture con direzioni prevalenti NW-SE e direzioni

subordinate NE-SW, coerenti con le principali strutture tettoniche dell'area. Le analisi geomorfologiche e morfometriche hanno riguardato doline, polje, valli secche, ingressi di cavità e forme carsiche sublacuali (Fig. 1a) connesse al sistema sorgivo del Lago di Posta Fibreno, considerando parametri quali dimensioni, profondità, quota e rapporto di allungamento (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2020).

RISULTATI E DISCUSSIONI

Le doline occupano circa il 8% dell'area di studio e mostrano una distribuzione spaziale non casuale. La massima densità, pari a circa cinque doline per chilometro quadrato, si osserva nei settori maggiormente interessati dai principali segmenti di faglia del sistema del Fibreno e nelle aree in cui la fratturazione del rilievo carbonatico è più sviluppata. Dal punto di vista morfologico prevalgono forme subcircolari ed ellittiche, che rappresentano oltre l'80% del totale, mentre dal punto di vista dimensionale, dominano le macrodoline, pari a circa il 77% delle forme censite. La prevalenza di forme mature e di grandi dimensioni

suggerisce un'evoluzione carsica iniziata almeno nel Pleistocene inferiore e sviluppata in più fasi morfogenetiche. L'allineamento degli assi maggiori delle doline, orientati NW-SE e coerenti con le principali fratture e faglie, conferma il controllo strutturale sulla localizzazione e sull'evoluzione delle depressioni carsiche. La distribuzione altimetrica delle forme evidenzia una concentrazione principale delle doline tra 650 e 900 m s.l.m. e un secondo gruppo intorno a 300 m s.l.m., con relative valli secche che prendono origine dalle doline stesse, così come in corrispondenza del Lago di Posta Fibreno. Gli ingressi di cavità, distribuiti tra circa 290 e 700 m s.l.m., suggeriscono l'esistenza di un sistema carsico ipogeo sviluppato, capace di convogliare le acque infiltrate nelle porzioni più elevate del rilievo verso le sorgenti del Lago di Posta Fibreno. Tra le forme più rappresentative si distinguono le macrodoline di Fossa Maiura e del Tumolo. La prima, impostata su calcari cretaci frantumati, presenta un diametro massimo di circa 588 m e una profondità massima di circa 203 m; la seconda, su cui si sviluppa l'abitato di Campoli

Appennino, ha un diametro massimo di circa 546 m e una profondità massima di circa 123 m. L'impostazione della dolina del Tumolo su conglomerati continentali del Pleistocene inferiore consente di collocare l'avvio dell'evoluzione carsica tra circa 1,7 e 0,78 Ma (Saroli *et al.*, 2015). Le valli secche associate a Fossa Maiura e Tumolo, prive di continuità con un reticolo idrografico superficiale attivo, possono essere interpretate come antichi percorsi di deflusso connessi a fasi in cui le doline agivano come sorgenti carsiche e, successivamente, come inghiottitoi (estavelle). In questo quadro, le doline oggi sospese rispetto al livello sorgivo del Lago di Posta Fibreno rappresenterebbero delle paleo-emergenze progressivamente abbandonate a seguito dell'abbassamento relativo del livello di base idrogeologico (Fig. 1).

In tale contesto, il Lago di Posta Fibreno, con le sue doline e sorgenti sublacuali, rappresenta l'espressione attuale dell'interazione tra la tettonica attiva e il sistema carsico-idrogeologico. Il modello evolutivo (Fig. 1d) prevede che, durante il Pleistocene inferiore, il rilievo di Monte Morrone fosse caratterizza-

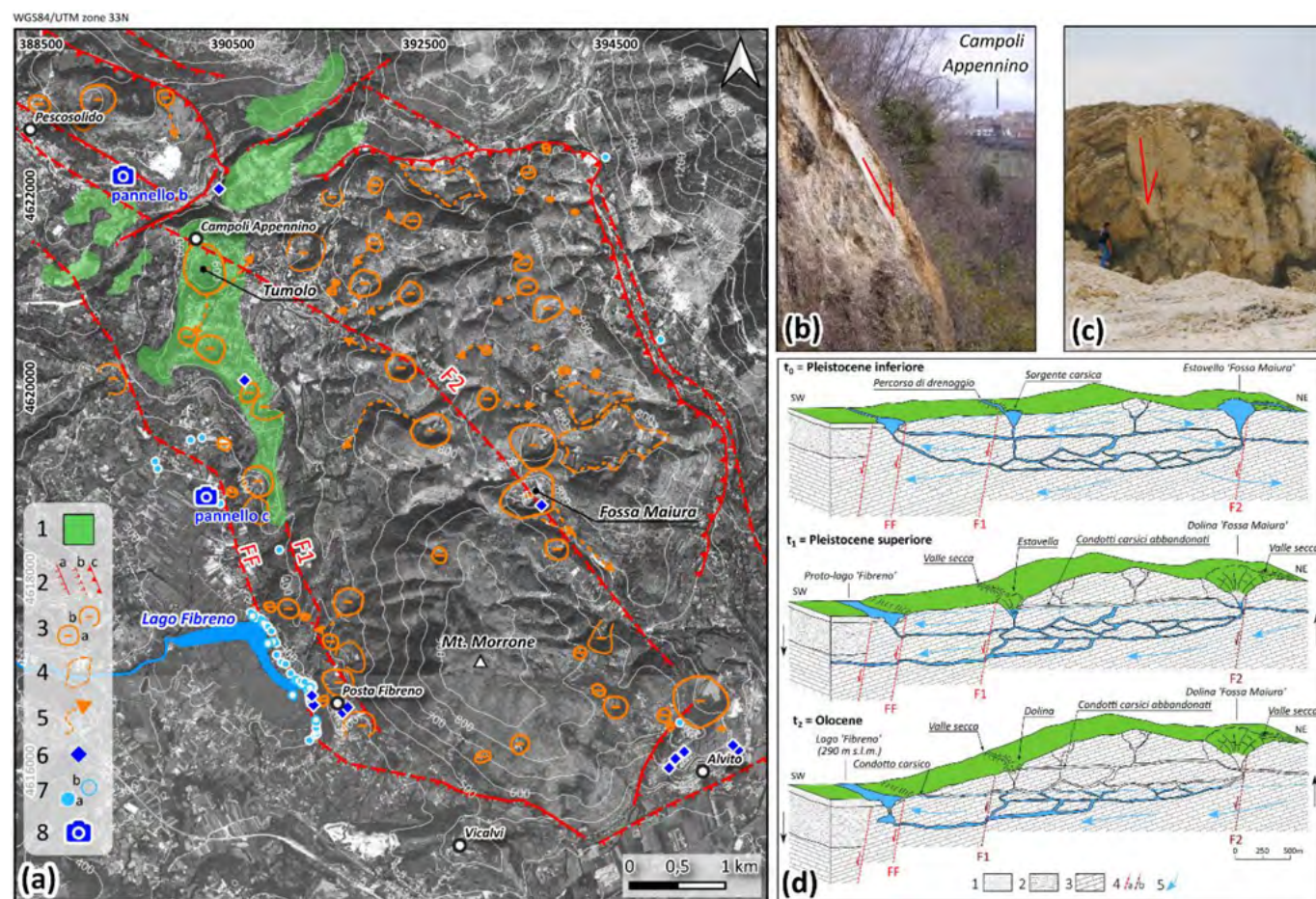


Figura 1. Sintesi dell'analisi geomorfologica condotta nell'area di studio e del modello concettuale evolutivo. (a) Stralcio sintetico dell'analisi geomorfologica. 1) Conglomerati di Campoli Appennino (Plio-quaternari da Saroli *et al.*, 2015) - 2) Faglie principali: a) certa; b) incerta; c) sovrascorrimento - 3) Doline: a) contorno regolare, b) contorno irregolare - 4) Polje - 5) Valle secca - 6) Condotto carsico - 7) Sorgenti: a) superficiali, b) sublacuali - 8) Ubicazione foto di terreno (b) e (c): evidenza di dislocazione per faglia di depositi del Pleistocene superiore-Olocene - (d) Schema concettuale evolutivo del sistema tettonico-carsico di Monte Morrone: 1) depositi detritici e lacustri (Pleistocene-Olocene) - 2) arenarie e argille grigie (Messiniano) - 3) Calcari e dolomie con marne emipelagiche (Lias-Tortoniano inferiore) - 4) Faglie: a) attive; b) non attive - 5) Circolazione idrica sotterranea (lo schema dei condotti carsici è indicativo). (modificato da Saroli *et al.*, 2022)

to da doline sorgenti e condotti carsici a quote più elevate rispetto a quelle dell'attuale Lago di Posta Fibreno. Il sollevamento tettonico associato ai segmenti delle faglie principali, in particolare alla faglia di Posta Fibreno, avrebbe determinato la migrazione del livello di base carsico-idrogeologico verso sud-ovest e a quote progressivamente inferiori. Le paleo-sorgenti più elevate, oggi rappresentate da doline con relative valli secche che si originano dalle doline stesse, documentano l'abbandono di antichi recapiti sorgivi e consentono di stimare tassi di sollevamento locali compresi tra 0,37 e 0,64 mm/anno, sulla base delle età relative ricavate da dati paleomagnetici e da analisi morfo-litostratigrafiche (Saroli *et al.*, 2012, 2015, 2022). Tali tassi sono verosimilmente espressione del movimento recente della faglia del Fibreno.

CONCLUSIONE

Il sistema del Lago di Posta Fibreno evidenzia una relazione diretta tra tettonica attiva, morfogenesi carsica e circolazione idrica sotterranea. La distribuzione altimetrica delle doline, le valli secche sospese, l'allineamento delle forme lungo direzioni strutturali e la localizzazione delle sorgenti lungo segmenti di faglia indicano che il carsismo registra le variazioni del livello di base del sistema carsico e l'attività della faglia di Posta Fibreno. La differenza di quota tra sorgenti attuali e paleosorgenti, insieme ai tassi di sollevamento stimati, rafforza il ruolo delle forme carsiche come indicatori geomorfologici della tettonica recente.

BIBLIOGRAFIA

- CAPELLI G., MASTRORILLO L., MAZZA R., PETITTA M., BALDONI T., CASCONI D., ..., TEOLI, P. (2012), *Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio scala 1: 100.000 (4 fogli)*. S.EL.CA., Firenze.
- CIPRIANI A. (2020), *Il Lago di Posta Fibreno (FR)*. Mem. Descr. Carta Geol., 106, 165-176.
- CIPRIANI A., RONCACCÈ S. (2020), *The dolines of Campoli Appennino (Frosinone, Italy). A geo-historical overview*. Rend. Online Soc. Geol. Ital., (52), 77-102.
- PARDO-IGÚZQUIZA E., DOWD P.A., TELBISZ T. (2020), *On the size-distribution of solution dolines in carbonate karst: Lognormal or power model?*. Geomorphology, 351, 106972.
- SAROLI M., ALBANO M., MORO M., FALCUCCI E., GORI S., GALADINI F., PETITTA M. (2022), *Looking into the entanglement between karst landforms and fault activity in carbonate ridges: The Fibreno fault system (central Italy)*. Front. Earth Sci., 10, 891319.
- SAROLI M., MORO M., FLORINDO F., LANCIA M., LURCOCK P.C., DINARÈS-TURELL J. (2015), *Paleomagnetic dating of tectonically influenced Plio-Quaternary fan-system deposits from the Apennines (Italy)*. Ann. Geophys., 58, 1-5.
- SAROLI M., MORO M., GORI S., FALCUCCI E., SALVATORE M.C. (2012), *Tettonica, idrogeologia e carsismo: un nuovo approccio multidisciplinare per lo studio della tettonica attiva. L'esempio della faglia di Posta Fibreno (Marsica occidentale-Lazio meridionale)*. IV Congresso AIGA, Perugia, EngHydroEnv Geology, 14B, 215-216.
- SHANOV S., KOSTOV K. (2015), *Dynamic tectonics and karst*, Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43992-0>

Sistemi carsici, spartiacque ipogei; tutela della diversità delle risorse idriche: il caso del Sistema di Monte Vermicano (Monti Ernici, Lazio)

Karst systems and karst groundwater divides; protecting water resource diversity: the case of the Monte Vermicano system (Ernici Mountains, Lazio)

Parole chiave: contaminazione, rischi antropici, acquifero carsico, acque potabili
Key words: contamination, anthropic risks, karst aquifer, drinking water

La fragilità dei sistemi carsici è un tema centrale fin dalla nascita della speleologia moderna. Già agli inizi del Novecento, Édouard-Alfred Martel esprimeva questo concetto con la massima: «*Le calcaire n'est pas un filtre [...], c'est un crible, un tamis*» (Il calcare non è un filtro, è un setaccio)¹. Con questa metafora, Martel intendeva spiegare che le rocce carbonatiche permettono il transito di batteri e impurità senza poter agire come elemento filtrante per purificare l'acqua. Grazie alle sue ricerche sulle connessioni tra pozzi, inghiottitoi e sorgenti, la Francia approvò il 15 febbraio 1902 la prima legge sulla tutela delle acque potabili, introducendo il divieto assoluto di scaricare residui inquinanti all'interno di grotte e voragini².

Oggi più che mai, la comunità speleologica – attraverso i suoi organismi nazionali e internazionali – svolge un ruolo importante di sensibilizzazione istituzionale e mediatica. Conoscere a fondo gli acquiferi carsici è infatti il presupposto imprescindibile per garantirne una tutela efficace. Questa necessità si fa drammaticamente urgente in un'epoca in cui, ai tradizionali pericoli di inquinamento chimico e microbiologico, si somma la minaccia invisibile e insidiosa delle microplastiche. Recenti progetti di ricerca promossi dalle federazioni speleologiche in sinergia con università ed enti di ricerca stanno dimostrando come queste particelle riescano a penetrare nelle profondità del reticolo sotterraneo, mettendo a rischio riserve idropotabili strategiche ed ecosistemi ipogei unici. In questo intervento viene presentato

il caso di studio del Sistema di Monte Vermicano e di una specifica area carsica della dorsale appenninica dei Monti Ernici come modello esemplificativo del complesso e delicato equilibrio che intercorre tra la conservazione del paesaggio montano, la tutela degli ambienti ipogei e lo sviluppo socio-economico del territorio, legato alle attività umane e turistico-ricettive.

L'EDIFICIO CARSICO

L'area costituita dall'anfiteatro del Monte Monna - Monte Vermicano (Guarcino, FR) si sviluppa lungo un gradiente altimetrico che dai crinali montuosi a circa 1900 metri si raccorda, in pochi chilometri, con la fascia di emergenza basale posta tra i 1200 e i 900 metri s.l.m., in corrispondenza del solco idrografico del Fiume Cosa. Due estesi altopiani carsici (Campocattino e Campovano) caratterizzano la zona alta di assorbimento mentre, dal punto di vista morfologico e idraulico, l'intero settore presenta un'elevata acclività dei pendii. Questa marcata pendenza determina un regime ad alta velocità sia per il ruscellamento delle acque superficiali, che per il transito e la restituzione delle acque sotterranee.

Dal punto di vista del dissesto idrogeologico e dell'impatto antropico, l'area presenta alcune criticità strutturali e ambientali. Tra i principali fattori di rischio si segnalano la slavina del Fosso di Terramuta e il progressivo deterioramento delle infrastrutture lungo la strada sterrata Colle Pannunzio-Innola, con particolare riferimento ai ponti e ai

relativi muretti sovrastanti i fossi. A ciò si aggiunge il disfacimento delle briglie lungo i fossi del Vermicano e del Renato; queste opere idrauliche rappresentavano un tempo un presidio basilare per il contenimento e la mitigazione delle piene. Infine, permane il problema del crollo dei massi, che nell'agosto 2022 ha costretto l'amministrazione comunale a interdire parzialmente l'accesso pubblico all'area dell'Eremo di Sant'Agnello³. La fragilità del versante risulta ulteriormente inasprita dal disboscamento sistematico e continuativo delle faggete dell'Anfiteatro, operazione che compromette la naturale azione di consolidamento del suolo e di mitigazione del rischio caduta massi, svolta dalla vegetazione.



Foto 1. Il torrente che scorre nell'Abisso di Monte Vermicano, Guarcino, FR, (Maurizio Monteleone 2 giugno 1991)



Foto 2. Colorazione con tracciante del corso d'acqua sotterraneo sul fondo dell'Abisso Vermicano, Guarcino, FR (Maurizio Monteleone, 2 giugno 1991)

SISTEMI SOTTERRANEI, BACINI IDROGRAFICI E SORGENTI

I reticoli carsici più conosciuti ed estesi dell'edificio carsico sono la Grotta degli Urli⁴ – che vanta uno sviluppo planimetrico di 5,3 km e una profondità di 610 metri – e il Sistema di Monte Vermicano, che presenta attualmente cinque ingressi, una profondità di 455 metri e uno sviluppo complessivo di oltre 3 chilometri⁵.

Le connessioni idrauliche degli acquiferi sono state sperimentalmente dimostrate attraverso storici test di tracciamento che hanno definito i principali vettori di deflusso sotterraneo attualmente conosciuti⁶. In particolare, il corso d'acqua che scorre sul fondo della Grotta degli Urli alimenta i recapiti della Grotta di Fossocampo (o Grotta La Foce)⁷ e delle sorgenti del Ceraso, come accertato dal tracciamento con fluoresceina effettuato nel 1992 dal Circolo Speleologico Romano (CSR)⁸. Per quanto riguarda invece il collettore ipogeo del Sistema di Monte Vermicano, la colorazione eseguita dal CSR nel 1995 ha dimostrato la sua diretta corrispondenza con le sorgenti basali di Caporelle. Il Gruppo sorgentizio di Caporelle, situato a una quota media di 900 m s.l.m. sulla destra orografica del Fiume Cosa, risulta quasi interamente captato sia per finalità idropotabili, sia per la produzione di energia idroelettrica. Dal punto di vista della distribuzione idrica, il sistema alimenta direttamente l'acquedotto comunale di Guarcino e, attraverso la gestione degli Acquedotti di Frosinone, rifornisce «la rete di di-

stribuzione [destinata ad] alcuni centri circostanti (Torre Caietani, Trivigliano, Porciano, Vico nel Lazio e Fumone)»⁹.

L'andamento dei reticoli carsici evidenzia l'idrostruttura e gli spartiacque sotterranei del massiccio carbonatico. La Grotta degli Urli, oggetto di recenti, nuove esplorazioni¹⁰, è caratterizzata dall'alternanza tra gallerie, tronconi fossili e zone attive e drena il proprio flusso idrico verso Nord-Ovest, confluenso nel bacino idrografico del Fiume Aniene. Al contrario, il reticolo ipogeo del Sistema di Monte Vermicano convoglia le proprie acque in direzione Sud-Ovest, drenando l'area di Campocatino e gran parte dell'Anfiteatro naturale direttamente verso il Fiume Cosa, affluente diretto del Fiume Sacco e sub-affluente del bacino idrografico del Liri.

Un ulteriore e spettacolare punto di emergenza delle acque di questo settore degli Ernici è rappresentato dalla cascata della risorgiva Zompo lo Schioppo, situata verso Nord-Est sul ripido versante abruzzese della Valle Roveto. Al di là degli spartiacque locali, la direttrice principale della circolazione carsica profonda dell'intera dorsale dei Monti Simbuini-Ernici e Monte Cairo è strutturalmente impostata lungo l'asse appenninico NO-SE. Questo imponente flusso sotterraneo recapita a Sud-Est nelle grandi risorgenze basali del Fiume Gari, a Cassino; da qui le acque vengono captate dall'Acquedotto della Campania Occidentale per alimentare la città di Napoli e il suo comprensorio metropolitano¹¹.

L'IDRODIVERSITÀ

La variabilità nelle tipologie di acque che il massiccio calcareo mostra nella ricca fascia di sorgenti della valle del Cosa – tra cui le emergenze di Capo Cosa, del Risorghiottto e la celebre Fonte Filette, acqua oligominerale di pregio¹² nota per la sua purezza e per un livello di nitrati eccezionalmente basso (0,2 mg/L) –, si presenta anche per le sorgenti di alta quota originate da falde sospese. Queste emergenze, che necessitano di analisi e monitoraggi, rappresentano una risorsa strategica per l'uso idropotabile, per l'abbigliamento della fauna selvatica e del bestiame al pascolo, quest'ultimo purtroppo in forte declino.

Tra queste, la sorgente più elevata è Fonte Pozzotello (1.870 m s.l.m.), a regime perenne ma con portata scarsa in estate (misurata in 0,1 litri al sec. il 22 agosto 2026), al centro di recenti progetti che vorrebbero impiegarla per alimentare gli impianti di innevamento artificiale

della stazione sciistica di Campocatino. Scendendo di quota si incontrano: la Sorgente perenne del Vermicano (1.604 m s.l.m.), le cui acque affiorano per il contatto con i livelli dell'Aptiano delle marne a *Orbitolina* e risultano quasi interamente captate per l'approvvigionamento potabile delle strutture ricettive e residenziali di Campocatino; la Sorgente Ascendella (1.539 m s.l.m.), captata per rifornire il Fontanile Le Campore (1.170 m s.l.m.), abitualmente utilizzato anche per il rifornimento idrico da parte della popolazione¹³; e infine Fonte Innola, ripristinata ad uso potabile da speleologi nella primavera 2016 per offrire un punto d'acqua potabile a escursionisti e frequentatori della montagna.

Altra importante sorgente in quota è Fontanella di Sant'Angelo, a regime perenne, situata lungo un tracciato che da Campo Rocelle conduce verso Pozzo Capodanno, su relitti di tracce dei tempi in cui i guarcinesi andavano a raccogliere fascine di legna¹⁴.

Sempre in zona Rocelle, di notevole interesse è la scoperta, effettuata dal CSR nel 2024, a una quota di 1.309 metri s.l.m., di un nuovo e importante corso d'acqua sotterraneo intercettato all'interno di una cavità in esplorazione¹⁵. L'afflusso idrico, perenne, si incontra a una profondità di circa -20 metri e, provenendo da un ramo con depositi di latte di monte, si incanala, dopo aver percorso una sala, lungo un meandro estremamente stretto, esplorato per venti metri. Le evidenze idrologiche indicano che il flusso emerge in superficie solo in concomitanza con i periodi di massima piena, attivando una risorgenza temporanea situata a una distanza lineare di circa 90 metri, che presenta anch'essa un meandro notevolmente stretto, ed è stata esplorata nell'estate scorsa dal CSR per soli venti metri usando, ad intervalli, una pompa sommersa¹⁶.

L'analisi chimica delle acque della Grotta delle Rocelle, campionate il 5 maggio 2025 in collaborazione con l'Istituto di Igiene dell'Università "La Sapienza" di Roma, ha rilevato una concentrazione di nitrati pari a 0,6 mg/l e un residuo fisso di 222 mg/l. Questi dati confermano la purezza chimica del flusso sotterraneo e l'assoluta assenza di contaminanti, tracciando il profilo tipico di un'acqua carsica sinora in quota protetta dall'antropizzazione e dotata di una mineralizzazione equilibrata. Il valore di conducibilità elettrica, di 366 µS/cm, suggerisce inoltre una circolazione idrica più lenta rispetto ad altri sistemi dell'area: il maggiore tempo di ritenzio-

ne e di contatto con la roccia permette all'acqua di arricchirsi significativamente in ioni calcio e bicarbonato.

LA VULNERABILITÀ DEL SISTEMA DI MONTE VERMICANO

Il legame tra inquinamento e vulnerabilità carsica trova una drammatica conferma proprio a Campocatino. Nel giugno 2016 è stato identificato e successivamente riaperto, con un'attività di scavo speleologico, un inghiottitoio attivo da tempo ostruito. Il progressivo accumulo al suo interno di rifiuti plastici e altri materiali detritici era, ed è ancora, causa diretta dei ricorrenti allagamenti nella zona sud del piano carsico. Quando le plastiche e i sedimenti bloccano il deflusso, nel campo carsico si forma un vero e proprio lago temporaneo profondo fino a 3-4 metri, sommergendo l'area degli impianti sciistici, provocando seri danni alle strutture turistiche e costringendo i Vigili del Fuoco a costose e complesse operazioni di idrovora per pompare via l'acqua¹⁷. La possibilità di pulire e ampliare i condotti, ripristinare il sistema naturale di drenaggio e di proteggere l'ingresso dell'inghiottitoio è importante quanto difficile da gestire; un tracciamento con fluoresceina sarebbe inoltre di estremo interesse per verificare la connessione con le acque del ramo 'Risalita di Cristiano' nel Sistema di Monte Vermicano, punto probabile di connessione. L'idrostruttura del Sistema di Monte Vermicano è caratterizzata da una complessa rete di condotti freatici e pozzi, con verticalità che superano a volte i 100 metri di dislivello. L'evoluzione morfologica del sistema mostra numerosi ed evidenti fenomeni di cattura idrica e ringiovanimento dei condotti, alimentati da molti, diffusi apporti idrici secondari. Questi flussi convergono nei meandri principali o, in alternativa, defluiscono verso settori ipogei ancora inesplorati. L'intero reticolo è contraddistinto da un'elevata efficienza idraulica, che imprime alle acque sotterranee una velocità di transito e di restituzione a valle estremamente sostenuta.

Alle portate stagionali altamente variabili nei diversi rami del reticolo, si somma il contributo preminente di un grande corso d'acqua a regime perenne, che ha origine da una frana in un'ampia galleria situata a oltre 300 metri di profondità; da tale quota, il flusso si incanala all'interno di un imponente e alto meandro, percorrendolo interamente fino a raggiungere i due attuali sifoni cosiddetti 'terminali'.



Foto 3. Grotta delle Rocelle, inizio del meandro a valle (Stefano Gambari, 14 settembre 2024)

Il tema del potenziale inquinamento dei corsi d'acqua ipogei trova in questo settore una drammatica evidenza, legata all'elevata vulnerabilità della falda acquifera da parte sia degli inghiottitoi di Campocatino sia di quelli, fortemente attivi, situati lungo il Fosso del Vermicano e pone all'attenzione la protezione dei fossi. Un esempio emblematico è costituito dall'inghiottitoio di "Gnomo Gnomo", una struttura in grado di drenare da sola circa la metà della portata complessiva del fosso. Durante gli eventi di piena, l'imbocco di questa cavità viene ciclicamente colmato da ingenti volumi di materiali detritici e sedimentari che, accumulandosi di anno in anno, determinano ricorrenti fenomeni di occlusione parziale o totale dell'ingresso.



Foto 4. Abisso Gemma Gresle, il grande meandro a -250 m (Maurizio Monteleone, marzo 1992)

Il precedente storico dell'inquinamento delle sorgenti di Guarcino, avvenuto nel 1990 e culminato con l'ordinanza di chiusura delle fontane pubbliche del paese, rappresenta un chiaro esempio della vulnerabilità dell'acquifero. Quell'evento diede avvio al "Progetto Guarcino", un piano di studi affidato al CSR tramite un'apposita convenzione con la XII Comunità Montana. Nell'ambito di questo progetto, il CSR ha sviluppato ricerche di carattere geologico¹⁸, idrologico, speleologico¹⁹, microbiologico²⁰ e biospeleologico²¹, tentando di comprendere le risorse idriche locali con un approccio scientifico multidisciplinare.

In questo contesto metodologico si inserisce il tracciamento del torrente sotterraneo perenne, che scorre sul fondo dell'Abisso Vermicano. La colorazione ha dimostrato la diretta corrispondenza con le sorgenti di Caporelle, stabilmente captate ad uso idropotabile. L'esperimento, con una risposta positiva registrata in sole dieci ore, ha evidenziato un'elevata velocità di transito e, nel contempo, ha svelato un rilevante potenziale esplorativo residuo, stimato in ulteriori 300 metri di dislivello verticale per uno sviluppo planimetrico di circa tre chilometri²².

Il monitoraggio microbiologico delle acque, condotto in sinergia con la USL di Frosinone, ha evidenziato una netta contaminazione da coliformi e streptococchi fecali, riscontrata sia nelle risorgenze sia in vari punti del corso d'acqua sotterraneo. Sulla base delle evidenze idrogeologiche, l'inquinamento è risultato riconducibile alle dispersioni provenienti dai sistemi di scarico locali (i cosiddetti

“pozzi neri”) a servizio del sovrastante insediamento turistico di Campocatino.

Un contributo importante per ricostruire la storia degli interventi nell'area, che qui riportiamo integralmente, ci è stato inviato dal Sindaco del Comune di Guarcino: «Il sistema originario di smaltimento dei reflui del Centro di Campocatino, realizzato a partire dagli anni Sessanta, era costituito da impianti del tipo fosse biologiche a dispersione, posti a servizio delle singole strutture ricettive e delle attività commerciali presenti nell'area. Successivamente, a causa delle criticità di carattere igienico-sanitario riscontrate nel sistema di smaltimento esistente, l'Amministrazione Comunale di Guarcino dispose l'obbligo per tutte le strutture di dotarsi di impianti a tenuta stagna, prevedendo lo svuotamento periodico dei liquami mediante ditte autorizzate e l'esibizione della relativa documentazione attestante l'avvenuto smaltimento. Nell'anno 2000 furono infine appaltati i lavori per la realizzazione del collettore fognario a servizio della stazione sciistica di Campocatino, con collegamento alla rete fognaria comunale per il successivo trattamento e smaltimento dei reflui»²³.

Le fosse biologiche a tenuta stagna vengono realizzate a partire dall'agosto del 1997, con svuotamento delle acque nere tramite autospurgo effettuato addirittura presso il depuratore di Latina, mentre nel gennaio del 2003 viene finalmente effettuato il collegamento del collettore fognario tra Campocatino e Guarcino.

UN FUTURO INCERTO

L'acqua rappresenta la risorsa ambientale più preziosa a livello globale e locale; la sua tutela, nel contesto dei Monti Ernici, richiede una conoscenza del sistema idrografico sotterraneo e dei relativi bacini di assorbimento. Proprio la grande piana di Campocatino – sito di Importanza Comunitaria della rete Natura 2000²⁴, Zona Speciale di Conservazione, inclusa all'interno di una più ampia Zona di Protezione Speciale – potrebbe costituire un laboratorio didattico per lo studio della flora, della fauna e dei fenomeni carsici, tuttavia, il suo futuro va in tutt'altra direzione. Nonostante tra gli interventi attivi e le azioni da incentivare la Direzione Regionale Ambiente individui anche quelli di «favorire forme di fruizione turistica invernale complementari e alternative allo sci alpino (sci di fondo, escursionismo con racchette da neve) e migliorare la stabilità dei versanti»²⁵ oggi, tra tabelloni in-



Foto 5. Struttura di ferro con funzione di filtro a protezione dell'inghiottitoio di Campocatino (Stefano Gambari, 23 agosto 2026)

formativi vandalizzati e segnaletica dei sentieri che versa in uno stato di scarsa manutenzione, si perde forse l'opportunità, partendo proprio da lì, di favorire una conoscenza diffusa della natura dei Monti Ernici e di scoprirne i fenomeni di biodiversità e 'idrodiversità'.

Eppure, quando ci si affaccia su Campocatino, la memoria visiva richiama un passato diverso, quello di un ambiente in cui si praticava la pastorizia e insieme l'escursionismo.

Proprio da lì, da quel bordo del piazzale asfaltato di via della Genziana, sparuti naturalisti, speleologi o *mountain bikers* si preparano ancora per partire lungo antichi sentieri diretti ai luoghi più integri della montagna. Tuttavia quel confine, simile alla banchina di un porto, sembra oggi privo di senso: l'arrivo di moto di alta cilindrata contribuisce a un certo senso di 'spaesamento'. Per la fauna selvatica, per i lupi e l'orso marsicano, sempre più raro²⁶, costituiscono elemento di disturbo molte delle attività umane oggi in corso: il potenziamento delle infrastrutture, il costante taglio delle faggete, e anche quell'inquinamento acustico causato dalle corse ad alta velocità lungo la strada Guarcino-Campocatino.

Il Comune di Guarcino ha dato in concessione l'area a una società che intende trasformarla in un parco giochi per famiglie, con gonfiabili, parchi avventura, nuove piste da sci e tapis roulant, già installati anche in mancanza di parere di valutazione di incidenza ambientale (VIIncA)²⁷. Il turista non è più invitato a esplorare la natura, ma a divertirsi con *snow tubing*, *neveplast*, *fun-park*, *zipline* e area *food* in un ambiente artificiale che ricalca modelli urbani, snaturando la vocazione originaria del territorio; è soprattutto la ristrutturazione dell'invaso idrico per l'innervamento artificiale con alimentazione idrica prevista da Fonte Pozzotello, che potrebbe provocare gravi alterazioni dell'ambiente e del paesaggio; come la ricostruzione di due edifici sulla piana, attualmente demoliti, per i quali nei documenti «si specifica

che la gestione delle acque reflue avverrà mediante "sistemi a tenuta"»²⁸ e quindi senza allaccio al sistema fognario, fattore di rischio di cui abbiamo già conosciuto nel 1990 le conseguenze, e più elevato per un fattore di rischio concomitante, l'allagamento della piana per ostruzione dell'inghiottitoio di Campocatino.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Sindaco del Comune di Guarcino Urbano Restante per aver da sempre favorito le ricerche speleologiche, autorizzando il transito sulle strade forestali, e per le informazioni sul collettore fognario (*Riscontro alla richiesta di informazioni relative al sistema fognario di Campocatino*, Comune di Guarcino, prot. N.3908, 5 giugno 2026). Un particolare ringraziamento a Pietro Ricci (Acqua Filette) e al prof. Matteo Vitali, Responsabile Laboratorio di Chimica Ambientale, Dipartimento di Sanità Pubblica e Malattie Infettive, Direttore Laboratorio per la Sicurezza dell'Acqua e il Controllo della Legione nella (LSACL), Università di Roma La Sapienza che hanno rispettivamente sostenuto e svolto le analisi dei campioni delle acque della Grotta di Rocelle. Infine Silvano Agostini e Federico Sirtori hanno proposto suggerimenti e svolto la revisione del testo.

BIBLIOGRAFIA

- AGOSTINI S. (1995), *Il contesto geologico e ambientale dei fenomeni carsici nei Monti Ernici con particolare riferimento al sistema ipogeo Gemma Gresle-Vermicino*. Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 35-36 n. s., n. 8-10, 1993-1995, pp. 5-20.
- BALESTRA et al. (2006), *Falling from the ceiling: first evidence of microplastic and microfibres pollution in cave dripping waters, Groundwater for Sustainable Development*, vol. 34, 101669, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2026.101669>.
- CATALANO et al. (2025), *La tutela delle risorse idriche del Lazio: una proposta metodologica per la delimitazione delle Aree di Salvaguardia delle captazioni idropotabili applicata all'idrostruttura dei Monti Lepini*. Geologia Ambientale nel Lazio, a cura di Daniele Baldi, Eugenio Di Loreto, Lorenzo Manni, Sigea, pp. 118-124. Disponibile online.
- CONSORZIO DI CAMPOCATINO (2002), *Studio generale per la valorizzazione ambientale, culturale e turistica del comprensorio di Campocatino. Progetto esecutivo (perizia di variante). Completamento rete fognate (acque nere) e completamento e potenziamento dell'impianto idrico. Studio di impatto ambientale: relazione d'impatto*. Arch. Mario Caponi, 8 marzo 2002, 10 p. e 1 mappa con tracciato delle due linee (copia in Archivio Sbordoni, CSR).
- DEMATTEIS M., NARDELLI M. (2022), *Inverno liquido: la crisi climatica, le terre alte*

- e la fine della stagione dello sci di massa. Roma, DeriveApprodi.
- DE PERSIIS G. (2016), *Ernico: storia di un orso dell'Appennino*. Salviamo l'orso, Arti grafiche Tofani, Frosinone.
- DI RUSSO C., SIMONELLI S. (1995), *Monitoraggio microbiologico delle acque sorgive e sotterranee dell'alta valle del Fiume Cosa*, Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 35-36 n. s., n. 8-10, 1993-1995, pp. 123-133.
- GAMBARI S. (1995), *Carsismo e grotte dei monti Ernici (Comprensorio della XII Comunità Montana-Lazio)*, Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 35-36 n. s., n. 8-10, 1993-1995, pp. 21-93.
- LATELLA L., DI RUSSO C., SBORDONI V. (1995), *Note sulla fauna cavernicola dei Monti Ernici*, Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 35-36 n. s., n. 8-10, 1993-1995, pp. 135-146.
- MARTEL, É.-A. (1909), [Réponses], Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie, Procès-verbaux séance 19 janvier 1909, a. 23, Bruxelles: Hayez.
- MONTELEONE M. (1995), *Storia delle esplorazioni speleologiche dei Monti Ernici*, Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 35-36 n. s., n. 8-10, 1993-1995, pp. 147-175.
- NISIO S. (2008), *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. ISPRA, Roma.
- STERBINI G. (2019), *Speleologia di superficie: tre anni a Campovano*. Spelunca docet: atti del 7. Convegno della Federazione Speleologica del Lazio, Roma, 5-7 maggio 2017. Roma, Federazione Speleologica del Lazio, 2019, Speleologia del Lazio, 9: 25-30.
- TECNOSTUDI AMBIENTE (2022), *Servizio di studio ed elaborazione dati in materia ambientale ai fini dell'aggiornamento dei Piani di gestione delle acque da parte delle Autorità di Bacino distrettuali dell'Appennino centrale e meridionale. Rapporto finale*. Regione Lazio, Giunta regionale, Area Qualità dell'ambiente, ottobre 2022, <https://www.regione.lazio.it/sites/default/files/documentazione/AMB-DD-G17692-14-12-2022-Allegato1-Rapporto-finale.pdf>
- TERRAGNI F. (1992), *Indagini idrogeologiche con traccianti colorati nella Grotta degli Urli (M.ti Simbruini sud-orientali)*, Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 32-33 n.s., n. 6-7, 1991-1992, pp. 43-66.
- TERRAGNI F. (1995), *Indagini idrogeologiche nell'alta valle del Fiume Cosa*, Notiziario del Circolo Speleologico Romano, a. 35-36 n. s., n. 8-10, 1993-1995, pp. 95-121.
- TURRINI P. (2023), *Grotta degli Urli: studi climatici e nuovi sviluppi esplorativi*, Segni nella roccia: carsismo e dintorni: atti del 9. Convegno della Federazione Speleologica del Lazio, Segni, 9-10 ottobre 2021. Roma, Federazione Speleologica del Lazio, 2023, Speleologia del Lazio, 11: 95-100.
- TURRINI P. (2025), *Importanti scoperte nella Grotta degli Urli*, L'aria e l'acqua scultori delle grotte: atti del 10. Convegno della Federazione Speleologica del Lazio, Magliano Sabina, 19-20 ottobre 2024. Roma, Federazione Speleologica del Lazio, 2024 (stampa 2025), Speleologia del Lazio, 12: 43-49
- NOTE**
- 1 Martel, É.-A. (1909): 30
 - 2 L'Articolo 28 della Legge del 15 febbraio 1902 è stato definito "articolo Martel".
 - 3 Cfr. <https://www.circolospeleologicoromano.it/csr/progetto-eremo-di-s-agnello>.
 - 4 La Grotta degli urli, numero di Catasto delle cavità naturali La 1030 è stata esplorata dallo Speleo club Roma nel 1987, negli anni Novanta, nel 2019 e dal 2024 in poi; cfr. per le più recenti esplorazioni Turrini 2023, 2025.
 - 5 I cinque ingressi del Sistema di Monte Vermicano sono: Abisso di Monte Vermicano (La 616), quota 1555, scoperto nel 1972 ed esplorato dallo Speleo Club Roma (SCR) sino all'11-12 agosto 1973, data del raggiungimento del fondo, costituito allora da un sifone a -388m di profondità. Il secondo ingresso è l'Abisso Gemma Gresele (La 1400), quota 1609, esplorato dal CSR dal 9 settembre all'8 dicembre 1979, data della congiunzione a -280 m con l'Abisso di Monte Vermicano, che ha portato la profondità del sistema a -439 m. Dal 1979 verranno esplorati dal CSR numerosi rami del sistema. Il terzo ingresso, la Tana degli eretici (La 1401), quota 1520, fu scoperto nel 1997 dal CSR; la grotta fu congiunta nello stesso anno a 130 m di profondità con l'Abisso Gemma Gresele. La via dell'ingresso degli Eretici veniva seguita nel 1998 con la ripresa della risalita di Cristiano (Sella del Traverso Marco Di Bernardo, risalita del meandro; discesa e congiunzione con la parte finale del ramo 'Yogurt e nutella'). La Tana degli Eretici veniva percorsa, anche per rivisitare le parti finali dell'Abisso di Monte Vermicano. Il quarto ingresso, scoperto nel 2003, dà accesso alla Grotta di Gnomino (La 1514), quota 1405, congiunto con il Ramo delle foglie dell'Abisso Vermicano il 13 e 14 ottobre 2007. L'accesso, da utilizzare nel solo periodo estivo, costituiva una via privilegiata per continuare le esplorazioni nella zona cosiddetta terminale: nel 2011 il vecchio fondo (un sifone bypassato tramite un passaggio più alto) è superato e viene esplorato il tratto successivo per circa 200 m, da parte del CSR e del Gruppo Grotte Castelli Romani, raggiungendo due nuovi sifoni, a 455 m di profondità; il tratto è stato rivisitato e rilevato nell'ottobre 2015 da speleologi del CSR con esplorazione di un ramo affluente sulla destra orografica. Il quinto ingresso è l'Abisso Gianfranco Trovato (La 1972), quota 1566, scoperto nel giugno 1990, esplorato dal CSR in fasi successive con lavori di disostruzione e congiunto con il Ramo di Cristiano il 26 settembre 2020.
 - 6 Terragni 1995. La velocità delle acque sotterranee è stata calcolata - dal fondo dell'Abisso Vermicano alle sorgenti di Caporelle - in circa 200 metri/ora durante le prove di colorazione con fluoresceina realizzate dal CSR il 1 giugno 1991, ripetute il 12 aprile 2003.
 - 7 Grotta La Foce, numero del Catasto delle cavità naturali La 865.
 - 8 Terragni 1992.
 - 9 Terragni 1995: 99. Le portate complessive dei bottini F1-F4 sono stimate in 34 l/s, mentre l'esuberante delle sorgenti di Caporelle viene «direttamente incondottato verso la centrale idroelettrica di S. Agnello attraverso un canale parzialmente a cielo aperto in cui si registra una portata pressoché costante pari a circa 330 l/s».
 - 10 Turrini 2023, 2025.
 - 11 Nisio 2008: 88.
 - 12 Con una portata 1,6 l/s, imbottigliata dal 1894, è oggi distribuita nel settore dell'alta ristorazione. L'azienda di Ricci si distingue per essere *plastic-free*, con l'uso della bottiglia di vetro e di bottiglie di alluminio ricaricabili.
 - 13 Il fontanile Le Campore, perenne, ha un getto quasi costante di 1,3 l/s.
 - 14 Federico Sirtori, comunicazione personale.
 - 15 Grotta delle Rocelle, La 2503. Nella saletta alla base del P 20 iniziale, un monitoraggio con datalogger Elitech RC-51H (ottobre-novembre 2024) ha fornito una misura di temperatura dell'aria di 8.6° C, con variazioni a 8.5° C, e umidità del 100%.
 - 16 Risorgenza di Rocelle La 2484.
 - 17 Particolarmente rilevante ed esteso fu l'allagamento dell'inverno 1981-1982; più di recente si ricordano gli allagamenti di marzo 2011, 2016, 2017. L'inghiottitoio, ampliato tramite scavo da Gianluca Sterbini e Tarcisio Verdecchia, ha il numero di Catasto La 2436. Cfr. una notizia apparsa su *Gente comune*, n. 1, marzo 2017, e Sterbini 2019:29-30. L'acqua pompata dai VVFF dal lago viene fatta defluire nel grande imbuto carsico, solo in parte impermeabilizzato, posto tra via della Genziana e la struttura dell'hotel ristorante Eden. Quasi al centro della piana esiste anche un altro inghiottitoio, non interessato al drenaggio della zona Sud, La 1028 Dolina sfondata di Campocatino.
 - 18 Agostini 1995.
 - 19 Gambari 1995, Monteleone 1995.
 - 20 Di Russo e Simonelli 1995.
 - 21 Latella, Di Russo, Sbordonni 1995.
 - 22 La data della colorazione è il 1 giugno 1991. Cfr. Terragni 1995.
 - 23 Nel 2001-2002 viene redatto dal Consorzio di Campocatino un progetto esecutivo per il completamento della rete fognante allacciando le nuove linee a quelle esistenti in località Rivituro (Consorzio di Campocatino 2002).
 - 24 Codice della rete Natura 2000: IT6050009.
 - 25 https://www.parchilazio.it/documenti/schede/misure_di_conservazione_sic_it6050009_campo_catino.pdf. Cfr., per i percorsi di riconversione dello sci di massa, Dematteis e Nardelli 2022.
 - 26 De Persiis 2016.
 - 27 Regione Lazio, Direzione Regionale Ambiente, Cambiamenti climatici, transizione energetica e sostenibilità, Parchi, Area protezione e gestione della biodiversità, *Comune di Guarcino (FR). "Piano degli interventi volti alla valorizzazione e al potenziamento degli elementi infrastrutturali e turistici della Piana di Campocatino". Proponente: Società LVS Rental srl. Parere parzialmente favorevole e preavviso di diniego ai sensi dell'art. 10-bis della L. n. 241/1990 per la procedura di valutazione di incidenza appropriata ai sensi del DPR n. 357/1997 e delle LLGG VIn-cA (ns. rif. 1052/2024)*. Cfr. <https://regionelazio.box.com/v/VInC-A-1052-2024> con tutta la documentazione relativa al progetto.
 - 28 Ibid., p. 10.

Ente strumentale della Regione Campania che sviluppa attività di monitoraggio, prevenzione e controllo per la tutela del territorio e il superamento delle criticità ambientali



L'Agenzia ha siglato un accordo di collaborazione con la SIGEA finalizzato a promuovere iniziative e progetti comuni volti alla sensibilizzazione su i temi legati allo sviluppo sostenibile e alla diffusione di stili di vita rispettosi dell'ambiente.

Per saperne di più



www.arpacampania.it



[arpac_educazione ambientale](https://www.instagram.com/arpac_educazione_ambientale)



[arpa campania](https://www.youtube.com/arpa_campania)

Il paesaggio dell'acqua e la memoria idrologica delle "fogge" nella Murgia meridionale pugliese: la gestione storica della risorsa idrica nella pianificazione urbanistica del Comune di Martina Franca

The water landscape and the hydrological memory of "fogge" in southern Apulian Murgia: historical water resource management in the urban planning of the municipality of Martina Franca

Parole chiave: memoria storica, paesaggio idrologico, cisterne, urbanistica, fonti d'archivio
 Key words: historical memory, hydrological landscape, cisterns, urban planning, archival sources

1. PREMESSA

Gli ecosistemi carsici si configurano come contesti ambientali di estrema fragilità, all'interno dei quali le dinamiche di modellamento naturale e le necessità di insediamento antropico si intrecciano in modo indissolubile. La Murgia meridionale pugliese, e in particolare l'area compresa nel Comune di Martina Franca, rappresenta un caso emblematico di co-evoluzione tra uomo e ambiente carsico. La totale assenza di un reticolo idrografico superficiale perenne, causata dai diffusi processi di infiltrazione e fratturazione profonda delle rocce calcaree, ha storicamente imposto alle comunità locali l'adozione di strategie ingegnose per la captazione, lo stoccaggio e la gestione dell'acqua piovana. In questo scenario, le infrastrutture di approvvigionamento idrico antico sono localmente denominate *fogge* (da *fovae* ossia fosse interrate) e furono scavate e/o costruite al fine di convogliare le acque meteoriche mediante rudimentali canalizzazioni sul terreno. Esse non costituiscono meri elementi isolati dell'archeologia rurale, ma formano una complessa infrastruttura idraulica, diffusa già a partire dal 12 agosto 1310, quando il principe Filippo I d'Angiò nel riconoscere istituzionalmente il *Casale della Franca Martina* garantì ai cittadini il *privilegio* di poter scavare cisterne senza alcun aggravio fiscale.

Le *fogge* sono altresì l'esempio emblematico del passaggio delle greggi

e/o delle mandrie lungo le *vie erbose* della transumanza, fenomeno storico-culturale-economico attestato alla fine del Quattrocento e riconosciuto ampiamente nella letteratura specialistica. Erano dunque elementi fondamentali per garantire lo stazionamento temporaneo del bestiame itinerante, oltre a essere ancor oggi la testimonianza dei relitti di strade interpoderali e dei grandi *paretoni* e *varcaturi* che sono stati irrimediabilmente compromessi/distrutti dalla speculazione edilizia e no.

Le *fogge*, a seconda dei casi, potevano essere quindi d'approvvigionamento idrico per lo sfruttamento agricolo e per l'allevamento del bestiame delle masserie, tipico sistema produttivo martinese agrosilvopastorale sviluppatosi a partire dalla fine del XV secolo e caratterizzato come peculiarità insediativa e produttiva rispetto a quello della restante Murgia dei Trulli: oggi per masseria s'intende la parte per il tutto, ossia il corpo di fabbrica di queste antiche aziende, ma fino a tutto il Cinquecento con lo stesso termine *massa* s'indicavano i terreni destinati alla coltura e/o al pascolo (lemma derivato presumibilmente dal latino *massae* che indica i fondi sativi delle ville romane) ovvero le grandi masse armentizie o di bestiame.

Lo studio si propone quindi di analizzare tale sistema antropico attraverso un approccio multidisciplinare con l'obiettivo di dimostrare come la localizza-

zione e l'architettura di tali infrastrutture idriche storiche non siano frutto di scelte casuali o puramente logistiche, bensì la risposta a una profonda, seppur empirica, comprensione delle dinamiche idrogeomorfologiche superficiali e ipogee del territorio martinese *ab antiquo*.

2. METODOLOGIA E RISULTATI DELLO STUDIO SULLE FOGGE DI MARTINA FRANCA

La ricerca è stata articolata in tre fasi consequenziali al fine di strutturare una banca dati geografica georeferenziata, implementata da un'analisi spaziale basata sulla sovrapposizione di diversi livelli informativi, tra cui gli strati di pericolosità idraulica del territorio.

La fase preliminare della ricerca ha riguardato la mappatura sistematica delle *fogge* nel territorio comunale. Il processo di georeferenziazione in ambiente GIS ha combinato l'analisi archivistica e bibliografica con la fotointerpretazione e il riscontro diretto sul campo.

In particolare, la lettura sincronica della cartografia storica e delle restituzioni satellitari permette di affermare che la scelta dei siti, spesso situati a grande distanza dai corpi di fabbrica delle masserie, rispondesse a una precisa logica di adattamento: pur privi di tecnologie avanzate, gli artefici di queste opere seppero leggere il territorio, sfruttandone le peculiarità topografiche e assecondando i fenomeni

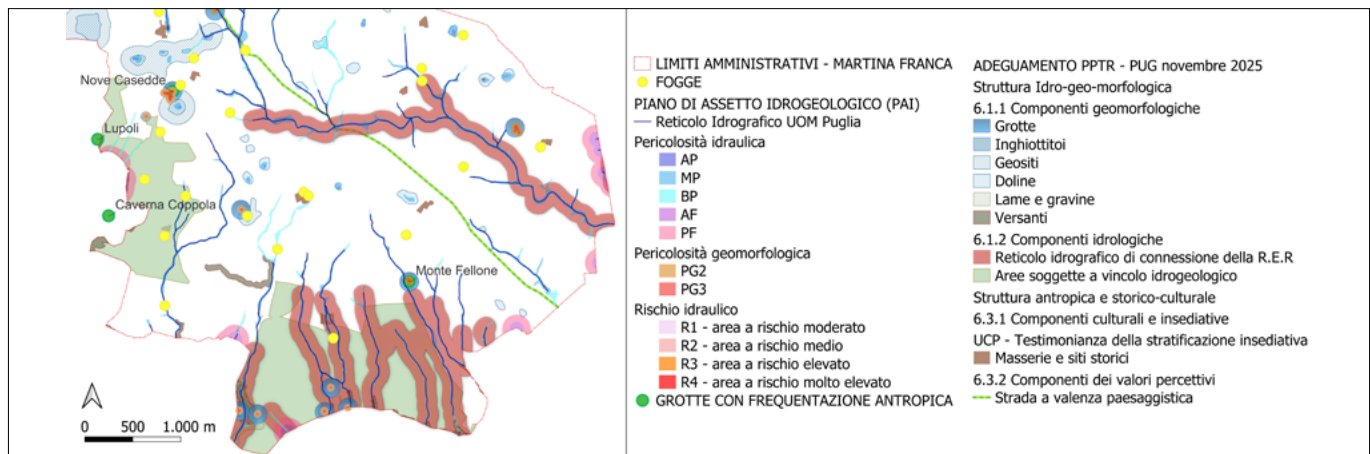


Figura 1. Inquadramento cartografico della porzione meridionale del territorio comunale di Martina Franca in cui ricadono i complessi carsici a frequentazione antropica antica di Nove Casedde, Lupoli, Caverna Coppola e Monte Fellone. La cartografia evidenzia la stretta prossimità spaziale delle "fogge" alle aree soggette a vincolo idrogeologico e a elementi di pericolosità e rischio idraulico/geomorfologico

atmosferici per ottimizzare le attività e i servizi connessi alle grandi aziende agro-silvo-pastorali. La raccolta delle acque meteoriche avveniva seguendo le variazioni altimetriche dei terreni e il naturale deflusso verso le emergenze carsiche, come inghiottitoi, doline e gravi. Questa stretta interconnessione geografica si riflette anche nella toponomastica: nei documenti e nella cartografia d'archivio, le *fogge* sono identificate con il nome della masseria limitrofa oppure accostando il termine *foggia* al toponimo della zona o al nome del proprietario del fondo (Tab. 1).

Il *layer* delle strutture idriche antiche è stato successivamente integrato con il quadro idrogeomorfologico moderno, sovrapponendo il reticolo idrologico e geomorfologico comunale, aggiornato e standardizzato sulla base dei dati cartografici e normativi contenuti nel Piano Urbanistico Generale (PUG), adottato dal Comune di Martina Franca nel 2025.

Al fine di analizzare le interconnessioni con i fenomeni endocarsici, la piattaforma GIS è stata arricchita importando i dati relativi agli imbocchi delle cavità censite dalla Federazione Speleologica Pugliese (FSP) ricadenti nel perimetro amministrativo.

Il modello spaziale e tridimensionale è stato infine completato con le evidenze estratte dagli archivi del Ministero della Cultura (MiC): quest'integrazione ha

permesso di mappare con precisione sia le cavità carsiche caratterizzate da frequentazione antropica antica dalla preistoria all'età medievale, sia la localizzazione delle masserie storiche, nuclei pulsanti dell'economia rurale in Età Moderna.

L'analisi incrociata dei dati ha rivelato chiare correlazioni tra gli insediamenti umani e la geomorfologia del paesaggio carsico: questo legame non solo testimonia l'efficacia di una pianificazione territoriale storica, ma conferma anche la validità delle recenti prescrizioni espresse dagli enti di tutela per la compatibilità del piano urbanistico comunale.

La prima evidenza riguarda la stretta correlazione tra la posizione delle *fogge* e il moderno reticolo idrologico superficiale, perché le infrastrutture idriche censite si collocano in corrispondenza geometrica o nell'immediata prossimità degli impluvi naturali e delle aree di convergenza del deflusso. L'uomo in antichità ha dunque sfruttato i naturali punti di raccolta delle acque meteoriche per massimizzare la resa di riempimento delle strutture, riducendo al minimo lo sforzo di canalizzazione artificiale. La localizzazione preferenziale sui margini o sui fondi delle doline evidenzia, inoltre, lo sfruttamento geologico delle cosiddette *terre rosse* (bolo): questo materiale era ideale come additivo o legante per le malte idrauliche da rivestimento,

necessarie a impermeabilizzare l'interno delle *fogge* e a garantire la tenuta idraulica in un ammasso roccioso altrimenti fortemente permeabile per fessurazione.

Il secondo livello di analisi mostra la sovrapposizione funzionale tra il sistema delle *fogge* e la rete delle masserie storiche. Le *fogge a cielo aperto* (senza copertura), di dimensioni maggiori e perlopiù circolari, risultano quasi sempre baricentriche rispetto ai pascoli e ai percorsi di transumanza, configurandosi quindi come infrastrutture pubbliche o collettive. Al contrario, le *fogge ipogee*, spesso chiuse nella parte superiore e dotate di *pile* (vasche), si concentrano attorno ai nuclei edilizi delle masserie e dei complessi di trulli: destinate prevalentemente all'uso idropotabile domestico o all'abbeveraggio del bestiame, presentavano una forma geometrica protetta che limitava sia la perdita d'acqua per evaporazione sia la contaminazione biologica.

L'aspetto più innovativo emerge dall'incrocio con i dati della FSP e del MiC: lo studio ha evidenziato una suggestiva prossimità (spaziale e verticale) tra le *fogge* e le cavità naturali frequentate in epoca antica. Un esempio emblematico di questa complessa interazione antropico-carsica e della continuità millenaria nella gestione delle risorse idriche è rappresentato dalla Grotta Nove Casedde. Questo sito, noto per la presenza di una vasca di raccolta delle acque di stillicidio, è stato frequentato senza soluzione di continuità dall'Eneolitico fino all'Età Moderna: oltre a svolgere una funzione di luogo di culto e di approvvigionamento idrico, la grotta custodisce una straordinaria concentrazione di reperti archeologici e, sulle pareti rocciose, iscrizioni medievali in greco e in latino (riconducibili alla minuscola beneventana barese) insieme ad altre della prima metà del XVI secolo, che testimoniano la prima attestazione di

Tabella 1. Fogge ubicate nei 300 km² del territorio comunale di Martina Franca

Tipologia	Quantità
Foggia urbana (Orti del duca)	1
Foggia extraurbana con denominazione mutuata dal complesso masserizio	111
Foggia extraurbana senza specifica denominazione	179
Foggia extraurbana con denominazione specifica (Pozzo della Noce, Pozzo Scalabrino e Foggia di Barnaba)	3
Totale	294

protospeleologia italiana. In questo e in numerosi altri contesti, a breve distanza dall'imbocco della grotta archeologica è ubicata una foggia e tale ricorrenza indica che, laddove la cavità naturale costituiva il primo rifugio o luogo di culto con riserva idrica in epoca protostorica, l'area esterna è divenuta successivamente il fulcro per lo sviluppo di sistemi avanzati di raccolta delle acque. Ciò testimonia dunque un'evoluzione tecnologica cruciale, cioè il passaggio da un uso passivo della morfologia ipogea a una gestione attiva e modificativa della circolazione idrica superficiale.

3. GESTIONE IDRICA, VINCOLI DI TUTELA E COMPATIBILITÀ DEL PUG

Lo studio si inserisce organicamente nel dibattito tra pianificazione territoriale e salvaguardia dell'identità paesaggistica, ponendosi in stretta relazione con la gestione storica della risorsa idrica. Il lavoro riflette l'articolato quadro prescrittivo definito dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale (prot. n. 49515 del 10/07/2024), dalla Regione Puglia mediante la *Sezione Opere Pubbliche e Infrastrutture* (parere prot. n. 50371 del 12/07/2024) e la *Sezione Autorizzazioni Ambientali* (Decreto Dirigenziale n. 53 del 27/02/2026) e, infine, dalla Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per le province di Brindisi, Lecce e Taranto (parere del 21/05/2026).

I pareri degli enti regionali pongono dunque in luce l'urgenza di una svolta metodologica che orienti la pianificazione verso una gestione cautelativa della risorsa idrogeomorfologica, perché le previsioni strutturali e programmatiche sono risultate parzialmente disallineate rispetto al reale raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità prefissati nel PUG.

L'attestazione di compatibilità condizionata, definita dalla Deliberazione della Giunta Regionale n. 603 del 18/05/2026, stabilisce infatti una linea d'azione rigorosa in cui la pianificazione territoriale deve obbligatoriamente adeguarsi alla fragilità strutturale del contesto carsico martinese. Sotto il profilo storico-culturale e paesaggistico, tale pianificazione deve integrare la prescrizione della Soprintendenza che ha "blindato" la salvaguardia dei sistemi tradizionali di raccolta idrica, elevando le *fogge* a elementi identitari insostituibili del territorio murgiano ai sensi dell'art. 136 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004).

Questo riconoscimento impone l'obbligo di indicare le *fogge* come UCP

- *Testimonianze della stratificazione insediativa*, traducendosi in un vincolo di tutela assoluto contro opere di urbanizzazione e infrastrutturazione invasive ed escludendo interventi di scavo o sbanamento. Prima del parere ministeriale, tali criticità erano state sollevate dalle associazioni ambientaliste e da organismi tecnici durante le fasi di consultazione del PUG, azioni recepite dagli enti regionali e che hanno portato al ridimensionamento delle previsioni del piano adottato e alla formalizzazione di vincoli per evitare operazioni distruttive del patrimonio in pietra locale ovvero interventi ritenuti estremamente pericolosi poiché potrebbero anche intercettare doline o cavità sotterranee non ancora cartografate, alterando i deflussi idrici naturali e aumentando sensibilmente il rischio di contaminazione della falda.

Tutto ciò è stato tassativamente ribadito anche nella Valutazione Ambientale Strategica della Regione Puglia, in perfetto coordinamento con la gestione della sicurezza idrogeomorfologica definita dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale.

Le autorità hanno introdotto altresì un regime di «trasformabilità condizionata» e la sospensione temporanea degli interventi edilizi nelle aree caratterizzate da criticità idrogeomorfologiche o in contrasto con il PAI. Emblematico è il caso della grande cisterna urbana ubicata in Piazza Plebiscito (PU_CA_1320), inizialmente non cartografata nel PAI ma implementata nel sistema delle conoscenze del PUG, che dimostra l'operatività di questo approccio: lo sblocco di qualunque trasformazione nell'intorno circostante è subordinato all'esecuzione di indagini geognostiche e geofisiche di dettaglio e all'avvio delle formali procedure di aggiornamento dell'Assetto Geomorfologico del PAI.

Attualmente, però, non sono state ancora censite altre cisterne ubicate nel centro urbano, tra cui le tre situate nel Palazzo Ducale e rilevate in un documento del 1802 conservato nell'Archivio Caracciolo de Sangro presso la Biblioteca Comunale di Martina Franca.

4. IL VALORE DELLA MEMORIA IDROLOGICA NELLA PIANIFICAZIONE CONTEMPORANEA

Lo studio dimostra come, in passato, la conoscenza approfondita delle dinamiche naturali rappresentasse un prerequisito fondamentale per la sopravvivenza e lo sviluppo socio-economico delle comunità insediate in contesti ge-

omorfologici critici. Questo approccio offre oggi una preziosa chiave di lettura in ottica di sostenibilità idrica: le aree storicamente individuate per lo scavo delle *fogge*, infatti, coincidono esattamente con le zone a maggiore vulnerabilità da allagamento e ristagno d'acqua in caso di eventi meteorologici intensi.

In un'epoca segnata dai mutamenti climatici e dall'aumento di precipitazioni concentrate nel tempo, la *memoria idrologica* delle *fogge* può guidare la pianificazione urbanistica moderna, indicando con precisione dove evitare nuove impermeabilizzazioni del suolo e dove ripristinare i sistemi tradizionali di laminazione delle piene. In tal modo, il recupero e lo studio di queste strutture fungono da volano per definire misure concrete di mitigazione del rischio idrogeologico e di adattamento alla scarsità idrica nel paesaggio carsico, muovendosi in perfetta armonia con gli obiettivi fissati dalla Regione Puglia nel Piano di Tutela delle Acque e nella Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici.

BIBLIOGRAFIA

- ANCONA C.C. (2019), *Note storico-archeologiche in Valle d'Itria - L'area del depuratore di Martina Franca in Contrada Cupa Blasi*, Riflessioni-Umanesimo della Pietra 42, 137-152.
- ANCONA C.C. (2020), *Conoscere e tutelare le evidenze del territorio - Masseria Pozzo Tre Pile di Martina Franca, un archetipo del paesaggio agrario*, Riflessioni-Umanesimo della Pietra 43, 35-40.
- ANCONA C.C. (2026), *La morfogenesi del paesaggio in Valle d'Itria - Analisi dell'interazione e dell'interdipendenza tra fattori storico-culturali, substrato geologico e normativa vigente*, Terrae 63, 50-63.
- ANCONA C.C., ROTONDO R. (2026), *Cavernae solertes inquisitores. Graffiti on a Sixteenth-Century Speleological Exploration in Martina Franca*, Utrecht Studies in Medieval Literacy 69, Brepols Publishers, Turnhout, 169-184.
- BAUER N., GIACOVELLI C. (1983), *Pozzi, fogge e neviere*, Riflessioni-Umanesimo della Pietra n. 6, Martina Franca, 31-34.
- BLASI D. (1981), *Martina Franca - Masserie ed agro rurale della Murgia: esempi e modelli*, in *La Puglia tra Medioevo ed Età Moderna - Città e Campagna* (a cura di C. D. Fonseca), Electa, Milano, 332-372.
- MONGIELLO L. (1989), *Masserie di Puglia - Organismi architettonici ed ambiente territoriale*, Adda Editore, Bari.
- PALASCIANO I. (1984), *Le lunghe vie erbose: tratturi e pastori nella Puglia di ieri*, Capone Editore, Cavallino.
- PARISE M. (2010), *Hazards in karst, Sustainability of the karst environment - Dinaric karst and other karst regions - International Interdisciplinary Scientific Conference*, Unesco, Parigi, 155-162.

La revisione della scheda di censimento del Catasto delle cavità naturali e artificiali della Federazione Speleologica Pugliese: uno strumento interdisciplinare per la tutela e la gestione degli ambienti carsici

The revision of the survey form of the Apulian Speleological Federation's cadastre of natural and artificial cavities: an interdisciplinary tool for the conservation and management of karst environments

Parole chiave: carsismo, catasto speleologico, interoperabilità digitale, pianificazione territoriale

Key words: karst, speleological cadastre, digital interoperability, land-use planning

Cristina Comasia Ancona, Emanuela Derossi, Fabio Fiorito, Paolo Giuliani, Francesca Lagna, Raffaele Lombardi, Francesco Lorusso, Aurelio Marangella, Vincenzo Martimucci, Marco Petruzzelli, Gianluca Russo

Federazione Speleologica Pugliese

E-mail: segreteria@fspuglia.it

PREMESSA

Gli ambienti carsici costituiscono porzioni di territorio di straordinaria fragilità ed elevato valore ambientale, paesaggistico e scientifico. In Italia, e in particolare in Puglia, il patrimonio carsico ipogeo rappresenta non solo un elemento identitario del paesaggio culturale, ma anche un nodo cruciale per il drenaggio e l'approvvigionamento delle risorse idriche sotterranee.

Data la spiccata vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici ai fenomeni di inquinamento e degradazione antropica, la conoscenza sistematica e l'aggiornamento continuo dei dati relativi alle cavità naturali e artificiali risultano prerequisiti indispensabili per l'elaborazione di efficaci piani di tutela e per la promozione di uno sviluppo sostenibile del territorio.

In questo contesto, i catasti speleologici regionali evolvono da meri strumenti applicativi a uso esclusivo dei soci o da semplici archivi storici e geografici, a veri e propri sistemi di *decision support systems* a disposizione degli enti pubblici preposti alla pianificazione territoriale e della comunità scientifica in senso lato.

Proprio in risposta a queste stringenti esigenze di *governance* ambientale, nel 2026 la Commissione Catasto della Federazione Speleologica Pugliese (FSP) ha ultimato la revisione metodologica e strutturale della scheda di censimento delle cavità regionali, aggiornando la precedente versione del 2019.

Il nuovo modello segna il passaggio definitivo da uno strumento di archiviazione passiva a un prototipo digitale nativo e pienamente interoperabile con i principali Sistemi Informativi Territoriali: tra questi spiccano lo stesso portale della FSP, il Piano Paesaggistico Territoriale Regionale (PPTR) della Regione Puglia, il Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia della Società Speleologica Italiana (SSI) e il Geoportale Nazionale per l'Archeologia (GNA) del Ministero della Cultura.

L'introduzione di criteri rigorosi di validazione documentale, la standardizzazione toponomastica e l'implementazione di moduli specialistici opzionali (geologico, biospeleologico, archeologico e paleontologico) si affiancano all'obbligatorietà dei dati sul rischio ambientale e sulla sicurezza del soccorso ipogeo.

L'obiettivo principale dell'intero impianto è incrementare la qualità scientifica del dato catastale per supportare in modo efficace le politiche di pianificazione, la salvaguardia delle risorse idriche sotterranee e la gestione sostenibile dell'ecosistema carsico pugliese.

INQUADRAMENTO NORMATIVO E SINERGIE ISTITUZIONALI

La revisione della scheda di censimento del Catasto FSP si colloca all'interno di un quadro normativo e programmatico ben definito: il lavoro

è stato realizzato operativamente dalla Commissione Catasto della FSP, composta da nove membri eletti nell'Assemblea del 23 febbraio 2025, secondo quanto definito dalle indicazioni del nuovo Regolamento FSP approvato nel 2024.

L'iniziativa è nata per ottimizzare gli strumenti operativi e conoscitivi della FSP e risponde direttamente ai principi della Legge Regionale della Puglia n. 33 del 4 dicembre 2009 (*Tutela e valorizzazione del patrimonio carsico e speleologico regionale*), che individua nel Catasto della FSP uno strumento fondamentale per la pianificazione e la salvaguardia territoriale regionale. La struttura della nuova scheda è stata allineata *in primis* alle indicazioni della SSI e delle relative Commissioni Nazionali, al fine di garantire l'omogeneità metodologica su scala nazionale. In un'ottica di cooperazione interistituzionale e multidisciplinare, la scheda integra inoltre i requisiti del recente protocollo d'intesa siglato tra la SSI e l'Istituto Centrale per l'Archeologia (ICA) del Ministero della Cultura per la gestione e la tutela dei dati archeologici e paleontologici in contesti ipogei.

IL RUOLO SUSSIDIARIO DELLA FSP NELLA PIANIFICAZIONE REGIONALE PUGLIESE E IL PPTR

L'efficacia della sinergia tra la FSP e le istituzioni regionali ha radici con-

solidate, avendo trovato la sua massima espressione operativa durante la fase di redazione e implementazione del PPTR della Puglia. In tale contesto, la FSP ha svolto un ruolo sussidiario e propedeutico di fondamentale rilevanza scientifica, mettendo a disposizione della Regione il proprio patrimonio informativo e georiferito per il censimento sistematico delle emergenze carsiche superficiali e profonde. Il lavoro cartografico e di catalogazione sviluppato dai gruppi federati ha permesso inoltre di popolare i quadri conoscitivi del PPTR, integrando i dati dei sistemi ipogei all'interno delle componenti geologiche, idrogeologiche e geomorfologiche dei beni paesaggistici.

Questo imponente *screening* territoriale ha garantito la perimetrazione e l'applicazione della vincolistica di tutela del PPTR su aree ad alta sensibilità ambientale e ha anche dimostrato l'assoluta necessità di disporre di banche dati dinamiche e costantemente aggiornate per la pianificazione urbanistica e la salvaguardia dei geositi ipogei.

INNOVAZIONE DIGITALE E INTEROPERABILITÀ GEOGRAFICA DEL DATO

Il passaggio alla versione 2026 della scheda di censimento rappresenta una radicale rivoluzione nei flussi di acquisizione e gestione del dato speleologico regionale.

Nel modello precedente, strutturato sulla base della scheda del 2019, il processo di censimento si configurava come un'attività puramente analogica e asincrona.

I rilevatori compilavano moduli statici, inserendo metriche descrittive e valorizzando i parametri ambientali attraverso selezioni dicotomiche o campi a scelta multipla vincolati; tale scheda veniva poi trasmessa alla Commissione Catasto della FSP, allegando la documentazione di supporto (rilievi topografici e materiale fotografico) esclusivamente in formato rasterizzato. La Commissione FSP, in seguito, procedeva a un'archiviazione di tipo passivo: assegnava manualmente il numero di catalogo ufficiale alla cavità – distinguendo i record mediante i prefissi identificativi per le cavità naturali (PU) e per le cavità artificiali (PU_CA) – e inseriva le coordinate del punto d'ingresso all'interno di un sistema GIS primordiale, operante come semplice visualizzatore cartografico di punti discreti nello spazio.

A differenza di questo approccio frammentario e passivo, la versione

2026 costituisce l'architettura logica e il prototipo funzionale di un *form online* interattivo nativamente digitale. Il nuovo sistema elimina la trasmissione asincrona e la successiva trascrizione manuale, vettorializzando l'intero processo all'origine.

All'atto dell'accesso, l'utente è vincolato a dichiarare se l'operazione riguarda un *Nuovo Inserimento* o la *Revisione* di un record esistente, preservando così l'integrità del database da sovrascritture o duplicazioni accidentali.

L'albero logico del *form* è dinamico: la selezione iniziale della macro-categoria di cavità (terrestre, costiera, marina o artificiale) adatta in tempo reale i campi visibili, mostrando solo i parametri pertinenti ed escludendo le sezioni ridondanti.

Le coordinate geografiche, i file di rilievo vettoriale e i metadati ambientali vengono validati dal sistema in fase di *upload*, garantendo l'interoperabilità immediata e il riversamento diretto delle informazioni nel nuovo sistema informativo territoriale (WebGIS FSP – Fig. 1), approntato contestualmente alla revisione della scheda catastale.

RIGORE SCIENTIFICO E STANDARDIZZAZIONE METODOLOGICA

Il nuovo *standard* impone rigidi criteri documentali per l'accettazione e la successiva validazione scientifica delle schede da parte dei referenti territoriali della Commissione Catasto FSP.

La denominazione ufficiale della cavità segue un criterio di standardizzazione toponomastica, ossia deve essere derivata prioritariamente dalla cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare o dagli strumenti urbanistici vigenti, documentando dettagliatamente eventuali sinonimi locali per evitare fenomeni di omonimia o duplicazione dei record.

La sottomissione dei dati metrici (sviluppo planimetrico, sviluppo spaziale, dislivelli positivi e negativi) deve essere accompagnata obbligatoriamente dai file grafici in formato vettoriale, comprensivi di planimetrie e sezioni georeferenziate, al fine di ottimizzare contestualmente e immediatamente il WebGIS FSP e, quindi, altri SIT eventualmente a esso correlato.

Il valore scientifico della documentazione allegata alla scheda sarà garantito da un rigoroso approccio oggettivo: l'apparato fotografico dovrà riportare le peculiarità morfologiche, speleogenetiche e strutturali della cavità mediante

chiari indicatori per l'immediata individuazione dell'orientamento cartografico e una scala metrica di riferimento, elementi indispensabili per assicurare la corretta proporzione geometrica e la leggibilità scientifica delle strutture ipogee ritratte.

Una specifica sezione finale, dedicata alle sottoscrizioni legali e alle dichiarazioni d'uso del dato, garantisce il rigore scientifico e la certezza del diritto dell'intero impianto catastale. Questa sezione distingue chiaramente le responsabilità e i ruoli delle diverse figure professionali o speleologiche coinvolte – nello specifico il redattore della scheda, il rilevatore topografico e il responsabile dell'apparato fotografico – consentendo una corretta attribuzione della paternità intellettuale del dato e definendo in modo univoco i limiti e le autorizzazioni per la sua consultazione, riproducibilità e utilizzo in ambito scientifico o pianificatorio.

APPROCCIO INTERDISCIPLINARE E TUTELA AMBIENTALE

La scheda 2026 espande l'orizzonte speleologico tradizionale attraverso sezioni specialistiche opzionali dedicate agli ambiti geologico, biospeleologico, paleontologico e archeologico. Questo approccio sistemico permette una caratterizzazione multidisciplinare avanzata dell'ambiente ipogeo.

Dal punto di vista della tutela ambientale e della salvaguardia delle risorse idriche sotterranee – tema cardine per lo sviluppo sostenibile dei territori carsici – la novità di maggior rilievo è rappresentata dall'obbligatorietà del modulo sul *Potenziale Dannoso*. Questo campo impone una rigorosa valutazione dello stato di conservazione sia dell'area d'ingresso sia dell'interno della cavità, censendo l'eventuale presenza di rifiuti (solidi o liquidi, organici o inorganici) o di scarichi infrastrutturali abusivi che possano intercettare la circolazione idrica ipogea.

L'intensità del degrado viene catalogata su una scala della vulnerabilità standardizzata (da bassa a molto pericolosa), offrendo agli enti di controllo una mappatura immediata delle macrocriticità ambientali per la protezione degli acquiferi.

In linea con le moderne esigenze di gestione del rischio, la sezione relativa alle informazioni per il soccorso speleologico è divenuta un campo obbligatorio: questo modulo consente di mappare preventivamente le specificità tecniche e

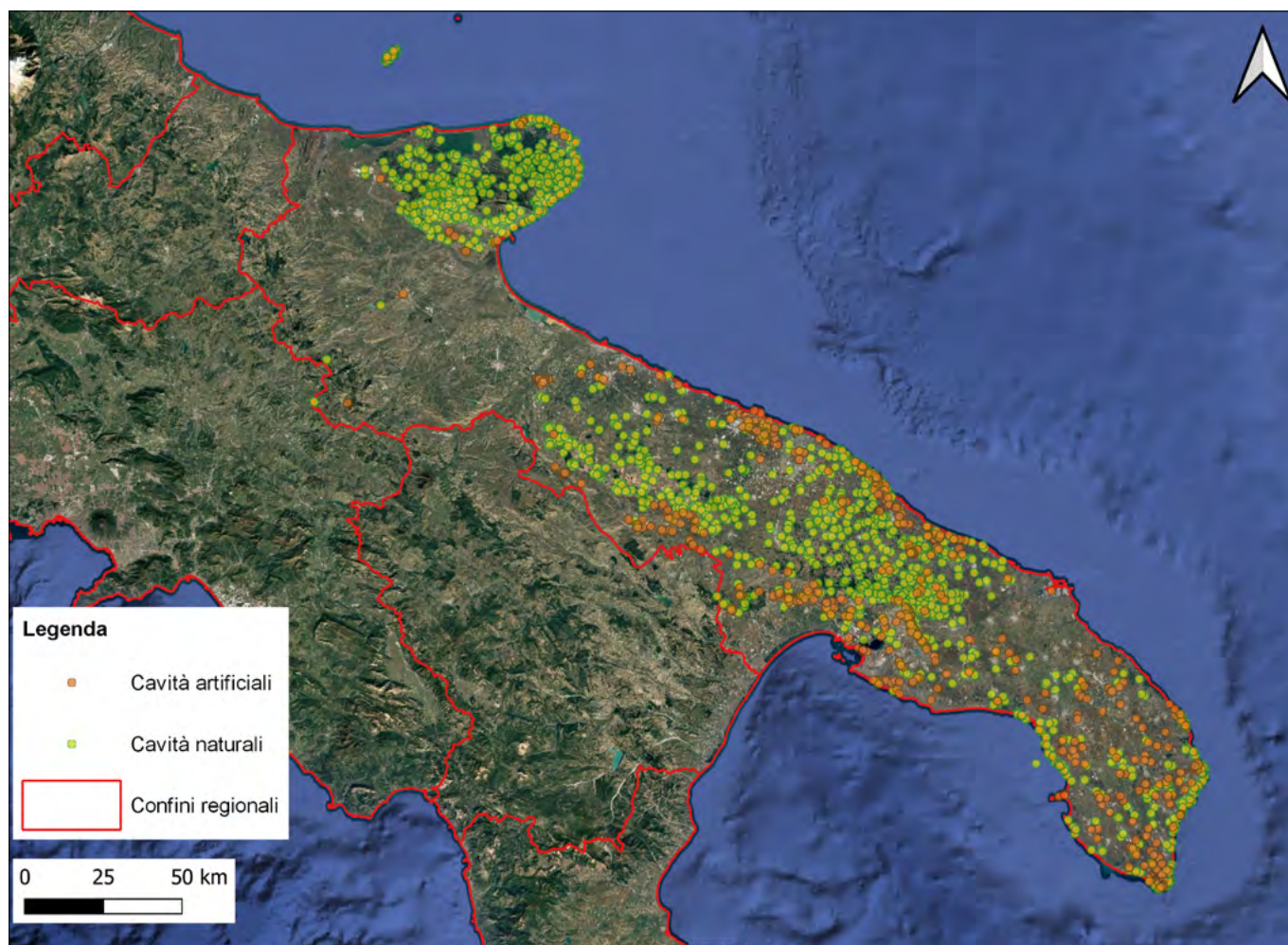


Figura 1. Estratto del WebGIS delle cavità naturali e artificiali della Puglia (FSP, 2026)

i fattori di rischio intrinseci della cavità (presenza di strettoie selettive, pozzi verticali, sifoni idrici o atmosfere anossiche/insalubri) e di registrare eventuali interventi pregressi del Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico (CNSAS).

Tale *database* si rivela uno strumento operativo fondamentale per la prevenzione degli incidenti e per la pianificazione logistica delle emergenze.

Un altro elemento di centrale rilevanza scientifica è l'integrazione nella scheda 2026 di moduli specialistici dedicati ai dati archeologici e paleontologici, sviluppati in stretta aderenza al protocollo d'intesa siglato tra la SSI e l'ICA del Ministero della Cultura. Questa sezione non solo mappa le evidenze materiali eventualmente conservate nei depositi ipogei, ma valorizza l'intero processo di studio scientifico e di rigorosa ricerca archivistica preliminare. Il modulo favorisce la cooperazione sistematica tra speleologi, archeologi, paleontologi, archivisti, storici e autorità di tutela, promuovendo un approccio strutturato e pluridisciplinare e garantendo da un lato la massima riservatezza e salvaguardia dei contesti sensibili dal rischio di scavi clandestini, e dall'altro

la fruibilità del dato per la ricostruzione storica e paleoambientale del territorio carsico.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La scheda di censimento 2026 della FSP non si configura come un mero adempimento burocratico, bensì come un moderno e avanzato strumento di pianificazione territoriale, ricerca scientifica e monitoraggio ambientale.

La digitalizzazione della struttura e la standardizzazione del dato consentono, da un lato, di mappare le competenze tecniche dei gruppi speleologici per orientare futuri programmi di formazione e, dall'altro, offrono alla pubblica amministrazione e alla comunità scientifica una banca dati affidabile, strutturata e nativamente interoperabile.

In questa prospettiva di forte integrazione istituzionale, la FSP sta approntando un nuovo e organico progetto di aggiornamento dei dati del PPTR, che si auspica possa essere validato dalla Regione Puglia in piena attuazione e adempimento della Legge Regionale 33/2009, che individua appunto nella cooperazione tra i soggetti federati e l'ente pubblico il motore per la salva-

guardia del territorio. L'implementazione di questo progetto permetterà di riversare i dati raccolti mediante la nuova scheda direttamente nei quadri conoscitivi regionali, costituendo un pilastro scientifico e operativo indispensabile per attuare concrete strategie di tutela, valorizzazione e sviluppo sostenibile del patrimonio carsico e delle sue vulnerabili risorse idriche sotterranee.

SITOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI

DELIBERA DELLA GIUNTA REGIONALE DEL 16 FEBBRAIO 2015, N. 176, *Approvazione del Piano Paesaggistico Territoriale della Regione Puglia*. Bollettino Ufficiale della Regione Puglia n. 40 del 23 marzo 2015

FEDERAZIONE SPELEOLOGICA PUGLIESE (2026), *SIT cartografico delle cavità naturali e artificiali della Puglia*. <https://catasto.fspuglia.it/>

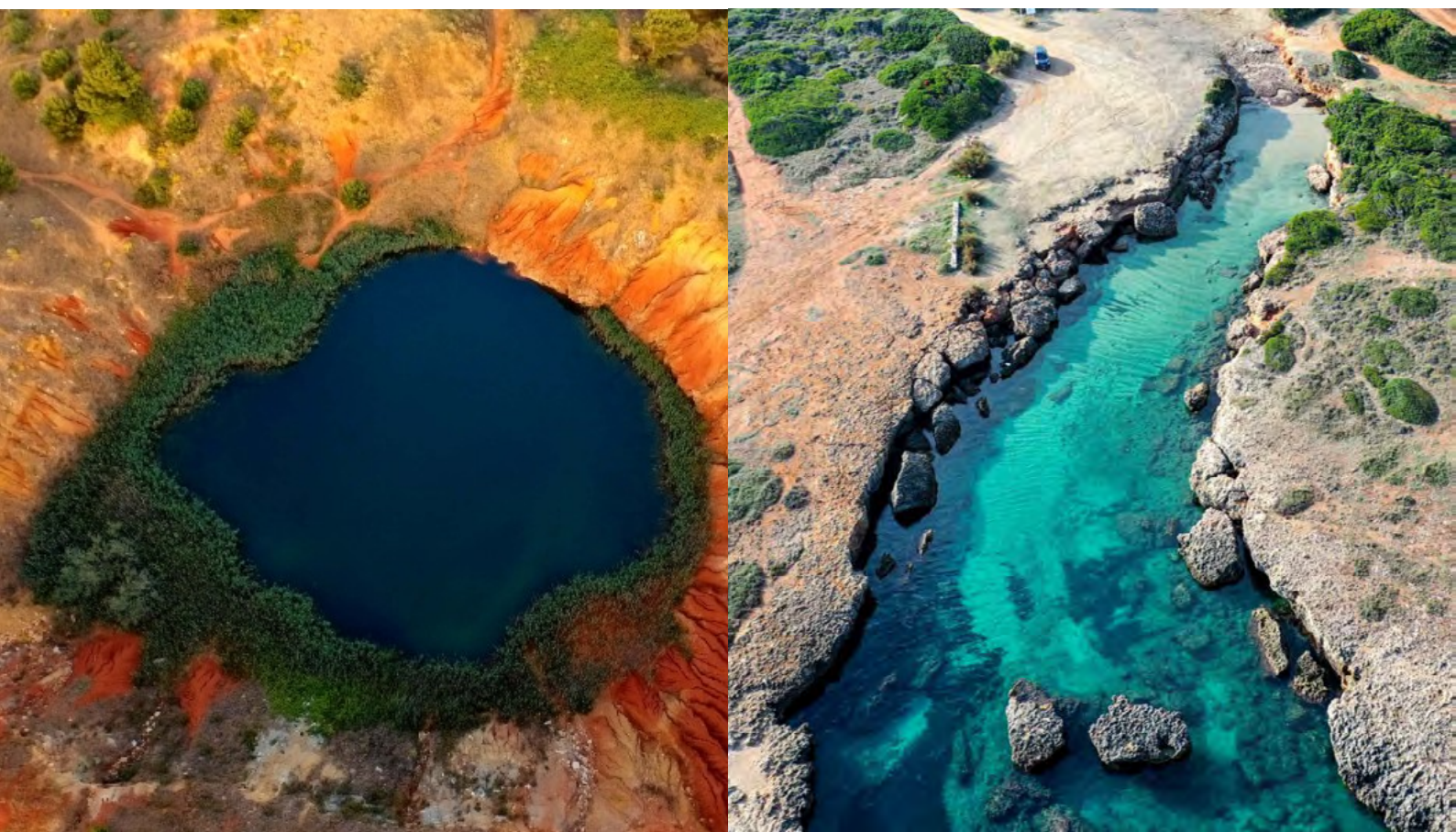
ISTITUTO CENTRALE PER L'ARCHEOLOGIA, *Geoportale Nazionale per l'Archeologia*. <https://gna.cultura.gov.it/index.html>.

SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA – Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia <https://speleo.it/catastogrotte/wish/>

SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA, ISTITUTO CENTRALE ARCHEOLOGIA (2025), *Accordo di collaborazione tecnico-scientifica del 12/06/2025*.



ARPA Puglia, organo tecnico della Regione Puglia, è preposta all'esercizio di attività e compiti in materia di prevenzione e tutela ambientale, ai fini della salvaguardia delle condizioni ambientali soprattutto in relazione alla tutela della salute dei cittadini e della collettività.



ARPA Puglia e la SIGEA-APS hanno firmato un Protocollo d'Intesa al fine di:

- ✓ collaborare in attività di studio e ricerca;
- ✓ sviluppare iniziative condivise per la diffusione della cultura della difesa del territorio dai rischi naturali ed antropici;
- ✓ promuovere iniziative di sensibilizzazione, formazione e comunicazione per la conoscenza del patrimonio naturale e della geodiversità.

Per la prima volta dalla sua istituzione ARPA Puglia ha, nel suo organico, tre dirigenti geologi. La valorizzazione delle attività di questi professionisti si è concretizzata in virtù di una scelta strategica della Direzione dell'Agenzia.

La Grotta Mangiapane di Custonaci (Trapani): analisi swot e matrice tows per un geomorfosito culturale di importanza internazionale

The Mangiapane Cave in Custonaci (Trapani): a swot analysis and tows matrix for an internationally significant cultural geomorphosite

Parole chiave: Sicilia, Grotta Mangiapane, geomorfosito culturale, carsismo, analisi SWOT, matrice TOWS, geoturismo

Key words: Sicily, Mangiapane Cave, cultural geomorphosite, karstification, SWOT analysis, TOWS matrix, geotourism

ABSTRACT

The Grotta Mangiapane is a remarkable example of a **cultural geomorphosite**, where the geomorphological value of a karst cave is closely connected with archaeological, historical, ethnographic, and cultural heritage features. Located within the Scurati cave system, the site preserves evidence of human occupation since prehistoric times and contains a traditional rural settlement inhabited until the mid-twentieth century. Today, it serves as an important cultural heritage attraction, particularly through traditional events such as the Living Nativity Scene. The SWOT analysis highlights the site's multidisciplinary heritage value, authenticity, and strong connection

to local traditions as its main strengths. Weaknesses include limited international visibility and seasonal tourist demand. Opportunities involve the development of geotourism, educational activities, and digital promotion, while threats include heritage degradation, increasing visitor pressure, and the gradual loss of intangible cultural traditions. The TOWS matrix identifies strategic actions focused on the integrated enhancement of natural and cultural heritage, tourism diversification beyond seasonal peaks, strengthening educational initiatives, and promoting sustainable conservation practices. Consequently, Grotta Mangiapane represents an outstanding case of a cultural geomorphosite where

natural and cultural values interact to support territorial identity and sustainable tourism development.

INTRODUZIONE

In questi ultimi anni il geoturismo, promovendo una fruizione sostenibile del territorio basata sulla conoscenza del patrimonio geologico e geomorfologico (Newsone & Dowling, 2010), ha contribuito a sviluppare un approccio innovativo nell'analisi del paesaggio visto oggi come risultato dinamico dell'interazione tra processi naturali e attività umane nel corso del tempo. Si tratta quindi di un sistema complesso, in cui elementi fisici, ecologici e culturali risultano strettamente interconnessi. Si deve a Panizza (2001) l'introduzione del concetto di geomorfosito, termine che indica una forma del rilievo terrestre che ha acquisito un valore aggiunto rispetto alla propria natura geologica o geomorfologica (Panizza e Piacente, 2003, 2014). Un geomorfosito può essere **scientifico** o **culturale**, anche se la distinzione tra i due tipi non è sempre netta e molti di essi possono essere definiti come polivalenti. Un geomorfosito scientifico presenta come valori dominanti il carattere scientifico-geologico, didattico, rarità e rappresentatività dei processi geomorfologici e la sua valorizzazione è prevalentemente accademica (ricercatori, geologi, studenti universitari, naturalisti, ecc.): viene fruito tramite escursioni scientifiche, rilievi sul campo, pubblicazioni. Un **geomorfosito culturale** (Panizza e Piacente, 2003, 2014) possiede invece un valore storico-culturale, artistico, spirituale e simbolico e viene fruito tramite itinerari tematici,

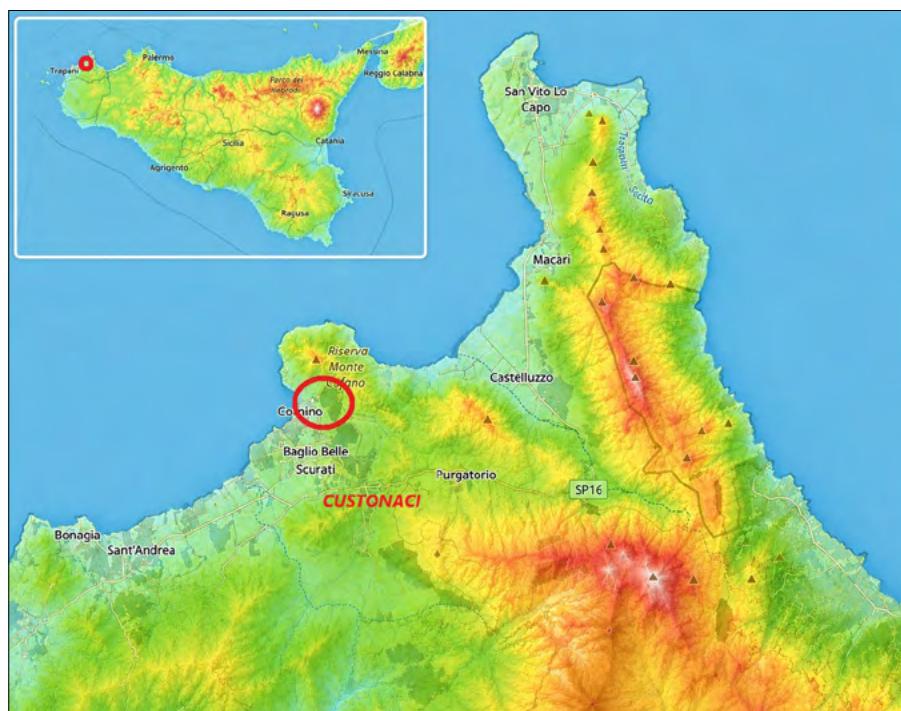


Figura 1. Ubicazione dell'area in cui si trova la Grotta Mangiapane



Figura 2. Il Monte Cofano con indicata nel cerchietto la Grotta Mangiapane

narrazioni, eventi culturali da turisti generici, scolaresche, appassionati di storia, ecc. Questo tipo geomorfosito è inoltre caratterizzato da una importante storicità, valenza estetica e identità locale che lo rendono non più solo un oggetto naturale, ma parte integrante del paesaggio culturale di un territorio. Ad un geomorfosito culturale sono infatti associati significati storici, archeologici, etico/ religiosi, letterali, rappresentazioni artistiche, identità territoriali fondamentali per non perdere la memoria collettiva. Ovviamente non deve mancare il valore estetico del paesaggio geomorfologico e un valore economico derivante dall'utilizzazione del sito per finalità ricreative e turistiche: è comunque fondamentale che un geomorfosito sia sempre il prodotto di interazione tra natura e percezione umana (Panizza e Piacente, 2014) il cui valore culturale deriva dall'interpretazione umana del paesaggio. Per tutti questi motivi le

grotte, unendo valori culturali all'interesse geologico e/o geomorfologico, rappresentano esempi significativi di geomorfositi culturali.

IL GEOMORFOSITO CULTURALE GROTTA MANGIAPANE (CUSTONACI, TRAPANI)

Si tratta di una cavità carsica appartenente al sistema più complesso delle grotte di Scurati nei pressi dell'abitato di Custonaci in provincia di Trapani (Fig. 1), le cui dimensioni raggiungono 70 metri di altezza, 13 metri di larghezza e 50 metri di profondità. È ubicata sul versante orientale del Monte Cofano (Fig. 2) ed è scavata in rocce carbonatiche appartenenti alla successione mesozoica della piattaforma carbonatica siciliana. Il complesso montuoso situato tra Trapani e Castellammare del Golfo appartiene alla catena Appennino-Maghrebide ed è il prodotto delle defor-

mazioni tettoniche tardive che hanno interessato la piattaforma sedimentaria nord-africana e deriva dalla sovrapposizione di tre principali unità stratigrafico-strutturali, riconducibili, dall'alto verso il basso, ai domini Pre-Panormide, Panormide e Trapanese (Catalano *et al.*, Serv. Geol. D'It. 2011). Dal punto di vista paleogeografico, le strutture orogeniche presenti nel territorio di Custonaci sono attribuite al Dominio Panormide (Giunta & Liguori, 1970; Catalano & D'Argenio, 1978). L'origine della grotta è legata alla duplice azione di processi carsici e marini che hanno contribuito a modellare la vecchia falesia costiera durante le variazioni passate del livello marino (Ruggieri, 2016). Al suo interno sono state trovate tracce di frequentazione umana a partire dal Paleolitico con reperti litici, ceramiche neolitiche, tracce rupestri (Filippi A., 2021), anche se la sua notorietà è dovuta alla presenza di un antico borgo rurale con stalle, magazzini, casette di proprietà dell'antica famiglia Mangiapane cui la grotta deve il nome (Figg. 3, 4, 5, 6). Già da questa breve descrizione si intuiscono gli elevati valori geomorfologico, archeologico e etnografico di questo sito. A questi bisogna aggiungere il valore immateriale religioso rappresentato dal Presepe Vivente che, a partire dal 1983, richiama ogni anno migliaia di visitatori che possono rivivere momenti di vita ed attività contadina del primo Novecento in Sicilia. La Grotta Mangiapane costituisce quindi un vero e proprio luogo di memoria collettiva.

ANALISI SWOT E MATRICE TOWS PER LA GROTTA MANGIAPANE

L'analisi SWOT (Humphrey A., 2005, Chermack, T. J., & Kasshanna, B. K., 2007, Helms, M. M., & Nixon, J., 2010, Ghazinoory, S., Abdi, M., & Azadegan-Mehr, M., 2011, Valentin, E. K., 2001) e la matrice TOWS (Wehrich H., 1982, 2000) costituiscono strumenti versatili ed efficaci per la pianificazione e valorizzazione dei geositi e/o geomorfositi. La loro efficacia risiede nel tradurre un quadro conoscitivo complesso in strategie operative gerarchizzate, orientate alla geoconservazione, alla valorizzazione scientifica e allo sviluppo del geoturismo sostenibile.

ANALISI SWOT

L'analisi SWOT è uno strumento diagnostico che fotografa la situazione di un geosito/geomorfosito analizzando quattro dimensioni.



Figura 3. Il villaggio rurale all'interno della Grotta Mangiapane



Figura 4. Il villaggio rurale all'interno della Grotta Mangiapane



Figura 5. Il villaggio rurale all'interno della Grotta Mangiapane

PUNTI DI FORZA (STRENGTHS)

unicità e rarità geologica del sito (formazioni, fossili, strutture), valore scientifico riconosciuto a livello nazionale/internazionale, accessibilità fisica (sentieri, viabilità, parcheggi), presenza di pannellistica e infrastrutture didattiche esistenti, inserimento in rete di geoparchi o parchi naturali, attrattività paesaggistica e turistica del contesto, comunità locale coinvolta e identità territoriale forte.

PUNTI DI DEBOLEZZA (WEAKNESSES)

Scarsa visibilità e promozione del sito, la mancanza di personale specializzato in geoturismo, infrastrutture di accoglienza insufficienti (servizi, segnaletica), risorse finanziarie limitate per la gestione e la manutenzione, assenza di un piano di gestione formale, vulnerabilità del sito al degrado (erosione, vandalismi).

lizzato in geoturismo, infrastrutture di accoglienza insufficienti (servizi, segnaletica), risorse finanziarie limitate per la gestione e la manutenzione, assenza di un piano di gestione formale, vulnerabilità del sito al degrado (erosione, vandalismi).

OPPORTUNITÀ (OPPORTUNITIES)

Crescita del geoturismo e turismo naturalistico, fondi europei (es. PNRR), Geoparchi UNESCO, interesse crescente per l'educazione ambientale nelle scuole, digitalizzazione (realtà aumentata, app, QR code) per interpretazione del geosito/geomorfosito, collaborazioni con università e centri di ricerca, reti

di slow tourism e cammini culturali già attive.

MINACCE (THREATS)

Cambiamenti climatici, sovrafflusso turistico, mancanza di tutela legislativa specifica per i geositi/geomorfositi, pressione antropica e turismo di massa non regolamentato, tagli ai finanziamenti pubblici per enti locali e parchi, spopolamento rurale con perdita di custodi locali, raccolta abusiva di campioni geologici e fossili.

Si presenta di seguito l'analisi SWOT per il geomorfosito culturale di Grotta Mangiapane.

PUNTI DI FORZA S

- Combinazione tra patrimonio geomorfologico, archeologico ed etnografico.
- Presenza di un intero villaggio storico conservato all'interno di una cavità carsica/marina.
- Paesaggio spettacolare con vista mare.
- Testimonianze archeologiche del Paleolitico e del Neolitico.
- Identità culturale molto forte e valore simbolico per l'abitato e la zona di Custonaci.
- Presepe vivente integrato al museo etno-antropologico come elementi di elevato valore del patrimonio immateriale.
- Attrattività come location per attività fotografiche e produzioni cinematografiche (es. Fiction Commissario Montalbano, Dolce & Gabbana, ecc.).
- Integrazione con Riserva Naturale Monte Cofano.

PUNTI DI DEBOLEZZA W

- Limitata notorietà rispetto ad altri geositi siciliani.
- Capacità di carico turistico limitata per preservare il sito.
- Costi elevati per manutenzione e conservazione del sito.
- Accessibilità, viabilità e servizi turistici migliorabili.
- Rischio di concentrazione dei flussi turistici (overtourism) in pochi periodi dell'anno (es. Presepe Vivente con massa di visitatori concentrata nel periodo natalizio).
- Vulnerabilità idrogeologica e carsica (cedimenti, infiltrazioni, ecc.).

OPPORTUNITÀ O

- Domanda crescente a livello locale e nazionale di turismo esperienziale e culturale.



Figura 6. Il villaggio rurale all'interno della Grotta Mangiapane

- Inserimento in itinerari geoturistici della Sicilia occidentale (Custonaci possiede il secondo distretto italiano dopo Carrara per le cave di marmo)
- Creazione di percorsi educativi geomorfologici, etnografici ed archeologici (es. Riserva dello Zingaro, Trapani, Segesta, San Vito)
- Digitalizzazione tramite realtà aumentata.
- Collaborazioni con Università e centri di ricerca.
- Destagionalizzazione dell'offerta turistica.
- Film, spot pubblicitari e produzioni internazionali.

MINACCE T

- Degrado fisico dovuto all'aumento dei visitatori concentrati in pochi periodi dell'anno.
- Cambiamenti climatici che possono influire sulla integrità del sito e del paesaggio circostante.
- Concorrenza di attrazioni più note nella zona (es. Riserva dello Zingaro, Scopello).
- Riduzione dei fondi pubblici destinati alla tutela del patrimonio naturale.
- Eccessiva commercializzazione dell'esperienza culturale.
- Perdita progressiva delle tradizioni culturali in caso di chiusura del sito.
- Incendi.

MATRICE TOWS

Dopo aver analizzato le quattro dimensioni fornite dall'analisi SWOT, il passo successivo consiste nell'incrociare questi fattori per generare quattro tipologie di strategia operative: la ma-

trice TOWS fu introdotta da **Heinz Weihrich** nel 1982 come sviluppo operativo dell'analisi SWOT, per trasformare i quattro fattori diagnostici in strategie concrete attraverso il loro incrocio sistematico (TOWS è l'acronimo al contrario di SWOT e può essere descritto con i termini inglesi Territory, Offer, Worth, Needs). Applicata a studi sui geoparchi (Dowling & Newsome, 2006, Pereira & Pereira, 2010) e nella pianificazione turistica costiera (Rovere et al., 2015), la matrice TOWS è particolarmente adeguata per i geomorfositi culturali, dove la dimensione territoriale integra aspetti fisici, storici, sociali e identitari che richiedono una lettura multidisciplinare.

SO (forza + opportunità): strategia offensiva per massimizzare i vantaggi.

ST (forza + minaccia): strategia difensiva attiva per ridurre le minacce.

WO (debolezza + opportunità): strategia di riposizionamento per superare le debolezze grazie alle opportunità.

WT (debolezza + minaccia): strategia di protezione minima per minimizzare le debolezze ed evitare le minacce.

STRATEGIE SO (STRENGTHS + OPPORTUNITIES)

- Creare percorsi di GEOTURISMO CULTURALE per valorizzare contemporaneamente aspetti geomorfologici (grotta), archeologici (reperti del Paleolitico e del Neolitico) e etnografici (borgo abitato e mestieri antichi).
- Creare programmi didattici universitari e scolastici per comprendere il

concetto di geomorfosito/geomorfosito culturale.

- Utilizzare il Presepe Vivente per la promozione del sito a livello internazionale.
- Inserire il sito di Grotta Mangiapane in un percorso regionale integrato più ampio che comprenda le località trapanesi importanti dal punto di vista geologico e come Erice, Distretto del marmo di Custonaci, Monte Cofano, San Vito Lo Capo, Riserva dello Zingaro, Saline di Trapani, ecc.
- Sviluppare un "Museo Diffuso" con esperienze immersive (es. antichi mestieri, vita rurale, ecc.).

STRATEGIE ST (STRENGTHS + THREATS)

- Rafforzare le misure di conservazione per ottenere fondi contro erosione ed incendi.
- Sensibilizzare i visitatori alla protezione ambientale evitando comportamenti impattanti specialmente durante i picchi di maggior afflusso (es. periodo natalizio).
- Diversificare l'offerta formativa distribuendola durante l'anno.
- Cercare finanziamenti per la tutela della grotta, migliorandone la resilienza (consolidamenti, drenaggi, ecc.).

STRATEGIE WO (WEAKNESSES + OPPORTUNITIES)

- Aumentare le infrastrutture della zona (parcheggi, servizi, percorsi accessibili) facendo ricorsi a bandi regionali/europei.
- Promuovere la visibilità del sito tramite campagne digitali, visite virtuali e contenuti multimediali.
- Promuovere pacchetti turistici e culturali durante tutto l'anno (visite geologiche, laboratori didattici trekking, ecc.) per ridurre la stagionalità.

STRATEGIE WT (WEAKNESS + THREATS)

- Realizzare un Piano di Gestione Integrato (rischio incendi, monitoraggio geologico, piano di evacuazione, gestione flussi turistici, capacità di carico, ecc.).
- Monitorare lo stato della grotta e delle strutture abitative del villaggio storico.
- Sensibilizzare alla Educazione Ambientale per ridurre i rischi legati al flusso turistico.
- Favorire la partecipazione della comunità locale ai processi di tutela,



Figura 7. La Grotta Mangiapane vista dall'esterno.

valorizzazione e trasmissione del patrimonio culturale.

CONCLUSIONI

La grotta Mangiapane rappresenta un **GEOMORFOSITO CULTURALE** di estremo valore strategico (Fig. 7) in quanto unisce quattro dimensioni che raramente coesistono nello stesso luogo:

- grande cavità carsica/marina (dimensione geomorfologica);
- villaggio rurale (dimensione storico-etnografica);
- frequentazione preistorica (dimensione archeologica)
- presepe vivente e tradizioni popolari (dimensione immateriale).

Come risulta dalla matrice TOWS la strategia da adottare che più si addice a questo sito è quella di tipo SO che punta sulla unicità geo-culturale al fine di trasformare un turismo concentrato in brevi periodi dell'anno in uno di qualità, sostenibile e distribuito nell'arco dell'anno intero. In questo modo, migliorando debolezze (weaknesses) connesse alla gestione e alle infrastrutture,

il geomorfosito Grotta di Mangiapane può rafforzare il proprio ruolo come sito di rilevanza mondiale per il suo valore patrimoniale, scientifico e culturale.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREWS, K. R. (1971), *The concept of corporate strategy*. Dow Jones-Irwin.
- CATALANO R. *et al.* (2011), *Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 593 Castellammare del Golfo*.
- CATALANO R. & D'ARGENIO B. (1978), An essay of palimpsest restoration across the western Sicily. *Geol. Rom.*, 17. 145-159.
- CHERMACK, T. J., & KASSHANNA, B. K. (2007), *The use and misuse of SWOT analysis and implications for HRD professionals*. Human Resource Development International, 10(4), 383-399. <https://doi.org/10.1080/13678860701516707>
- CHRISTENSEN, C. R., ANDREWS, K. R., BOWER, J. L., HAMERMESH, R. G., & PORTER, M. E. (1978), *Business policy: Text and cases* (4th ed.). Irwin.
- DOWLING, R. K., & NEWSOME, D. (Eds.). (2006), *Geotourism*. Elsevier.
- FILIPPI, A. (2021), *La ricerca archeologica nelle grotte degli Scurati e Mangiapane* (Custonaci). Elymos. Quaderni del Par-

co Archeologico di Segesta, 1, 17-27. <https://doi.org/10.48255/2785-4655.Elymos.1.2021.02>

- GHAZINOORY, S., ABDI, M., & AZADEGAN-MEHR, M. (2011), *SWOT methodology: A state-of-the-art review for the past, a framework for the future*. *Journal of Business Economics and Management*, 12(1), 24-48. <https://doi.org/10.3846/16111699.2011.555358>
- GIUNTA G. & LIGUORI V. (1970), *Geologia della penisola di Capo San Vito (Sicilia nord occidentale)*. Lav. Ist. Geol. Univ. Palermo 9. 1.21.
- HELMS, M. M., & NIXON, J. (2010), *Exploring SWOT analysis — Where are we now? A review of academic research from the last decade*. *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215-251. <https://doi.org/10.1108/17554251011064837>
- HUMPHREY, A. S. (2005), *SWOT analysis for management consulting*. SRI Alumni Newsletter, SRI International.
- LEARNED, E. P., CHRISTENSEN, C. R., ANDREWS, K. R., & GUTH, W. D. (1965), *Business policy: Text and cases*.
- NEWSOME, D., & DOWLING, R. K. (Eds.). (2010), *Geotourism: The tourism of geology and landscape*. Goodfellow Publishers.
- PANIZZA, M. (2001), *Geomorphosites: Concepts, methods and example of geomorphological survey*. *Chinese Science Bulletin*, 46(Suppl.), 4-5.
- PANIZZA, M., & PIACENTE, S. (2003), *Geomorfologia culturale*. Pitagora Editore.
- PANIZZA, M., & PIACENTE, S. (2014), *Geomorfologia culturale*. Pitagora. ISBN 9788837118952
- PEREIRA, P., PEREIRA, D., & CAETANO ALVES, M. I. (2007), *Geomorphosite assessment in Montesinho Natural Park (Portugal)*. *Geographica Helvetica*, 62(3), 159-168. <https://doi.org/10.5194/gh-62-159-2007>
- PEREIRA, P., & PEREIRA, D. (2010), *Methodological guidelines for geomorphosite assessment. Géomorphologie: relief, processus, environnement*. 16(2), 215-222.
- REYNARD, E., CORATZA, P., & REGOLINI-BISSIG, G. (Eds.). (2009), *Geomorphosites*. Pfeil.
- RUGGIERI, R. (2016), *Speleological and speleogenetic aspects of the Monti di Capo San Vito (Sicily): Influence of morphotectonic evolution*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21720-8>
- VALENTIN, E. K. (2001), *SWOT analysis from a resource-based view*. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 9(2), 54-69. <https://doi.org/10.1080/10696679.2001.11501891>
- WEHRICH, H. (1982), *The TOWS matrix — A tool for situational analysis*. *Long Range Planning*, 15(2), 54-66. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(82\)90120-0](https://doi.org/10.1016/0024-6301(82)90120-0)
- WEHRICH, H. (2000), *Analyzing the competitive advantages and disadvantages of China with the TOWS matrix — An alternative to Porter's model*. In R. Berndt (Ed.), *Innovative Management* (pp. 153-172). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-57009-4_11



ARPALAZIO

AGENZIA REGIONALE PROTEZIONE AMBIENTALE DEL LAZIO

Cos'è l'ARPA Lazio?

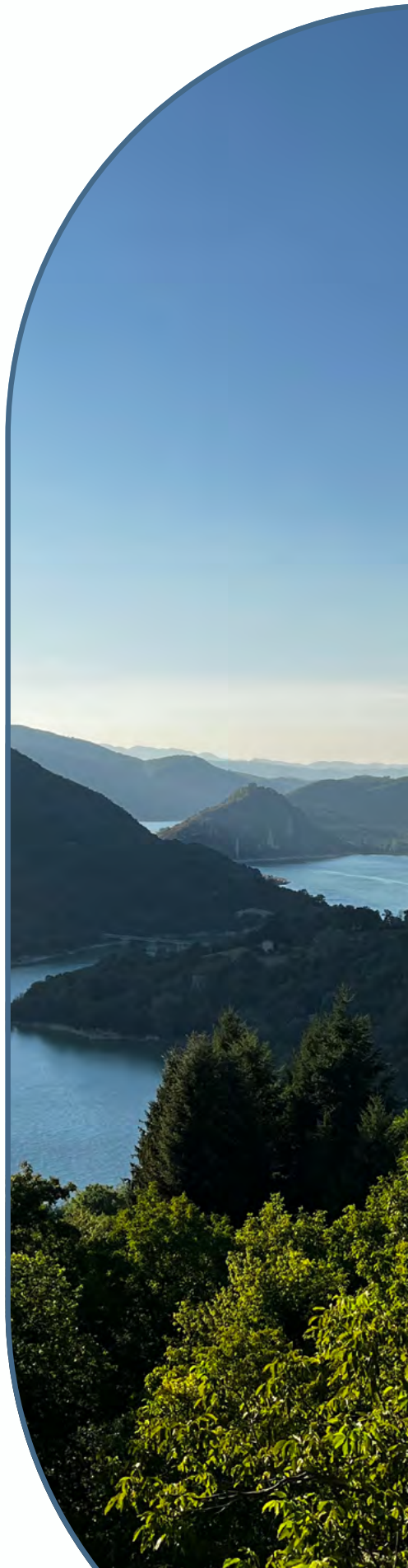
L'ARPA Lazio, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Lazio, è ente strumentale della Regione Lazio istituito e disciplinato dalla Legge Regionale 6 ottobre 1998, n. 45. Le finalità dell'Agenzia sono indicate in apertura della legge istitutiva: sviluppo e potenziamento della tutela ambientale attraverso la definizione e la realizzazione di un sistema regionale permanente di protezione e di informazione ambientale basato su controlli oggettivi, attuabili e comparabili dal punto di vista scientifico.

Cosa fa l'ARPA Lazio?

In qualità di ente pubblico di natura tecnica, l'ARPA Lazio ha il ruolo di garantire la protezione dell'ambiente e della salute umana e contribuire a una sostenibile crescita economica. Con un organico di circa 500 persone dislocate in tutto il territorio del Lazio, l'Agenzia controlla e fornisce supporto su una vasta gamma di attività di interesse ambientale:

- monitora la qualità delle **acque** di balneazione come pure delle risorse idriche superficiali e sotterranee
- supporta la Regione nelle attività di monitoraggio della qualità dell'**aria** con la gestione della rete regionale di centraline di rilevamento fisse, con la realizzazione di campagne periodiche effettuate con mezzi mobili nelle zone del territorio regionale potenzialmente critiche e con l'uso di modelli di simulazioni di dispersione degli inquinanti
- in materia di **siti oggetto di bonifica**, effettua attività di vigilanza e controllo tecnico, verifiche analitiche e documentali, supporto tecnico agli enti locali e all'autorità giudiziaria
- effettua misurazioni degli **agenti fisici**, misure di campo elettromagnetico in abitazioni e luoghi di lavoro, campionamenti e misure per il controllo della radioattività ambientale
- collabora con gli enti locali dando pareri per il rilascio di autorizzazioni ad **attività produttive** che possono avere impatto sull'ambiente
- svolge funzioni di supporto e di consulenza tecnico-scientifica a Regione, enti locali e aziende sanitarie per lo svolgimento di compiti nel campo della **prevenzione** e tutela ambientale.
- si confronta con le **imprese** perché possano comprendere e adempiere alle loro responsabilità e obblighi ambientali e lavora in collaborazione con altri **soggetti pubblici e privati** per promuovere la comprensione dell'ambiente e costruire consenso sulle priorità e le questioni ambientali
- svolge attività di educazione ambientale per le scuole della regione e organizza **eventi formativi** o informativi
- diffonde **dati e informazioni ambientali**.

WWW.ARPALAZIO.IT



La geologia dei vini come fattore di sviluppo turistico delle aree carsiche

The geology of wines as a factor in the tourist development of karst areas

Parole chiave: Rocce carbonatiche, Carsismo, Suoli, Vini DOC; Carso Classico; Appennino centrale, Murgia e penisola salentina, turismo sostenibile
Key words: Carbonate rocks, Karst, Soils, DOC Wines, Classic Karst, Central Apennines, Murgia and Salentine peninsula, sustainable tourism

Margherita Bonamico
Geologo, SIGEA-APS
E-mail: bonamicomargherita@gmail.com

Eugenio Di Loreto
Sigea Lazio
E-mail: eugeol.dlr@gmail.com

Sandro Rota
Libero professionista
E-mail: sandro.rota@georicerchets.it

INTRODUZIONE

Le rocce carbonatiche, in particolare i calcari, sono caratterizzate da peculiari processi di modellamento che generano morfologie particolari determinate dalla solubilità della roccia nelle acque naturali (Castiglioni, 1992). Le forme che si generano sono tipiche del paesaggio carsico di alcune aree italiane, note per la loro bellezza e singolarità in tutto il mondo. Emblematici sono i complessi ipogei sviluppati in questi contesti come, la grotta del Gigante (TS) (Fig. 1), le grotte di Frasassi (PU) o quelle di Castellana (BA). Questi ambienti sotterranei costituiscono un'importante attrazione per il turismo e costituiscono il volano dell'economia dei territori.

I suoli dei rilievi calcarei sono generalmente di profondità limitata, condizione che limita l'attività agricola. Tuttavia, nelle zone in cui lo spessore del suolo è più sviluppato, come nelle doline, lungo i bordi delle conche intramontane, sui detriti di falda o sui conoidi, è possibile la coltivazione di cereali e la diffusione di uliveti, frutteti, e vigneti. I suoli calcarei, ricchi in carbonato di calcio (CaCO_3), mostrano gene-

ralmente una tessitura variabile, buone capacità drenanti, e un pH alcalino (Gisotti, 1991). La loro porosità favorisce l'approfondimento dell'apparato radicale e l'accesso alle sostanze nutritive, rendendoli adatti alla viticoltura anche con climi a scarsa piovosità. Ogni vitigno riflette le caratteristiche geologiche, pedologiche, morfologiche, climatiche, storiche e culturali, del territorio di origine. Una sommatoria di fattori ben identificati dai francesi con il concetto di "terroir" (territorio).

In questo contributo vengono analizzati argomenti interdisciplinari tra le scienze della terra e la comunicazione del territorio, con riferimento a tre diverse aree carsiche italiane (il Carso classico; l'appennino calcareo laziale; gli altipiani carbonatici delle Murge e della penisola Salentina in Puglia) nelle quali la presenza di suoli generati da un substrato di rocce carbonatiche ha contribuito allo sviluppo di vini di qualità.

I VINI DEL CARSO CLASSICO

L'area nota come "Carso Classico" rappresenta l'unità fisiografica e l'al-

topiano calcareo di riferimento per lo sviluppo dei moderni studi scientifici sul "carsismo" (Fig. 2).

Questa specifica macroregione geografica ha ospitato, a partire dal XIX secolo, le prime indagini sistematiche e le relative cartografie dei fenomeni di dissoluzione chimica a carico delle rocce carbonatiche. Tale primato scientifico ha determinato l'estensione del toponimo locale (la cui etimologia risale alla radice paleo indoeuropea *Kar* o *Krs*, indicante la pietra o la roccia affiorante), a termine tassonomico universale per la definizione del fenomeno del "carsismo".

In tale "contesto geologico", contraddistinto da una situazione geopedologica caratterizzata da un substrato carbonatico con elevata permeabilità (per fessurazione e dissoluzione) e da sottili suoli di terra rossa, il *Pucinum* risulta il più antico vino originario del territorio calcareo costiero; esso deve la sua notorietà storiografica alla *Naturalis Historia* di Plinio il Vecchio, il quale ne esaltava le proprietà medicinali ed il peculiare legame con un ecosistema pedoclimatico estremo (stress idrico compensato dalle costanti brezze marine del Golfo di Trieste), configurando un precoce modello di "viticoltura eroica" ad alta salubrità fitosanitaria.

L'attuale produzione enologica rientrante nel "Carso Classico" è tutelata dalla DOC bilingue "Carso-Kras", istituita nel 1985 nella Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia (sotto il profilo enologico, i tentativi di stabilire una correlazione filogenetica o qualitativa tra il citato *Pucinum* e le odierne produzioni locali risultano però scientificamente speculativi).

La DOC Carso include una vasta gamma di rossi (Terrano, Cabernet Franc, Cabernet Sauvignon, Merlot, Refosco dal peduncolo rosso) e bianchi (Vitovska, Malvasia, Glera, Pinot Grigio, Sauvignon, Traminer, Chardonnay).

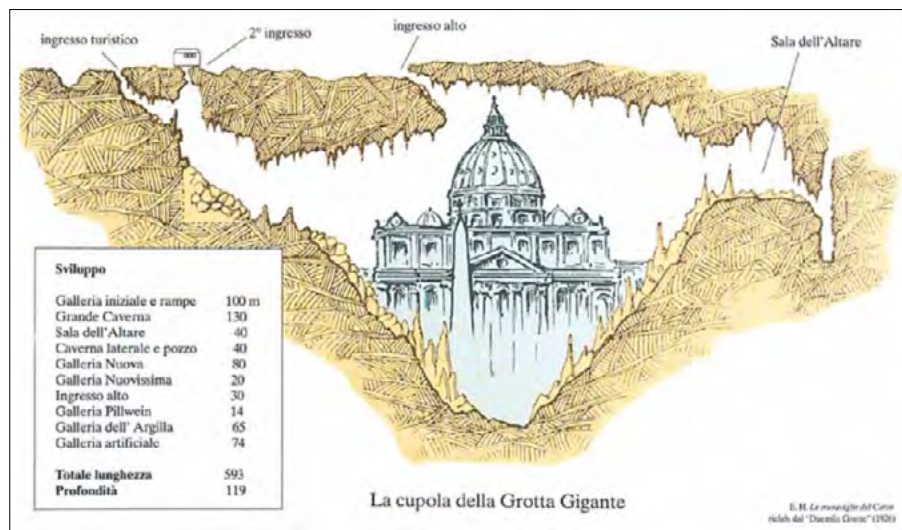


Figura 1. La Grotta Gigante (TS). È la cavità carsica turistica a sala singola più ampia al mondo (nel disegno viene fatto il confronto con il volume della Basilica di S. Pietro a Roma).

Fonte: <https://www.fisofvg.it/aaoc2016/la-grotta-gigante>

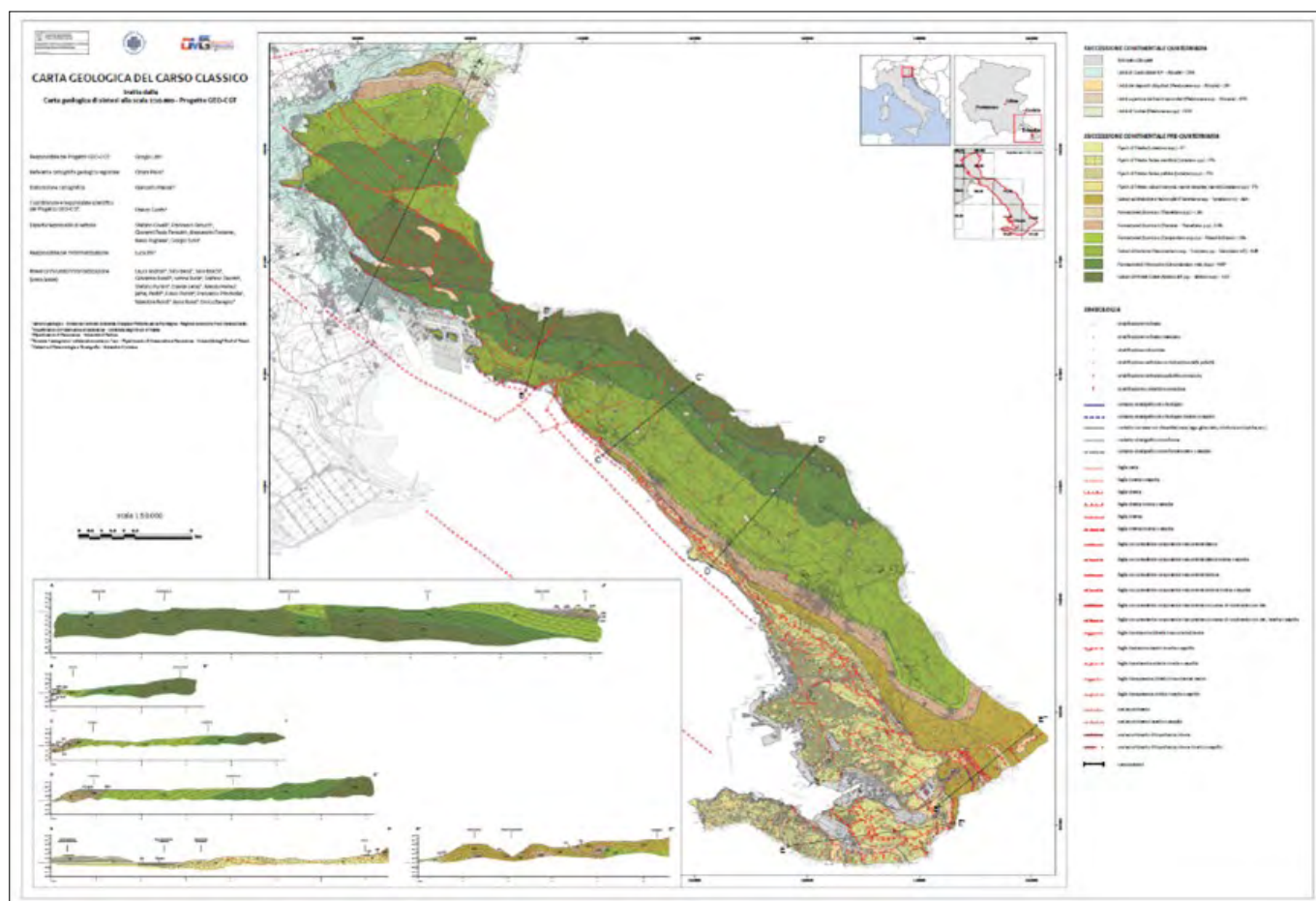


Figura 2. Carta Geologica del Carso classico, (indicate con colore verde le aree in cui sono presenti rocce calcaree).

Fonte: https://www.regione.fvg.it/rafvog/export/sites/default/RAVVG/ambiente-territorio/geologia/FOGLIA05/allegati/Carla_geologica_del_Carso_Classico.pdf

Tra i bianchi il più identitario è la Vitovska - vitigno autoctono del Carso, produce vini bianchi freschi, sapidi e minerali, mentre tra i rossi lo è il Terrano - vino rosso dal colore intenso, con una marcata acidità, note di frutti rossi ed un peculiare contenuto di ferro (esso appartiene alla famiglia dei vitigni Refosco, di cui fa parte anche il Refosco dal Peduncolo Rosso).

La cultura del vino nel Carso è strettamente legata alle "osmize", tipici locali dove i produttori vendono direttamente vino e prodotti locali. Le osmize del Carso traggono origine da un editto asburgico del 1784 di Giuseppe II, il quale autorizzava i contadini a vendere le proprie eccedenze di vino e cibo esentasse direttamente a casa propria. La tradizione prende il nome dal termine sloveno *osem* ("otto"), indicando gli otto giorni consecutivi di concessione annuale, segnalati visivamente ai vian-danti tramite l'esposizione di una frasca d'edera.

L'evoluzione delle osmize ha trovato un fondamentale volano nello sviluppo del "turismo speleologico" sul Carso, trainato dalla valorizzazione di grandi attrattive ipogee come Il flusso costante di visitatori verso il sottosuolo ha convertito questi spacci rurali in tappe cen-

trali dell'offerta escursionistica, delineando un modello di turismo integrato. La spettacolarità geologica delle cavità si coniuga così con la sosta ristorativa presso le frasche, offrendo una valorizzazione a chilometro zero dei prodotti della DOC Carso e consolidando l'attrattiva internazionale dell'altopiano.

I VINI DELL'APPENNINO CALCAREO DELL'ITALIA CENTRALE

L'Appennino centrale comprende un dominio geomorfologico esteso, costituito dai rilievi del Lazio e dell'Abruzzo (dai Monti Lepini, Ernici-Ausoni-Aurunci sul lato tirrenico, al Gran Sasso-Maiella sul lato adriatico), costituiti da potenti successioni di rocce calcaree e calcareo-dolomitiche mesozoico-cenozoiche. La degradazione fisica e chimica di tali rocce, associata ai processi carsici, gravitativi e colluviali, origina coperture pedologiche spesso discontinue, da sottili a poco profonde, con elevato contenuto in scheletro, reazione subalcalina o alcalina e buona permeabilità. In ambito viticolo queste condizioni determinano, un controllo rilevante sul bilancio idrico della vite, sulla profondità di radicazione e sulla vigoria vegeto-produttiva. Tuttavia, gli habitat diventano proibitivi per

le piante, man mano che si sale di quota, per le basse temperature, la mancanza di acqua, l'elevata insolazione e la mancanza di suolo. Nel Lazio, lungo la fascia ovest dei rilievi appenninici calcarei, con locali coperture vulcaniche dei monti Ernici e della piccola dorsale dei Monti Affilani, si sviluppa l'area di produzione del vino **Cesane** con due DOC, denominate di Affile (RM) e di Olevano Romano (RM), e una DOCG, denominata del Piglio (FR), con un'estensione complessiva di 217 kmq (Bollati *et al.*, 2012). I vini sono rossi di colore rosso rubino, con profilo aromatico delicato orientato su componenti floreali e speziate, e un sapore morbido. Le vigne sono impiantate su lembi di terra rossa o su fasce di accumulo di detriti calcarei e di terra rossa, al piede di alcuni versanti (Colacicchi e Parotto, 2006). Lungo la fascia litoranea meridionale dei Monti Ausoni (LT), nei versanti rivolti verso il mare, viene prodotto il **Moscato di Terracina** (DOC), coltivato su un altopiano carsico caratterizzato da tipiche formazioni come le doline, i campi carreggiati, su cui sveltano imponenti monoliti di natura calcarea (ARP, 2008), denominati "hum" (Fig. 3), concrezioni residuali calcaree sotto i quali si coltivano i vigneti. La vite cresce addossata ai



Figura 3. L'etichetta del Vino Moscato DOC di Terra-cina richiama il contesto dei fenomeni carsici, in particolare degli HUM, strutture residuali testimoni relitti della roccia carbonatica che è stata completamente erosa. Fonte: <https://enoteca.cantinasantandrea.it/vino-hum/>

massi che consentono il lento rilascio di temperatura e un'escursione termica più graduale; l'acqua è garantita da caratteristiche cisterne artificiali che sfruttano le pareti delle rocce (Di Loreto e Fattori, 2025). Si tratta di un vino bianco da dessert, con profumi aromatici e persistenti.

Nel complesso, i vini dei rilievi carbonatici dell'Appennino laziale sono un caso significativo di interazione tra litologia, pedogenesi, topografia e clima: il substrato calcareo non determina meccanicamente il profilo sensoriale del vino, ma condiziona in modo sostanziale lo stato idrico e nutrizionale della vite, i tempi di maturazione e, l'espressione enologica finale del sistema vigneto.

I VINI DEGLI ALTIPIANI DELLE MURGE E DELLA PENISOLA SALENTINA

La Puglia presenta una elevata percentuale di rocce carbonatiche in affioramento che coprono i distretti di Gargano, Murge e Salento; tale condizione la elegge a regione carsica per eccellenza dell'Italia meridionale. Vi sono, infatti, più di 2000 grotte registrate nel Catasto delle Grotte e delle Cavità Artificiali della Puglia (<http://www.catasto.fspuglia.it>), gestito dalla Federazione Speleologica Pugliese (Liso e Parise, 2022).

Dal punto di vista geomorfologico, le **Murge** individuano un vasto altipiano carbonatico degradante verso est che presenta alcune delle doline più note della regione, designate con vari termini locali (Delle rose *et al.*, 2004), quali *pulo* e *gurgo*: il Pulo di Altamura, il Pulo di Molfetta e il Gurgo di Andria, ed il

grande complesso carsico delle Grotte di Castellana (Fig. 4).

Il **Salento**, pur essendo l'area topograficamente meno elevata della Puglia, presenta una alternanza di rilievi e depressioni strutturali, con manifestazioni carsiche che si esplicano sia nelle zone costiere dove l'interazione tra acque sotterranee e marine favorisce intensi fenomeni di dissoluzione delle rocce, sia in diffuse forme carsiche identificate spesso nel termine dialettale di *Vora*; queste ultime costituiscono vie preferenziali di scorrimento delle acque e favoriscono l'accumulo finale di terre rosse residuali. Per la prima categoria meritano una menzione le famose Grotta della Zinzulusa, Grotta della Poesia e Grotta dei Cervi, mentre per la seconda si citano la *Vora Bosco* e la *Vora foresta*, manifestazioni carsiche tutte ricadenti nel territorio leccese.

In questa regione, dove predominano suoli a matrice calcarea e calcarenitica, insieme ai caratteristici suoli a terra rossa della Penisola Salentina, la vocazione alla viticoltura trae origine dall'antica civiltà greca, e si è mantenuta nel tempo raggiungendo particolare rilevanza nel XVII secolo quando il Salento fu riconosciuto come la "Cantina d'Europa". In tale contesto si è consolidato un forte legame tra l'uomo e le manifestazioni carsiche nel

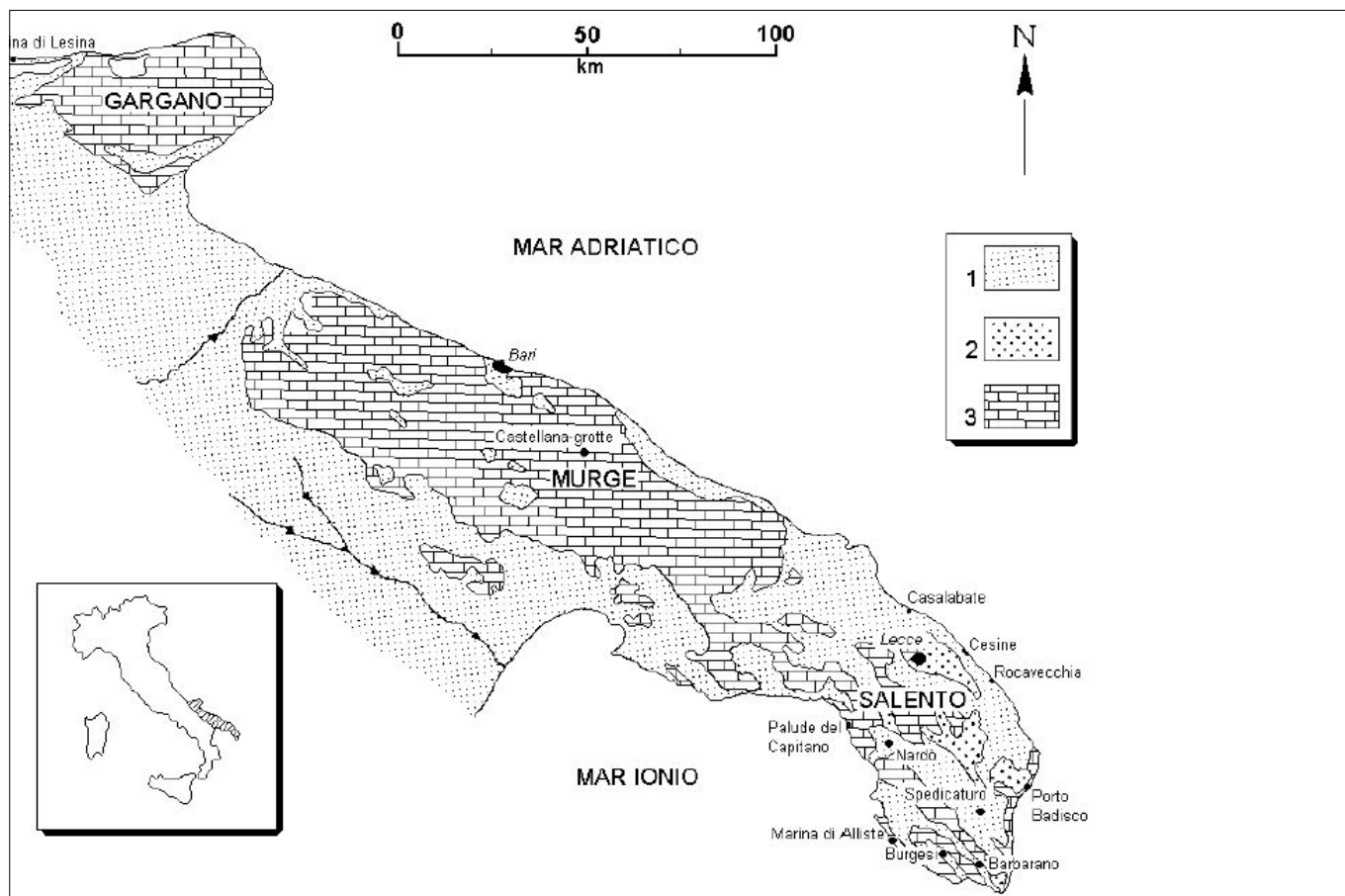


Figura 4. Schema geologico della Puglia. Legenda: 1) depositi alluvionali, argille e calcareniti (Pliocene – Pleistocene); 2) rocce carbonatiche bioclastiche (Paleogene) e calcareniti (Miocene); 3) rocce di piattaforma carbonatica (Cretaceo) (delle Rose *et al.*, 2004)



Figura 5. Testimonianza fotografica della recente scoperta a Lecce delle vasche dette "palmenti" atte alla produzione del vino, ricavate dall'uomo nelle depressioni carsiche e doline nei depositi carbonatici (Quotidiano di Puglia, 2026)

territorio, corroborato dalla recentissima scoperta nel leccese di circa sessanta vasche di pigiatura delle uve, denominate "palmenti", realizzate nel passato all'interno di doline carsiche e di depressioni tettono-carsiche (Quotidiano di Puglia, 2026) scolpite nella pietra leccese (Fig. 5). La dolina offriva condizioni geologiche favorevoli, grazie alla sua conformazione e ai suoli fertili formati dall'azione delle acque, a testimonianza della capacità dell'uomo di adattarsi alle peculiarità del paesaggio carsico.

Il connubio tra il turismo vitivinicolo e le forme geomorfologiche nel paesaggio è testimoniato anche dalla presenza della Strada del Vino DOC della Murgia Carsica (BA), territorio d'elezione delle denominazioni Gravina DOC e Gioia del Colle DOC, dove crescono i vitigni Uva di Troia, Primitivo, Aglianico (bacca rossa) e la Malvasia Bianca, il "Greco Bianco" e il "Bianco di Alessano" (bacca bianca). Nelle strade del Vino il paesaggio è caratterizzato dalle profonde e tortuose voragini delle gravine, provenienti dall'antico termine "Grava", ovvero spettacolari fenditure dalle pareti ripide, profonde anche qualche centinaio di metri assimilabili a dei veri e propri "canyon". Nel territorio barese, risulta altresì rappresentativa la presenza delle realtà vitivinicola denominata "Terre carsiche 1939" che identifica nel nome della Cantina il forte legame tra il vino e il carsismo tipico del territorio.

In definitiva, il vigneto pugliese, riconosciuto come uno dei più "esuberanti" d'Italia per la presenza di 32 denominazioni di tutela tra DOCG e DOC, e grazie alla fama internazionale delle Terre del Primitivo, rappresenta un efficace modello di integrazione tra le caratteristiche geomorfologiche del territorio e

la loro valorizzazione nel settore vitivinicolo. Ne sono esempi emblematici le Strade del Vino delle Murge Carsiche e la denominazione Gravina DOC.

Infine, un'ulteriore prospettiva di sviluppo per il **turismo sostenibile** potrebbe riguardare la valorizzazione delle recenti scoperte dei *palmenti* ubicati all'interno di forme carsiche nel territorio leccese: tali testimonianze storiche evidenziano ulteriormente la profonda integrazione tra l'uomo, la viticoltura e il carsismo, distintivo del paesaggio pugliese.

CONCLUSIONI

In Italia sono 530 i vini DOP e IGP, la cui varietà dei vini è strettamente collegata alle caratteristiche del substrato geologico. Il concetto di *Terroir*, termine utilizzato dagli addetti ai lavori, esprime definitivamente l'esito di una lunga e suggestiva storia geologica, spesso poco conosciuta, ma determinante per l'identità e il valore anche commerciale del vino.

L'area di produzione, il contesto naturale e storico, insieme ai fattori topografici, litologici, pedologici e climatici, contribuiscono a delineare gli elementi che raccontano la bellezza e la cultura del territorio italiano. La conoscenza dei luoghi, del loro assetto geomorfologico, paleogeografico e ambientale, rappresenta una risorsa da valorizzare nella comunicazione del vino, soprattutto attraverso l'etichetta della bottiglia, che ne costituisce a tutti gli effetti la carta d'identità (Gregori, 2009). Essa è il primo strumento di presentazione del prodotto ai consumatori e fornisce anche le informazioni essenziali, comprese quelle richieste dalla normativa.

Le tre diverse aree carsiche regionali che abbiamo descritto mostrano come la diversità geologica, climatica, dei suoli

e dei vitigni coltivati, abbia favorito le caratteristiche dei diversi vini prodotti. Ogni roccia e terreno dona al vino una firma unica, che si traduce in aromi, sapori e struttura inimitabili, perché è lì che inizia la sua storia.

Vogliamo infine sottolineare che la comunicazione della conoscenza del paesaggio è la chiave per la valorizzazione e lo sviluppo del territorio in quanto economia e cultura sono due aspetti fortemente legati, e l'uno è valore e volano dell'altro.

BIBLIOGRAFIA

- ARP (2008), *Natura in campo. atlante dei prodotti tipici e tradizionali dei parchi del Lazio*. Regione Lazio Assessorato ambiente e Cooperazione tra i popoli – Agenzia Regionale Parchi (testi a cura di Egidi I., Margaritelli L.). pp. 204, Palombi Editore, Roma.
- CASTIGLIONI G.B. (1992), *Geomorfologia*, Editore UTET. Torino. ISBN 88-02-04019-2
- COLACICCHI R., PAROTTO M. (2006), *Geologia dei Vini Italiani. Italia Centrale*. Be-Ma Ed., Milano, pp. 176, ISBN (10 88.7143.27.03)
- DELLE ROSE M., ANTONIO F., PARISE M. (2004), *Problematiche connesse a fenomeni di subsidenza carsica e sinkholes in Puglia*. 1° Seminario-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.
- DI LORETO E., FATTORI C. (2025), *Geologia da gustare. I paesaggi geologici e i prodotti enogastronomici del Lazio*, in Monografie di Geologia Ambientale. *Geologia Ambientale nel Lazio*, a cura di BALDI D., DI LORETO E., MANNI L., pp. 125-140. ISBN 979-12-80-811-06-6
- GREGORI L. (2009), *Etichetta e contro etichetta: comunicazione geologica del vino*. Atti del Convegno "I paesaggi del vino", Perugia 8-10 maggio 2008, pp. 17 – 32
- LISO I.S., PARISE M. (2022), *Alcuni aspetti idrogeologici della circolazione idrica sotterranea dell'inghiottitoio di Masseria Rotolo. - Geologi e Territorio*. Ordine regionale dei Geologi – Puglia, n. 2/2022, 7-11, ISSN: 1974-1189.

SITOGRAFIA

- <https://www.fisofvg.it/aaoc2016/la-grotta-gigante>
- https://moodle2.units.it/pluginfile.php/371698/mod_resource/content/1/21%20Carso%20D%202020.pdf
- <https://enoteca.cantinasantandrea.it/vino-hum/>
- QUOTIDIANO DI PUGLIA, 2026
- https://www.quotidianodipuglia.it/lecce/salento_archeologia_vino_palmenti_produzione_vino_dove_si_trova-no-9417803.html
- <http://assovini.it/italia/puglia/item/1102-strada-dei-vini-della-murgia-carsica>
- <http://www.catasto.fspuglia.it>

Campo Soriano: un caso studio per la tutela dei geositi carsici attraverso la collaborazione tra ISPRA e Regione Lazio

Campo Soriano: A case study for the protection of karst geosites through collaboration between ISPRA and the Lazio Region

Parole chiave: geositi carsici, geodiversità, monitoraggio strutturale, sviluppo sostenibile

Key words: karst geosites, geodiversity, structural monitoring, sustainable development

Elisa Brustia¹, Mauro Lucarini¹, Dario Mancinella², Diego Mantero², Paolo Mastrobattista³, Luca Olivetta¹, Roberto Pompili¹, Paolo Primerano¹, Maurizio Testardi²

¹ ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia.

E-mail:

elisa.brustia@isprambiente.it,
mauro.lucarini@isprambiente.it,
luca.olivetta@isprambiente.it,
roberto.pompili@isprambiente.it,
paolo.primerano@isprambiente.it

² Regione Lazio, Area Geodiversità e Monumenti Naturali

E-mail:

dmancinella@regione.lazio.it,
dmantero@regione.lazio.it,
mtestardi@regione.lazio.it

³ Parco Naturale Regionale Monti Ausoni e Lago di Fondi

E-mail: pmastrobattista@regione.lazio.it

ABSTRACT

L'area di Campo Soriano (LT) rappresenta un modello virtuoso per la tutela dei geositi carsici, frutto della sinergia tra ISPRA e Regione Lazio. In seguito ai distacchi rocciosi del 2025 che hanno coinvolto la formazione della Cattedrale di San Domenico, è stato attivato un sistema di monitoraggio continuo con sensori, usando un approccio conservativo che non interferisce con i naturali processi erosivi. Tale caso studio dimostra come innovazione tecnologica e gestione istituzionale condivisa possano integrarsi efficacemente per salvaguardare il patrimonio geologico in un'ottica di sviluppo sostenibile.

ABSTRACT

The Campo Soriano area (LT) represents an exemplary model for the protection of karst geosites, resulting from the synergy between ISPRA and the Lazio

Region. Following the rockfalls in 2025 that affected the rock formation known as the Cathedral of San Domenico, a continuous sensor-based monitoring system was activated, using a conservation-oriented approach that does not interfere with natural erosive processes. The case study demonstrates how technological advances and shared institutional management can be effectively integrated to safeguard geological heritage with a view to sustainable development.

INTRODUZIONE

Gli ambienti carsici italiani rappresentano un patrimonio naturale di grande valore, in cui aspetti geologici, ecologici, culturali ed economici sono strettamente interconnessi. L'Inventario Nazionale dei Geositi, gestito da ISPRA, costituisce il principale strumento per la catalogazione, la conoscenza e la tutela di questo patrimonio

(Fig. 1). Il database comprende attualmente migliaia di geositi distribuiti sul territorio italiano, con una presenza significativa di aree carsiche che richiedono specifiche strategie di gestione e conservazione (ISPRA, 2025).

La modernizzazione dell'inventario è sostenuta dal progetto PNRR Geo-SciencesIR, che applica i principi FAIR (reperibilità, accessibilità, interoperabilità e riutilizzo) per migliorare la gestione e la condivisione dei dati geologici. L'utilizzo di piattaforme digitali, modelli tridimensionali e dataset interoperabili consente di rendere le informazioni disponibili non solo ai ricercatori, ma anche alle istituzioni, agli operatori della formazione e ai cittadini.

La Regione Lazio collabora attivamente con ISPRA per l'aggiornamento e la validazione delle informazioni relative ai geositi regionali, rafforzando il collegamento tra conoscenza scienti-



Figura 1. Homepage dell'Inventario Nazionale dei Geositi, ISPRA (Fonte: ISPRA, 2026)

fica, pianificazione territoriale e tutela paesaggistica. Il Catasto regionale dei Geositi del Lazio, approvato con Deliberazione della Giunta Regionale n. 88/2025 è consultabile sul Geoportale regionale (<https://geoportale.regione.lazio.it/catalogue/#/map/1551>).

CONOSCENZA, PROTEZIONE E SVILUPPO SOSTENIBILE DELLE AREE CARSICHE

La gestione degli ambienti carsici si basa su tre fattori principali: migliorare la conoscenza scientifica, garantire la protezione ambientale e promuovere uno sviluppo sostenibile.

Infatti, grazie all'ampliamento delle conoscenze scientifiche, l'uso di tecnologie moderne come Laserscanner (Fig.2,a), laser scanner e fotogrammetria digitale consente ai ricercatori di realizzare modelli tridimensionali dettagliati, monitorare le trasformazioni geomorfologiche e individuare aree soggette a erosione o instabilità. Questi strumenti risultano particolarmente importanti negli ambienti carsici, dove i sistemi idrici sotterranei, i processi di dissoluzione delle rocce e la presenza di strutture geologiche fragili richiedono un monitoraggio continuo.

Per quanto concerne la salvaguardia ambientale, le aree carsiche italiane sono tutelate dalla normativa nazionale in materia di Aree Naturali Protette, declinata a livello regionale con apposite leggi, dal D.lgs. 42/2004, Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio e rientrano in molti casi in aree afferenti alla Rete Natura2000; la Regione Lazio possiede

inoltre la Legge regionale n. 1/1999 per la Tutela del patrimonio carsico e valorizzazione della speleologia. Una conservazione efficace richiede il controllo delle attività estrattive, la prevenzione dell'inquinamento degli acquiferi carsici e il monitoraggio dei fenomeni di dissesto.

Riguardo le potenzialità di sviluppo sostenibile, i paesaggi carsici possiedono un importante valore culturale ed economico grazie alla presenza di testimonianze archeologiche, attrattive naturali e potenzialità turistiche. Il geoturismo, i percorsi didattici e i musei geologici possono contribuire allo sviluppo delle economie locali accrescendo intanto la consapevolezza pubblica sull'importanza del patrimonio geologico.

CAMPO SORIANO: UN CASO DI STUDIO ESEMPLARE

Tra i geositi carsici italiani, l'area di Campo Soriano nei comuni di Sonnino e Terracina (Latina), compresa nel Parco Naturale Regionale Monti Ausoni e Lago di Fondi, rappresenta uno degli esempi più significativi di conservazione del patrimonio geologico. Il paesaggio, plasmato dall'interazione tra tettonica ed evoluzione carsica, è caratterizzato da doline, depressioni carsiche, inghiottitoi, pozze naturali e suoli rossi (Bellatreccia *et al.*, 2020; Nolasco. & Colombi, 2020). Il suo buono stato di conservazione è il risultato di sinergie di lunga data tra istituzioni e comunità locale, a partire dall'istituzione nel 1985 del Monumento Naturale che ha di fatto impedito il proseguimento

dell'attività estrattiva di una cava che ne minacciava l'esistenza stessa. Ad oggi la tutela dell'area è garantita dalla gestione e dalla vigilanza assicurata dal Parco e dalla presenza di un attivo e attento Comitato Cittadino. L'area ospita inoltre comunità animali e vegetali di grande interesse, spesso sviluppate in funzione del migliore adattamento al peculiare substrato calcareo. I suoli rossi carsici hanno favorito anche lo sviluppo di attività agricole tradizionali, in particolare la coltivazione dell'olivo e della vite. La produzione locale del Moscato di Terracina Doc ha dato origine anche ad una etichetta dedicata a Campo Soriano - "Hum" - dimostrando come gli aspetti geologici del territorio possano influenzare attività economiche sostenibili (Casto & Zarlenga, 1997).

L'elemento più rappresentativo del sito è il pinnacolo calcareo noto come Cattedrale di San Domenico, una formazione alta circa diciotto metri che è diventata il simbolo dell'area protetta. La sua particolare morfologia è il risultato della lunga interazione tra struttura geologica, erosione e processi di dissoluzione del calcare (Fattori & Mancinella, 2010). Campo Soriano è stato inserito nell'Inventario Nazionale dei Geositi ISPRA, confermandone il valore scientifico e conservazionistico (ISPRA, 2026).

Nell'ambito del progetto PNRR, l'ammasso roccioso di Campo Soriano è stato oggetto di campagne di monitoraggio tramite laser scanner effettuate nel 2024. Il confronto tra nuvole di punti tridimensionali ha permesso di individuare fratture, quantificare modifiche



Figura 2. Rilievo Laserscanner del 2024 (Fonte: E. Brustia, a); applicazione dei sensori sulla Cattedrale di San Domenico (Fonte: P. Mastrobattista, b)

strutturali e documentarne l'evoluzione nel tempo (Fig. 2).

Nell'agosto 2025, il distacco di alcuni blocchi rocciosi di circa un metro cubo dalla 'Cattedrale' ha fatto scattare l'allarme. Tuttavia, questo non è stato un episodio isolato: negli anni precedenti si erano già verificati piccoli crolli e le fratture mostravano chiari segni di instabilità. Per questo motivo, su richiesta dell'Ente Parco, l'Area Geodiversità e Monumenti Naturali della Regione Lazio ha stanziato fondi regionali per la messa in sicurezza della formazione, garantendo al contempo la pubblica fruizione del sito. La scelta "filologica" alla base dell'intervento è stata di tipo conservativo coerente con il contesto naturale, a differenza di quanto accade nel contrasto ai processi di degrado di un bene culturale, dove si interviene consolidando le strutture per evitarne il crollo. Si è così deciso di non rimuovere il materiale franato né di ricollocarlo, lasciandolo in sito come testimonianza concreta del naturale processo erosivo che ha generato la formazione stessa. Per conciliare questa impostazione con la sicurezza dei visitatori, il Parco ha commissionato uno studio strutturale di dettaglio dell'ammasso roccioso, individuando i settori a maggiore rischio, sui quali ha successivamente installato un sistema di monitoraggio continuo (Fig. 2, b). La rete si basa su tre sensori inclino-accelerometri digitali in grado di rilevare, tramite le variazioni dell'accelerazione di gravità, anche minimi angoli di rotazione sui tre assi spaziali, consentendo di gestire la fruizione in modo consapevole e di intervenire tempestivamente con eventuali misure restrittive. L'intervento unisce l'esigenza di una fruizione sicura al godimento del paesaggio, offrendo uno spunto di riflessione sul patrimonio geologico del territorio e sui processi naturali che lo hanno modellato.

LE SFIDE FUTURE PER LA PROTEZIONE DEGLI AMBIENTI CARSICI

La conservazione degli ambienti carsici richiede interventi su più fronti: aggiornamento delle conoscenze scientifiche, rafforzamento della tutela, sviluppo di turismo sostenibile e protezione delle risorse idriche sotterranee. Tecnologie come droni, LiDAR e monitoraggio digitale sono essenziali per documentare l'evoluzione delle forme geologiche più fragili, mentre servono controlli più rigorosi per ridurre gli impatti antropici da attività estrattive, contaminazione o

urbanizzazione incontrollata. Particolare attenzione meritano inoltre gli acquiferi carsici, estremamente vulnerabili all'inquinamento: il monitoraggio continuo della qualità delle acque e l'individuazione delle aree di ricarica sono indispensabili per preservare queste risorse strategiche. L'Inventario Nazionale dei Geositi manterrà un ruolo centrale come piattaforma scientifica e gestionale, supportando conservazione, educazione e partecipazione pubblica. Per la Regione Lazio, le priorità includono aggiornamento delle banche dati, estensione del monitoraggio, sviluppo di itinerari geoturistici e partecipazione a progetti europei per la geodiversità.

CONCLUSIONI

I paesaggi carsici rappresentano archivi della storia geologica della Terra e risorse di grande importanza scientifica, ecologica e culturale. La loro protezione richiede una stretta collaborazione tra ricercatori, istituzioni e comunità locali.

Il geosito Campo Soriano dimostra come protezione e sviluppo sostenibile possano convivere, trasformando un'area protetta in un laboratorio di ricerca permanente e in una risorsa per il territorio. Attraverso innovazione tecnologica, gestione dei dati aperti ed educazione ambientale sarà possibile preservare paesaggi unici per le generazioni future.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BELLATRECCIA F., FIERLI M., MECCHIA G., PINTUS G., PIRO M. & RE M. (2020), *Le grotte dei territori comunali di Fondi, Leno-la, Monte San Biagio, Sonnino, Terracina e Vallecorsa*. In: *Atlante dei fenomeni carsici dei Monti Ausoni meridionali*. Notiziario 17 Speleo Club, marzo 2020, Roma.
- CASTO L. & ZARLENGA F. (1997), *I beni culturali a carattere geologico del Lazio – La pianura pontina, fondana e i monti Ausoni meridionali*. ENEA/Regione Lazio. pp. 88–89.
- FATTORI C. & MANCINELLA D. (2010), *La conservazione del patrimonio geologico del Lazio: materiali, modelli, esperienze*. Regione Lazio / A.R.P. Disponibile su: https://www.parchilazio.it/schede-32655-carsismo_a_campo_soriano
- ISPRA (2026), *Inventario Nazionale dei Geositi*. Database SNPA/SINA Cloud.
- NOLASCO F. & COLOMBI A. (2020), *Sinkholes phenomena in Lazio Region: a live point of view over case studies*. Volume n° 1 - from PR01 to B15 (12 pp). Firenze, 20-28.08.2004.

Contaminanti, la minaccia nascosta per gli ambienti sotterranei

Eleonora Cialente

Dipartimento MeSVA, Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila

Enrico Lunghi

Dipartimento MeSVA, Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila

E-mail: enrico.lunghi@univaq.it

Contaminants, the hidden threat to subterranean environment

Parole chiave: Grotta, inquinanti, metalli pesanti, m

Key words: Cave, heavy metals, legislation, microplastics, monitoring, pollutants

Riassunto

Questo lavoro di revisione ha avuto l'obiettivo di indagare il numero di articoli incentrati sull'analisi dei contaminanti negli ambienti sotterranei europei, pubblicati negli ultimi 100 anni (1925-2025). È emerso che questo tema di ricerca riguarda solo gli ultimi quattro decenni e che gli ambienti sotterranei investigati, per lo più acquatici, non sono distribuiti in modo uniforme tra i paesi europei. Inoltre, la mancanza di una normativa comune riguardante la prevenzione ed il controllo degli inquinanti in ambiente sotterraneo non permette di svolgere un controllo standardizzato di questi ambienti.

INTRODUZIONE

Gli ecosistemi sotterranei, compresi le grotte, gli acquiferi carsici e i sistemi d'acqua sotterranea, sono habitat delicati che ospitano una grande diversità di specie altamente specializzate e spesso endemiche (Culver e Pipan 2019; Culver, Deharveng et al. 2021). Riconoscere la loro vulnerabilità può sensibilizzare il pubblico sull'importanza della loro conservazione, poiché questi habitat sono particolarmente sensibili agli impatti antropici a causa del loro isolamento e delle limitate risorse trofiche (Culver e Pipan 2019). Nonostante la loro importanza ecologica, il monitoraggio degli ecosistemi sotterranei volto a valutare le potenziali minacce è generalmente insufficiente (Di Lorenzo et al. 2024). Tra le minacce potenziali, gli inquinanti sono tra le più sottovalutate. Gli inquinanti possono essere di tipo diverso (chimici, fisici o biologici) e seguire diverse vie per raggiungere gli ambienti sotterranei (Lavoie et al. 2007; Banasiak et al. 2023). Una volta presenti, essi possono compromettere il funzionamento degli ecosistemi e le funzioni biologiche delle specie, sia singolarmente sia in combinazione tra loro (Cabana e Ra-

smussen 1994; Geyer et al. 2000; Verla et al. 2019). La nostra comprensione attuale di questo tema non consente di valutare adeguatamente l'estensione di queste minacce e i modi in cui influenzano il mondo sotterraneo (Mammola et al. 2020; Nanni et al. 2023).

Questa review ha l'obiettivo di sintetizzare gli studi sugli inquinanti negli ecosistemi sotterranei pubblicati in Europa nell'ultimo secolo. Gli obiettivi principali sono: i) definire ciò che è noto sulla presenza di inquinanti negli ambienti sotterranei europei; ii) fornire evidenze sull'importanza emergente di questo tema; iii) evidenziare le lacune legislative che ostacolano un monito-

raggio armonizzato degli ambienti sotterranei.

METODI

Sono stati esaminati studi scientifici pubblicati tra il 1925 e il 2025 che trattavano la contaminazione degli habitat sotterranei, sia acquatici sia terrestri, in Europa. Gli inquinanti sono stati classificati in tre categorie principali: chimici, fisici e biologici. Gli inquinanti chimici includevano sostanze organiche e inorganiche, metalli, aumenti di CO₂ e farmaci. Gli inquinanti fisici comprendevano principalmente microplastiche, rifiuti solidi e marmettola. Gli inquinanti biologici erano principalmente batteri

Tabella 1. Sommario degli articoli pubblicati e il numero di ambienti investigati nei paesi europei

Paese	Numero degli ambienti investigati	Acquatici	Terrestri
Italia	285	269	16
Francia	156	156	0
Spagna	249	246	3
Germania	186	186	0
Slovenia	44	39	5
Portogallo	125	121	4
Regno Unito	85	83	2
Romania	16	12	4
Grecia	87	87	0
Serbia	25	25	0
Turchia	24	23	1
Austria	18	18	0
Danimarca	18	18	0
Polonia	11	11	0
Croazia	8	4	4
Bosnia ed Erzegovina	4	4	0
Norvegia	4	4	0
Repubblica Ceca	2	0	2
Belgio	1	0	1
Totale	1348	1306	42

provenienti dalle feci. Sono inoltre state raccolte informazioni sulla legislazione europea e nazionale.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Sono stati recuperati 100 articoli pubblicati tra il 1991 e il 2025. Il dataset comprende ambienti campionati in 19 Paesi europei, coprendo circa il 70% degli Stati membri dell'Unione Europea (Tabella 1). Dei 2.007 eventi di campionamento condotti in 1.348 ambienti sotterranei, almeno un inquinante è stato rilevato in 1.781 occasioni, mentre in sole 226 occasioni non sono stati rilevati contaminanti.

Le soglie comuni a livello europeo si applicano solo a due gruppi di inquinanti: nitrati e pesticidi. In contrasto, le soglie regolatorie nazionali erano riportate in 12 paesi. Gli inquinanti più frequentemente segnalati sono stati quelli chimici (93,3% delle occasioni), seguiti da quelli biologici (4%) e fisici (2,7%).

BIBLIOGRAFIA

- BANASIAK L. J., WEAVER L., HUMPHRIES B., DANN R., BLAUROCK M., GOSSES M., PANG L. CLOSE M. (2023), *Microbial and solute transport through intact vadose zone cores of heterogeneous alluvial gravel under variably saturated conditions*. Vadose Zone Journal 22: e20250.
- CABANA G. RASMUSSEN J. B. (1994), *Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes*. Nature 372: 255-257.
- CULVER D. C., DEHARVENG L., PIPAN T. BEDOS A. (2021), *An overview of subterranean biodiversity hotspots*. Diversity 13: 487.
- CULVER D. C. PIPAN T. (2019), *The biology of caves and other subterranean habitats*. New York, Oxford University Press.
- DI LORENZO T., LUNGI E., AANEI C., ALTERMATT F., ALTHERR R., AMORIM I. R., BÂNCILĂ R. I., BELLVERT A., BLOMBERG A., BORGES P. A. V., BRAD T., BRANCELJ A., BRANKOVITS D., CARDOSO P., CERASOLI F., CHAUVEAU C. A., CRESPO L., CSADER M., DELIĆ T., DI CICCIO M., DOUADY C. J., DUCHEMIN L., FAILLE A., FIASCA B., FIŠER C., FLOT J.-F., GABRIEL R., GALASSI D. M. P., GARZOLI L., GRIEBLER C., KARWUTZ C., KENESZ M. I., KONECNY-DUPRÉ L., LILLEY T., MALARD F., MARTÍNEZ A., MEIERHOFER M. B., MESSANA G., MILLÁN A., MIZERAKIS V., MORI N., NANNI V., NICOLOSI G., OROMÍ P., PALLARÉS S., PEREIRA F., REBOLEIRA A. S. P. S., SACCÒ M., SALUSSOLIA A., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ D., SARBU S. M., ȘTEFAN A., STOCH F., DI CAMILLO A. T., TAITI S., VACCARELLI I., VALANNE V., ZAGMAJSTER M., ZAKŠEK V., ZITTRA C. MAMMOLA S. (2024), *EU needs groundwater ecosystems guidelines*. Science 386: 1103-1103.
- GEYER H. J., RIMKUS G. G., SCHEUNERT I., KAUNE A., SCHRAMM K.-W., KETTRUP A., ZEEMAN M., MUIR D. C. G., HANSEN L. G. MACKAY D. (2000), *Bioaccumulation and occurrence of endocrine-disrupting chemicals (edcs), persistent organic pollutants (pops), and other organic compounds in fish and other organisms including humans*. Bioaccumulation – New Aspects and Developments. B. Beek. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 1-166.
- LAVOIE K. H., HELF K. L. POULSON T. L. (2007), *The biology and ecology of North American cave crickets*. Journal of Cave and Karst Studies 69: 114-134.
- MAMMOLA S., AMORIM I. R., BICHUETTE M. E., BORGES P. A. V., CHEEPHTAM N., COOPER S. J. B., CULVER D. C., DEHARVENG L., EME D., FERREIRA R. L., FIŠER C., FIŠER Ž., FONG D. W., GRIEBLER C., JEFFERY W. R., JUGOVIC J., KOWALKO J. E., LILLEY T. M., MALARD F., MANENTI R., MARTÍNEZ A., MEIERHOFER M. B., NIEMILLER M. L., NORTHUP D. E., PELLEGRINI T. G., PIPAN T., PROTAS M., REBOLEIRA A. S. P. S., VENARSKY M. P., WYNNE J. J., ZAGMAJSTER M. CARDOSO P. (2020), *Fundamental research questions in subterranean biology*. Biological Reviews 95: 1855-1872.
- NANNI V., PIANO E., CARDOSO P., ISAIA M. MAMMOLA S. (2023), *An expert-based global assessment of threats and conservation measures for subterranean ecosystems*. Biological Conservation 283: 110136.
- VERLA A. W., ENYOH C. E., VERLA E. N. NWARNORH K. O. (2019), *Microplastic-toxic chemical interaction: a review study on quantified levels, mechanism and implication*. Discover Applied Sciences 1: 1400.

Un esempio di carsismo nel Lazio: le doline di Artena

An example of karst landscapes in Lazio: the Artena sinkholes

Maria Luisa Felici
Geologa, SIGEA-APS
E-mail: mluisa@tin.it

Giulio Caratelli
Giornalista

Parole chiave: sinkhole, Monti Lepini, Artena, dolina La Prece, dolina Santa Croce
Key words: sinkhole, Lepini Mounains, Artena, La Prece dolina, Santa Croce dolina

1. INTRODUZIONE

Il comune di Artena, in provincia di Roma, a circa 50 km dalla capitale, è situata lungo il fianco settentrionale dei Monti Lepini a circa 420 metri sul livello del mare, in prossimità dell'antica via Latina, nell'alta valle del fiume Sacco. La sua origine si perde nel tempo: a circa 630 metri s.l.m. si trova l'acropoli volsca conosciuta con il nome di Piano della Civita, che conserva tuttora resti di mura poligonali e terrazzamenti risalenti al IV-V secolo a.C. Il nome di Artena è relativamente recente, attribuito nel 1873, al posto di Montefortino, toponimo che ricorda che agli inizi del Medioevo si sviluppò sotto la Civita un piccolo borgo che tra l'VIII e IX secolo ospitò un castello fortificato. Successivamente, nel tempo, Montefortino, come altri piccoli centri, passò al patrimonio ecclesiastico della Santa Sede, poi nelle mani di diverse famiglie nobiliari, come Colonna, Conti di Tuscolo, Conti di Segni, Borghese.

Anni di guerre e distruzione segnarono la vita di Montefortino ma nel 1873, con il cambiamento di nome in Artena, che secondo alcuni studiosi era l'antico nome della Piana di Civita, la nuova Amministrazione comunale iniziò un cammino di rinnovamento e di modernità (Provincia di Roma, 1999).

Quando ancora era denominata Montefortino, il paese di Artena è stata oggetto di probabili fenomeni di crollo di pareti rocciose, avvenuti in tempi diversi, ancora visibili ad est e a sud ovest nei resti di due doline, denominate rispettivamente La Prece e Valle Santa Croce (o solo Santa Croce).

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il centro storico di Artena si estende sulle propaggini settentrionali dei Monti Lepini, una struttura costituita da calcari massivi e stratificati di età cretacea della piattaforma Laziale-Abruzzese con spessori anche di centinaia di metri e che rappresenta la prosecuzione settentrionale della dorsale Aurunci-

Ausoni-Lepini orientata in direzione appenninica NW-SE.

Si riconoscono due sistemi di faglie principali:

- 1) sistemi con andamento NE-SE che attraversano le serie calcaree e bordano la dorsale ad est e ad ovest;
- 2) sistemi orientati circa E-W che segnano il limite tra le successioni carbonatiche di piattaforma e i depositi del Pleistocene sul bordo settentrionale e che ribassano i calcari al di sotto dei depositi piroclastici (Nisio, 2008).

La struttura dei Lepini è costituita da due subunità tettoniche, accavallate con vergenza nordorientale lungo la direttrice Segni-Montelanico-Carpineto Romano, su cui è parzialmente impostata la valle del torrente Il Rio, tributario di destra del Fiume Sacco (Argentieri *et al.*, 2020).

In basso il paese si estende sull'alta Valle Latina, caratterizzata da materiali piroclastici provenienti dall'apparato vulcanico dei Colli Albani e dai depositi alluvionali dell'alveo del fiume Sacco. La Valle Latina, originata dal ribassamento per faglie dirette tra i Monti Lepini e i Monti Ernici, con il suo riempimento alluvionale e il ricoprimento delle piroclastiti, nasconde il sistema di faglie che interessa questa parte di Appennino.

Nelle zone pianeggianti affiorano i limi argillosi dell'area alluvionale del fiume Sacco e dei suoi affluenti.

Nell'area sono presenti sorgenti e fontanili, originate dal contatto tra terreni più permeabili (calcari) e terreni semi permeabili (piroclastiti ed eluvium-colluvium). All'interno della piana, nelle coperture piroclastiche, sono state rilevate falde sospese ed in pressione (Nisio, 2008).

3. LE DOLINE DI ARTENA

Le voragini che si originano con eventi parossistici di sprofondamento sono note nella letteratura geologica con il termine anglosassone di *sinkhole*. Esse danno origine a cavità, generalmente di forma sub-circolare, anche di grandi

dimensioni che, nella maggior parte dei casi, vengono colmate da acque di falda o sorgive, trasformandosi in piccoli laghi (Nisio, 2008).

I sinkhole di origine naturale sono spesso presenti in terreni soggetti al fenomeno del carsismo, ovvero l'insieme dei processi chimici e fisici attraverso cui l'acqua modella le rocce solubili, quali calcari e dolomie, creando particolari morfologie in superficie (vedi doline, carri carreggiati o karren, inghiottitoi) e nel sottosuolo (grotte). Il carsismo è associato anche ad aree caratterizzate da fasi tettoniche compressive e distensive che hanno dato origine a sistemi di faglie e fratture nelle rocce, come è il caso dell'area dei Monti Lepini.

Inoltre, il carsismo è molto sviluppato, soprattutto sui rilievi più soggetti alla permanenza delle acque meteoriche o sui versanti esposti all'azione del dilavamento (Nisio, 2008).

Quando ancora era denominata Montefortino, il paese di Artena è stata oggetto di probabili fenomeni di crollo di pareti rocciose, avvenuti in tempi diversi, ancora visibili ad est e a sud ovest nei resti di due doline, denominate rispettivamente La Prece e Valle Santa Croce (o solo Santa Croce).

Il 2 luglio 1850 un improvviso fenomeno di sprofondamento imputabile quasi certamente al collasso della volta di una cavità carsica, provocò boati, rumori, scuotimenti per alcune ore finché alcune aree naturali sprofondarono verso il basso, dando origine alla dolina di Valle Santa Croce. Francesco De Rossi e Giuseppe Andreoli, periti in geologia, furono incaricati da Monsignor Giuseppe Berardi, Commissario straordinario pontificio per le Province di Marittima Campagna di effettuare un sopralluogo (Argentieri *et al.*, 2020). Nel loro rapporto finale, ipotizzarono che la causa fosse riconducibile al crollo improvviso di una o più cavità sotterranee.

Il prof. Giuseppe Ponzi, geologo ed emerito docente universitario, componente dell'Accademia Pontificia dei Lincei, si recò a Montefortino insieme

ai Commissari Cavalieri San Bertolo e Carpi al fine di effettuare un'analisi della situazione.

Nella sua relazione definitiva Ponzi affermò che si trattava di un fenomeno fisico, originato da cause «*puramente locali*», come l'«*apertura di una cavità sotterranea, o una dilatazione, ovvero una rottura di equilibrio delle forze fisiche nei massi disgregati*», sottolineando la mancanza di dati certi e di studi analitici e concludendo che «*...Noi siamo adunque di opinione, che la causa produttrice del fenomeno di Montefortino, ci è tuttora incognita, e che perciò merita indagini ulteriori*» (Ponzi, 1850).

A differenza della dolina di Santa Croce, La Prece sembra essere una cavità molto più antica.

Da notare che, oltre alla grotta del Catauso, posta sulla Piana di Civita, sono state rilevate altre cavità naturali nella dolina di Santa Croce e ulteriori morfologie carsiche situate nel territorio di Artena (Segre, 1948; Mecchia *et al.*, 2003; Nisio, 2008; Romboli *et al.*, 2024).

In epoca più moderna, lo studio dei sinkholes nel territorio italiano ha portato alla realizzazione del Database Nazionale Sinkhole (<https://sgi.isprambiente.it/sinkholeweb/>) da parte dell'ISPRA, che, per il territorio di Artena, include le seguenti morfologie:

- 1) La Puzzariga, dolina secolare di forma circolare già presente nel VI secolo d.c., cartografata dall'IGM nel 1884. Si tratta di una struttura asciutta, senza gas e con una falda in pressione a 74 metri che risale di 18 metri;
- 2) Fondo Ara Loveso, dolina secolare asciutta di forma circolare;
- 3) Fondo del Proicchio, dolina secolare asciutta di forma circolare;
- 4) Fontana dello Schiavo, dolina secolare di forma circolare, cartografata dall'IGM nel 1884, situata a circa 2 km ESE da La Puzzariga.

BIBLIOGRAFIA

- ARGENTIERI A., PIRO M., GIZZI A., AIMATI V. (2020), *La dolina di Montefortino (Monti Lepini, Roma), The Montefortino sinkhole (Lepini Mts., Rome)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 106, 213-220.
- MECCHIA G., MECCHIA M., PIRO M. E BARBATI M. (2003), *Le grotte del Lazio I fenomeni carsici, elementi della geodiversità*. Regione Lazio, Assessorato all'Ambiente, Edizioni ARP.
- NISIO S. (2008), *I sinkholes nel Lazio (The sinkholes in the Latium region)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXXXV, 128-135.
- PONZI G. (1850), *Sull'avvallamento accaduto*

il 2 di luglio 1850 presso Montefortino. Atti della Accademia Pontificia de' Nuovi Lincei, 1849 - 1850, Annata 3, Tomo 3, 75-76.

PROVINCIA DI ROMA (1999), *Via Casilina*. Dipartimento V Servizio 3°, Attività Culturali ed Educazione Permanente, Fratelli Palombi Editori.

ROMBOLI L., VALENZI L., IANNUCCI D., TAVANI D. (2024), *Le doline di Artena*. Atti del X Convegno della Federazione Speleologica del Lazio "L'Aria e l'Acqua scultori delle grotte", Magliano Sabina, 19-20 ottobre 2024.

SITOGRAFIA

ISPRA: <https://sgi.isprambiente.it/sinkholeweb/database.html>

Inghiottitoio del Roccone nel territorio di Vita (TP): studio dell'ipogeo carsico e della sua interazione con il bacino idrografico di riferimento

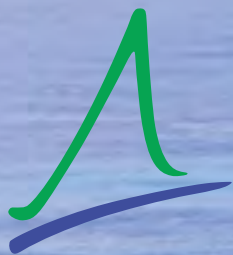
Roberto Grammatico
Rosario Bonventre
Luigi Fontana

Gruppo Speleologico "Speleo Team
Trapani ETS"
E-mail: grammarob@gmail.com

Roccone sinkhole in the Vita area (TP): study of the karst hypogeum and its interaction with the relevant hydrographic basin

Parole chiave: gessi, inghiottitoio, idrogeologia, termalismo
Key words: gypsum, sinkhole, hydrogeology, thermalism

L'Inghiottitoio del Roccone è una cavità carsica ad andamento prettamente verticale ubicata a NE dell'abitato di Vita (Sicilia occidentale) con sviluppo all'interno dei gessi selenitici del II ciclo – gessi di Pasquasia (Messiniano superiore). Sconosciuta fino ad oggi, questa cavità è subito risultata interessante per la sua posizione all'interno di una grande depressione carsica che non permette il deflusso superficiale verso l'asse principale del bacino idrografico S. Bartolomeo ma fa defluire le acque verso l'asse maggiore della depressione dove si trovano ubicati i punti di infiltrazione delle acque. Nella sala di fondo dell'inghiottitoio del Roccone persiste un rivolo d'acqua che scorre in direzione corrispondente alle direzioni di deflusso degli impluvi alimentatori del torrente S. Bartolomeo facendo rientrare il deflusso sotterraneo nel sistema delle direzioni di deflusso ed alimentazione del corpo idrico. In senso geograficamente più ampio, all'interno dello stesso bacino idrografico si trova la Zubbia le Marge, anch'essa formatasi sugli stessi gessi del II ciclo, che raccoglie le acque di un impluvio orientandole con un rivolo d'acqua sotterraneo in direzione della direttrice del torrente S. Bartolomeo per cui si può ritenere questo fenomeno di deflusso sotterraneo caratteristico dell'areale e, nel loro complesso, apportano il contributo di acqua selenitica all'interno del corpo idrico alimentando il fenomeno termale-sulfureo del territorio segestano.



ARPACAL

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Calabria

Agisce per la tutela dell'ambiente in Calabria

*“L'ambiente è un trattato di pace:
richiede conoscenza, cooperazione
e azioni sostenibili”*

Recenti ricerche carsiche in siti del territorio pugliese

Recent karst research in Apulia

Parole chiave: grotte, carsismo, ricerca scientifica, tutela ambiente carsico
Key words: caves, karst, scientific research, protection of karst environment

Isabella Serena Liso¹,
Faraj Mohammed Mostafa¹,
Michele Onorato¹,
Mario Parise^{1,2}

¹ Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari Aldo Moro

² International Union of Speleology

E-mail: mario.parise@uniba.it

Nell'ambito di progetti di ricerca inerenti il carsismo del territorio pugliese, con particolare riferimento alle acque sotterranee carsiche, ed alle problematiche ad esse connesse in termini di disponibilità della risorsa idrica, salvaguardia dei relativi aspetti qualitativi e quantitativi dei corpi idrici, ed a dinamiche di pericolosità geologica connesse all'azione dell'acqua, il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro conduce da anni attività di studio e ricerca su vari settori di interesse della regione Puglia. Nella presente nota ci si sofferma su due argomenti di particolare interesse negli ultimi anni, e precisamente la tematica della intrusione salina, che minaccia vaste porzioni delle coste pugliesi, e la zona di Palude del Capitano, nel territorio di Nardò, in provincia di Lecce, un settore di notevole interesse per le relazioni esistenti tra acque carsiche e sviluppo diffuso di fenomeni di sprofondamento, anche noti nella letteratura internazionale come *sinkholes* (Gutierrez *et al.*, 2014; Parise, 2019, 2022).

INTRUSIONE SALINA

In molte parti del mondo, tra cui vale la pena citare aree dell'Asia, del bacino del Mediterraneo, dell'Australia e del

Nord America (Barlow and Reichard, 2010; Cao *et al.*, 2021; Sarkar *et al.*, 2021), l'intrusione di acqua marina negli acquiferi costieri rappresenta una delle minacce più persistenti e difficili da gestire per la qualità e la disponibilità a lungo termine delle risorse di acqua dolce sotterranea (Hussain *et al.*, 2019). Le proiezioni indicano che, entro il 2100, circa il 77% delle coste mondiali potrebbe essere interessate da processi di salinizzazione (Adams *et al.*, 2024). Questo problema assume una rilevanza sempre maggiore, se si considera che il 45% della popolazione mondiale vive in aree costiere (Perumal *et al.*, 2024).

Le situazioni più critiche si concentrano soprattutto nelle fasce costiere densamente popolate, dove la richiesta d'acqua è costantemente elevata e sottopone gli acquiferi costieri a forti pressioni (Xanke and Liesch, 2022). L'intrusione marina è, in origine, un fenomeno naturale legato all'interazione tra terra e mare, ma oggi viene sempre più intensificata dalle attività umane e dai cambiamenti climatici, che modificano gli equilibri idrogeologici, geodinamici e geochimici degli acquiferi (Gao *et al.*, 2024; Zhang and Yi, 2024).

Il problema non riguarda soltanto l'aumento della salinità delle acque sotterranee. L'ingresso di acqua marina

può infatti innescare reazioni tra acqua e roccia, favorendo il rilascio di ioni, nutrienti, carbonio inorganico e organico disciolto, solfuri, metalli in traccia, gas radioattivi e traccianti radionuclidici (Moore and Joye, 2021). Queste alterazioni possono compromettere la qualità dell'acquifero (Yang *et al.*, 2022; Heydarizad *et al.*, 2023) e contribuire anche alla salinizzazione dei suoli (Badaruddin *et al.*, 2015).

I numerosi studi disponibili negli ultimi anni nella letteratura internazionale (per una revisione dei lavori sul tema, si veda Mostafa *et al.*, 2026) forniscono indicazioni molto utili per la ricerca e per la gestione della qualità delle acque costiere, allo stesso tempo mettendo in evidenza una criticità ancora aperta: la complessità geologica degli acquiferi è spesso rappresentata in modo insufficiente. Questo limite è particolarmente importante negli acquiferi carsici e vulcanici, dove la circolazione dell'acqua può essere molto rapida e fortemente condizionata dalla presenza di fratture, condotti e cavità (Yu and Michael, 2019). Le principali incertezze derivano dall'eterogeneità degli acquiferi e dalla variabilità nel tempo dei fattori esterni, come l'innalzamento del livello del mare e la ricarica meteorica. Questi elementi controllano la posizione e l'evoluzione della zona di transizione tra acqua dolce e acqua salata e influenzano direttamente le stime dell'intrusione marina (Werner and Simmons, 2009; Dell'Oca *et al.*, 2020).

Il carsismo interessa circa il 15,2% delle terre emerse continentali e riguarda aree in cui vive il 16,5% della popolazione mondiale (Goldscheider *et al.*, 2020). Gli acquiferi carsici sono sistemi molto sensibili dal punto di vista idrogeologico e geomorfologico. La presenza di fratture, condotti e cavità consente infatti una circolazione dell'acqua molto rapida, ma riduce fortemente la capacità naturale dell'acquifero di attenuare contaminanti microbiologici e chimici (Goldscheider and Drew, 2007; Goldscheider *et al.*, 2020). Per questo motivo, gli ambienti carsici sono tra i contesti più vulnerabili

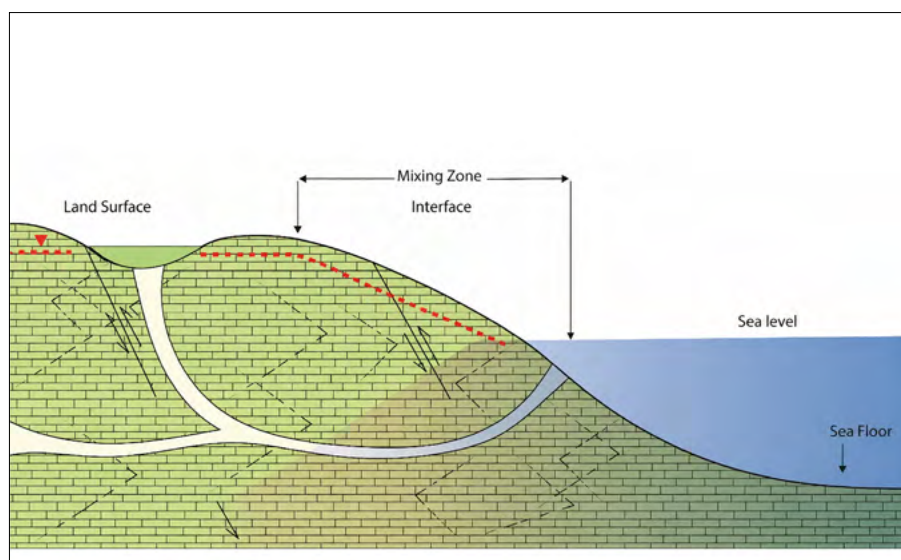


Figura 1. Modello concettuale di intrusione marina in acquifero carsico dominato da intrusioni attraverso i condotti, dove la forte eterogeneità ed anisotropia favoriscono l'individuazione di percorsi preferenziali

sia per la gestione delle risorse idriche sia per i rischi geologici (Gutiérrez, 2010; Gutiérrez *et al.*, 2014; Parise, 2015). Secondo Stevanović (2019), circa il 10% della popolazione mondiale dipendeva da acque carsiche nel 2016. Gli acquiferi carsici hanno avuto, e continuano ad avere, un ruolo fondamentale nello sviluppo socio-economico di molte regioni e rappresentano ancora oggi una risorsa strategica per la crescita sostenibile di numerosi Paesi (Laureano, 2001; Parise and Sammarco, 2015; Valipour *et al.*, 2020). Tuttavia, questi sistemi sono sottoposti a pressioni crescenti a causa dell'aumento della popolazione e della domanda di risorse idriche, nonostante forniscano circa il 25% dell'acqua potabile a scala globale (Ford and Williams, 2007; Parise *et al.*, 2018).

Gli acquiferi carsici costieri sono particolarmente vulnerabili. In molte aree costiere essi rappresentano una quota importante dell'approvvigionamento idrico, ma proprio per questo sono spesso sfruttati intensamente e risultano molto sensibili al sovrasfruttamento (Stevanović, 2018a; Bakalowicz, 2015; Stevanović, 2019; Fiorillo *et al.*, 2022). Essi sono costituiti da reti di fratture, condotti e grotte interconnesse, che permettono all'acqua sotterranea di muoversi rapidamente. La stessa struttura, però, facilita anche l'ingresso e il trasporto veloce di contaminanti, compresa l'acqua marina (Palmer, 1991; Gillieson *et al.*, 2022). La loro dinamica è ulteriormente complicata dalla forte eterogeneità e anisotropia idraulica: condotti ad alta permeabilità sono spesso inseriti all'interno di matri-

ci calcaree molto meno permeabili. Di conseguenza, gli acquiferi carsici costieri sono estremamente esposti all'intrusione marina, che spesso rappresenta la principale forma di contaminazione in questi sistemi. A differenza degli acquiferi porosi, nei sistemi carsici l'intrusione marina non può essere descritta facilmente con semplici leggi fisiche, perché la presenza di condotti, cavità e percorsi preferenziali modifica profondamente il flusso dell'acqua e i processi di mescolamento tra acqua dolce e acqua salata (Fleury *et al.*, 2023).

In alcuni casi, le reti di drenaggio carsico già esistenti possono favorire la penetrazione naturale dell'acqua marina verso l'interno, con fronti di intrusione che possono estendersi anche per diversi chilometri dalla costa (Arfib *et al.*, 2007). Questo fenomeno può avere conseguenze non solo sulla qualità delle acque sotterranee, ma anche sulla biodiversità degli ambienti sotterranei e, più in generale, sugli ecosistemi costieri (Culver and Pipan, 2019; Siegel *et al.*, 2023; Galmarini *et al.*, 2023).

Il territorio pugliese risulta fortemente interessato da fenomeni di intrusione salina, che riguardano soprattutto le fasce costiere del Salento, "aggredito" da entrambi i lati dall'avanzamento delle acque marine, ma che interessano anche vasti settori delle Murge e del litorale garganico. La situazione diviene ulteriormente critica nel corso delle stagioni estive, a causa del sovraffollamento turistico, che spesso non tiene in alcun conto la necessità di pianificare l'utilizzo della risorsa idrica e si preoccupa solo di aumentare, spesso in maniera incon-

trollata e non sostenibile per il territorio, il numero di turisti che transitano nella nostra regione.

PALUDE DEL CAPITANO

Lungo il versante ionico del Salento, il tratto costiero lungo circa 25 km compreso tra Torre Castiglione (Porto Cesareo, a nord), e Serra Cicora (Nardò, a sud) si distingue per la presenza molto diffusa di *sinkholes*, cioè cavità o depressioni da sprofondamento, che si distribuiscono dalla linea di costa fino a circa 1 km verso l'interno e risultano allineati lungo le principali direttrici tettoniche della zona (Pepe & Parise, 2014; Parise *et al.*, 2025). Localmente questi fenomeni sono conosciuti con il termine dialettale "*spunnulate*". Hanno dimensioni molto variabili: in pianta possono estendersi da pochi metri quadrati fino a circa 6000 m², mentre la profondità varia generalmente da 0,1 a 5 m (Bruno *et al.*, 2008; Beccarisi *et al.*, 2010; Basso *et al.*, 2013; Delle Rose & Parise, 2002; Onorato *et al.*, 2017).

I *sinkholes* rappresentano una delle forme più caratteristiche degli ambienti carsici costieri, soprattutto lungo coste basse e pianeggianti (Gutiérrez *et al.*, 2014; Parise, 2019, 2022), contesti in cui il mescolamento tra acqua dolce e acqua salata favorisce la dissoluzione delle rocce carbonatiche, accelerando l'evoluzione geomorfologica della costa (Cigna & Forti, 1986; Forti, 1993, 1994; Liso & Parise, 2023a, b; Liso *et al.*, 2023; Campanale *et al.*, 2025; Rizzo *et al.*, 2025).

La Palude del Capitano, nel Comune di Nardò, rappresenta il più grande *sinkhole* da crollo dell'area: le sue dimensioni sono da 5 a 20 volte maggiori rispetto a quelle delle cavità circostanti, rendendola un vero e proprio laboratorio naturale per osservare e studiare questi fenomeni. Si tratta di un'ampia zona umida caratterizzata dalla presenza di diversi altri *sinkholes* da crollo, oggi allagati da acque salmastre. Nell'area affiorano dolomie e calcari del Cretaceo superiore, ricoperti dalle Calcareni di Gravina del Pleistocene inferiore (Rossi, 1968; Palmisano & Onorato, 1994; Delle Rose, 2002; Carrozzo *et al.*, 2003), mentre nei settori più depressi sono presenti anche depositi continentali olocenici, costituiti da sabbie argillose e limi lagunari-palustri, alternati a piccoli depositi eluviali, come le terre rosse (Beccarisi *et al.*, 2010).

Per il suo elevato interesse naturalistico, la Palude del Capitano è stata oggetto di numerosi studi riguardanti la flora e la fauna terrestri, ma anche



Figura 2. Tavolette per la stima della dissoluzione nella laguna di Palude del Capitano (foto: M. Onorato)

l'ecosistema acquatico. Il sito è tutelato dalla normativa regionale pugliese, dal Decreto Ministeriale del 28 dicembre 2018, che lo ha inserito nell'elenco nazionale delle Zone Speciali di Conservazione, e dalla normativa europea. Inoltre, si trova di fronte alla zona A della riserva integrale dell'Area Marina Protetta di Porto Cesareo.

Questi ambienti rappresentano anche importanti hotspot di biodiversità, dato che al loro interno sono state riconosciute almeno 34 diverse specie o gruppi tassonomici, comprese alcune specie rare e protette (Denitto *et al.*, 2006; Galmarini *et al.*, 2023; Boulamail *et al.*, 2025).

Con l'obiettivo di analizzare il ruolo dell'equilibrio dinamico tra acque sulfuree, acque dolci e acque marine nei processi di dissoluzione della roccia, è stata di recente avviata una ricerca che mira a comprendere quali siano i fattori predisponenti e innescanti che controllano la formazione e l'evoluzione dei *sinkholes*, nonché le ragioni dell'elevata biodiversità che caratterizza questi ambienti.

A questo scopo il sito della Palude del Capitano è stato strumentato (Onorato *et al.*, in stampa) con sonde multiparametriche utili per misurare alcuni parametri fisici dell'acqua, come conducibilità elettrica, temperatura e livello idrico per diventare un vero e proprio laboratorio naturale dedicato allo studio dell'idrogeologia carsica in ambiente costiero e del suo rapporto con l'elevato livello di biodiversità osservato nell'area.

Tavolette di calcare e calcarenite sono state poi posizionate lungo alcuni transetti a diverse profondità all'interno della laguna (profondità max circa 3 m), al fine, da un lato, di valutare la velocità di dissoluzione delle diverse rocce a contatto con acque caratterizzate da un complesso mescolamento tra componenti dolci, marine e probabilmente sulfuree, e, dall'altro, di osservare quali organismi colonizzano progressivamente la superficie delle tavolette, ricoprendole nel tempo.

Le stazioni di misura sono state realizzate con due pali in acciaio zincato fissati su basi di cemento. L'altezza dei pali varia in funzione della profondità dei tre siti di installazione, in modo che restino pochi centimetri al di sotto del livello dell'acqua durante la bassa marea.

Periodicamente alcune tavolette vengono recuperate e portate in laboratorio ove, dopo essere state lasciate in forno per 24 ore, in modo da eliminare l'acqua assorbita, vengono pesate. Il confronto con il peso iniziale permette

di verificare eventuali variazioni dovute alla dissoluzione della roccia. Altre tavolette, invece, sono lasciate immerse, per poter valutare gli effetti della dissoluzione e della colonizzazione biologica su tempi più estesi.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS K.H., REAGER J.T., BUZZANGA B.A., DAVID C.H., SAWYER A.H., HAMLINGTON B.D. (2024), *Climate-induced salt-water intrusion in 2100: Recharge-driven severity, sea level-driven prevalence*. *Geophys. Res. Lett.* 51 (22), e2024GL110359.
- ARFIB B., DE MARSILY G., GANOULIS J. (2007), *Locating the zone of saline intrusion in a coastal karst aquifer using springflow data*. *Groundwater* 45 (1), 28–35. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00252.x>.
- BADARUDDIN S., WERNER A.D., MORGAN L.K. (2015), *Water table salinization due to seawater intrusion*. *Water Resour. Res.* 51 (10), 8397–8408. <https://doi.org/10.1002/2015WR017098>.
- BAKALOWICZ M. (2015), *Karst and karst groundwater resources in the Mediterranean*. *Environ. Earth Sci.* 74 (1), 5–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4239-4>.
- BARLOW P.M., REICHARD E.G. (2010), *Saltwater intrusion in coastal regions of North America*. *Hydrogeol. J.* 18 (1), 247–260. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0514-3>.
- BASSO A., BRUNO E., PARISE M., PEPE M. (2013), *Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy)*. *Environmental Earth Sciences*, 70 (6), 2545–2559.
- BECCARISI L., DELLE ROSE M., ERNANDES P., NAPOLETANO S., ZUCCARELLO V. (2010), *Distribuzione geografica e stato di conservazione delle 165 doline di crollo della costa ionica salentina (Puglia meridionale)*. *Atti Secondo Workshop Sinkhole*, 165–179. Roma.
- BOULAMAIL S., FUMAROLA L.M., ONORATO M., PIRAINO S., VENTRUTI S., LISO I.S., PARISE M., COZZOLI F. (2025), *Interactive influence of intrinsic and extrinsic factors on stygofauna metabolic rate*. *Scientific Reports*, 15, 39819. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23493-y>.
- CAMPANALE F., LISO I.S., PARISE M., SPALUTO L. (2025), *Anatomy of a cave/sinkhole karst system near the Adriatic coast*. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, vol. 67, p. 21–26. <https://doi.org/10.3301/ROL.2025.27>.
- CAO T., HAN D., SONG X. (2021), *Past, present, and future of global seawater intrusion research: a bibliometric analysis*. *J. Hydrol.* 603, 126844. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126844>.
- CARROZZO M.T., DELLE ROSE M., FEDERICO A., LEUCCI G., MARRAS V., NEGRI S., NUZZO L. (2003), *Osservazioni geologiche e indagini 169 geofisiche sul carsismo della costa neretina*. *Thalassia Salentina*, 26 (Suppl.), 3–10. 170
- CIGNA A., FORTI P. (1986), *The speleogenetic role of air flow caused by convection*. *International Journal of Speleology*, 15, 41–52.
- CULVER D.C., PIPAN T. (2019), *The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats*. Oxford University Press, Oxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198820765.001.0001>.
- DELLE ROSE M. (2002), *Influenza dell'ipercarsismo sull'evoluzione delle coste rocciose basse del Salento*. *Atti Spelaion, Altamura (BA)* 175 1–3 dicembre 2000, Uniongrafica Corcelli, 173–180. Bari.
- DELLE ROSE M. & PARISE M. (2002), *Karst subsidence in south-central Apulia Italy*. *Int. Journal of Speleology*, 31 (1/4), 181–199.
- DELL'OCA A., RIVA M., GUADAGNINI A. (2020), *Global sensitivity analysis for multiple interpretive models with uncertain parameters*. *Water Resour. Res.* 56 (2), e2019WR025754. <https://doi.org/10.1029/2019WR025754>.
- DENITTO F., MOSCATELLO S., PALMISANO P., POTO M., ONORATO R. (2006), *Novità speleologiche, idrologiche e naturalistiche della Palude 178 del Capitano (pSIC IT9150013), costa neretina*. *Thalassia Salentina*, 29, 99–116. <http://doi.org/10.1285/i15910725v29supp99>.
- FIORILLO F., PAGNOZZI M., ADDESSO R., CAFARO S., D'ANGELI I.M., ESPOSITO L., LEONE G., LISO I.S., PARISE M. (2022), *Uncertainties in understanding groundwater flow and spring functioning in karst*. In: Currell M.J., Katz B.G. (Eds.), *Threats to Springs in a Changing World: Science and Policies for Protection*. *Geophys. Monogr.*, vol. 275 AGU/Wiley, Washington, DC/Hoboken, pp. 131–143.
- FLEURY P., PISTRE S., BAKALOWICZ M. (2023), *Coastal karst aquifers and submarine springs: what future for their water resources?* *Compt. Rendus Geosci.* 355 (S1), 487–500. <https://doi.org/10.5802/crges.168>.
- FORD D.C., WILLIAMS P.W. (2007), *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Wiley, Chichester. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>.
- FORTI P. (1993), *Meccanismi genetici ed evolutivi delle grotte marine*. *Speleologia*, 28, 63–67.
- FORTI P. (1994), *Cenni speleogenetici*. In: Favale F.F. (Ed.), *Le grotte di Polignano*. *Fed. Spel. Pugliese*, 43–52.
- GALMARINI E., VACCARELLI I., FIASCA B., DI CICCIO M., PARISE M., LISO I.S., PICCINI L., GALASSI D.M.P., CERASOLI F. (2023), *Regional climate contributes more than geographic distance to beta diversity of copepods (Crustacea Copepoda) between caves of Italy*. *Scientific Reports*, 13, 21243. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48440-7>.
- GAO W., LIU J., XU Y., LI P. (2024), *Evolution of sandy shores under the combined impact of global climate change and anthropogenic activities in Shandong Peninsula, East China*. *J. Asian Earth Sci.* 259, 105887. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2023.105887>.
- GILLIESON D., GUNN J., AULER A., BOLGER T. (2022), *Guidelines for Cave and Karst Protection*, 2nd ed. International Union of Speleology (UIS) and IUCN, Postojna,

- Slovenia and Gland, Switzerland. ISBN 978-0-646-84911-9.
- GOLDSCHIEDER N., DREW D. (Eds.) (2007), *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor and Francis/Balkema, Leiden. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>.
- GOLDSCHIEDER N., CHEN Z., AULER A.S., BAKALOWICZ M., BRODA S., DREW D., HARTMANN J., JIANG G., MOOSDORF N., STEVANOVIC Z., VENI G. (2020), *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. Hydrogeol. J. 28 (5), 1661–1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>.
- GUTIERREZ F. (2010), *Hazards associated with karst*. In: ALCANTARA-AYALA I., GOUDIE A.S. (Eds.), *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 161–175.
- GUTIÉRREZ 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.
- HEYDARIZAD M., PUMIJUMNONG N., MANSOURIAN D., ANBARAN E.D., MINAEI M. (2023), *The deterioration of groundwater quality by seawater intrusion in the Chao Phraya River Basin, Thailand*. Environ. Monit. Assess. 195, 424. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11688-6>.
- HUSSAIN M.S., ABD-ELHAMID H.F., JAVADI A.A., SHERIF M.M. (2019), *Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review*. Water 11, 2467. <https://doi.org/10.3390/w1122467>.
- LAUREANO P. (2001), *The Water Atlas: Traditional Knowledge to Combat Desertification*. Boringhieri, Torino.
- LISO I.S., PARISE M. (2023a), *Sinkhole development at the freshwater-saltwater interface in Apulia (southern Italy)*. Proc. 17th 184 Multidisc. Conf. on Sinkholes and the Engng. and Environ. Impacts of Karst, Tampa (Florida, USA), NCKRI Symp., 9, 229–238.
- LISO I.S., PARISE M. (2023b), *Gli acquiferi carsici in contesti di cambiamento climatico: il caso della Regione Puglia (Italia meridionale)*. In: Bentivenga M. & Di Loreto E. (Eds.), *Atti del Convegno “La Geologia Ambientale al servizio del Paese”*, Roma, 10–11 ottobre 2022, Geologia dell’Ambiente, suppl. n. 4/2023, p. 102–106.
- LISO I.S., MARGIOTTA S., PARISE M. (2023), *Morphological and hydrogeological features of sinkholes in coastal settings*. In: ÇINER A., KHAN M.F., KALLELA A., RODRIGO-COMINO J., PARISE M., BARZEGAR R., ERGULER Z.A., KHELIFI N., ALI I. (Eds.), *Recent Research on Environmental Earth Sciences, Geomorphology, Soil Science, Paleoclimate, and Karst*. Proceedings of 1st MedGU, Istanbul 2021 (vol. 4), Advances in Science, Technology & Innovation, Springer, p. 243–246. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42917-0_54.
- MOORE W.S., JOYE S.B. (2021), *Saltwater intrusion and submarine groundwater discharge: acceleration of biogeochemical reactions in changing coastal aquifers*. Front. Earth Sci. 9, 600710. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.600710>.
- MOSTAFA M.F., PARISE M., LISO I.S. (2026), *Seawater intrusion in karst aquifers: A critical review of factors, methods, and mitigation actions*. Earth Science Reviews, vol. 277, 105455, 32 pp. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2026.105455>.
- ONORATO M., ONORATO R., POSI M.E., POTO M. (2017), *La spunnulata della Pajara: esplorazione e prime osservazioni*. Thalassia 193 Salentina, 39, 73–82.
- ONORATO M., DI CAPUA I., LISO I.S., ONORATO R., CONGEDO M., POTO M., PALMISANO G., PUGLIA G., ZINI L., PARISE M. (in stampa), *Palude del Capitanato (Apulia, Italy): a natural coastal laboratory to 1 monitor biological diversity and dynamics of karst hydrogeology*. Rendiconti Online Società Geologica Italiana.
- PALMER A.N. (1991), *Origin and morphology of limestone caves*. Geol. Soc. Am. Bull. 103 (1), 1–21.
- PALMISANO G., ONORATO R. (1994) – *Note sull’avvio di ricerche sul carsismo sottomarino del Salento (Puglia)*. Memorie dell’Istituto Italiano di Speleologia, 6(II), 193–197. Bologna.
- PARISE M. (2015), *A procedure for evaluating the susceptibility to natural and anthropogenic sinkholes*. Georisk: Assessm. Manag. Risk Eng. Syst. Geohaz. 9 (4), 272–285. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1045002>.
- PARISE M. (2019), *Sinkholes*. In: WHITE W.B., CULVER D.C., PIPAN T. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*. 3rd ed., Elsevier Academic Press: Cambridge, MA, USA, p. 934–942.
- PARISE M. (2022), *Sinkholes, Subsidence and Related Mass Movements*. In: Shroder J. J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, vol. 5. Elsevier, Academic Press, p. 200–220.
- PARISE M., SAMMARCO M. (2015), *The historical use of water resources in karst*. Environ. Earth Sci. 74 (1), 143–152. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3685-8>.
- PARISE M., PALMISANO P., ONORATO R. (2017), *Contributo alla conoscenza dei fenomeni carsici di collasso in zone costiere del Salento 202 Jonico (Puglia): la Spunnulata della Pajara*. Thalassia Salentina, 39, 99–122.
- PARISE M., GABROVSEK F., KAUFMANN G., RAVBAR N. (2018), *Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications*. Geol. Soc. London Spec. Publ. 466, 1–15. <https://doi.org/10.1144/SP466.26>.
- PARISE M., ANDRIANI G.F., DE SANTIS V., DIPRIZIO G., LOLLINO P., LONGO L., PACIOLLA R., LISO I.S. (2025), *Analysis of the factors involved in sinkhole development and evolution in the coastal environment of Apulia*. Rendiconti Online Società Geologica Italiana, vol. 67, p. 27–34. <https://doi.org/10.3301/ROL.2025.29>.
- PEPE M., PARISE M. (2014), *Structural control on development of karst landscape in the Salento Peninsula (Apulia, SE Italy)*. Acta 204 Carsologica, 43 (1), 101–114. 205
- PERUMAL M., SEKAR S., CARVALHO P.C. (2024), *Global investigations of seawater intrusion (SWI) in coastal groundwaters in the last two decades (2000–2020): a bibliometric analysis*. Sustainability 16 (3), 1266. <https://doi.org/10.3390/su16031266>.
- RIZZO A., MATTEI G., DUMON STEENSSENS L., ANZIDEI M., AUCCELLI P.P.C., ALBERTI A., ANTONIOLI F., BEZZI A., BONALDO D., FONTOLAN G., FURLANI S., LISO I.S., PARISE M., SANSÒ P., SCICCHITANO G., TRIPPANERA D., VECCHIO A., MASTRONUZZI G. (2025), *Methodological advances in sea level rise vulnerability assessment: implications for sustainable coastal management in a climate change scenario*. Ocean and Coastal Management, 268, 107751.
- ROSSI D. (1968), *Le caratteristiche morfologiche, strutturali e paleogeografiche della Penisola Salentina*. Ann. Univ. Ferrara, IV, n. 11.
- SARKAR B., ISLAM A., MAJUMDER A. (2021), *Seawater intrusion into groundwater and its impact on irrigation and agriculture: evidence from the coastal region of West Bengal, India*. Reg. Stud. Mar. Sci. 44, 101751. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101751>.
- SIEGEL L., GOLDSCHIEDER N., PETITTA M., XANKE J., ANDREO B., BAKALOWICZ M., et al. (2023), *Distribution, threats and protection of selected karst groundwater-dependent ecosystems in the Mediterranean region*. Hydrogeol. J. 31 (8), 2231–2249.
- STEVANOVIC Z. (2018), *Global Distribution and Use of Water from Karst Aquifers*.
- STEVANOVIC Z. (2019), *Karst Waters in Potable Water Supply: A Global-Scale Overview*.
- VALIPOUR M., AHMED A.T., ANTONIOU G.P., SALA R., PARISE M., SALGOT M., BENSI N.S., ANGELAKIS A.N. (2020), *Sustainability of underground hydro-technologies: from ancient to modern times and toward the future*. Sustainability 12 (21), 8983. <https://doi.org/10.3390/su12218983>.
- WERNER A.D., SIMMONS C.T. (2009), *Impact of sea-level rise on seawater intrusion in coastal aquifers*. Groundwater 47 (2), 197–204. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x>.
- XANKE J., LIESCH T. (2022), *Quantification and possible causes of declining groundwater resources in the Euro-Mediterranean region from 2003 to 2020*. Hydrogeol. J. 30 (2), 379–400. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02448-3>.
- YANG H., JIA C., LI X., YANG F., WANG C., YANG X. (2022), *Evaluation of seawater intrusion and water quality prediction in Dagü River of North China based on fuzzy analytic hierarchy process exponential smoothing method*. Environ. Sci. Pollut. Res. 29 (44), 66160–66176.
- YU X., MICHAEL H.A. (2019), *Mechanisms, configuration typology and vulnerability of pumping-induced seawater intrusion in heterogeneous aquifers*. Adv. Water Resour. 128, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.04.013>.
- ZHANG Z., YI L. (2024), *Research methods for seawater intrusion in China and recommendations for novel radium–radon technologies*. Mar. Environ. Res. 198, 106530. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106530>.

L'acquifero carbonatico del pozzo Burano nella regione Marche

Endro Martini
Geologo Ambientale, SIGEA-APS
E-mail: endromartini@gmail.com

The carbonate aquifer of the Burano well in the Marche region

Parole chiave: acqua, siccità, governance, portata, pressione, deflussi, prevenzione, contratti di fiume

Key words: water, drought, governance, flow, pressure, outflows, prevention, river contracts

ABSTRACT

Nella Regione Marche la figura di Enrico Mattei, nato ad Acqualagna e trasferitosi poi a Matelica è famosa e ricordata sia per la sua casa nativa in Acqualagna che per il Museo di Matelica gestito dalla nipote Rosangela Mattei, che per il campus Mattei presso l'università di Urbino e infine per la Geotecneco e Idrotecneco poi Aquater a San Lorenzo in Campo. Enrico Mattei, nominato commissario per liquidare l'Agip, disobbedì, rilanciò l'azienda e, attraverso la Agip Mineraria, guidò la ricerca di idrocarburi che portò al boom energetico italiano. Negli anni 1955 e 1956 proprio come Agip Mineraria effettuò un pozzo esplorativo tra Cagli e Cantiano, a margine del Fiume Burano, non lontano dalla sua città di origine per cercare idrocarburi. Il pozzo fu perforato per circa 2500 metri, detto Burano 1 di cui esite una straordinaria stratigrafia ben descritta. Una massiccia venuta d'acqua durante la perforazione avvenuta a circa 300 metri di profondità in

corrispondenza del calcare massiccio e l'eccessivo afflusso di falda (Fig. 2) (quasi 30 atmosfere al piano campagna) costrinse l'Agip a interrompere l'opera e ad abbandonare il pozzo sterile. In seguito all'enorme serbatoio idrico sotterraneo conosciuto oggi, furono scavati altri pozzi per approvvigionamento idropotabile

ABSTRACT

In the Marche Region, Enrico Mattei, born in Acqualagna and later moved to Matelica, is famous and remembered for his birthplace in Acqualagna, the Matelica Museum managed by his niece Rosangela Mattei, the Mattei campus at the University of Urbino, and finally the Geotecneco e Idrotecneco, then Aquater, in San Lorenzo in Campo. Enrico Mattei, appointed commissioner to liquidate Agip, disobeyed, relaunched the company, and, through Agip Mineraria, led the search for hydrocarbons that led to the Italian energy boom. And in 1955 and 1956, just as Agip Mineraria, he drilled an exploratory well between Cagli and

Cantiano, on the banks of the Burano River, not far from his hometown, to search for hydrocarbons. The well, called Burano 1, was drilled for approximately 2,500 meters, and its extraordinary, well-described stratigraphy remains. A massive influx of water during drilling at a depth of about 300 meters in correspondence with the massive limestone and the massive influx of groundwater (Fig. 2) (almost 30 atmospheres on the ground floor) forced Agip to interrupt the work and abandon the sterile well. Following the enormous underground water tank thus known, other wells were then dug for drinking water supply.

CRONISTORIA DEL POZZO BURANO E INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nel luglio del 1990 la Regione Marche, con apposita deliberazione affidò alla Società Aquater del Gruppo ENI, il compito di eseguire studi e monitoraggio delle risorse idriche esistenti nella

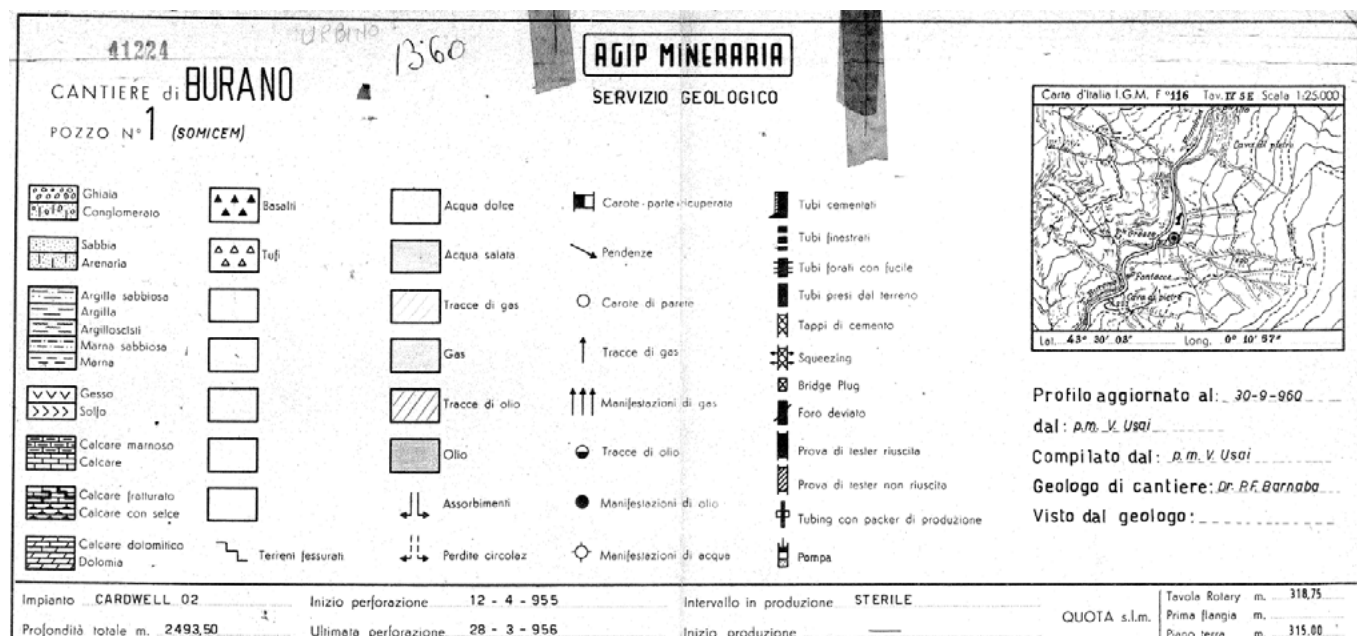


Figura 1. Litologie incontrate e ubicazione pozzo Burano n. 1



Figura 2. Acqua a pressione durante la perforazione (maggio-1956)

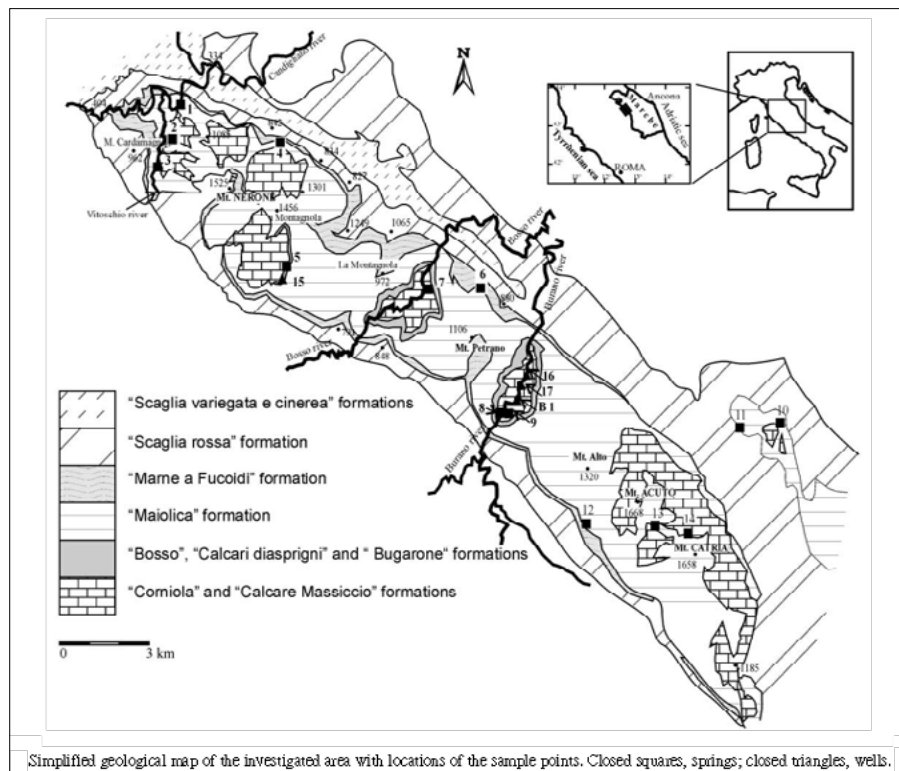


Figura 3. Schema geologico semplificato

dorsale Carbonatica Catria Nerone e la perforazione di un pozzo per acqua, nell'ambito di un progetto generale per la realizzazione di impianti di soccorso per approvvigionamento idrico di Cagli e di Acqualagna. Si volevano raggiungere i seguenti scopi: conoscere qualità e potenzialità delle acque sotterranee esistenti nella zona (scoperte dalla perforazione Agip del 1956); individuare i caratteri idrogeologici quali i livelli acquiferi, le aree di ricarica, il bilancio idrogeologico; valutare i rapporti tra prelievi dal pozzo e sorgenti della zona, al fine di una salvaguardia e corretta gestione della risorsa stessa avendo cura di

non indurre scompensi nei fiumi e nelle sorgenti che potenzialmente potevano interagire con i serbatoi idrogeologici profondi. La perforazione venne eseguita fino alla profondità di 300 metri e fu allestito un sistema di monitoraggio delle sorgenti e delle portate dei fiumi anche a pozzo aperto che faceva uscire a pressione circa 300 litri secondo. Per timore di stressare l'acquifero e per l'opposizione della popolazione locale, il pozzo non fu mai allacciato alla rete acquedottistica. Dopo varie discussioni e ricorsi una sentenza del tribunale di Urbino autorizzò

il prelievo di 35 litri secondo da quell'acquifero: fu così scavato un altro pozzo Burano denominato Cagli 1 da cui si preleva il fabbisogno idropotabile per Cagli e Acqualagna. Esiste poi un altro pozzo detto Burano vecchio sempre del Comune che viene attivato quando non è disponibile quello principale. Per l'inquadramento geologico e idrogeologico (Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6) si riportano immagini estratte dal lavoro *Hydrogeochemistry of groundwaters from carbonate formations with basal gypsiferous layers: an example from the Mt Catria-Mt Ne-*

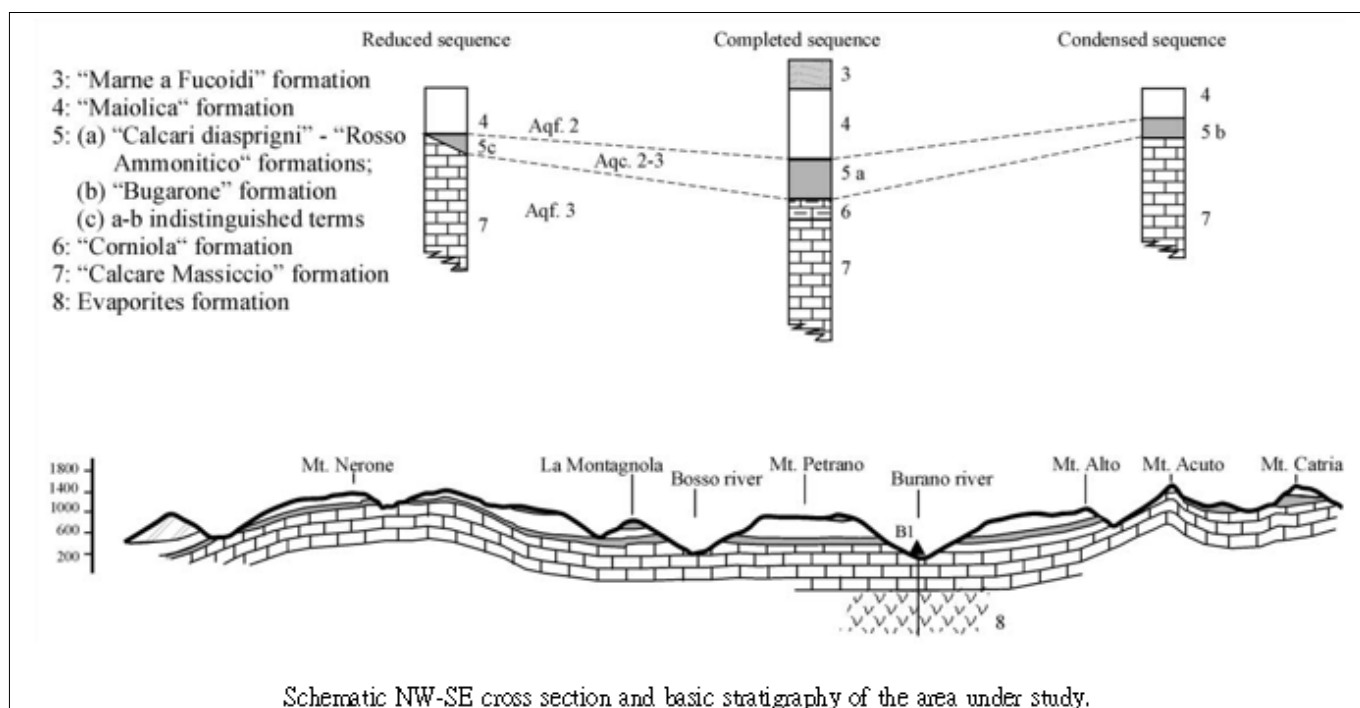


Figura 4. Sezione Geologica semplificata

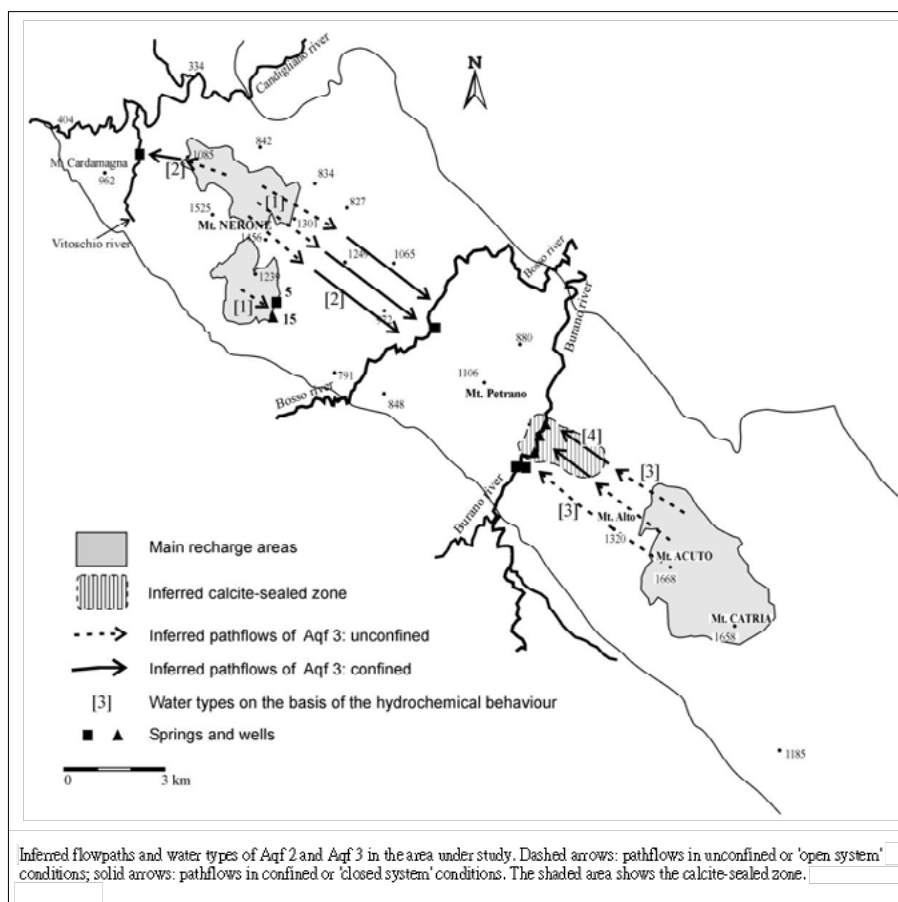


Figura 5. Principali aree di ricarica (valli del Bosso e del Burano) in pianta

la Valle del Vitoschio e la Sorgente di S. Nicolo. Ciò sempre secondo gli autori potrebbe anche spiegare i diversi regimi di pressione idraulica osservati nell'acquifero basale tra le valli di Bosso e Burano.

SITUAZIONE OGGI E UTILIZZO DEL POZZO BURANO

Come detto il pozzo Burano (Fig. 7) non vien utilizzato a scopo idropotabile. L'acquifero da cui capta il pozzo è stato dichiarato come riserva idrica strategica regionale dalla L.R.5/2006 che all'art. 2 stabilisce le acque sotterranee dei sistemi appenninici come una riserva strategica da tutelare. Il Piano di tutela delle acque della Regione consente un uso eccezionale e il prelievo è consentito solo per fronteggiare situazioni di emergenza e carenze idriche gravi, attivabile su disposizione della Protezione Civile dopo specifici studi che escludano danni ambientali.

Dal 2006, fino allo scorso anno, e anche oggi fin dal 29 luglio 2026 ogni evento siccitoso che a seguito della crisi climatica si ripete sempre più spesso e con lunghe durate viene ancora affrontato e gestito aprendo il famoso pozzo BURANO a 300 litri secondo a bocca pozzo, per scaricarli per periodi anche di 60/90 giorni, nel fiume Burano (Fig. 8), fargli fare circa 18 chilometri fino ad incontrare il fiume Candigliano per essere poi pompato e potabilizzato perché nel frattempo questa portata di 300 litri secondo si è presa in carico le acque

rone ridge (Northern Appennines, Italy) di Bruno Capaccionia, Mariano Didero, Carmela Paletta, Piero Salvadori dell'Università di Urbino pubblicato su Journal of Hydrology 253 (2001) 14-26.

In conclusione gli autori sopra citati ritengono che l'acquifero basale deve

essere suddiviso in due unità idrauliche pressoché indipendenti con due aree di ricarica e scarico indipendenti: l'area del Monte Catria che fornisce acque per pozzi e sorgenti nella Valle del Burano, con i tassi di scarico più elevati; e la zona del Monte Nerone che rifornisce d'acqua

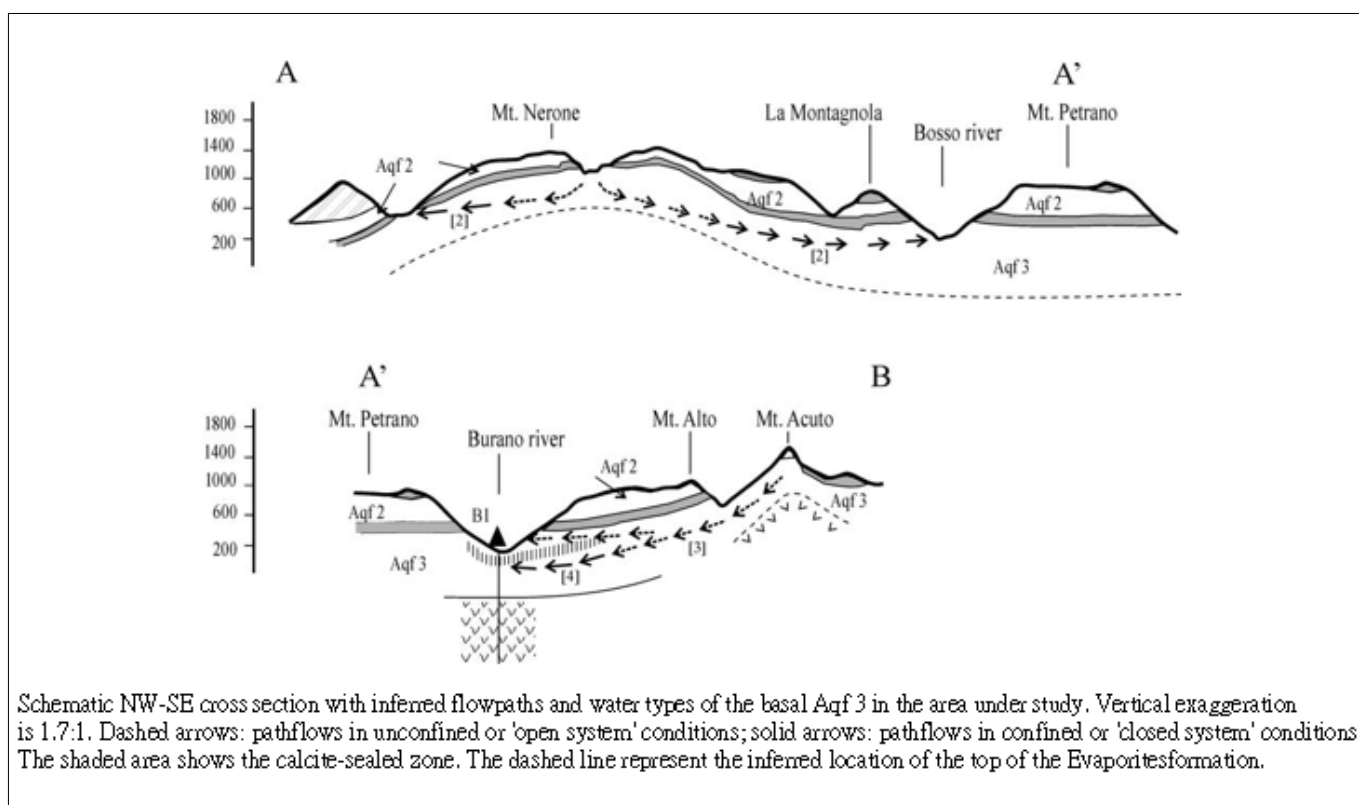


Figura 6. Principali aree di ricarica (valli del Bosso e del Burano) in sezione



Figura 7. Il Pozzo Burano recintato



Figura 8. L'acqua sotterranea nella fase di scarico a Fiume

depurate rivenienti da depuratori che scaricano nel Fiume Burano. E la parte non pompata va alla diga del Furlo che la scarica poi a Valle per rimpinguare il bacino di San Lazzaro dove c'è una concessione di derivazione da 600 litri/sec a scopo idropotabile. Molti aggiungono pure che questa acqua che esce dal Pozzo, essendo assai freddina, serve a raffreddare le acque delle dighe lontane chilometri, da cui partono i prelievi idropotabili per la costa e serve pure ad impedire le formazioni algali, perché

ovviamente questa acqua, nel suo lungo viaggio verso le dighe, non si riscalda mai nell'alveo fluviale, ne evapotraspira, visto che nei periodi siccitosi la temperatura non scende mai di notte sotto i 25 o i 38/40 gradi centigradi, come in questo recente periodo. Sono personalmente assai critico per questo modello di utilizzo di un'acqua sotterranea di un acquifero strategico, che potrebbe essere decisamente meglio utilizzato. È giunto il momento di rendere visibile l'invisibile (Rapporto UNESCO 2022) e di sco-

prire le carte. È in discussione il futuro delle generazioni dei nostri figli e dei nostri nipoti; nella gestione dell'acqua è in discussione qualsiasi operazione di sviluppo "sostenibile". Le falde acquifere possono anche tamponare gli impatti derivanti dalla variabilità stagionale e dal cambiamento climatico. Tuttavia, questa risorsa naturale è spesso poco compresa, e di conseguenza sottovalutata e mal gestita. È giunto il momento per questa risorsa e per questo Pozzo Burano di prendere il coraggio a quattro mani, di effettuare una analisi costi benefici ecologica ed economica per valutare un più appropriato utilizzo delle acque del pozzo Burano nei periodi siccitosi, riorganizzando il Piano regolatore degli acquedotti della Regione che risale al 2014. Sappiamo che la Direzione Risorsa Idriche della Regione Marche sta facendo attente valutazioni e studi anche con la collaborazione dell'Università Politecnica delle Marche per capire

e trovare risposte. Auguriamoci che si trovino presto le soluzioni ottimali sia ecologiche che economiche. Credo che nel merito una partecipazione a livello locale sia opportuna.

BIBLIOGRAFIA

CAPACCIONIA B., DIDERO M., PALETTA C., SALVADORI P. (2001), *Hydrogeochemistry of groundwaters from carbonate formations with basal gypsiferous layers: an example from the Mt Catria-Mt Nerone ridge (Northern Apennines, Italy)*. Journal of Hydrology, 253 14-26.

Animale di grotta dell'anno in Italia: una campagna di comunicazione-azione per la conoscenza e la tutela della biodiversità sotterranea

Cave animal of the year in Italy: a communication-action campaign for the knowledge and protection of biodiversity in caves

Parole chiave: Biospeleologia, Conservazione, Araneae, Ecosistemi carsici, Cambiamento climatico

Key words: Biospeleology, Conservation, Araneae, Karst ecosystems, Climate change

Sergio Orsini*

Società Speleologica Italiana SSI ETS
c/o Dipartimento di Scienze Biologiche,
Geologiche ed Ambientali - BiGeA -
Università di Bologna
E-mail: presidenza@socissi.it

Ferdinando Didonna*

Società Speleologica Italiana SSI ETS
E-mail: ferdinando.didonna@socissi.it

Luisa Dainelli

Gruppo Speleologico Archeologico
Livornese - GSAL

Giuseppe Nicolosi

Dipartimento di Scienze Biologiche,
Geologiche e Ambientali, Sezione di
Biologia Animale - Università di Catania

*corresponding author

RIASSUNTO

La campagna "Animale di Grotta dell'Anno" in Italia, promossa dal 2018 dalla Società Speleologica Italiana (SSI ETS), mira a sensibilizzare l'opinione pubblica, i cittadini e le autorità sulla fauna sotterranea. L'iniziativa seleziona ogni anno una specie iconica per evidenziarne il valore ecologico e la fragilità degli habitat carsici.

Attraverso una rete multidisciplinare di biologi, speleologi e operatori turistici, la campagna coniuga la divulgazione scientifica con il monitoraggio ambientale partecipato. Il presente contributo aggiorna i risultati scientifici e le strategie di conservazione estendendoli all'anno 2026, incentrato sulla tutela della "zona crepuscolare" mediante lo studio biologico e climatico dei ragni del genere *Meta* (*M. bourneti* e *M. menardi*), minacciati dal cambiamento climatico e dall'impatto antropico.

ABSTRACT

The "Cave Animal of the Year" campaign in Italy, launched in 2018 by the Italian Speleological Society (SSI ETS), aims to raise awareness about subterranean fauna among the general public and stakeholders. The initiative highlights a specific cave species each year, showcasing its ecological significance and unique habitat protection needs.

This paper updates the project's outcomes up to 2026, focusing on the protection of the cave "twilight zone" through the biological and climatic monitoring of orb-weaving spiders belonging to the genus *Meta* (*M. bourneti* and *M. menardi*), currently threatened

by climate change and anthropogenic disturbances.

1. INTRODUZIONE

L'iniziativa "Animale di Grotta dell'Anno" (Cave Animal of the Year - CAOTY) è nata in Germania nel 2008 ad opera della *Verband der Deutschen Höhlenforscher e.V. (VdHK)* con l'obiettivo di accrescere la consapevolezza pubblica sulla fauna ipogea. Nel 2014, il progetto ha ricevuto il premio "France HABE" dall'Unione Internazionale di Speleologia (UIS). La Società Speleologica Italiana (SSI ETS) coordina stabilmente la campagna in Italia dal 2018, operando sotto l'egida della Federazione Speleologica Europea (FSE) e avvalendosi di un fitto network di biologi, speleologi, della rete delle grotte turistiche AGTI.

2. MATERIALI E METODI

La campagna si sviluppa su tre pilastri metodologici integrati:

- Selezione tassonomica annuale:** Individuazione di un taxon target avente forte valore ecologico e rappresentativo della fragilità biologica del sottosuolo.
- Divulgazione ed Edutainment:** Sviluppo di poster, brochure informative, schede cartacee, produzioni documentali ed iconografiche (es. Biospeleo Cards o le schede laminate curate dal disegnatore Andrea Ambrogio).
- Monitoraggio biodiversità:** vengono proposti moduli digitali di segnalazione online, accompagnati da una descrizione accurata della pro-

cedura da seguire per minimizzare l'impatto antropico. Tali monitoraggio hanno lo scopo di identificare le specie osservate e raccogliere dati abiotici, come temperatura e umidità. Le segnalazioni possono essere effettuate su piattaforme dedicate, come iNaturalist (<https://www.inaturalist.org/projects/triphosa-dubitata-nel-lazio>) o tramite il database della SSI ETS (<https://forms.gle/exPN6ovsQFnXtGf27>).

3. RISULTATI E FOCUS CAMPAGNA 2026

Dal 2019 al 2026, la campagna ha promosso oltre 59 eventi nazionali, registrando una forte partecipazione da parte di scuole, visitatori delle grotte turistiche e singoli gruppi speleologici. In questo arco di tempo sono state selezionate 8 specie come "Animale di Grotta" con l'obiettivo di valorizzare la biodiversità sotterranea e sensibilizzare alla protezione degli habitat carsici (Tab. 1).

La scelta delle specie tiene conto della diversità ipogea, includendo specie con diverso grado di adattamento alla vita sotterranea, appartenenti a differenti gruppi tassonomici. Vengono inoltre considerate la loro familiarità per il pubblico, il loro valore come indicatori biologici o, in alcuni casi, la necessità di evidenziare lacune scientifiche ancora presenti.

L'edizione del 2026 accende i riflettori su due specie di grandi ragni eurasiatici: *Meta bourneti* Simon, 1922 e *Meta menardi* (Latreille, 1804) (Tetragnathidae). Pur non essendo specie

Tabella 1. Cronologia aggiornata delle specie selezionate per la campagna CAOTY in Italia (2019-2026)

Anno	Specie / Genere	Gruppo tassonomico	Focus ecologico e di conservazione	Azioni sul terreno
2019	<i>Limonia nubeculosa</i>	<i>Diptera</i>	Scambi energetici e flussi trofici tra l'ambiente esterno e il sottosuolo.	Lancio nazionale al Raduno Nuvolesse 2018; siglato protocollo d'intesa scientifico con "Biologia Sotterranea Piemonte" (Bossea); distribuzione di poster informativi cartacei alle Grotte Turistiche Italiane; riunione operativa a Urzulei (ICNUSSA 2019).
2020	<i>Plectogona sanfilippoi</i>	<i>Diplopoda</i>	Adattamento morfologico all'ambiente profondo (depigmentazione, cecità).	Creazione di vari webinar e larga diffusione nei media pubblici in Italia, creazione poster e flyers in distribuzione alle grotte turistiche di AGTI.
2021	<i>Italodytes stammeri</i>	<i>Coleoptera</i>	Monitoraggio della biodiversità endemica in cavità a forte impatto turistico; sinergia con l'Anno Internazionale (IYCK).	Avvio del programma di monitoraggio biologico continuativo presso le Grotte di Castellana (Puglia) in collaborazione con il Gruppo Puglia Grotte; distribuzione digitale dei kit informativi, collaborazione con il WWF per visite e lezioni nelle scuole, collaborazione con la UIS per campagna internazionale.
2022	<i>Miniopterus schreibersii</i>	<i>Chiroptera</i>	Tutela dei mammiferi ipogei; sinergia con l'Anno Internazionale (IYCK).	Incontri formativi e sul campo in Emilia-Romagna (F.S.R.E.R.): corso per guide/GAE a Faenza ("Pipistrelli nelle grotte") e workshop sul campo a Borgo Tossignano per monitoraggio acustico ("Volare con le mani"). Collaborazione con GIRC, Associazione Tutela Pipistrelli e Università Federico II di Napoli, collaborazione con la UIS per campagna internazionale.
2023	Gen. <i>Niphargus</i>	<i>Crustacea Amphipoda</i>	Salvaguardia biologica e alta biodiversità.	Campagne di coordinamento locale per conferenze alle grotte di Falvaterra sulla tutela degli acquiferi; mantenimento della stazione di monitoraggio biologico nelle Grotte di Castellana.
2024	Gen. <i>Speleomantes</i>	<i>Amphibia Caudata</i>	Prevenzione delle micosi (chitridiomicosi).	Diffusione e applicazione tra gli speleologi di protocolli tassativi di biosicurezza sul terreno (pulizia/disinfezione attrezzature); patrocinio e presentazione dati al Convegno Nazionale di Biospeleologia in Sardegna; collaborazione di ricerca con l'Università dell'Aquila.
2025	<i>Triphosa dubitata</i>	<i>Lepidoptera</i>	Incremento della ricerca tassonomica negli ecosistemi di rifugio ipogeo.	Presentazione e pubblicazione degli atti scientifici della campagna al 17 ICS in Brasile; lezioni pratiche in Lazio e registro su piattaforma iNaturalist, fornitura di pacchetti didattici in PowerPoint all'AGTI for la formazione delle guide delle grotte turistiche; collaborazione con la UIS per campagna internazionale.
2026	<i>Meta bournetii</i> / <i>Meta menardi</i>	<i>Araneae</i>	Ecologia della zona crepuscolare, vulnerabilità al riscaldamento microclimatico.	Progetto "Oltre il Buio": Inclusione dei temi della biospeleologia, della fauna ipogea e della fragilità del microclima sotterraneo all'interno delle lezioni e dei programmi didattici rivolti agli studenti delle scuole elementari. Scheda di Monitoraggio: Attivazione e utilizzo di una scheda di monitoraggio (modulo online) per la raccolta di segnalazioni georeferenziate sul territorio (Citizen Science) da parte di speleologi e cittadini per mappare la presenza dei ragni. Creazione del Puzzle Educativo: Sviluppo e progettazione di un puzzle didattico incentrato sulla "grotta tipo" e sulle sue nicchie ecologiche, per spiegare in modo visivo e immediato la biodiversità del sottosuolo.

Azioni di comunicazione ADG



Figura 1. Quadro sinottico delle azioni di comunicazione, divulgazione e citizen science sviluppate nell'ambito della campagna nazionale "Animale di Grotta dell'Anno" (ADG Italia). A sinistra: specie designate ogni anno e canali di coinvolgimento pubblico. Al centro e a destra: estratto iconografico della collezione ufficiale delle "Biospeleo Cards" e dei relativi taxa target associati alle diverse edizioni della campagna (Fonte dati e monitoraggio: Gruppo di lavoro ADG / Società Speleologica Italiana SSI ETS, <https://animalidigrotta.speleo.it>).

Nota di Trasparenza (In conformità con il Regolamento UE sull'Intelligenza Artificiale - AI Act): La presente infografica è stata co-creata e ottimizzata mediante ausilio di sistemi di Intelligenza Artificiale generativa. Le illustrazioni biologiche e la struttura concettuale si basano fedelmente sui campioni iconografici, sulle schede originali e sui dati scientifici ufficiali forniti dal progetto «Animali di Grotta» della Società Speleologica Italiana.

strettamente troglobie, questi predatori apicali rappresentano in modo efficace il legame ecologico e il flusso energetico tra l'ambiente epigeo e il mondo sotterraneo. Il loro ciclo biologico prevede infatti una fase giovanile epigea, caratterizzata da fototassi positiva e dispersione tramite *ballooning*, seguita da un ritorno obbligato ad ambienti bui e umidi durante la maturità riproduttiva. Trattandosi di specie strettamente associate agli ambienti sotterranei della regione paleartica e legate a specifici intervalli di temperatura e umidità, la scelta di *Meta bournetii* e *Meta menardi* come "Animale di Grotta" appare coerente con il loro ruolo ecologico, la loro riconoscibilità e il loro potenziale valore come specie sensibili alle alterazioni microclimatiche degli ambienti ipogei.

5. CONCLUSIONI

La campagna CAOY dimostra la validità di un approccio coordinato e multidisciplinare che trasforma l'esplorazione speleologica in uno strumento attivo di tutela scientifica.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo E. Lana ed E. Lunghi per il materiale fotografico fornito. Ringraziamo inoltre tutta la rete nazionale

dei collaboratori SSI a partire dalla prima edizione del 2019.

BIBLIOGRAFIA

- COGONI R., DI GREGORIO M., CIANFERONI F., LUNGI E. (2023), Monitoring of the Endangered Cave Salamander *Speleomantes sarrabusensis*. Animals: an open access journal from MDPI 13:391.
- CORNIELLO A., DE RISO R. (2000), *Risorse idriche sotterranee in Campania: problemi di monitoraggio*. Geologia dell'Ambiente n. 1.
- DIDONNA F., ORSINI S., RAGONE G. (2025), *Cave animal of the year in Italy: A communication-action campaign for the knowledge and protection of biodiversity in caves*. In: A. Calux (Ed.), 19th International Congress of Speleology: Proceedings, Vol. 6, Sociedade Brasileira de Espeleologia, pp. 171-175.
- FIACCHINI D., CAROTTI G., FUSCO G. (eds) (2008), Convegno Biospeleologia dell'Appennino: studi e ricerche su Anfibi e Invertebrati, con particolare riferimento all'Appennino Umbro-Marchigiano, Parco naturale regionale Gola della Rossa e di Frasassi, GSS - CAI Senigallia. CoSteSS. Tecnostampa Edizioni srl, Ostra Vetere (AN), 80 p.
- INGUSCIO S., RAGONE G., ROSSI E. (2017), *Il magnifico gigante dell'Ade. Biospeleologia della Grotta di Lamalunga*. Editrice Salentina, Galatina, 64 p.
- INGUSCIO S., ROSSI E. (2001), *Animalia Tenebrarum*, Ideemultimediali. Nardò, 96 p.
- ISAIA M., PASCHETTA M., LANA E., PAN-

TINI P., SCHÖNHOFER A. L., CHRISTIAN E., BADINO G. (2011), *Aracnidi sotterranei delle Alpi Occidentali italiane (Arachnida: Araneae, Opiliones, Palpigradi, Pseudoscorpiones)*, Monografia.

KAISER M. et al. (2022), Living in darkness: Exploring adaptation of *Proteus anguinus* in 3 dimensions by X-ray imaging, Giga-Science, 11, 1-8.

LUNGI E. (2018), Ecology and life history of *Meta bournetii* (Araneae: Tetragnathidae) from Monte Albo (Sardinia, Italy). PeerJ, 6, e6049.

MAGRINI P., VANNI S. (1986), Diagnosi preliminare di una nuova sottospecie di *Italdytes stammeri* Muller, 1938 (Coleoptera Carabidae). Atti Mus. Civ. Stor. Nat. Grosseto, N. 7/8, pp. 5-9.

MAMMOLA S., ISAIA M. (2014), *Niche differentiation in Meta bournetii and M. menardi (Araneae, Tetragnathidae) with notes on the life history*. International Journal of Speleology, 43(3), 343-353.

NICOLOSI G., PIANO E., DE BENI E., ISAIA M. (2023), *Double dare: Climate change and volcanic activity threatens local populations of Meta menardi (Araneae, Tetragnathidae) in Sicily*. Global Ecology and Conservation, 48, e02699.

STOCH F., LATELLA L. (2001), *Biospeleologia*. Quaderni habitat, Ministero dell'Ambiente, pp. 53-130.

SITO INTERNET DI RIFERIMENTO

<https://animalidigrotta.speleo.it>

Le aree carsiche protette nelle evaporiti messiniane della Sicilia

Marcello Panzica La Manna

A.N.S. Le Taddarite, Palermo – Società

Speleologica Italiana

E-mail: panzicam@yahoo.com

Protected karst areas in the messinian evaporite rocks of Sicily

Parole chiave: Sicilia, Aree protette, Carsismo, Rocce evaporitiche, Messiniano, Geositi

Key words: Sicily, Protected areas, Karst, Evaporite rocks, Messinian, Geosites

RIASSUNTO

La Sicilia è la regione italiana in cui è possibile rilevare la maggiore estensione di terreni evaporitici che affiorano su una superficie di oltre 1.000 km². Gli affioramenti evaporitici, riconducibili al Gruppo Gessoso-Solfifera del Messiniano, sono presenti principalmente nel settore centro-meridionale dell'Isola oltre che in aree della Sicilia occidentale (province di Palermo e Trapani) ed in minima parte nelle propaggini nord-orientali del gruppo montuoso dei Peloritani, in provincia di Messina, costituiti prevalentemente da rocce carbonatiche e solfatiche; queste ultime rappresentate prevalentemente da gesso di differenti litotipi quali selenitico, alabastrino, balatino, gessarenite e gessopelite. Rari e di modesta estensione sono gli affioramenti di salgemma (halite), presenti invece nel sottosuolo sotto forma di cospicui giacimenti associati anche ad

altri sali alcalini quali kainite, carnallite, ecc. I litotipi gessosi, preponderanti per estensione e, subordinatamente, quelli halitici facenti parte delle successioni evaporitiche, sono sede di notevoli fenomeni carsici rappresentati sia da forme superficiali a grande e piccola scala (depressioni, karren, ecc.) sia da cavità sotterranee attive e fossili.

In considerazione del notevole pregio naturalistico, scientifico e paesaggistico, un cospicuo numero di emergenze carsiche delle evaporiti della Sicilia è stato oggetto di tutela tramite l'istituzione di specifiche Riserve Naturali previste dalla Regione Siciliana nell'ambito della L. R. n. 98 del 1981, "Norme per l'istituzione nella Regione siciliana di parchi e riserve naturali". Le stesse emergenze sono in procinto di essere designate anche quali Geositi ai sensi della L.r. n. 25 dell'11 aprile 2012 "Norme per il riconoscimento, la catalogazione e la tutela dei Geositi in Sicilia"

ABSTRACT

Sicily is the Italian region where the largest outcrops of Messinian evaporite rocks are present, covering an area of more than 1,000 square kilometers, belonging to the Gessoso-Solfifera Group. The principal lithotypes are limestone, gypsum, and alkaline salts (halite and potassium salts). Mainly, the gypsum outcrops are characterized by very interesting and unique karst phenomena, represented by underground (caves, ponors) and epigeal morphologies (karren, dolines, blind valleys, poljes). With Act No. 98 of 1981, the Sicily Regional Government, in addition to several protected areas, established Natural Reserves dedicated to preserving some important karst features related to the evaporite rocks, represented by: Riserva Naturale Lago di Pergusa (Enna Province), Riserva Naturale Lago Preola e Gorgi Tondi (Trapani Province), Riserva Naturale Lago Sfondato, and



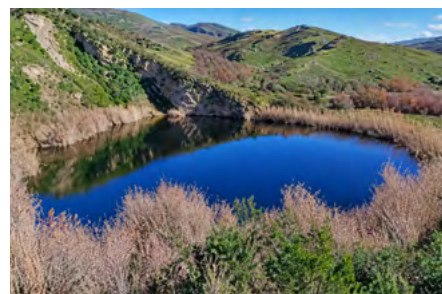
Figura 1. Ubicazione delle Aree carsiche protette nelle evaporiti messiniane della Sicilia



Lago di Pergusa Fonte. ORBS - Reg. Sic.



Lago Preola e Gorghi Tondi. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Lago Sfondato. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Lago Soprano. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Monte Conca. Ph. M. Vattano



C.da Scaleri. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Serre di Ciminna. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Grotta di Entella. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Grotta di Santa Ninfa. Ph. M. Vattano



Grotta di Sant'Angelo. Fonte ORBS - Reg. Sic.



Torre Salsa - Il Pantano. Fonte ORBS - Reg. Sic.

Figura 2. Immagini delle Aree carsiche protette nelle evaporiti messiniane della Sicilia

Riserva Naturale Lago Soprano (Caltanissetta Province); these are natural lakes produced by collapse due to the solution of underlying layers of gypsum and/or halite. Riserva Naturale Monte Conca (Caltanissetta Province), Riserva Naturale Grotta di Entella (Palermo Province), Riserva Naturale Grotta di Sant'Angelo Muxaro (Agrigento Province), and Riserva Naturale Grotta di Santa Ninfa

(Trapani Province), which are very interesting caves, both horizontal and vertical, that in some cases reach more than 1 km in length and/or more than 100 meters in depth. Riserva Naturale Serre di Ciminna (Palermo Province), a large gypsum mountain area with several surface morphologies, such as dolines and karren. Riserva Naturale Geologica di Contrada Scaleri (Caltanissetta Provin-

ce), a small area with several unique micromorphologies like rillen and rinnenkarren on gypsarenites and gypsopelites. Riserva Naturale Torre Salsa (Agrigento Province), a natural area with a large karst polje (Il Pantano), a very uncommon surface feature on gypsum rocks. The same areas are also included in the inventory of Geosites planned by the Regional Act No. 25 of 2012.

Tabella 1. Aree protette nelle evaporiti messiniane della Sicilia

Denominazione	Comune	Caratteristiche	Ente Gestore/Sito Web
Riserva naturale speciale Lago di Pergusa	Enna	Si tratta di una conca lacustre estesa circa 2 kmq su terreni arenaceo-argillosi pliocenici, originatasi per subsidenza derivante da solubilizzazione di sottostanti litotipi evaporitici (gessi e sali alcalini)	Libero Consorzio Comunale di Enna https://www.provincia.enna.it/
Riserva Naturale Integrale Lago di Preola e Gorgi Tondi	Mazara del Vallo (TP)	Specchi lacustri su terreni calcarenitici quaternari, originatisi per subsidenza e crollo derivanti da solubilizzazione di sottostanti litotipi gessosi	WWF Italia https://www.wwfpreola.it/
Riserva Naturale Integrale Lago Sfondato	Caltanissetta	Specchio lacustre scavato su gessi e gessareniti messiniane esteso circa 3.400 mq, originatosi nel 1907 per crollo di sottostanti cavità carsiche nei gessi	Legambiente Sicilia https://www.legambienteriserve.it/lago-sfondato/
Riserva Naturale Orientata Lago Soprano	Serradifalco (CL)	Conca lacustre di subsidenza su terreni calcareo-marnosi (Trubi) derivante dalla solubilizzazione di sottostanti litotipi evaporitici (gessi e sali alcalini)	Libero Consorzio Comunale di Caltanissetta
Riserva Naturale Integrale Monte Conca	Campofranco (CL)	Rilievo costituito da gessi selenitici, caratterizzato dalla presenza di un sistema carsico ipogeo completo (inghiottitoio-risorgenza) con rami attivi e fossili, disposto su più livelli, esteso circa 2,25 km e profondo 132 m	CAI (Club Alpino Italiano) Sicilia www.caisiciliariserve.it
Riserva Naturale Integrale Geologica di Contrada Scaleri	Santa Caterina Villarmosa (CL)	Area di circa 12 ha caratterizzata dalla presenza di diverse microforme carsiche superficiali (<i>rillenkarren</i> , <i>rinnenkarren</i> , forme arrotondate), impostate su gessoareniti, gessopeliti e gesso alabastrino	Libero Consorzio Comunale di Caltanissetta https://www.provincia.caltanissetta.it/010/
Riserva Naturale Integrale Grotta di Entella	Contessa Entellina (PA)	Cavità fossile (paleorisorgenza) nei gessi selenitici sviluppata su tre livelli estesa oltre 1 km	CAI (Club Alpino Italiano) Sicilia www.caisiciliariserve.it
Riserva Naturale Integrale Grotta di Sant'Angelo Muxaro	Sant'Angelo Muxaro (AG)	Sistema carsico ipogeo suborizzontale completo e attivo (inghiottitoio con risorgenza), esteso circa 2 km, nei gessi selenitici, con pozzi affluenti. Nell'area protetta sono presenti anche altre morfologie quali trafori idrogeologici e karren	Legambiente Sicilia www.legambienteriserve.it/grotta-di-s-angelo-muxaro/
Riserva Naturale Integrale Grotta di Santa Ninfa	Santa Ninfa e Gibellina (TP)	Sistema carsico ipogeo suborizzontale completo e attivo (inghiottitoio con risorgenza) nei gessi selenitici, esteso circa 1,5 km, alimentato da una valle cieca	Legambiente Sicilia www.legambienteriserve.it/grotta-di-santa-ninfa/
Riserva Naturale Orientata Serre di Ciminna	Ciminna (PA)	Rilievo di gessi selenitici caratterizzato dalla presenza di innumerevoli forme carsiche epigee (doline e microforme) ed ipogee (inghiottitoi attivi, grotte fossili, cavità tettoniche)	Città Metropolitana di Palermo http://www.cittametropolitana.pa.it/
Riserva Naturale Orientata Torre Salsa	Siculiana (AG)	Area protetta costiera all'interno della quale si rinviene un ampio polje (Il Pantano) impostato sui gessi	WWF Italia https://www.wwftorresalsa.it/

L'area carsica di Monte Acquapuzza (Monti Lepini)

Maria Piro

E-mail: piomaria55@gmail.com

The karst area of Monte Acquapuzza (Lepini Mountains)

Parole chiave: Appennino, Pianura Pontina, carsismo, grotte, sorgenti idrotermali, acquiferi, Lazio, sinkholes

Key words: Apennine chain, Pontine Plain, karst, caves, hydrothermal springs, aquifers, Lazio, sinkholes

Il Monte Acquapuzza, dominato da una torre medioevale e circondato alla base da un tracciato stradale che ricalca quello dell'antica via Pedemontana Volsca, è un modesto rilievo che si stacca dal margine occidentale dei Monti Lepini. Sul colle, un blocco carbonatico delimitato da evidenti linee tettoniche, un fitto reticolo di faglie e fratture costituisce una via preferenziale per la circolazione delle acque e per l'evoluzione del reticolo carsico.

Il margine pontino della catena dei Lepini, sbloccato e ribassato da una serie di faglie dirette, si immerge sotto i depositi continentali plio-pleistocenici della Pianura Pontina. La particolare situazione strutturale dell'area, con la presenza di importanti lineamenti tettonici che delimitano le strutture carbonatiche, favorisce la risalita di acque del circuito idrotermale, più calde di quelle provenienti dal circuito carsico alimentato dalla dorsale dei Monti Lepini, e generalmente mineralizzate, che si immettono nella parte terminale del ciclo carsico mescolandosi alle acque di falda. Le acque fuoriescono infine, spesso in pressione, da sorgenti distribuite alla base del versante calcareo, al contatto con i depositi limo-argillosi, formando a volte piccoli laghetti (Bigi *et al.*, 1988; Bono *et al.*, 1980; Gazzetti *et al.*, 2010; Vigna *et al.*, 2012). Il fenomeno si manifesta particolarmente nell'area di Ninfa, in quella delle sorgenti del gruppo Acquapuzza, e in alcuni laghetti pedemontani, come i Laghi del Vescovo, la cui formazione è probabilmente legata a fenomeni di sink hole (Nisio, 2003). Una manifestazione secondaria, ma presente ovunque nell'area lungo la fascia inferiore dei versanti, è l'emissione di vapori caldi e con caratteristico odore di zolfo dalle cavità carsiche e da fessure della roccia.

Il gruppo di sorgenti dell'Acquapuzza, che affiora con numerose polle presso il Fiume Cavata, con la sua portata complessiva di oltre 3 mc/sec., e la temperatura delle acque che varia fra i 15 e i 18°C (Gazzetti *et al.*, 2010), è ben conosciuto

e utilizzato fin dall'antichità. La sorgente principale di questo gruppo è quella denominata Fiume Coperto, nome derivante dalla presenza di un condotto carsico a monte dell'emergenza. Le polle sorgive alimentano attualmente due

brevi corsi d'acqua, il Fiume Coperto o Fosso della Catena ed il Fosso Cavatella, affluenti del Fiume Cavata.

Il reticolo carsico che interessa il Monte Acquapuzza è strettamente collegato alla presenza delle sorgenti, ed è



Figura 1. La sorgente perenne da cui inizia il Fiume Cavatella, sullo sfondo la cava della Catena e la Torre dell'Acquapuzza



Figura 2. Cristalli di gesso nella Grotta di Fiume Coperto

condizionato dalla presenza di acque re-se chimicamente aggressive a causa della risalita di fluidi termali e di vapori, che accelerano i processi speleogenetici.

La cavità più importante dell'area è la Grotta di Fiume Coperto, che alimenta l'omonima sorgente; si tratta di una galleria di interstrato, suborizzontale, che si è sviluppata nella zona di affioramento della falda; all'interno, un corso d'acqua sotterraneo a lento scorrimento forma pozze e laghetti di acqua leggermente sulfurea, a volte ricoperta da ammassi filamentosi identificati come solfobatteri (Di Russo *et al.*, 1999). Sulla fascia inferiore delle pareti si trovano quasi ovunque crostoni parietali di gesso con colori variabili da bianco a ocra e a violaceo, che ricoprono a tratti le concrezioni calcitiche (Mecchia *et al.*, 2003). Probabilmente il condotto era in comunicazione con una cavità vicina, la Grotta del Laghetto Sulfureo, prima che la circolazione idrica originaria e l'andamento stesso delle grotte fossero stravolti dai lavori eseguiti all'esterno per la costruzione di una ferrovia, oggi abbandonata e non più riconoscibile, e dall'attività estrattiva della Cava della Catena, non più attiva. Attualmente, infatti, non esiste più un collegamento diretto fra la cavità e la sorgente; le acque non fuoriescono dall'imbocco della grotta, ma sono incanalate al di sotto della strada pedemontana con opere in muratura realizzate per favorire il deflusso delle acque ed evitare gli impaludamenti. La situazione attuale dell'area è anche il risultato degli interventi di bonifica della pianura Pontina e della regimazione delle acque fluviali e sorgentizie, che impaludavano l'area.

Altra grotta notevole, anche se in parte troncata dai lavori di escavazione, è la Grotta della Cava; anche questa cavità si è formata nella zona di affiora-

mento della falda, ma è stata abbandonata dall'acqua. E' costituita da una serie di gallerie di interstrato ad andamento labirintico, modellate anche da fenomeni di crollo; anche qui le cristallizzazioni di gesso di affiancano a quelle calcitiche.

Lungo i versanti del Monte Acquapuzza si incontra invece un fenomeno carsico con caratteristiche piuttosto diverse: le numerose diaclasi che intersecano il versante danno origine a cavità fortemente condizionate dalla tettonica, in gran parte semplici "fessure soffianti", con sensibili emissioni di vapori caldi e sulfurei.

L'interesse per l'area dell'Acquapuzza nasce anche dalle numerose testimonianze storiche che evidenziano una costante frequentazione umana. Le sorgenti sono spesso rappresentate nelle antiche cartografie del Lazio; leggende locali narrano che i viandanti si fermassero alle sorgenti dell'"Acqua Putrida" per bagnare il pane nell'acqua sulfurea. E' importante dal punto di vista storico anche la presenza della Torre dell'Acquapuzza, antica dogana dello Stato Pontificio posta a controllo della Via Pedemontana, che costituiva un'alternativa alla Via Appia per evitare il passaggio attraverso le paludi.

L'area delle sorgenti è stata inserita nel database dei geositi del Lazio e censita nell'elenco dei beni culturali a carattere geologico della regione (Casto, 2005; Di Loreto *et al.*, 2012). L'interesse è dovuto a vari aspetti peculiari, in primo luogo la presenza di acque termali e mineralizzate ai livelli attivi e fossili del sistema ipogeo e la conseguente formazione di depositi e speleotemi formati in gran parte da gesso; aspetti che, anche se non rari, non sono frequenti nelle aree carsiche della regione. Lo studio di questi particolari ambienti potrebbe risultare molto importante, inoltre, anche per gli aspetti più specificamente natu-

ralistici e biologici dell'area e dell'habitat sotterraneo, nel quale sono presenti organismi che hanno sviluppato particolari adattamenti alle caratteristiche dell'ambiente (Di Russo *et al.*, 1999).

BIBLIOGRAFIA

- BIGI G., COSENTINO D., PAROTTO M. (1988), *Modello litostratigrafico-strutturale della Regione Lazio*. Carta in scala 1:250.000. Regione Lazio Assessorato alla Programmazione - I.C.A. e Univ. La Sapienza Roma - Dipartimento Scienze della Terra.
- BONI C., BONO P., CALDERONI G., LOMBARDI S., TURI B. (1980), *Indagine idrogeologica e geochimica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella pianura Pontina (Lazio Meridionale)*. Geologia Applicata e Idrogeologia, vol. 15, Bari.
- CAMPONESCHI B. & NOLASCO F. (1984), *Le risorse naturali della Regione Lazio, vol. 2 Monti Cimini e Tuscia Romana*. Regione Lazio, 497 pp.
- CAPELLI G., MASTRORILLO L., MAZZA R., PETITTA M., BALDONI T., BANZATO F., *et al.* (2012), *Carta idrogeologica del territorio della regione Lazio*. Regione Lazio, Università di Roma "La Sapienza", Università Roma Tre.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G., NISIO S. (2008), *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Nat Hazards, 45.
- CASTO L. (A CURA DI) (2005), *I beni culturali a carattere geologico del Lazio: i monti Lepini, Ausoni ed Aurunci*. Volume monografico pubblicato dalla Regione Lazio.
- COSENTINO D., PAROTTO M. & PRATURLON A. (1993), *Schema geologico del Lazio*. In: "Guide geologiche regionali - Lazio". Società Geologica Italiana, BE-MA editrice.
- DI LORETO E., LIPERI L., NOLASCO D., SERICOLA A. (2012), *Il patrimonio Geologico del Lazio: Guida ai Siti Geologici*. Volume monografico pubblicato dalla Regione Lazio.
- DI RUSSO C., LATELLA L. & RAMPINI M. (1999), *La Grotta di Fiume Coperto e il suo significato biologico (Italia centrale-Lazio)*. Speleologia (Società Speleologica Italiana), n. 41, dicembre 1999, p. 57-60.
- GAZZETTI C., LOY A., ROSSI S., SARANDREA P. (2010), *Atlante delle sorgenti della provincia di Latina*. A cura del Settore Ecologia e Ambiente della Provincia di Latina, Gangemi Editore, 304 pp.
- KLIMCHOUK A., FORD D., PALMER A., DREYBRODT W. (2000), *Speleogenesis - Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama.
- MECCHIA G., MECCHIA M., PIRO M., BARBATI M. (2003), *Le grotte del Lazio. I fenomeni carsici, elementi della geodiversità*. Pubblicazione a cura dell'Agenzia Regionale Parchi, (Collana Verde dei Parchi, Serie Tecnica, n. 3), Regione Lazio.
- NISIO S. (2003), *Fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia centrale*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, 16.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1966), *Foglio 159 Frosinone*, Carta geologica d'Italia scala 1:100.000.

Conoscenza e tutela degli ambienti carsici in Italia: “Monumento Naturale Grotta Aosi” - Comune di Prossedi (LT)

Antonio Trotta
Geologo
Email: atotrotta@gmail.com

Knowledge and protection of karst environments in Italy Natural Monument Grotta Aosi' - Municipality of Prossedi (LT)

Parole chiave: Ambienti carsici; Grotta Aosi, Lazio Meridionale, Misure di tutela
Key words: Karstic environments; Aosi Cave, Southern Lazio, Protective Measures

A partire dagli anni Settanta, insieme ad alcuni colleghi del Gruppo Speleologico Romano (G.S.R.), rilevammo la Grotta degli Aosi nella Valle dell'Amaseno, tra i Monti Lepini e gli Ausoni, nel Lazio meridionale, lungo un percorso caratterizzato da fiumare, inghiottitoi e forme carsiche di particolare interesse (Figg. 1 e 2).

Il territorio conserva importanti testimonianze del cammino antico dell'uomo: necropoli protostoriche, terrazzamenti con tracce di capanne primordiali, acquedotti realizzati dai Volsci e dai Romani (Fig. 3) e canaliz-

zazioni che confluiscono nel virgiliano fiume *Amasenum*. È un paesaggio di migrazioni arcaiche, percorsi micaelici, borghi, castelli, torri di avvistamento e resti di insediamenti monastici; un “cammino di evoluzione, transito e transumanza” attraverso le vie d'acqua, osservabile dall'alto del klippen dantesco del *Castrum Cacumen*. Più vicino a noi, nel “cammino della mente”, emerge il paesaggio-scrigno della Campagna Romana, con portatrici d'acqua alle fonti, contadini, mandrie di bufali e greggi al pascolo: luoghi descritti da artisti italiani ed europei, da Ferdinand Gregoro-

vius nella sua “emigrazione intellettuale” nelle terre d'Italia e dalle fotografie ottocentesche di Gabrielle Hébert.

La Grotta degli Aosi è un sistema carsico inserito nel quadro della Rete Natura 2000 e ricade in due Zone Speciali di Conservazione ai sensi della Direttiva Habitat 92/43/CEE: IT6040001 “Grotta degli Aosi” e IT6050023 “Alto corso del Fiume Amaseno”. La cavità contribuisce al bilancio idrico del bacino dell'Amaseno e riveste un rilevante interesse conservazionistico per la presenza di specie di chiroterti di interesse comunitario, tra cui *Rhinolophus hip-*



Figura 1 e 2. Monumento Naturale “Grotta Aosi”

posideros, *Rhinolophus ferrumequinum*, *Rhinolophus euryale*, *Myotis myotis*, *Myotis capaccinii*, *Myotis blythii* e *Miniopterus schreibersii*. La tutela dell'ambiente ipogeo, delle acque sotterranee e della fauna cavernicola costituisce quindi un obiettivo prioritario per la conservazione del sito.

Nel 2000 furono avviate azioni per impedire l'apertura di una discarica di rifiuti nell'area sovrastante la piana di raccolta delle acque confluenti nella Grotta

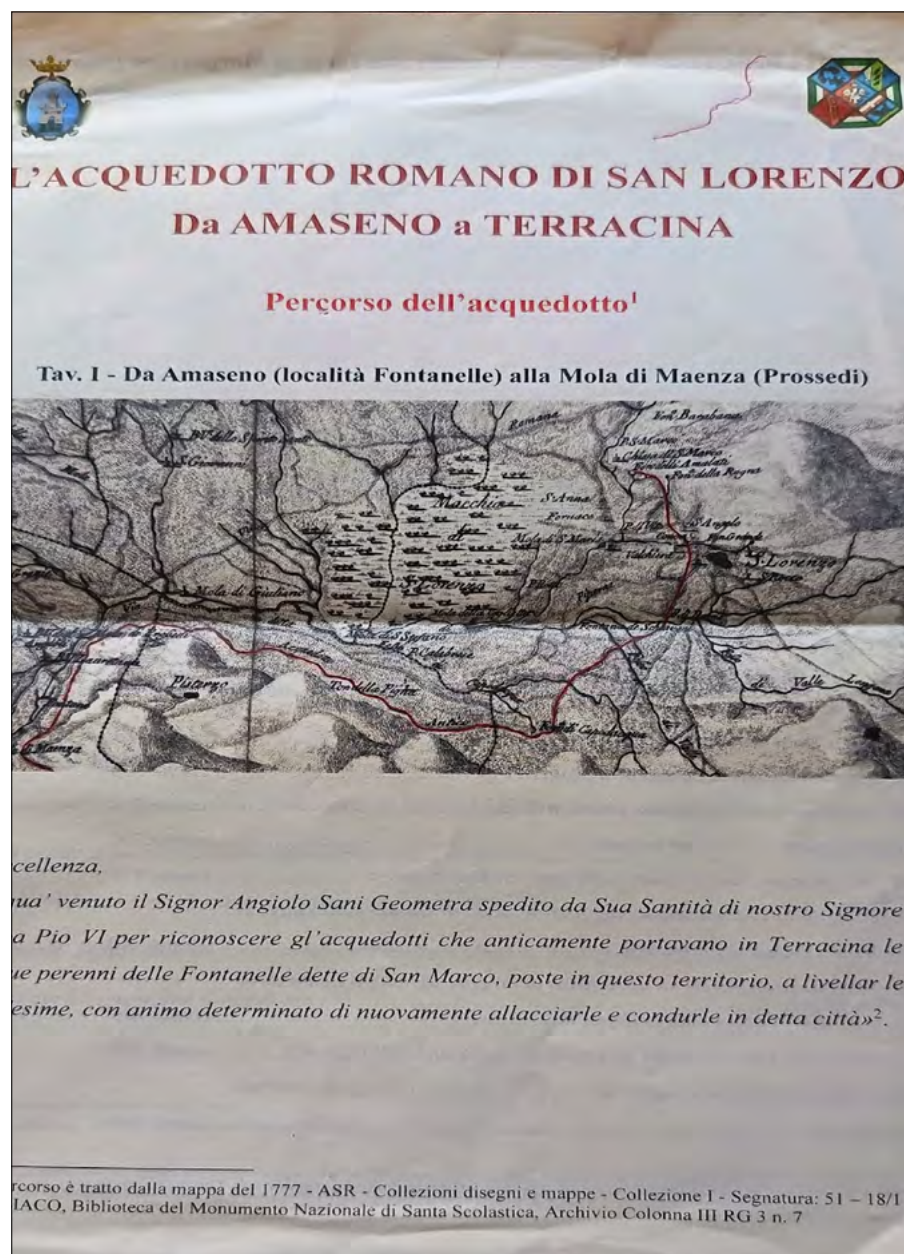


Figura 3. L'Acquedotto Imperiale di San Lorenzo

degli Ausi. A tutela del patrimonio carsico e idrogeologico venne predisposta l'Area di Salvaguardia del campo pozzi di Volaga (PS n. 29), destinato al consumo umano, con il contributo dell'A.T.O. n. 4 "Lazio Meridionale - Latina". La specificità del complesso carsico, unita alla sua funzione didattica ed educativa, ha motivato la proposta al Comune di Prossedi, in sinergia con l'Ecomuseo Agro Pontino, di istituire il Monumento Naturale "Grotta degli Ausi" ai sensi dell'art. 6 della Legge Regionale 6 ottobre 1997, n. 29 e successive modifiche e integrazioni. Il percorso istitutivo si è sviluppato attraverso: 1) la Deliberazione del Consiglio Comunale di Prossedi n. 18 dell'8 novembre 2025, finalizzata alla tutela e valorizzazione di un'area di particolare pregio naturalistico e culturale; 2) la Determinazione n. G02275 del 23 febbraio 2026 della Direzione Regionale Programmazione economica,

fondi europei e patrimonio naturale - Area geodiversità e monumenti naturali; 3) il Decreto del Presidente della Regione Lazio, n. 11579 del 4 aprile 2026. La gestione del Monumento Naturale sarà affidata all'Ente Parco Naturale Regionale Monti Ausoni e Lago di Fondi; l'area interessata, pari a circa 40 ettari, è attualmente in fase di perimetrazione.

BIBLIOGRAFIA

- Regione Lazio, *Proposta di istituzione del Monumento Naturale "Grotta degli Ausi" nel Comune di Prossedi (LT)*, avviso pubblicato il 7 aprile 2026.
- Regione Lazio, *Decreto del Presidente: istituzione del Monumento Naturale "Grotta degli Ausi" nel Comune di Prossedi (LT)*, proposta n. 11579 del 2 aprile 2026.
- Regione Lazio - Parchi Lazio, *Misure di conservazione del SIC/ZSC IT6040001 "Grotta degli Ausi"*, D.G.R. n. 160 del 14 aprile 2016.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza

Energetica, *Natura 2000 - Standard Data Form: IT6040001 "Grotta degli Ausi"*, scheda aggiornata nell'ambito della Rete Natura 2000.

Parchi Lazio, *Grotta degli Ausi - Zona Speciale di Conservazione IT6040001*, scheda dell'area protetta e dati gestionali.

Parks.it, *Zona Speciale di Conservazione Grotta degli Ausi*, scheda dell'area protetta, Comune di Prossedi (LT).

Archeologia Sotterranea, *Grotta degli Ausi*, scheda catastale della cavità, codice catasto 342 La.

Ecomuseo dell'Agro Pontino, *Grotta degli Ausi*, materiali e contributi divulgativi sul sito e sul contesto territoriale.

Paesaggio e testimonianze storico-culturali del “Costone Murgiano” (Puglia)

Pietro Ubbriaco

SIGEA APS Puglia, già Ricercatore/
Docente Politecnico di Bari, DICATECH
Email: pietroubbriaco@gmail.com

Landscape and historical-cultural evidence of the “Costone Murgiano” (Apulia Region)

Parole chiave: paesaggio, geomorfologia, testimonianze storiche
Key words: landscape, geomorphology, historical evidence

RIASSUNTO

L'Altopiano delle Murge è un rilievo calcareo che caratterizza la Puglia centrale: la geomorfologia delle incisioni vallive-Lame è influenzata dall'afflusso idrico sia sul versante Adriatico sia sul versante Bradanico-Ionico. Il paesaggio e le testimonianze storico-culturali indicano il ruolo strategico delle principali alture murgiane (Monte Scorzone, Monte Caccia, Poggio Senarico, Torre Disperata, M. Lamatorta, Madama, Serraficaia, Murgia Monaco, Murgia Pulicchio, Castiglione) in correlazione alla costa Adriatica e alla valle Bradanica Lucana. Le indagini paesaggistiche hanno riguardato principalmente il “Costone Murgiano” e l'area intensa-

mente carsificata che si delinea dal “Costone Lamadama” verso l'estremità Sud-Est di Murgia Castiglione. La presenza di risorse idriche unitamente ai valori paesaggistici hanno determinato l'inse-diamento di siti strategici, già dall'antichità, per il controllo delle vie interregionali Puglia-Basilicata-Campania da Nord-Est a Sud-Ovest e per il controllo della fascia viaria Sud-Est/ Nord-Ovest dalla Puglia interna all'Italia centrale e Settentrionale.

PAESAGGIO

Diverse ricerche hanno riguardato il Costone Murgiano, che si sviluppa a Nord-Ovest da Murgia Castiglione verso Poggio Senarico, da cui è emer-

so il ruolo strategico del sito collinare “Castello di Gravina” (1, 2, 3, 4); i risultati inducono anche ad approfondire gli aspetti paesaggistici correlando l'Altopiano delle Murge con un più ampio territorio interregionale. Lo sviluppo delle indagini ha riguardato le alture murgiane strategiche e le principali incisioni vallive sia del versante Ionico sia del versante Adriatico.

Le numerose Lame, che solcano il Costone Murgiano, canalizzano la risorsa idrica prima nel Torrente Gravina e nel Torrente Basentello i quali affluiscono nel Fiume Bradano. Tale sistema idrografico ha determinato le singolarità paesaggistiche e la presenza di testimonianze storiche che insistono



Figura 1. Sito Ms. San Mauro e delimitazione che segue la fortificazione sottostante



Figura 2. Acquedotto di Pozzo Pateo e sviluppo sud-ovest dalla collina Castello

su un vasto territorio inoltre emergono correlazioni con il tracciamento delle antiche vie nell'area Apulo-Lucana sino ad interessare le più lontane Regioni Campania e Calabria. In particolare emerge il ruolo ambientale e strategico dell'area marcatamente carsificata che si delinea dall'altura "Lamapera" (670 msl) verso Sud-Est dove il "Costone" s'incurva come una sorta di golfo marino e le Lame hanno determinato con il loro apporto idrico il grande Bacino Maricello-Pantano; al bordo Sud-Est delimitato da Murgia Castiglione si apre la grande e profonda Grave del Pantano.

Sulla linea di costa ideale, erosa, insiste la Lama Cipriani, a ridosso di tale sistema si è delineata una singolare collina a forma di isola, delimitata da corsi d'acqua alimentati anche da sorgenti-Fontane antiche: F. San Mauro, F. Cipriani, F. San Paolo, F. A Due Boccali, F. La Chianca. Sul territorio di Lama Cipriani insistono antiche Masserie: Ms. Martoro, Ms. Caporusso, Ms. San Mauro, Ms. Cipriani. Ms. San Mauro in particolare si qualifica come sito strategico più antico ed è forticata da una struttura muraria possente (Fig. 1), in prossimità è ubicata una Fontana con relativo acquedotto, sul sito emerge inoltre un reticolo di canalizzazioni idriche che unitamente alla presenza di materiali/scorie siderurgiche la rendono ascrivibile a sito in cui si produceva acciaio ed altri materiali; un'insieme che indica un importante ruolo in epoca Romana. In vicinanza, sul fianco sud, è possibile delineare una efficace direttrice verso Nord-Ovest che raggiunge Ms. Costarizza (alla base

del Costone Lamadama) e Monte Fornasiello, lo sviluppo raggiunge Lama Poggiorsini, Lama Torta e Murgia Garagnone. Un sistema di alture efficace da cui è possibile correlarsi con Minervino (sito castellare). Minervino è l'ultimo nucleo urbano del rilievo murgiano da cui si domina la pianura di Cerignola sin verso Foggia per raggiungere la costa Adriatica Molisana di Campomarino. Da San Mauro verso Sud-Est è possibile ricostruire, sulla stessa direttrice, una correlazione verso la collina Castello-Gravina (bordo Pozzo Pateo) (Fig. 2) e verso la Murgia Materana, riferimento che si proietta verso Ginosa (Ta) e la relativa costa Ionica. Sempre dal sito San Mauro è possibile delineare un corridoi paesaggistico, ortogonale al suddetto, quindi verso Sud-Ovest che raggiunge l'altura "San Marco" (563 msl), della collina Irsina (Mt), un sito strategico a ridosso del Fiume Bradano; mentre nel verso opposto Nord-Est è possibile seguire il passo-spartiacque di Ms. Maiorana, tangente al promontorio Lamacantarella, e risalire il rilievo di Murgia Portico/Manarella che conduce all'altura della Dolina Pulicchio, quindi s'incrociano le successive Dolina Guriolamanna e Dolina Trepaduli, dal riferimento Murgia Pulicchio è possibile indirizzarsi agevolmente per il versante Adriatico incrociando il villaggio Palombaio (Bitonto) e la costa di Santo Spirito (Bari). È ipotizzabile un "corridoio" parallelo a questo suddetto considerando come riferimento meridionale la collina Castello Gravina/Pozzo Pateo: lo sviluppo interseca la collina

"Murgetta", il villaggio San Giovanni sino a raggiungere Modugno e la costa San Cataldo di Bari. In verso opposto, a Sud-Ovest, si raggiunge l'ambiente rupestre "Madonna della Stella", sul Torrente Gravina, successivamente la collina "Difesa Grande" incrociando il sito "Ms. Pozzo Nuovo" da cui è possibile correlarsi con la collina Lucana "Corona Romana" e con il rilievo montuoso di Tricarico; dopo s'impone la montagna "Serra Longa" (1503 msl) che si proietta sin verso la costa Tirrenica di Palinuro.

Il ruolo strategico del sito San Mauro come riferimento intermedio è ancor più evidente se consideriamo un altro corridoio paesaggistico ricostruibile sulla fascia settentrionale: risulta idoneo Monte Fornasiello infatti a Nord-Est è ben correlato con la vicina altura di Seraficaia (672 msl) che controlla la costa Adriatica di Giovinazzo mentre a Sud-Ovest si raggiunge, lungo l'incisione di San Cataldo (Poggiorsini), Fontana Vetere e il colle Monte Serico sul fianco "Porta Peragine", la proiezione interseca Monte Moltone (815 msl) (Oppido Lucano), Monte Motola (1700 msl) e la costa Tirrenica (Ascea).

CONCLUSIONI

Il Costone Murgiano evidenzia un ruolo importante per i valori paesaggistici, in particolare l'area più carsificata è caratterizzata da un bacino ricco di risorse idriche su cui si sono insediate Masserie e siti strategici per il controllo delle antiche vie indirizzate verso il Mare Adriatico, il Mar Ionio e il Mar Tirreno. Il "Costone" del rilievo calcareo pur essendo caratterizzato da modeste alture riesce a correlarsi con un vasto territorio come dimostrano le diffuse testimonianze di siti e strutture storiche.

BIBLIOGRAFIA

- UBBRIACO P. (2005), *Il sito di Masseria San Mauro e l'Alta Murgia: Ambiente e Testimonianze storico-culturali*. Sede Ente Parco Nazionale dell'Alta Murgia - Gravina in Puglia, 21/09/2005.
- UBBRIACO P. (2012), *Fuori dai banchi... Esploro l'ambiente*. Centro Studi Terre dell'Altopiano, Gravina (BA), Marzo 2012, Tipografia Eurografica.
- UBBRIACO P. (2023), *Il sito di San Mauro: Paesaggio, Ambiente, Prospettive*. Convegno di studi Fondazione E. Pomarici Santomasì - Monastero Santa Sofia - Gravina in Puglia, 10/11/2023.
- UBBRIACO P. (2025), *Landscape, geomorphology, and historical evidence of the "Castello" hill in Gravina (Apulia Region)*. Giornata di studi "Geodiversità e patrimonio geologico nelle aree urbane", Roma 6/10/2025 - sala convegni CNR.



PROTEGGERE L'AMBIENTE

è nella nostra natura

PREVISIONE E PREVENZIONE DEI RISCHI DI ORIGINE NATURALE INFORMAZIONI DI CARATTERE AMBIENTALE



Processi ed effetti

Arpa si occupa di studi e monitoraggi nel campo della geologia e geomorfologia, in particolare dei processi di modellamento naturale attivi sul territorio (piene fluviali e torrentizie, frane) e dei processi in ambiente di alta quota (ghiacciai, valanghe, permafrost). L'aggiornamento del quadro conoscitivo del dissesto del territorio, soprattutto in seguito ad eventi alluvionali, è fondamentale per l'individuazione delle zone soggette a pericolosità geomorfologica



Previsioni

Le competenze geologiche confluiscono nel sistema di allerta del Centro funzionale per la previsione dei rischi naturali, con valutazioni sulla probabilità di innesco di fenomeni gravitativi di diversa tipologia



Monitoraggio

Arpa gestisce la Rete Regionale di Controllo sui Movimenti Franosi, con più di 200 siti di monitoraggio sul territorio regionale, con strumenti di misura di tipo superficiale e profondo. Gestisce inoltre la Rete di monitoraggio del permafrost nelle Alpi piemontesi: direttamente collegato alle caratteristiche climatiche, il permafrost è un importante indicatore per la comprensione dei cambiamenti climatici in area montana, dei rischi naturali in alta quota e del ciclo idrologico delle terre alte



Geoportale

I dati ambientali raccontati da noi.
Raccolta di mappe, testi, e grafici che descrivono l'ambiente



Il monitoraggio delle sorgenti in rocce carbonatiche: alcuni esempi nel Piemonte centro-meridionale

Carbonate springs monitoring: a case study from central-southern Piedmont

Parole chiave: acquiferi carsici, monitoraggio, idrodinamica, temperatura e conducibilità elettrica delle acque

Key words: Karst aquifers, monitoring, hydrodynamics, temperature and electrical conductivity of water

Bartolomeo Vigna

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino. SSI
Email:

bartolomeo.vigna@formerfaculty.polito.it

Nel settore centro-meridionale del Piemonte l'installazione di stazioni di monitoraggio di acquiferi impostati in rocce carbonatiche è iniziata nel 1982 attraverso la realizzazione di una bocca a stramazzo dotata di un idrometrografo a galleggiante ubicata nel collettore della Grotta di Bossea (Civita *et al.*, 1990). Sono stati gli speleologi del Gruppo Alpi Marittime del CAI di Cuneo coadiuvati nell'anno successivo dai ricercatori del Politecnico di Torino che hanno iniziato gli studi su tale acquifero seguiti negli anni successivi dalla installazione di bocche a stramazzo presso la sorgente delle Fuse (nel 1984 con il contributo degli speleologi del GSI) e nel collettore della Grotta di Rio Martino (nel 2002 con gli speleologi di Saluzzo).

Negli anni successivi, grazie anche all'impiego di acquisitori automatici di livello e poi di sonde multiparametriche, la rete di monitoraggio delle sorgenti carsiche si è estesa ulteriormente grazie anche ai fondi messi a disposizione dal settore delle Risorse Idriche della Regione Piemonte. Ad oggi sono ben 9 le sorgenti monitorate dal DIATI (sorgenti di Bossea, delle Vene, delle Fuse, di Mondini, del Pesio, dell'Ellero, di Rai, del Tenda, di Rio Martino).

Il monitoraggio delle sorgenti della Dragonera e di Borello Superiore è iniziato nel 2004 e a partire dal 2014 ed è stato preso in carico da Arpa Piemonte. Attraverso una enorme quantità di dati provenienti dal monitoraggio di tali sorgenti è stato possibile evidenziare significative differenze di funzionamento tra i diversi acquiferi esaminati impostati nelle successioni carbonatiche triassico-cretaciche dei domini Brianzonese e Piemontese (Vigna, 2007; Vigna *et al.*, 2012; Vigna 2013). Tali differenze sono principalmente legate al rapporto tra il

processo carsico e lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi. In situazioni con rocce carbonatiche altamente fratturate la circolazione dell'acqua in profondità si disperde nella moltitudine delle discontinuità presenti.

La carsificazione non riesce quindi a generare vie di flusso preferenziali (collettori principali o secondari) e la circolazione delle acque si imposta in una rete di flusso piuttosto omogenea con valori di permeabilità ridotte (vedi sorgenti Rai e del Tenda).

In tali situazioni possono essere presenti anche cavità di notevoli dimensioni (come ad esempio il grande ambiente intercettato dalle gallerie drenanti alle sorgenti del Peschiera presso Rieti) ma tali vuoti, non essendo collegati a vie di drenaggio importanti, hanno soltanto una funzione capacitiva. E' quindi la presenza o meno di collettori principali e secondari in corrispondenza dell'intera rete di flusso a condizionare l'idrodinamica e la variazione dei parametri chimico-fisici delle acque sorgive. Presso le sorgenti delle Fuse, delle Vene (in Valle Tanaro) e del Pesio (nella vallata omonima) si registrano portate molto ridotte in assenza di apporti infiltrativi (tra 30-60 l/s) e picchi di piena con valori superiori a 1000-3000 L/s nell'arco di poche ore dall'inizio delle precipitazioni (Vigna & Banzato, 2015).

Anche la temperatura e la mineralizzazione delle acque sono condizionate dalla presenza di importanti collettori carsici con evidenti cadute dei valori legate all'arrivo nell'arco di poche ore delle acque di neoinfiltrazione.

Una funzione altrettanto importante nella caratterizzazione degli acquiferi in rocce carbonatiche è legata alla presenza della microcarsificazione che può interessare estese porzioni dell'ammasso

roccioso e che gioca un ruolo capacitivo estremamente importante. Con tale termine si intende il risultato del processo carsico sulle discontinuità presenti nella struttura carbonatica (in particolare sui giunti di strato) con la formazione di estese reti di condotti a pieno carico di dimensioni da centimetriche a decimetriche in grado di ospitare ingenti volumi idrici. La presenza di queste riserve è messa in luce dai processi di pistonaggio (rapidi incrementi della portata, della temperatura e della conducibilità elettrica delle acque in seguito degli eventi di piena) che si osservano alle sorgenti della Dragonera o di Bossea (Vigna & Banzato, 2009). Sono quindi i dati di monitoraggio che si possono acquisire presso le sorgenti (andamento nel tempo della portata, della temperatura e della conducibilità elettrica) a fornire le indicazioni più utili per comprendere il funzionamento degli acquiferi in rocce carbonatiche.

La raccolta di tali dati è finalizzata anche alla valutazione della vulnerabilità degli acquiferi ed alla individuazione ed al dimensionamento delle aree di salvaguardia delle sorgenti (Vigna *et al.*, 2010, Banzato *et al.*, 2014). In genere gli acquiferi carsici vengono considerati molto vulnerabili all'inquinamento mentre i dati acquisiti evidenziano anche situazioni di vulnerabilità medie o medio-basse tipiche dei sistemi con circolazione dispersiva (come le sorgenti Rai o di Tenda).

Estremamente interessanti sono i dati acquisiti nell'arco di diversi decenni di monitoraggio ad alta frequenza (intervallo orario) che possono fornire utili indicazioni riguardanti il comportamento di tali acquiferi in seguito ai cambiamenti climatici. Attraverso una raccolta dati di lungo periodo è possibile cominciare

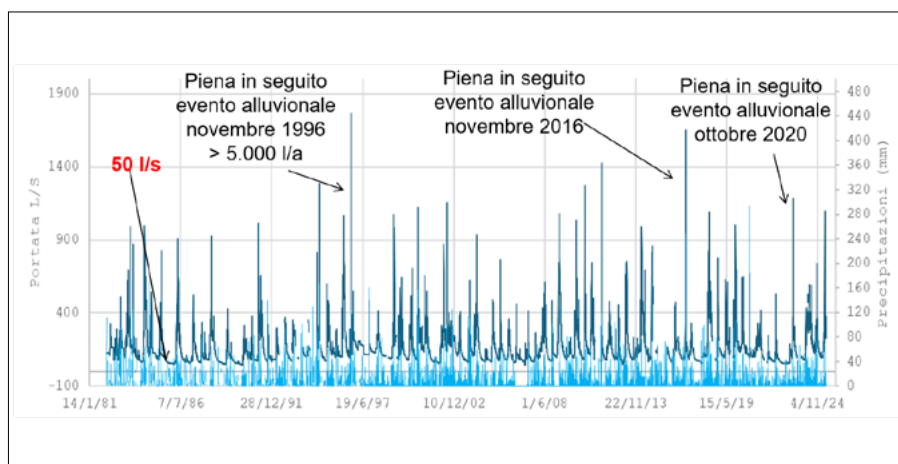


Figura 1. Andamento giornaliero della portata del collettore di Bossea negli anni 1982-2025: le piene principali sono legate ai processi di fusione nivale in concomitanza delle precipitazioni primaverili e alle intense piogge autunnali. I minimi di portata sono stati registrati nel periodo invernale negli anni '80-'90, legati alle basse temperature

a fornire valide risposte ad alcuni fondamentali quesiti. L'incremento delle temperature come condiziona i processi di evapotraspirazione importanti per la ricarica degli acquiferi? Il cambiamento delle modalità delle precipitazioni con eventi estremi sempre più frequenti (eventi alluvionali e lunghi periodi di siccità) come condiziona i processi infiltrativi? La qualità delle acque sotterranee viene condizionata da tutti questi processi? E' possibile, attraverso modelli basati sui dati registrati negli anni, stimare la riduzione quantitativa e qualitativa di queste risorse sotterranee che si potrà verificare in futuro?

Nel sistema carsico di Bossea dove sono a disposizione 43 anni di dati (Fig. 1) la retta di tendenza sembra indicare una relativa costanza nel tempo della portata con valori minimi negli anni 80-90 (intorno ai 50 L/s) che si verificavano nei mesi invernali a causa delle temperature dell'aria molto basse e di conseguenza ai ridottissimi processi infiltrativi. Negli ultimi anni il flusso idrico negli stessi mesi è quasi raddoppiato a causa delle temperature ben maggiori

con precoce fusione del manto nevoso. I valori minimi si registrano ora in genere nella stagione autunnale dopo lunghi periodi in assenza di precipitazioni. Tale situazione si è ben evidente in seguito alla situazione di siccità che si è verificata negli anni 2021-2022 (Fig. 2).

Molto interessante è l'andamento delle portate in seguito agli eventi alluvionali del novembre 2016 (Nannoni et al., 2018) e di ottobre 2020. In particolare nel 2020 il picco di piena ha raggiunto valori simili a quelli che si registrano in seguito alla azione combinata dei processi di fusione nivale e delle precipitazioni primaverili a causa del significativo ruscellamento delle acque di pioggia nelle aree assorbenti legato ad apporti di notevole intensità oraria. Nell'evento del novembre 1996 la portata idrica ha superato i 5.000 L/s in seguito ad una temporanea interruzione del flusso idrico legata ad un collasso di materiale fine depositato nei condotti della zona satura con ostruzione della via di flusso principale (Peano et al., 2005). Sono tuttora in fase di preparazione una serie di pubblicazioni che potran-

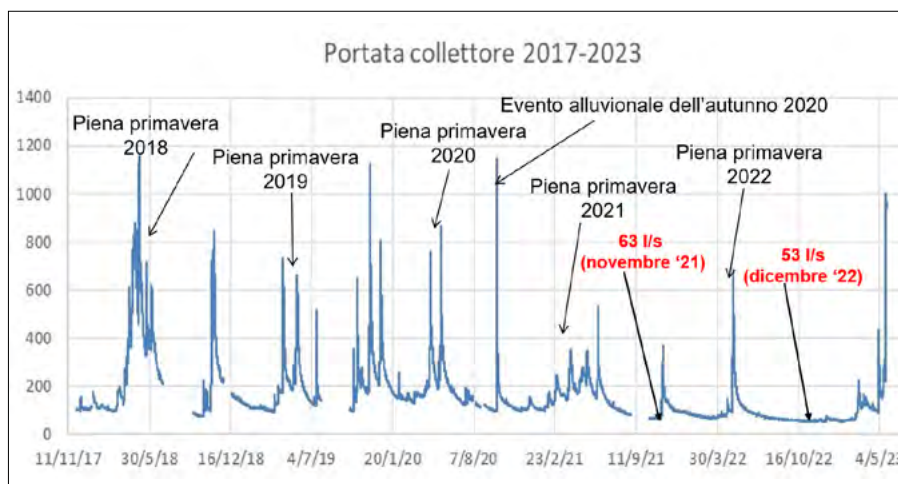


Figura 2: Andamento delle portate orarie del collettore di Bossea tra novembre 2017 e maggio 2023 con evidenziate le magre del novembre 2021 e del dicembre 2022

no fornire ulteriori approfondimenti sulle complesse problematiche inerenti alla relazione tra comportamento degli acquiferi in rocce carbonatiche e variazioni climatiche relative alle diverse sorgenti monitorate.

BIBLIOGRAFIA

- BANZATO C., DE WAELE J., FIORUCCI A., VIGNA B. (2011), *Study of springs and karst aquifers by monitoring and geochemical analysis*. Hydrology & hydrogeology of the karst, Besancon (Francia) 1-3/09/2011, pp. 4, 2011.
- BANZATO C., GOVERNA M., PETRICIG M., VIGNA B. (2014), *The importance of monitoring for the determination of aquifer vulnerability and spring protection areas*. IAEG - XII Congress, Torino (Italia) 15-19 settembre, pp. 1379-1386.
- CIVITA M., GREGORETTI F., MORISI A., OLIVERO G., PEANO G., VIGNA B., VILLAVECCHIA E., VITTONI F. (1990), *Atti della stazione scientifica della Grotta di Bossea*.
- NANNONI A., VIGNA B., FIORUCCI A., DE WAELE J. (2018), *Bossea cave system response to an exceptional flood event*. 12th Euro-Speleo Forum. Verein für Höhlenkunde Ebensee, Ebensee, Austria, pp. 4.
- PEANO G., VIGNA B., VILLAVECCHIA E. (2005), *L'evento alluvionale dell'ottobre 1996 nella Grotta di Bossea*. Atti del Convegno Nazionale "L'ambiente carsico e l'uomo", Bossea 5-8 Settembre 2003.
- VIGNA B., FIORUCCI A., MARCHIOLATTI F., BANZATO C., MOINTRE B. (2012), *Synergic application of different methodologies for the characterization of aquifers in carbonate rocks*. Rendiconti della società geologica italiana. In: Bandi editore, 86° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana, Arcavacata di Rende 18-20 settembre 2012, pp. 3, 2012, Vol. 21, pagine da 881 a 883, ISSN: 0392-3037.
- VIGNA B. (2007), *Schematizzazione e funzionamento degli acquiferi in rocce carbonatiche*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia. Serie Geologica e Geofisica, pp. 6, 2007, Vol. 19.
- VIGNA B., BANZATO C. (2009), *The "piston flow effect in karst aquifers: tree example from the Maritime Alps (Cuneo North Italy)*. In: *Epitome*, Volume 3 Geotitalia 2009, Rimini, Italy 9-11 settembre, pp. 1, 2009, ISSN: 1972-1552.
- VIGNA B., FIORUCCI A., BANZATO C., CIVITA M. (2010), *Hydrodynamics, geochemistry and vulnerability of springs fed by highly karstified aquifers (Ligurian Alps - Piedmont, Italy)*. In: Rendiconti Online, Società Geologica Italiana, 85° Congresso Nazionale, Pisa 6-8 settembre 2010, pp. 2, 2010, Vol. Volume 1.
- VIGNA B. (2013), *Modelli concettuali relativi agli acquiferi in rocce carbonatiche*. La ricerca carsologica in Italia, Frabosa Soprana, 22-23 giugno. pp. 13.
- VIGNA B., BANZATO C. (2015), *The hydrogeology of high-mountain carbonate areas: an example of some Alpine systems in Southern Piedmont (Italy)*. In: *Mediterranean karst hydrogeology Springer*, pagine 267-280.



www.sigea-aps.it

5X1000

Aiutaci a promuovere
la **CULTURA GEOLOGICA** e
la **TUTELA DELL'AMBIENTE**

DESTINA IL
CINQUE X MILLE
ALLA **SIGEA-APS**
C.F. 04336801008

Destinando il tuo 5xmille alla SIGEA-APS ci aiuterai a promuovere la cultura geologica e la tutela dell'ambiente.

COME FARE?

- Nella **scheda per la scelta della destinazione dell'8, del 5 e del 2 per mille dell'IRPEF** (da compilare)
- sezione dedicata alla **scelta per la destinazione del 5 per mille**
- **riquadro** «SOSTEGNO DEGLI ENTI DEL TERZO SETTORE ISCRITTI NEL RUNTS DI CUI ALL'ART. 46, C. 1, DEL D.LGS. 3 LUGLIO 2017, N. 117, COMPRESSE LE COOPERATIVE SOCIALI ED ESCLUSE LE IMPRESE SOCIALI COSTITUITE IN FORMA DI SOCIETÀ, NONCHÉ SOSTEGNO DELLE ONLUS ISCRITTE ALL'ANAGRAFE»
- apponi la tua firma e inserisci il codice fiscale della SIGEA-APS: **04336801008**

SCADENZE:

30 giugno 2026: Modello Redditi Persone Fisiche presentato in forma cartacea tramite ufficio postale

30 settembre 2026: Modello 730 precompilato o ordinario

2 novembre 2026: Modello Redditi Persone Fisiche presentato per via telematica

**SOSTEGNO DEGLI ENTI DEL TERZO SETTORE ISCRITTI NEL RUNTS DI CUI
ALL'ART. 46, C. 1, DEL D.LGS. 3 LUGLIO 2017, N. 117, COMPRESSE LE COOPERATIVE
SOCIALI ED ESCLUSE LE IMPRESE SOCIALI COSTITUITE IN FORMA DI SOCIETÀ',
NONCHÉ SOSTEGNO DELLE ONLUS ISCRITTE ALL'ANAGRAFE**

FIRMA *La tua firma*

Codice fiscale del beneficiario (eventuale) **0 4 3 3 6 8 0 1 0 0 8**

SE SEI ESONERATO DALLA PRESENTAZIONE DELLA DICHIARAZIONE DEI REDDITI PUOI COMUNQUE DESTINARE IL TUO 5 PER MILLE ALLA SIGEA-APS.

PASSAPAROLA

Invita i tuoi amici, familiari, colleghi a donare il loro 5x1000 alla SIGEA-APS:

- scarica la card 5x1000 SIGEA-APS e condividila su **WhatsApp**

Ricorda che il 5x1000 non ti costa nulla, è una parte delle tasse che già paghi.



Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

www.sigea-aps.it - info@sigeaweb.it



La collana completa delle Monografie di Geologia Ambientale è disponibile sul sito della SIGEA-APS
alla pagina dedicata: <https://sigea-aps.it/monografie-di-geologia-ambientale/>



Aiutaci a promuovere
la CULTURA GEOLOGICA e la TUTELA DELL'AMBIENTE

DESTINA IL **5X1000** ALLA SIGEA-APS
C.F. 04336801008

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

www.sigea-aps.it - info@sigeaweb.it