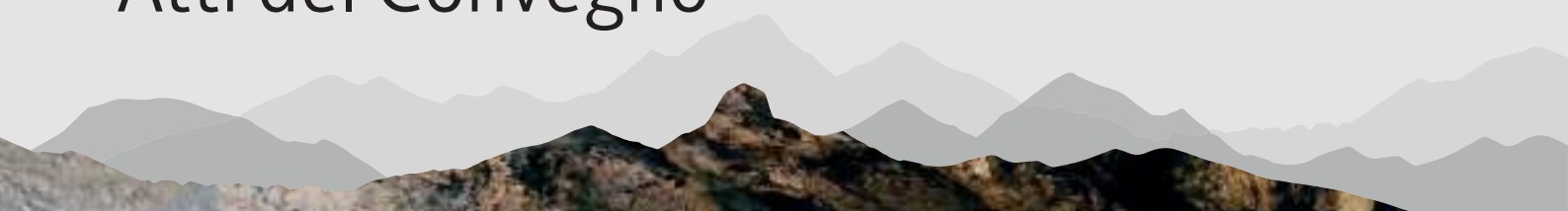


Speleo2025: acque e grotte senza frontiere

Cultura scientifica e valorizzazione del patrimonio speleologico

Gorizia 14 | 15 giugno 2025

Atti del Convegno



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA



Speleo2025: acque e grotte senza frontiere

Cultura scientifica e valorizzazione del patrimonio speleologico

Gorizia 14 | 15 giugno 2025

Atti del Convegno

a cura di Furio Finocchiaro e Giuseppe Muscio

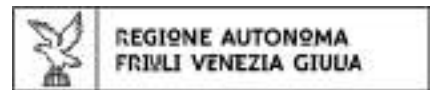
Il Convegno Regionale di Speleologia del Friuli Venezia Giulia

Speleo2025 è organizzato dalla

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Servizio geologico

e dalla

Federazione Speleologica Regionale del FVG - APS



Con la collaborazione
del Comune di Gorizia, nell'ambito di Go!2025



GO! 2025



Con il patrocinio di:

Questo volume è dedicato a **Furio Premiani (1946-2025)**,
per dieci anni presidente della Federazione Speleologica Regionale

Sede del Convegno

L'incontro si è svolto a Gorizia, presso l'Auditorium della Cultura Friulana

Responsabili degli Enti organizzatori

Massimo Zanetti, Direttore del Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

Furio Finocchiaro, Presidente della Federazione Speleologica Regionale del Friuli Venezia Giulia

Paolo Manca, Servizio geologico, Coordinatore struttura stabile gestione del patrimonio speleologico regionale

Comitato organizzatore

Fiorella Bieker

Furio Finocchiaro

Gianpaolo Fornasier

Giuseppe Muscio

Maurizio Tavagnutti

Comitato scientifico

Graziano Cancian

Furio Finocchiaro

Giuseppe Muscio

Michele Potleca

Luca Zini

Mostra

In occasione del Convegno è stata allestita, nello stesso edificio, la mostra

Le Grotte fra Esplorazione e Ricerca

Il Patrimonio Speleologico del Friuli Venezia Giulia

foto di copertina: Paolo Manca e Michele Potleca

La Legge regionale 15/2016 riconosce nel patrimonio speleologico un bene comune da tutelare e studiare, individuando nei gruppi e nelle associazioni speleologiche interlocutori privilegiati della pubblica amministrazione. Essi rappresentano infatti una rete capillare di ricerca e volontariato scientifico che opera quotidianamente nel monitoraggio e nell'aggiornamento del Catasto Speleologico Regionale (CSR), strumento tecnico e conoscitivo fondamentale per la pianificazione territoriale, la gestione del patrimonio speleologico e la salvaguardia ambientale. La piattaforma del CSR consente oggi di raccogliere, validare e condividere dati geomorfologici, idrogeologici, biologici e ambientali attraverso la collaborazione diretta dei cittadini e dei gruppi speleologici: un modello di citizen science che traduce la passione e la competenza dei volontari in conoscenza pubblica, mettendo a disposizione delle istituzioni e della comunità un patrimonio informativo aggiornato e partecipato.

In questo quadro, il convegno "SPELEO2025: acque e grotte senza frontiere - Cultura scientifica e valorizzazione del patrimonio speleologico", organizzato dalla Federazione Speleologica Regionale e dal Servizio Geologico della Regione Friuli Venezia Giulia rappresenta un momento di sintesi e rilancio della collaborazione fra istituzioni, mondo associativo ed Enti di ricerca, anche transfrontalieri. Ai lavori in aula è stata associata una mostra dal titolo "Le grotte fra esplorazione e ricerca: il patrimonio speleologico del Friuli Venezia Giulia", inaugurata durante il convegno ed installata per circa un mese presso l'Auditorium della Cultura Friulana, che ha ospitato i lavori congressuali. L'evento si è svolto in collaborazione con il Comune di Gorizia che messo a disposizione non solo l'Auditorium e gli spazi per la mostra, ma anche la necessaria sorveglianza.

L'evento è stato inserito nel programma di GO 2025! - che vede Gorizia e Nova Gorica Capitale Europea della Cultura - conferendo al convegno ed alla mostra una dimensione culturale, transfrontaliera e partecipativa: non solo approfondimento scientifico, ma anche occasione per riflettere sul ruolo delle grotte, delle acque sotterranee e dei territori carsici come luoghi di sapere, identità e relazione tra comunità quali l'associazionismo, le istituzioni, gli enti di ricerca e non ultimo i cittadini sia come abitanti delle aree carsiche che come frequentatori più o meno occasionali.

Il risultato ottenuto è partito da una co-progettazione sinergica tra la Regione e la Federazione Speleologica Regionale, nel contesto normativo del D.lgs 117/2017 a cui si è dato seguito con apposita convenzione, diventando così un esempio concreto di sussidiarietà orizzontale: la pubblica amministrazione e il Terzo Settore condividono obiettivi, metodi e strumenti per la conoscenza e la valorizzazione del territorio. I lavori presentati al convegno e raccolti in questi atti rappresentano una testimonianza viva di questo approccio integrato: studi scientifici, rilievi tridimensionali, modelli idrogeologici, esperienze di monitoraggio e progetti di divulgazione. La loro importanza va oltre l'ambito specialistico, poiché contribuisce a costruire una coscienza collettiva del sottosuolo come ecosistema fragile, risorsa d'acqua e archivio naturale della storia geologica e umana del Friuli Venezia Giulia.

La speleologia, in questa prospettiva, si afferma come pratica di cittadinanza scientifica e strumento di partecipazione, capace di unire ricerca professionale, volontariato e responsabilità civica nella cura del patrimonio naturale e culturale comune.

Fabio Scoccimarro
Assessore regionale alla difesa dell'ambiente,
energia e sviluppo sostenibile
della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia



L'apertura del Convegno: da sinistra Furio Finocchiaro (Presidente della Federazione Speleologica Regionale), Massimo Zanetti (Direttore del Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia) e Sergio Orsini (Presidente della Società Speleologica Italiana) (foto A. Miani).



La capiente Sala della Cultura Friulana di Gorizia durante il Convegno (foto A. Miani).

Il primo convegno regionale di speleologia del Friuli Venezia Giulia risale al lontano 1973, dieci anni dopo la scoperta “esplorativa” della zona carsica del Massiccio del Monte Canin, che aveva riportato la speleologia della nostra Regione sul palcoscenico nazionale. A quei tempi le esplorazioni erano spedizioni collettive e piramidali, i tempi di percorrenza lunghissimi, con scalette superleggere e illuminazione a carburo.

Dopo 50 anni, tutto è cambiato; tutto tranne l’esigenza e l’importanza di lasciare traccia scritta delle esplorazioni e delle ricerche. Nel Catasto Speleologico Regionale, ma non solo.

È cambiato anche il modo di conservare e trasmettere queste informazioni. Esistono Internet, i file pdf, le riviste on line, i siti specializzati. La Federazione, in pieno accordo con il Servizio geologico, ritiene che un volume reale, sia pure insieme alla possibilità di scaricare i file pdf, resti comunque il modo migliore per conservare e trasferire i risultati delle attività speleologiche dei gruppi regionali.

Il titolo del Convegno che si è svolto a Gorizia è stato “Acque e grotte senza frontiere Cultura scientifica e valorizzazione del patrimonio speleologico”. La sede di Gorizia è stata una scelta naturale: insieme a Nova Gorica è capitale europea della cultura per il 2025, una sede transfrontaliera, come alcuni degli acquiferi carsici più importanti della Regione.

Il convegno è stato organizzato su tre sessioni:

- > Speleologia e idrogeologia delle aree carsiche,*
- > Monitoraggio degli ambienti carsici,*
- > Rappresentare il vuoto.*

Due sessioni su temi scientifici, l’ultima dedicata ad aspetti più tecnici. Senza dubbio quello degli acquiferi carsici, nella nostra regione e nei paesi confinanti, è il tema fondamentale che accompagna la speleologia scientifica fin dai suoi inizi nella seconda metà dell’Ottocento. Monitorare ambienti e habitat sotterranei è invece un tema che negli ultimi decenni ha avuto una notevole espansione sia per i cambiamenti climatici, sia, soprattutto, per le nuove metodologie che da alcuni anni hanno cambiato l’approccio alla biospeleologia. Analoghe considerazioni valgono per le modalità di “creare” il rilievo: in questo campo, se bussola e cordella sono ormai preistoria, anche il Disto-X sembra superato.

Non tutte le relazioni corrispondono in modo preciso agli argomenti delle sessioni, ma il Comitato Scientifico ha preferito un’interpretazione estensiva, favorendo così una maggior partecipazione e ampliando il quadro delle attività speleologiche regionali.

L’organizzazione del Convegno è iniziata già nell’estate del 2024. Con noi c’era Furio Premiani che, nel corso dei 10 anni della sua presidenza, ha fortemente voluto che i convegni fossero una vetrina delle attività di tutti i gruppi regionali e un’occasione di dialogo.

Purtroppo, non ha potuto vedere il successo di SPELEO25.

A lui, alla sua memoria, dedichiamo il volume degli Atti.

Furio Finocchiaro
Presidente della Federazione Speleologica
Regionale del Friuli Venezia Giulia



La mostra allestita in occasione del Convegno e nell'ambito di Go 2025 (foto A. D'Andrea).



La mostra allestita in occasione del Convegno e nell'ambito di Go 2025 (foto A. D'Andrea e A. Miani).

PROGRAMMA DEL CONVEGNO

Sabato 14 giugno 2025

- 09:00 Saluto autorità
- 09:45 Intervento ad invito: Franci Gabrovsek - Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna, Slovenia
Flood Wave Propagation in the Reka-Timavo System: Insights from Observations and Modelling
- 10.30 Paolo Manca, Michele Potleca, Tullio Quaia, Luca Zini
Censimento e caratterizzazione delle aree e acquiferi carsici del Friuli Venezia Giulia
- 10.45 Riccardo Corazzi, Rino Semeraro, Louis Torelli
Conclusione delle ricerche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche 2009-2024 sul Davorjevo brezno (Kras/Carso, Slovenia)
- 11.00 Coffe break
- 11.30 Giuseppe-Adriano Moro, Rosa Romanin, Loris Biasizzo, Adalberto D'Andrea, Furio Finocchiaro
Note sull'idrologia della sorgente carsica La Fontanate di Torlano
- 11.45 Matteo Monfredo, Stefano Rejc, Rino Semeraro
Conclusione delle ricerche sulle acque sotterranee del margine nord-occidentale del Carso (Carso Isontino)
- 12.00 Rino Semeraro, Luca Zini, Alice Buseti, Franco Bressan, Chiara Calligaris, Matteo Cavanna, Maurizio Comar, Loretta Crestani, Sergio Dambrosi, Fabio Gemiti, Lorenzo Marini, Tullio Quaia, Marco Restaino
Test di tracciamento delle perdite del Fiume Vipacco nell'acquifero del Carso Classico: nota informativa
- 12.15 Daniele Pascolo, Stefano Rejc, Rino Semeraro
Conclusione delle ricerche idrogeologiche nell'area del Campo di Bonis (Prealpi Giulie)
- 12.30 Sergio Dambrosi, Roberto Faggian, Alberto Giorgi, Lorenzo Marini, Marco Mercadante, Stefano Rejc, Rino Semeraro
Stato di avanzamento delle ricerche idrogeologiche nel "Progetto Acqua Negra" (Prealpi Carniche)
- 12.45 Pausa pranzo
- 14.00 Intervento ad invito: Bartolomeo Vigna - Politecnico di Torino, Speleo Club Tanaro
Perché studiare la circolazione dell'aria e dell'acqua nelle grotte
- 14,45 Renato R. Colucci, Andrea Securo, Costanza Del Gobbo, Paolo Manca, Michele Potleca
CryoKarst FVG: Un Progetto dedicato alla Criosfera nei Territori Carsici del Friuli Venezia Giulia
- 15.00 Andrea Bussani, Aldo Fedel, Igor Ardetti
Aspetti teorici e osservazioni sperimentali inerenti agli effetti delle maree atmosferiche termiche sulla temperatura di cavità ipogee
- 15.15 Francesco Serafin
Studio quantitativo della dinamica dell'aria nel complesso Abisso dei Cristalli - Grotta dell'Alce
- 15.30 Mario Fabretto, Graziano Cancian
Analisi in spettrometria gamma ad alta risoluzione su alcuni campioni di suoli raccolti in grotte e superfici del settore italiano del Carso Classico
- 15.45 Massimo Vascotto, Alberto Cherti, Carmelo Catania
Trenta anni di misure di radon-222 nella grotta Costantino Doria: una prima panoramica dei risultati
- 16.00 Jure Tičar
Hidden Waste: Investigating Cave Pollution in Slovenia's Bordering Karst Regions
- 16.15 Coffe break
- 16,45 Franco Gherlizza
Censimento delle grotte naturali della provincia di Trieste interessate da inquinamento, abbandono di rifiuti, ostruite o distrutte

- 17.00 Gregor Aljančič, Magdalena Aljančič, Edgardo Mauri
Contributi alla ricerca, alla conservazione, alla divulgazione culturale del Proteo e del suo habitat vulnerabile: iniziative del Laboratorio della grotta Tular e dello Speleovivarium
- 17.15 Azzurra Tommasi, Camilla Spoto, Raffaele Bruschi, Marco Restaino, Renata Rozman, Samo Šturm, Borut Peric, Piero G. Giulianini, Alberto Pallavicini, Chiara Manfrin
Grotte transfrontaliere a confronto: uso del DNA ambientale e studio della fauna ipogea, per indagare la continuità idrologica del Reka-Timavo sotterraneo
- 17.30 Benedetta Rigo, Josef Vuch, Alberto Riva
Censimento della presenza di "batteri oro e argento" nelle grotte del Friuli Venezia Giulia
- 17.45 Raffaele Bruschi
Studi ecotossicologici e microbiologici in due grotte carsiche inquinate da idrocarburi (Trieste, Italia) finalizzati allo sviluppo di un protocollo di biorisanamento
- 18.00 Giacomo Canciani, Martina Colautti, Caterina Bearzotti
La fauna cavernicola delle grotte nella Valle di Prentento (Prealpi Giulie meridionali). Nuovi dati
- 18.15 Enrico Merlak
Terre rare (rare earth elements - REE) nelle bauxiti carsiche del Nord Adriatico

Domenica 15 giugno 2025

- 09:15 Intervento ad invito: Marco Corvi - Speleo Club Ribaldone, Genova - InGrigna!
Rilievo: tra arte e tecnica
- 10.00 Alberto Giorgi
Topografia ipogea e rilevamento geomorfologico in grotta. Una metodologia moderna
- 10.15 Paolo Paganini, Carlo Cebula, Fiorella Bieker, Paolo Manca, Alessandro Pavan, Michele Potleca
Rilievi laser scan e virtual tour fotografici per la valorizzazione del patrimonio speleologico
- 10.30 Paolo Guglia
Rappresentazione georiferita 3D del "Complesso del Timavo". Nuovi strumenti per un rilievo di precisione
- 10.45 Massimiliano Werk
L'Innovazione nel Sistema di Rilievo delle Cavità Ipogee: LiDAR e CloudCompare
- 11.00 Gianni Benedetti
L'Abisso III di Gropada: un mistero lungo 100 anni... e oltre?
- 11.15 Pausa
- 11.45 Gianni Benedetti, Francesco Serafin
Il Complesso del Monte Croce (Friuli Venezia Giulia)
- 12.00 Alexander Debenjak, Giacomo Canciani, Luca Tringali, Tecla Tripari
Le nuove tecnologie per il rilievo di pozzi non accessibili: il caso dei pozzi artificiali sopra la galleria ferroviaria del Lokavac
- 12.15 Gianni Benedetti, Giorgia Del Bianco
La misteriosa tavoletta della Grotta del Frassinio
- 12.30 Maurizio Tavagnutti
Osservazioni sulle particolari forme carsiche nell'area del bacino idrico del Rio Bodrin a SE di Montefosca
- 12.45 Maurizio Comar
Geomorfologia della zona del Lago Sablici (Carso Goriziano-settore Monfalconese)

N.B. In alcuni casi i titoli delle relazioni presentate durante il convegno e quelli degli articoli per gli atti sono leggermente differenti.

Franci Gabrovšek¹

Osservazioni e analisi della propagazione delle inondazioni nel sistema carsico Reka-Timavo

1) Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna, Slovenia

Abstract. This paper presents an analysis of flow propagation in the epiphreatic zone of the Reka-Timavo system, located beneath the Karst Plateau (Slovenia/Italy), based on long-term monitoring of key physical parameters, namely water pressure (stage), temperature and specific electrical conductivity, in six active caves that are part of the flow system.

Riassunto. Si presenta un'analisi della propagazione dei flussi nella zona epifreatica del sistema Reka-Timavo, situato sotto l'altopiano del Carso (Slovenia/Italia), basata sul monitoraggio a lungo termine di parametri fisici chiave, vale a dire pressione dell'acqua (stadio), temperatura e conduttività elettrica specifica, in sei grotte attive che fanno parte del sistema di flusso.

Introduzione

Viene proposta una breve panoramica del monitoraggio a lungo termine del livello e della temperatura dell'acqua lungo il sistema sotterraneo Reka-Timavo. La sintesi copre il periodo di monitoraggio - dal 2005 al 2019 - evidenziando, sulla base dei dati emersi, i processi chiave. Il monitoraggio è stato effettuato in sei grotte che raggiungono il livello di base delle acque sotterranee, ovvero il flusso del Fiume Reka tra le Grotte di Škocjan e le Sorgenti del Timavo, monitorando così la propagazione dei segnali di inondazione lungo il sistema. Non è scopo di questo rapporto esaminare il vasto lavoro di altri ricercatori, che esula dal suo ambito. Per una descrizione e un'analisi più approfondite, si rimanda a GABROVŠEK et al. (2018) e PIVETTA et al. (2021).

L'obiettivo principale del monitoraggio era comprendere meglio tempi e dinamiche della trasmissione del segnale di piena del Fiume Reka da Škocjan alle grotte a valle.

Contesto geologico e idrologico dell'altopiano del Kras/Carso

L'altopiano del Carso si estende in direzione NW-SE tra il Golfo di Trieste a SW e la Valle del Vipacco a NE (Fig. 1): è lungo circa 40 km e largo 13 km. La superficie degrada dolcemente da SE (400-500 m s.l.m.) a NW (100 m s.l.m.).

Dal punto di vista geologico, l'altopiano è composto da una successione di rocce carbonatiche del Cretaceo e del Paleogene inferiore, depositate sulla piattaforma adriatico-dinarica (JURKOVŠEK et al., 1996, 2013, 2016). La struttura dell'area è il risultato della collisione tra la placca Apula (o Adriatica) e quella Eurasiatica, originando l'anticlinale del Carso che appartiene alla cintura imbricata dinarica esterna, parte del sistema di sovrascorrimenti dinarici esterni, e si estende sotto le Alpi Meridionali. L'evoluzione tettonica ha anche causato lo sviluppo di faglie trasversali a gradini, che attraversano la regione, tipicamente orientate in direzione dinarica (SE-NW) e transdinarica.

I sedimenti rinvenuti nella Grofova Jama suggeriscono che alcuni sistemi carsici risalgono a 11 milioni di anni fa. Le grotte epifreatiche lungo il fiume sotterraneo Reka-Timavo sono più recenti, ma hanno subito diverse fasi evolutive. Questi cambiamenti legati anche al variare dell'assetto strutturale, hanno dando luogo a una geometria carsica complessa e multilivello, spesso con forti variazioni nella sezione trasversale del flusso.

Il sistema è alimentato da più fonti, ma durante gli eventi alluvionali, l'afflusso del Fiume Reka alle Grotte di Škocjan è dominante. I tassi di ricarica variano notevolmente, da praticamente zero

a oltre 350 m³/s, il che provoca una risposta idrologica rapida ed estrema (ARSO, 2016). I livelli dell'acqua possono variare di oltre 100 metri, riflettendo la natura dinamica della falda acquifera durante tali eventi (CUCCHI & ZINI, 2002).

Risultati

Il lavoro si basa su misurazioni automatiche a lungo termine della pressione, della temperatura e della conduttività elettrica specifica (SEC) nelle grotte indicate in figura 1. I registratori sono stati programmati per effettuare campionamenti ogni ora e sono stati fissati al letto del fiume con listelli in acciaio inossidabile. Il periodo registrato va dal 2005 al 2013.

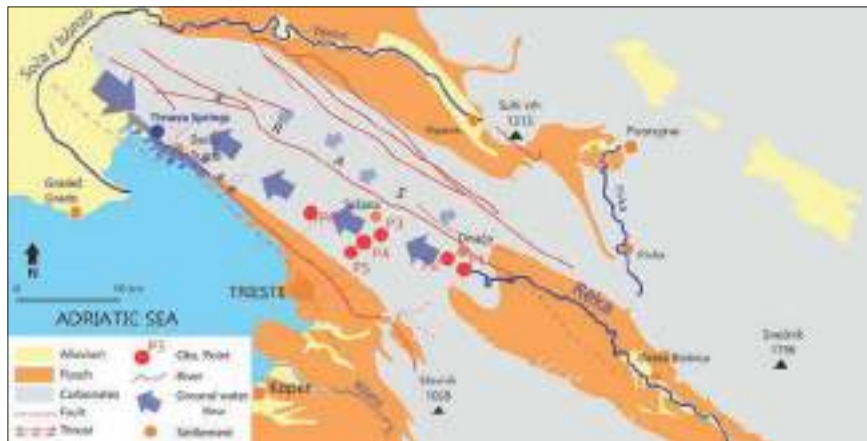


Fig. 1 - Sopra: schema geologico semplificato dell'area con le principali unità litologiche ed elementi strutturali. P1-P6 indicano la posizione delle grotte. Le frecce blu indicano la direzione generale del flusso delle acque sotterranee verso le sorgenti.

Sotto: sezione trasversale semplificata dell'altopiano del Kras/Carso tra le Grotte di Škocjan e le sorgenti lungo la costa nord-occidentale del Golfo di Trieste. Le linee blu tratteggiate indicano la posizione del flusso di base e delle piene estreme. Da P1 a P6 indicano le posizioni dei punti di osservazione utilizzati in questo lavoro. Le parti vadose nelle grotte sono riempite di bianco, mentre quelle freatiche ed epifreatiche sono in azzurro. La linea di flusso di base più alta tra P2 e P3 indica il flusso lungo i canali di sfioro parzialmente noti in questo segmento.

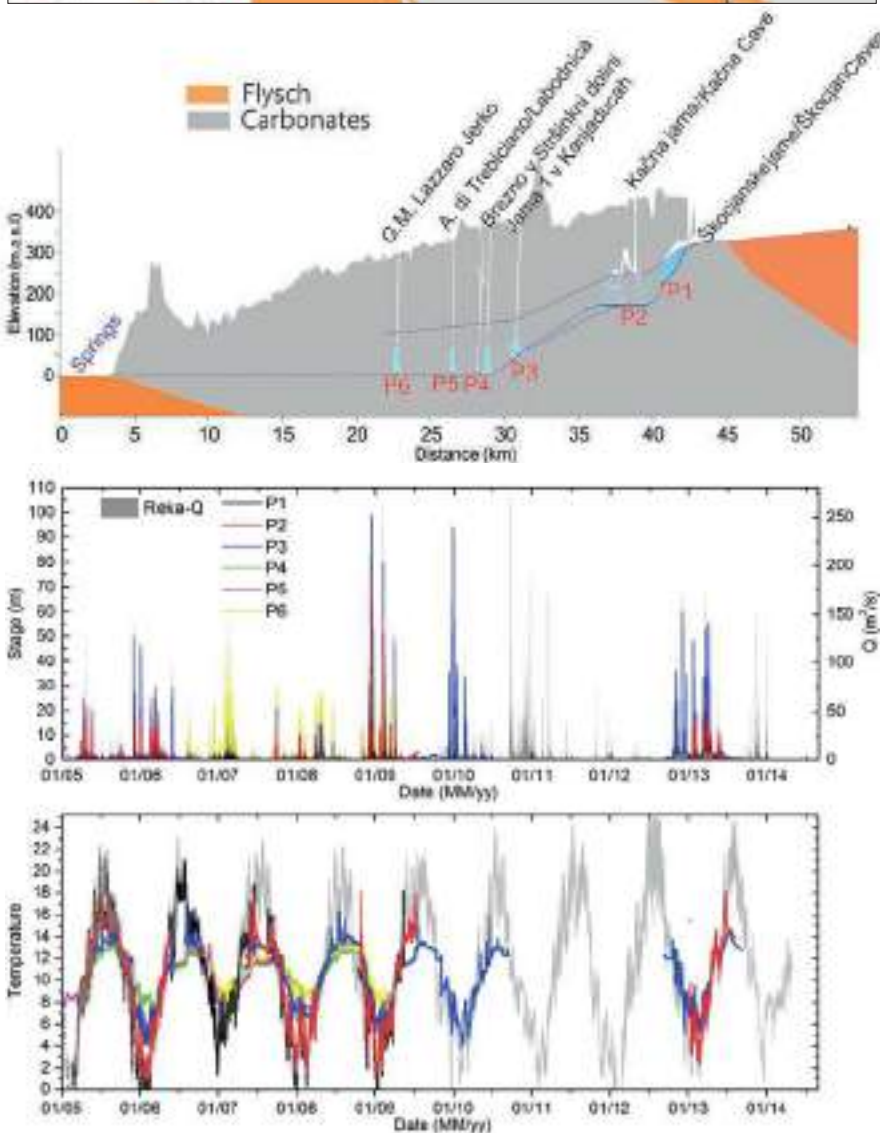


Fig. 2 - Grafico dei dati relativi a livello, portata (Q) e temperatura nel sistema Reka-Timavo.

Panoramica dei dati

I dati relativi al livello dell'acqua e alle portate mostrano chiaramente diverse inondazioni di grande entità, con una ricarica superiore a 250 m³/s e un aumento del livello dell'acqua da 70 a oltre 100 metri (Fig. 2). Il segnale della temperatura superficiale del fiume Reka viene progressivamente attenuato lungo il percorso del flusso a causa dello scambio termico con la roccia circostante, che tende a equilibrare la temperatura dell'acqua con quella della massa rocciosa (COVINGTON et al., 2011). I cicli annuali di temperatura e le variazioni a breve termine durante gli eventi di piena sono osservati in modo coerente in tutto il sistema monitorato. Durante il ritirarsi delle piene, i segnali di temperatura diurna sono rilevati anche nei punti di monitoraggio P1-P3. La tabella I riassume le statistiche di base sulla temperatura per tutte le stazioni osservate.

Eventi alluvionali caratteristici

Per fornire alcune indicazioni sugli igrografi tipici, presentiamo tre eventi alluvionali caratteristici di magnitudo crescente: un evento alluvionale di piccola entità (portata di picco <23 m³/s), un evento alluvionale di media entità (portata di picco <100 m³/s) e un evento alluvionale di grande entità (portata di picco <250 m³/s).

Un evento di piena di piccola entità

La figura 3 mostra il livello e la temperatura durante una piccola alluvione nel settembre 2005, quando la portata massima del fiume Reka ha raggiunto i 23 m³/s. Il livello a P1 (Grotte di Škocjan) e P2 (Grotta di Kačna) mostra una risposta minima e quasi identica. Si osserva un aumento maggiore nella parte inferiore del sistema, in particolare a P5 (Labodnica/Trebiciano), che ha preceduto le risposte a P3 e P4. Il punto a monte P3 ha reagito prima di P4, come previsto, ma mostra un calo molto più lungo. La temperatura è stata disturbata in tutto il sistema, ma solo tra P1 e P2 segue chiaramente l'andamento della temperatura del fiume Reka.

Un evento di piena di media entità

Un evento alluvionale del gennaio 2006 ($Q_{max} = 87$ m³/s) è mostrato in figura 4. C'è una chiara differenza tra P1, dove il livello ha reagito in modo simile a quello dell'evento di figura 2, e P2, dove il livello è salito bruscamente (<6 m/h) fino a ~13 m, raggiungendo un picco di 16 m. Il livello è rimasto sopra gli 8 m e poi è sceso lentamente fino a quando la portata del Fiume Reka è scesa al di sotto dei 15 m³/s, quando la curva di recessione si è inclinata in un segmento più ripido. La risposta in P3-P5 è simile, indicando un livello dell'acqua quasi uniforme nella parte inferiore del sistema. L'afflusso di acqua superficiale fredda ha disturbato le temperature lungo l'intero sistema. Si notino i picchi tipici dell'acqua calda, che precedono l'arrivo dell'acqua piovana più fredda tra P3 e P5.

Un grande evento di piena

Il più grande evento di piena registrato in tutti i punti di monitoraggio si è verificato nel dicembre 2008, quando la portata del fiume Reka ha raggiunto un picco di 250 m³/s (Fig. 5). I siti di monito-

	altitudine m s.l.m.	dist. dal ponor [km]	T _{media} [°C]	σT [°C]	T(max) [°C]	T(min) [°C]
Stazione di misurazione Reka Reka-Q	340		10,9	5,3	27,0	0,1
Grotte di Škocjan (P1)	214	2,1	8,7	5,7	21,0	0,1
Kačna jama (P2)	156	4,0	9,14	4,3	19,0	0,9
Jama 1 contro Kanjaducah (P3)	23	12,0	10,5	2,6	17,3	2,5
Brezno nella valle di Stršinkni (P4)	15	14,5	10,5	1,6	15,0	5,0
Abisso di Trebiciano (P5)	12	16,0	10,3	2,3	14,5	6,5
GM Lazzaro Jerko (P6)	4	19,0	10,8	1,55	14,8	7,5

Tab. I - Elenco delle stazioni di osservazione, loro altitudine, distanza dal "ponor" e statistiche annuali di base delle temperature rilevate in sei punti di osservazione.

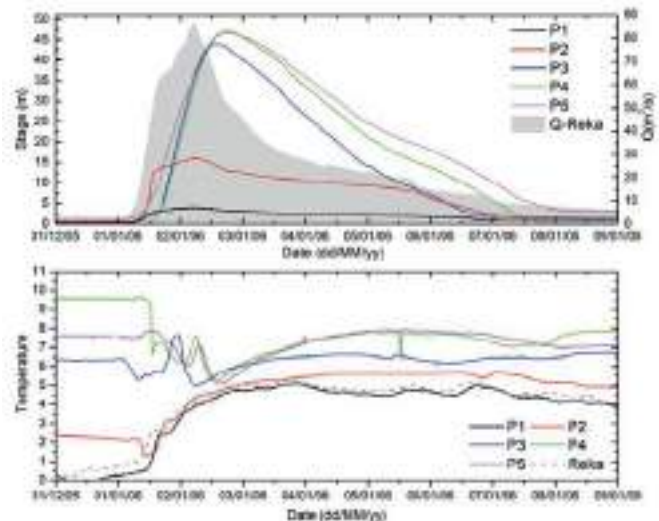
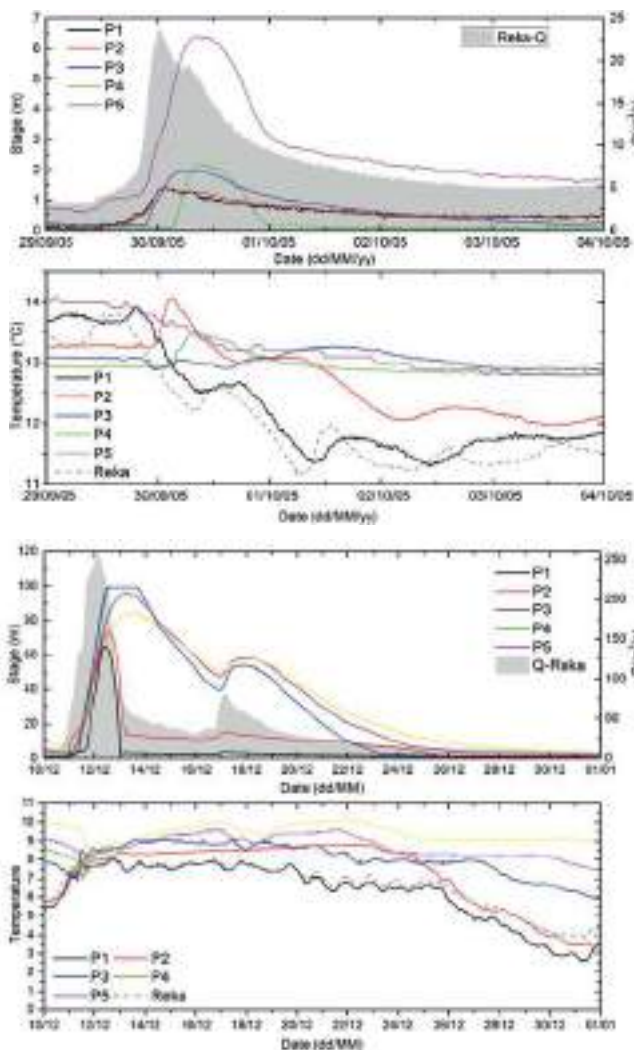


Fig. 3 - Sopra a sinistra: dinamica del livello e della temperatura durante un piccolo evento di piena.

Fig. 4 - Sopra a destra: dinamica del livello, della portata e della temperatura durante un evento di piena di media entità.

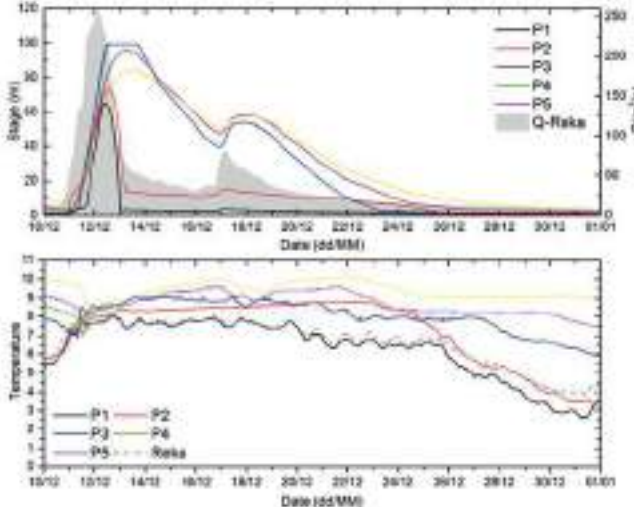


Fig. 5 - A sinistra: dinamica del livello, della portata e della temperatura durante un grande evento alluvionale

raggio P1 e P2 hanno reagito bruscamente. Entrambe le località hanno mostrato un rapido calo del livello dell'acqua in seguito alla diminuzione della ricarica; tuttavia, in P2, il calo si è arrestato una volta raggiunto un certo limite, come osservato anche durante un evento di piena di media entità (Fig. 4), ed è rimasto stabile fino a quando la ricarica è scesa al di sotto dei 15 m³/s.

Nelle parti inferiori del sistema, i livelli dell'acqua sono aumentati tra 84 e oltre 100 m. I sensori utilizzati hanno una portata massima di 100 m, che è stata superata in P3 e P4, causando l'interruzione della registrazione dei dati durante l'evento. Una semplice estrapolazione suggerisce che il livello massimo dell'acqua in P3 abbia superato i 120 m.

Una seconda alluvione di magnitudo e comportamento simili si è verificata nel gennaio 2009. L'evento più significativo del decennio successivo è stato registrato all'inizio di febbraio 2019, anche se solo nelle grotte di Škocjan e Kačna.

Livelli e portate nelle Grotte di Škocjan e nella Grotta di Kačna

La figura 7 illustra la correlazione tra il livello e la portata del Fiume Reka e i livelli in P1 (Grotte di Škocjan) e P2 (Grotta di Kačna). Il grafico a include tutti i dati relativi alle portate inferiori a 100 m³/s, mentre il b si concentra sulla più grande alluvione registrata nel dicembre 2008.

Poiché la portata e il livello sono stati misurati in luoghi diversi, i dati mostrano un effetto di isteresi. Questo effetto è stato parzialmente corretto spostando in avanti di 5 ore la serie temporale della portata, che corrisponde approssimativamente al tempo di percorrenza dell'acqua dalla stazione di misurazione al P1 durante un flusso medio-alto. Una correzione più accurata richiederebbe dati dettagliati sul tempo di percorrenza, ma ciò non è essenziale ai fini della presente discussione.

Fig. 6 - Il più grande evento di allagamento mai registrato nelle Grotte di Škocjan (febbraio 2019).

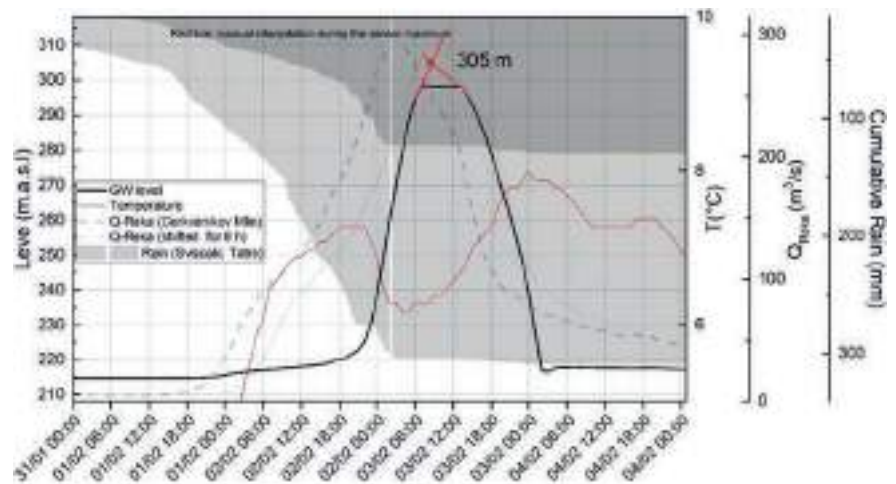


Fig. 7 - Grafici del rapporto livello-portata del fiume Reka e i livelli a P1 e P2. a) Tutti i dati per portate inferiori a 100 m³/s. b) Evento più importante nel dicembre 2008.

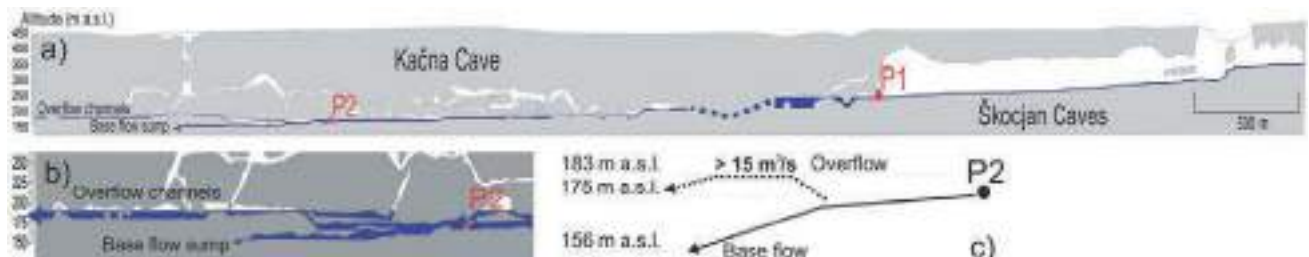
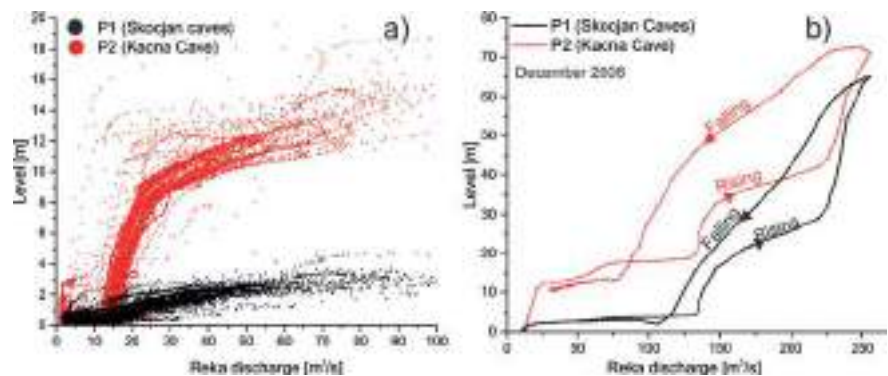


Fig. 8 - a) Profilo del sistema tra le grotte di Škocjan e la grotta di Kačna. b) Dettaglio della grotta di Kačna, che mostra la situazione durante l'alluvione. c) Schema della deviazione del flusso nei canali di sfioro nella grotta di Kačna.

Una differenza fondamentale tra i due siti è visibile in figura 7a: in P1, il livello dell'acqua sale solo di pochi metri nell'intervallo di portata osservato (<100 m³/s). Al contrario, in P2, il livello aumenta bruscamente fino a ~8-10 m quando la portata supera ~15 m³/s. Oltre questa soglia, un ulteriore aumento della portata comporta solo un modesto aumento del livello.

Questo comportamento è in linea con la geometria nota della grotta di Kačna (Fig. 8). Quando la portata è inferiore a ~15 m³/s, il flusso continua fino a un pozzo a 156 m s.l.m., che drena l'acqua in modo efficiente. A portate più elevate, l'acqua in eccesso viene deviata attraverso canali di sfioro che iniziano a circa 8-10 m sopra P2.

La figura 7b mostra l'evento alluvionale del dicembre 2008, quando la portata di picco ha raggiunto ~260 m³/s. A ~130 m³/s, entrambi i siti hanno mostrato un rapido aumento del livello dell'acqua, con curve di livello-portata altamente correlate. Ciò suggerisce che l'inondazione è stata determinata dalla strozzatura a valle oltre P2. In particolare, entrambe le curve mostrano segmenti concavi e convessi alternati tra 100 e 250 m³/s, riflettendo probabilmente il controllo da parte di questa stessa strozzatura.

Quanta acqua è immagazzinata nella zona epifreatica

Una caratteristica interessante emerge dai termogrammi degli eventi di piena invernali: nelle stazioni P3-P5 si osserva un netto aumento iniziale della temperatura (Fig. 9). Questo picco di tem-

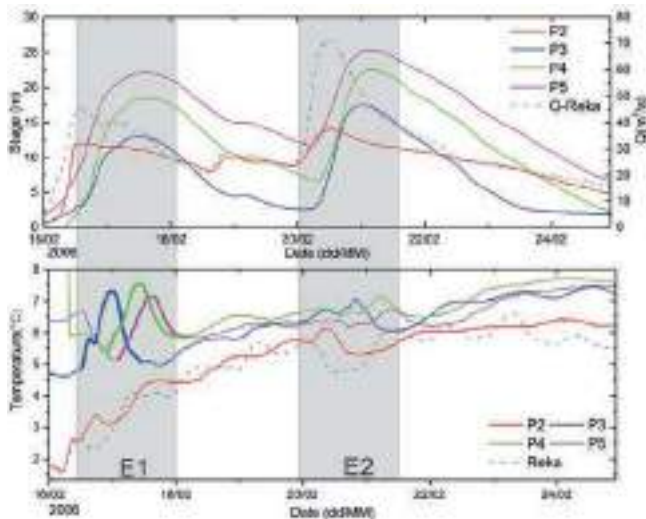


Fig. 9 - Il picco di temperatura da P3 viene trasferito a P4 e P5.

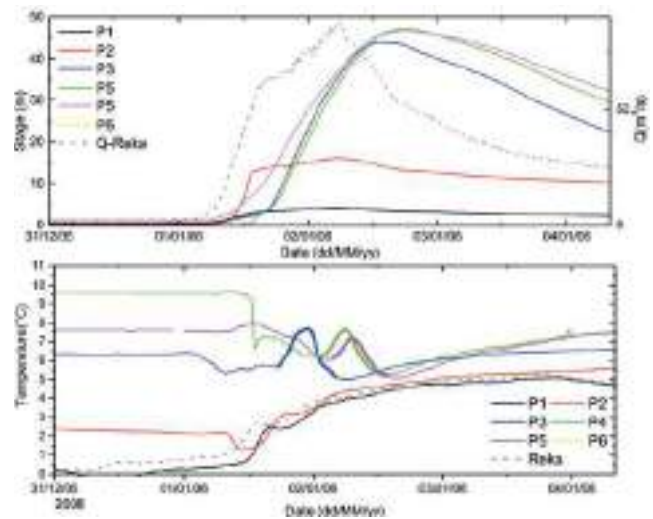


Fig. 10 - Idrogrammi di livello e temperatura durante due eventi di inondazione consecutivi nel 2006.

peratura, che precede l'arrivo dell'acqua più fredda della piena, è più pronunciato di quanto possa essere spiegato da un semplice effetto pistone (Figg. 9 e 10).

La figura 9 mostra la portata, il livello e la temperatura durante l'alluvione dell'inverno 2008 (picco ~50 m³/s). Prima dell'evento, i livelli dell'acqua sono rimasti bassi per oltre un mese. Le temperature erano stabili, comprese tra ~2,5°C e 9,5°C a P5. Ciò indica un riscaldamento più marcato dell'acqua lungo il corso del fiume. All'inizio e durante le fasi iniziali degli eventi alluvionali, il picco di temperatura persiste per 12 ore o più (contrassegnato dal segmento blu spesso negli idrogrammi di temperatura P3-P5). Quando si verificano due alluvioni consecutive in pochi giorni, il picco di temperatura durante la prima è molto più grande rispetto alla seconda, come mostrato in figura 10.

Queste osservazioni suggeriscono che un grande volume d'acqua è immagazzinato nei passaggi di traboccamento epifreatico tra la Grotta di Kačna (P2) e Jama I v Kanjadučah (P3). Tra un'alluvione e l'altra, quest'acqua si equilibra alla temperatura più calda della roccia circostante. Quando il percorso di traboccamento viene attivato, l'acqua immagazzinata viene scaricata a P3, creando un impulso caldo (Fig. 11). Se una seconda alluvione segue subito dopo la prima (come in figura 10), il tempo di riscaldamento è più breve, quindi il secondo picco di temperatura è più piccolo.

Le analisi di questi eventi basate sulle ipotesi della temperatura del massiccio e della conservazione della massa e del calore forniscono una stima dell'acqua immagazzinata tra P2 e P3 compresa tra 2 e 5 milioni di metri cubi.

Risposta nella parte inferiore del sistema (Kanjaduce-Lazzaro Jerko)

Gli idrogrammi di livello a P3-P6 mostrano andamenti simili. Nei 5 km tra P3 e P6, i livelli di portata di base diminuiscono di meno di 20 m, indicando un gradiente quasi piatto in condizioni di bassa portata.

La figura 12 confronta diversi eventi di piena di diversa entità registrati in questi siti. I livelli dell'acqua sono indicati in metri sul livello del mare, con il tempo relativo al picco di piena.

Le curve ascendenti e discendenti degli idrogrammi hanno forme simili in tutte le stazioni. Come previsto, i livelli di picco diminuiscono da P3 a P6 a causa delle perdite per attrito lungo il percorso del flusso. Il calo tra i picchi è più pronunciato durante gli eventi di grande entità. Nell'estrema alluvione del dicembre 2008, il livello a P3 ha superato la portata massima del registratore e il registratore P4 ha smesso di funzionare. Le stime suggeriscono che il livello a P3 abbia superato i 130 m s.l.m., con un calo di circa 50 m tra P3 e P6.

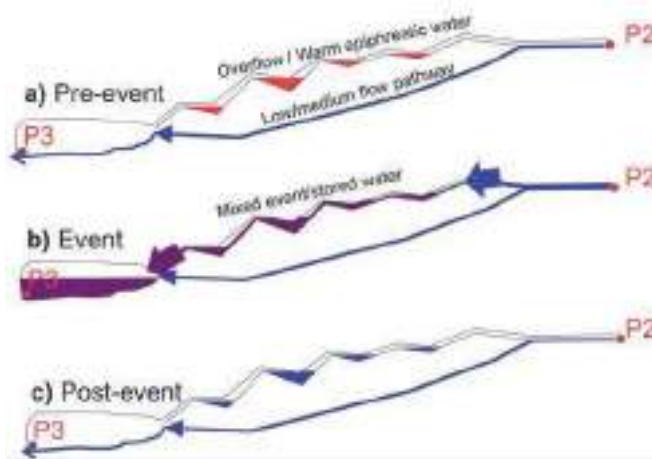


Fig. 11. Vista concettuale del comportamento anomalo della temperatura tra P3 e P5 durante gli eventi invernali. a) Prima dell'evento l'acqua epifreatica immagazzinata è termicamente in equilibrio con la massa rocciosa circostante. b) L'acqua dell'evento freddo deviata lungo le gallerie di by-pass si mescola con quella immagazzinata, provocando un aumento della temperatura in P3. c) L'acqua immagazzinata viene sostituita da quella nuova dell'evento.

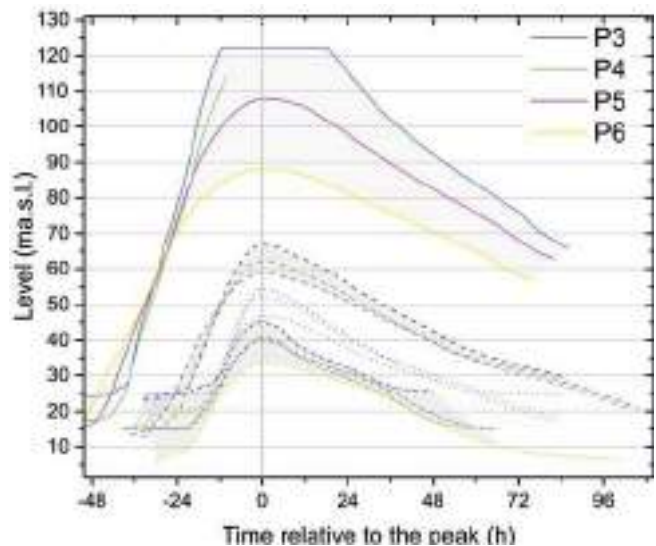


Fig. 12 - Idrogramma di livello per quattro eventi di piena di diversa entità (grande-linea continua, media-linea tratteggiata, piccola-linea tratteggiata) tra P3 e P6. Il valore $t=0$ per tutti gli idrogrammi è preso al momento del livello massimo in ciascun punto di osservazione.

Tempi di percorrenza e velocità di flusso apparenti

Le serie temporali di temperatura e conduttività, registrate simultaneamente in tutte le stazioni, consentono di valutare i tempi di percorrenza e le velocità apparenti tra le stazioni. COVINGTON et al. (2011) hanno derivato una relazione empirica secondo cui la scala temporale delle variazioni di temperatura e il tempo di percorrenza sotterraneo necessario affinché tali variazioni siano osservabili sono comparabili. In altre parole, le oscillazioni diurne possono essere tracciate fino al punto raggiunto dall'acqua che affluisce in superficie nell'arco di una giornata. Quando il segnale di temperatura diurna è ben espresso, il ritardo tra due minimi o massimi corrispondenti in due stazioni diverse è una buona approssimazione del tempo di percorrenza. Un esempio di oscillazioni di temperatura diurna con ritardi crescenti tra P1, P2 e P3 durante il calo dell'alluvione è mostrato nella figura 13.

I ritardi successivi nel segnale di temperatura sono stati registrati durante il periodo di recessione successivo a un evento di piena. Al contrario, l'afflusso di acqua fresca di piena è caratterizzato anche da un netto calo della SEC. I dati di temperatura e SEC sono stati analizzati manualmente calcolando i ritardi tra i minimi o i massimi di temperatura o tra i ritardi nei dati relativi alla SEC. Sono stati analizzati circa 20 eventi di questo tipo e calcolati oltre 50 ritardi temporali tra due o più stazioni. I ritardi temporali sono riportati nella tabella II. La figura 14 mostra la dipendenza dei tempi di percorrenza e delle velocità apparenti tra P1 e P2 e tra P2 e P3 dalla portata.

Le velocità di flusso nel sistema sono state valutate con numerosi esperimenti di tracciamento con colorante, in cui il tracciante è stato iniettato nel Fiume Reka, nei pozzi di trivellazione, in superficie o nell'Abisso di Trebiciano (P5). Le velocità di flusso dominanti variavano da meno di 50 m/h tra le Grotte di Škocjan (P1) e le sorgenti del Timavo in condizioni di flusso molto basso, a oltre

	P1-P2 n = 16	P2-P3 n = 33	P3-P4 n = 11	P4-P5 n = 13	P5-P6 n = 7
Distanza [km]	2	8	2,5	1,5	3
Tt (min, av, max) [h]	3,5; 8,7; 23,5	5,5; 23,6; 52	2,5; 8; 14	1,6; 7,5; 12,5	4; 8,7; 13
vapp (min, av, max) [m/h]	85; 230; 570	150; 340; 1450	180; 310; 1000	100; 220; 1500	230; 340; 750

Tab. II - Tempi di percorrenza minimi, medi e massimi (Tt) e velocità apparenti (vapp) lungo diverse sezioni del sistema, ottenuti dai registri di temperatura e SEC. n è il numero di occorrenze in cui è stato possibile leggere i ritardi temporali per una determinata sezione.

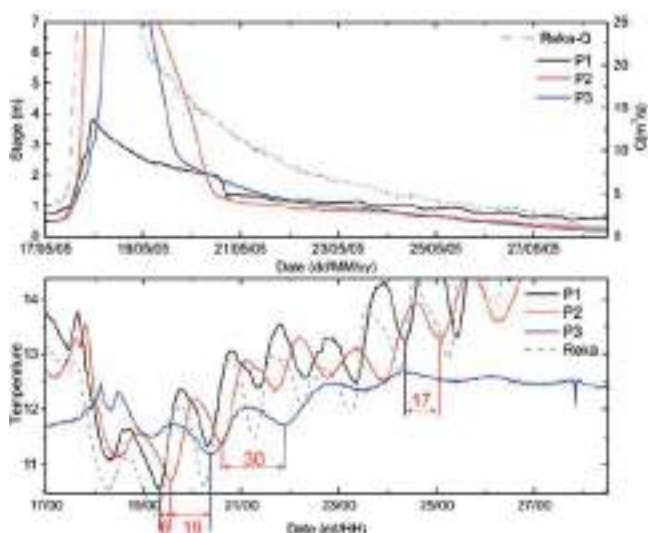


Fig. 13 - Oscillazioni diurne della temperatura registrate in P1, P2 e P3 durante l'evento del maggio 2005. I ritardi in ore tra i picchi corrispondenti selezionati in luoghi diversi sono indicati in rosso.

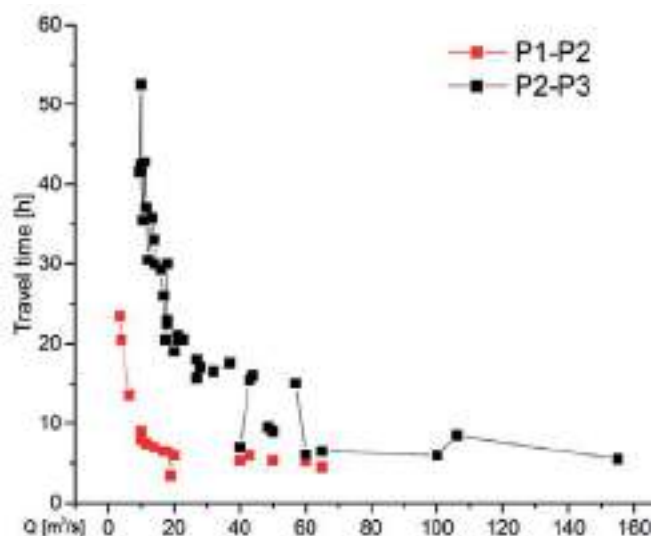


Fig. 14 - Relazione tra i tempi di percorrenza P1-P2 e P2-P3 e la portata ottenuti dai registri di temperatura, SEC e flusso.

300 m/h con una portata di 90 m³/s (CIVITA et al., 1995; PETRIČ & KOGOVŠEK, 2016). Si noti che i ritardi temporali possono essere generalmente letti solo durante portate relativamente elevate, il che rende le velocità riportate nella tabella II relativamente elevate rispetto a quelle ottenute nei test con traccianti.

Conclusioni e ulteriori prospettive

Il sistema Reka-Timavo presenta numerose sfide di ricerca aperte. Per ulteriori approfondimenti, si rimanda il lettore alle opere di altri autori (ad esempio CUCCHI et al., 2015; ZINI et al., 2015).

La nostra comprensione dei processi che avvengono nella zona freatica rimane limitata e le caratteristiche strutturali di questa zona sono ancora in gran parte sconosciute. Recenti studi (BREITENBERG, 2019; PIVETTA et al., 2021) hanno dimostrato che gli eventi alluvionali all'interno del sistema possono indurre risposte geodetiche e gravimetriche misurabili. Questi risultati evidenziano la natura dinamica della falda acquifera e aprono nuove strade di esplorazione. Sono fiducioso che questo sistema enigmatico continuerà a ispirare le future generazioni di speleologi e idrologi.

Bibliografia

- ARSO, 2016 - *Arhiv hidroloških podatkov / Archive of hydrological data*. Slovenian Environmental Agency.
- BRAITENBERG C., PIVETTA T., BARBOLLA DF., GABROVŠEK, F., DEVOTI R. & NAGY I., 2019 - *Terrain uplift due to natural hydrologic overpressure in karstic conduits*. Scientific Reports.
- CIVITA, M. et al., 1995. *The Timavo hydrogeologic system: an important reservoir of supplementary water resources to be reclaimed and protected*. Acta Carsologica, 24, pp. 169-186.
- COVINGTON M.D., LUHMANN A.J., GABROVŠEK F., SAAR M.O. & WICKS C.M., 2011 - *Mechanisms of heat exchange between water and rock in karst conduits*. Water Resources Research, 47, 10. W10514. Doi:10.1029/2011wr010683.
- CUCCHI F., ZINI L., 2002 - *Underground Timavo river monitoring*. Acta Carsologica, 31, 1, pp. 75-84.
- CUCCHI F., ZINI L. & CALLIGARIS C. (eds.), 2015 - *Project HYDROKARST: Le Aque del Carso Classico/ Vodonosnik klasičnega Krasa*. Università di Trieste EUT, 180 pp.
- GABROVŠEK F., PERIT B. & KEUFMANN G., 2018 - *Hydraulics of epiphreatic flow of a karst aquifer*. Journal of Hydrology, 560, pp. 56-74.
- JURKOVŠEK B. et al., 2016 - *Geology of the Classical Karst Region (SW Slovenia - NE Italy)*. Journal of maps, 12: 352-362 (Supl. 1).
- JURKOVŠEK B., CVETKO TEŠOVIČ B. & KOLAR-JURKOVŠEK T., 2013 - *Geologija Krasa*. Geološki zavod Slovenija, 205 pp.

- JURKOVŠEK B. et al., 1996 - *Geological Map of the Southern Part of the Triest-Komen Plateau*. Cretaceous and Paleogene Carbonate Rocks, Geological Survey of Slovenia, Ljubljana.
- PETRIČ M. & KOGOVŠEK, J., 2016 - *Identifying the characteristics of groundwater flow in the Classical Karst area (Slovenia/Italy) by means of tracer tests*. Environmental Earth Sciences, 75, 22, 1446. Doi:10.1007/s12665-016-6255-4.
- PIVETTA T., BRAITENBERG C., GABROVŠEK F., GABRIEL G., & MEURERS B., 2021 - *Gravity as a tool to improve the hydrologic mass budget in karstic areas*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 25, pp. 6001-6021.
- ZINI, L., CALLIGARIS, C. & CUCCHI F., 2015 - *The challenge of tunneling through Mediterranean karst aquifers: the case study of Trieste (Italy)*. Environmental Earth Sciences, 74(1): 281-295. Doi:10.1007/s12665-015-4165-5.

Observations and Analysis of Flood Propagation in the Reka-Timavo Karst System

This work presents a brief overview of long-term monitoring of water level and temperature along the underground Reka-Timavo system. The summary covers the full monitoring period from 2005 to 2019 and highlights key observations and processes. Monitoring was carried out in six caves that reach the groundwater level - i.e., the underground flow of the Reka River between the Škocjan Caves and the Timavo Springs. These sites were chosen to track how flood signals propagate along the system. It is not the aim of this report to review the extensive work of other researchers, which is beyond its scope. For a more in-depth description and analysis, readers are referred to Gabrovšek et al. (2018) and Pivetta et al. (202?, 202?). The primary goal of the monitoring was to better understand the timing and dynamics of flood signal transmission from the Reka River's ponor (swallow hole) at Škocjan to downstream caves along its subterranean path.

Geological and hydrological settings of the Kras/Carso plateau

The Kras/Carso Plateau extends in a NW-SE direction between the Bay of Trieste in the southwest and the Vipava Valley in the northeast (Fig. 1). It is approximately 40 km long and 13 km wide. The surface slopes gently from southeast (400-500 m a.s.l.) to northwest (100 m a.s.l.).

Geologically, the plateau is composed of a succession of Cretaceous to Lower Paleogene carbonate rocks, deposited on the Adriatic-Dinaric Carbonate Platform (JURKOVŠEK et al., 1996, 2013, 2016). The structure of the area results from the collision between the Apulian and Eurasian lithospheric plates, forming the Kras anticlinorium. This structure belongs to the External Dinaric Imbricated Belt, which is part of the External Dinarides thrust system and extends beneath the Southern Alps. The tectonic evolution also caused the development of en-echelon strike-slip faults, which cross the region, typically oriented in Dinaric (SE-NW) and cross-Dinaric directions.

Sediments found in Grofova jama suggest that some cave systems are as old as 11 million years. The epiphreatic caves along the Reka-Timavo underground river are younger but have undergone multiple phases of development, along with infilling. These changes occurred under shifting structural conditions, resulting in a complex, multi-level cave geometry, often with sharp variations in flow cross-section.

The system is recharged from multiple sources, but during flood events, the Reka River inflow at Škocjan Caves becomes the dominant input. Recharge rates vary widely - from practically zero to over 350 m³/s - which causes a rapid and extreme hydrological response (ARSO, 2016). Water levels can fluctuate by more than 100 meters, reflecting the dynamic nature of the aquifer during such events (CUCCHI & ZINI, 2002).

Results

The work is based on long-term automatic measurements of pressure, temperature and specific electric conductivity (SEC) in caves marked on figure 1. The loggers were programmed to sample hourly and were fixed to the riverbed with stainless steel battens. The recorded period spans between 2005 and 2013.

Data overview

The dataset of water stage and discharge rates clearly shows several major floods, with recharge exceeding 250 m³/s and water levels rising by 70 to over 100 meters (Fig. 2). The surface temperature signal of the Reka River is progressively dampened along the flow path due to heat exchange with the surrounding rock, which tends to equilibrate water temperature with that of the rock mass (COVINGTON et al., 2011). Annual temperature cycles and short-term variations during flood events are consistently observed throughout the monitored system. During flood recession, diurnal temperature signals are also detected at monitoring points P1-P3. Table I summarizes the basic temperature statistics for all observed stations.

Characteristic Flood events

To get some insight into the typical hygrographs, we present three characteristic flood events of increasing magnitude; a small flood event (peak flow <23 m³/s), a medium flood (peak flow < 00 m³/s) and a large flood event (peak flow <250 m³/s).

A small flood event

Figure 3 shows stage and temperature during a small flood event in September 2005, when the peak flow of the Reka River reached 23 m³/s. Stage at P1 (Škocjan Caves) and P2 (Kačna Cave) show a small and almost identical response. A higher increase is observed in the lower part of the system, particularly at P5 (Labodnica/Trebiciano), which preceded the responses at P3 and P4. The upstream P3 reacted before P4, as expected, but shows a much longer recession. Temperature was disturbed throughout the system, but only between P1 and P2 does it clearly follow the temperature trend of the Reka River.

A medium flood event

A flood event from January 2006 ($Q_{max} = 87 \text{ m}^3/\text{s}$) is shown on Figure 4. There is a clear difference between P1, where stage responded similarly as during the event on Figure 2, and P2, where the stage rose abruptly (<6m/h) to ~13 m, reaching a peak at 16 m. The stage remained above 8 m and then drops slowly until the discharge of Reka River dropped below 15 m³/s, when the recession curve inflects into a steeper segment. Stage response in P3-P5 is similar, indicating an almost uniform water level in the lower part of the system. The inflow of cold surface water disturbed temperatures along the whole system. Note, the typical peaks of warm water, which precede the arrival of the colder storm water between P3 and P5.

A large flood event

The largest flood event recorded across all monitoring points occurred in December 2008, when the discharge of the Reka River peaked at 250 m³/s (Fig. 5). Monitoring sites P1 and P2 responded abruptly. Both locations showed rapid recession in water level following the decrease in recharge; however, at P2, the decline halted once levels reached a certain threshold - as also observed during a medium flood event (Fig. 4) - and remained stable until recharge fell below 15 m³/s.

In the lower parts of the system, water levels rose between 84 m and over 100 m. The sensors used have a maximum range of 100 m, which was exceeded at P3 and P4, causing the data recording to stop during the event. A simple extrapolation suggests that the peak water level at P3 surpassed 120 m.

A second flood of similar magnitude and behavior followed in January 2009. The most significant event in the subsequent decade was recorded in early February 2019, though only in the Škocjan and Kačna Caves.

The stage and levels in Škocjan Caves and Kačna Cave

Figure 7 shows stage-discharge correlation plots between the Reka River discharge and water levels at P1 (Škocjan Caves) and P2 (Kačna Cave). Panel (a) includes all data for discharges below 100 m³/s, while panel (b) focuses on the largest recorded flood event in December 2008.

As discharge and stage were measured at different locations, the data exhibits hysteresis. This effect was partially corrected by shifting the discharge time series by 5 hours forward - approximately the travel time of water from the gauging station to P1 during medium to high flow. A more accurate correction would require detailed travel time data, though this is not essential for the present discussion.

A key distinction between the two sites is visible in figure 7a: at P1, the water level rises only a few meters across the observed range of discharge ($<100 \text{ m}^3/\text{s}$). In contrast, at P2, the level increases sharply to $\sim 8\text{-}10 \text{ m}$ once discharge exceeds $\sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$. Beyond this threshold, further increase in discharge results in only a modest rise in level.

This behavior aligns with the known geometry of Kačna Cave (Fig. 8). When discharge is below $\sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$, flow continues to a sump at 156 m a.s.l., which drains water efficiently. At higher discharges, excess water is diverted through overflow channels that begin $\sim 8\text{-}10 \text{ m}$ above P2.

Figure 7b shows the December 2008 flood event, when peak discharge reached $\sim 260 \text{ m}^3/\text{s}$. At $\sim 130 \text{ m}^3/\text{s}$, both sites exhibited rapid water-level rise, with highly correlated stage-discharge curves. This suggests that flooding was governed by downstream constriction beyond P2. Notably, both curves show alternating concave and convex segments between 100 and $250 \text{ m}^3/\text{s}$, likely reflecting the control from this same constriction.

How much water is stored in the epiphreatic zone

An interesting feature appears in the thermograms of winter flood events: a distinct initial temperature rise is observed at stations P3-P5 (Fig. 9). This temperature peak, preceding the arrival of colder floodwater, is more pronounced than can be explained by a simple piston effect (Figs. 9, 10).

Figure 9 presents discharge, stage, and temperature during the winter 2008 flood (peak $\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$). Prior to the event, low water levels persisted for over a month. Temperatures were stable, between $\sim 2.5^\circ\text{C}$ to 9.5°C at P5. This indicates moderate warming of water along the flow. At the onset and during initial stages of flood events temperature bulge persists for 12 hours or more (marked by the thick blue segment in the P3-P5 temperature hydrographs). When two consecutive floods occur within few days, the temperature bulge during first is much bigger than during second flood as shown in Figure 10.

These observations suggest that a large volume of water is stored in the epiphreatic overflow passages between Kačna Cave (P2) and Jama I v Kanjadučah (P3). Between floods, this water equilibrates to the warmer temperature of the surrounding rock. When the overflow pathway is activated, the stored water is flushed to P3, creating a warm pulse (Fig. 11). If a second flood follows soon after the first (as in Figure 10), the warming time is shorter, so the second temperature peak is smaller.

Analyses of these events based on the assumptions of the massif temperature, and mass and heat conservation give an estimate of stored water between P2 and P3 in the range between 2 and 5 million cubic meters.

Response in the lower part of the system (Kanjaduce-Lazzaro Jerko)

The stage hydrographs at P3-P6 show similar patterns. Over the 5 km between P3 and P6, base flow levels drop by less than 20 m, indicating a nearly flat gradient in low-flow conditions. Figure 12 compares several flood events of different magnitudes recorded at these sites. Water levels are shown in meters above sea level, with time relative to the flood peak.

The rising and falling limbs of the hydrographs have similar shapes across all stations. As expected, peak levels decrease from P3 to P6 due to friction losses along the flow path. The drop between peaks is most pronounced during large events. In the extreme December 2008 flood, the level at P3 exceeded the logger's maximum range, and the P4 logger stopped functioning. Estimates suggest the level at P3 exceeded 130 m a.s.l., with a $\sim 50 \text{ m}$ drop between P3 and P6.

Travel times and apparent flow velocities

Temperature and conductivity time series, recorded simultaneously at all stations, allow the assessment of travel times and apparent velocities between the stations. COVINGTON et al. (2011) derived a rule-of-thumb relation that the time scale of temperature variations and the underground travel time until

these variations could be observable are comparable. In other words, diurnal oscillations can be tracked to the point, which is reached by the surface inflowing water within a day. When the diurnal temperature signal is well expressed, the lag between two corresponding minima or maxima at two different stations is a good approximation of the travel time. An example of diurnal temperature oscillations with growing lags between P1, P2 and P3 during flood recession are shown in figure 13.

The successive delays in the temperature signal were recorded during the recession period following a flood event. By contrast, the inflow of fresh floodwater is also characterised by distinct drop in SEC. The temperature and SEC records were analysed manually by calculating the lags between the temperature minima or maxima or between delays in the SEC records. About 20 such events were analysed and over 50 time lags between two or more stations were calculated. The time lags are given in Table II. Figure 14 shows the dependence of travel times and apparent velocities between P1 and P2 and between P2 and P3 on the flow rate.

The flow velocities in the system have been assessed with numerous dye tracing experiments where the tracer was injected into the Reka River, boreholes, on the surface or in Abisso di Trebiciano (P5). Dominant flow velocities ranged from less than 50 m/h between Škocjan Caves (P1) and Timavo Springs at very low flow conditions, to over 300 m/h at discharge 90 m³/s (CIVITA et al., 1995; PETRIČ & KOGOVSĚK, 2016). Note that the time lags can generally be read only during relatively high flow, which makes the velocities given in Table II relatively high compared to those obtained in tracer tests.

Conclusions and further perspectives

The Reka-Timavo system presents numerous open research challenges. For further and more in-depth reading, a reader is referred to works of others (e.g. CUCCHI et al., 2015; ZINI et al., 2015). Our understanding of the processes occurring in the phreatic zone remains limited, and the structural characteristics of this zone are still largely unknown. Recent studies (BREITENBERG, 2019; PIVETTA et al., 2021) have shown that flood events within the system can induce measurable geodetic and gravimetric responses. These findings highlight the dynamic nature of the aquifer and open new avenues for exploration. I am confident that this enigmatic system will continue to inspire future generations of speleologists and hydrologists alike.

Paolo Manca¹, Michele Potleca¹, Tullio Quaia², Luca Zini²

Censimento e caratterizzazione delle aree e acquiferi carsici del Friuli Venezia Giulia

1) Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile - Servizio geologico, Trieste; 2) Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze, Università degli Studi di Trieste

Abstract. Karst aquifers represent a strategic resource for future drinking water supply, making their characterization and protection a priority. In compliance with Regional Law 15/2016, the Geological Survey of the Autonomous Region of Friuli Venezia Giulia and the Department of Mathematics, Informatics and Geosciences of the University of Trieste initiated a multi-year project aimed at delineating regional and cross-border karst aquifers. This paper presents the applied methodologies and the achieved results, including the systematic inventory of karst areas and aquifers, springs, concentrated and diffuse recharge zones, as well as associated hydrogeological features.

Riassunto. Gli acquiferi carsici rappresentano una risorsa strategica per l'approvvigionamento idrico potabile, per cui la loro individuazione e protezione sono aspetti prioritari. In attuazione della L.R. 15/2016, il Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia e il Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze dell'Università di Trieste hanno avviato un progetto pluriennale volto a individuare gli acquiferi carsici regionali e transfrontalieri. In questo articolo vengono riassunte le metodologie adottate e i risultati ottenuti che hanno portato al censimento delle aree ed acquiferi carsici, delle sorgenti e delle aree ad infiltrazione concentrata e diffusa.

Introduzione

La L.R.15/2016 ha istituzionalizzato una visione d'insieme del fenomeno carsico nel Friuli Venezia Giulia, riconoscendo il legame indissolubile tra le grotte, le aree carsiche e gli acquiferi carsici. In particolare la norma regionale prevede che la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia approvi i criteri per l'individuazione delle aree carsiche, dei relativi acquiferi, delle zone sorgentifere e delle aree di ricarica dell'acquifero carsico. Nell'ambito di tale caratterizzazione è previsto che vengano individuate le aree ad infiltrazione concentrata e le aree ad infiltrazione diffusa.

Per l'attuazione di tali obiettivi è stato avviato un progetto pluriennale di collaborazione tra il Servizio geologico e il Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste, istituendo un tavolo di lavoro partecipato con il Servizio gestione risorse idriche della Regione, gli enti gestori degli acquedotti e i gruppi speleologici. Questi ultimi, in particolare, oltre ad alimentare il Catasto Speleologico Regionale (CSR) che rappresenta una risorsa di primaria importanza per la definizione delle aree carsiche, hanno avuto un ruolo attivo nel progetto, condividendo la conoscenza del territorio e partecipando attivamente nei test di tracciamento idrogeologico sia all'immissione dei traccianti in cavità che al campionamento alle sorgenti (FINOCCHIARO et al., 2023; PONTON et al., 2020).

Modello concettuale

Il modello riportato in figura 1, tratto dalla più recente bibliografia di settore (HARTMANN et al., 2014) e modificato nell'ambito del presente lavoro, illustra in modo schematico le diverse parti che compongono una 'morfo-idrostruttura carsica'.

Si tratta chiaramente di uno schema esplicativo e non esaustivo di tutte le casistiche presenti in regione, che tuttavia si ritiene opportuno richiamare in quanto sintetizza, illustrandoli graficamente, tutti i diversi settori che costituiscono un acquifero carsico.

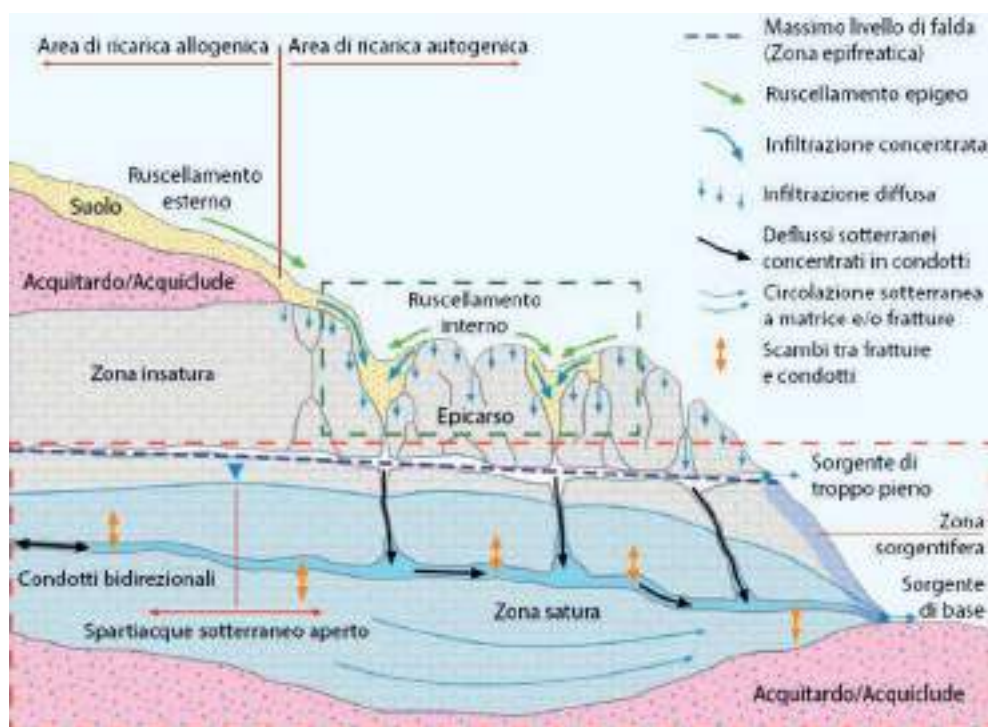


Fig. 1 - Modello che illustra in modo schematico le diverse parti che compongono una 'morfo-idrostruttura carsica' (modif. da HARTMANN et al., 2014).

La linea tratteggiata in verde mette in evidenza un settore dell'area di ricarica autogena in cui sono presenti aree ad infiltrazione concentrata e aree ad infiltrazione diffusa. La linea tratteggiata in rosso evidenzia il settore interessato dalla falda, che può essere a sua volta suddiviso in zona saturata e zona epifreatica (zona di oscillazione della falda, compresa tra il livello minimo e quello massimo, rappresentato con la linea tratteggiata in blu). La sorgente di base è posizionata nel punto di contatto tra l'unità carsificata e l'acquitardo (nel caso specifico si tratta di una sorgente per soglia), mentre la soprastante sorgente di troppo pieno si posiziona nella zona epifreatica e si attiva solo quando il livello della falda supera la quota minima della sorgente stessa.

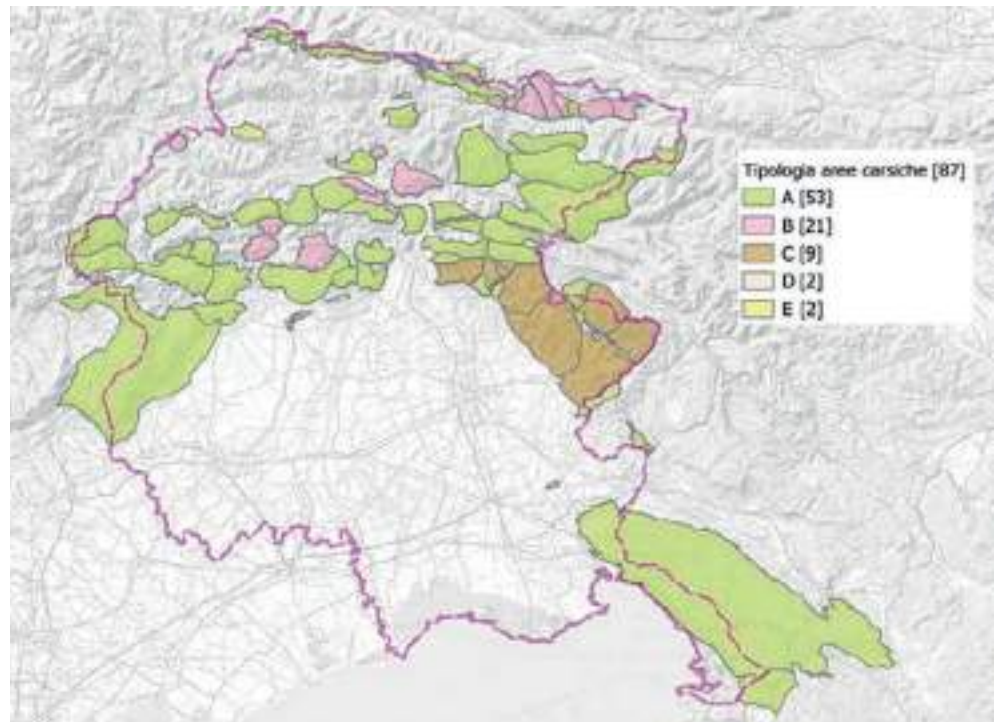
Il modello schematizza anche il ruolo di eventuali formazioni geologiche impermeabili e/o a minor permeabilità (in rosa), sia nei processi di ricarica esterna dell'acquifero (ricariche allogeniche), che di immagazzinamento delle riserve idriche, che di vincolo per la sorgente. In grigio sono rappresentate le rocce carsificate, caratterizzate da elevata permeabilità per fessurazione e carsismo (epigeo ed ipogeo).

Criteri di individuazione delle aree ed acquiferi carsici

L'individuazione, la perimetrazione e la caratterizzazione delle aree e degli acquiferi carsici regionali sono state eseguite sulla base di 4 criteri tra loro strettamente interconnessi:

1. Criterio litologico: un'area carsica è una porzione di territorio contraddistinta dalla presenza di rocce solubili o carsificabili (calcari, dolomie, brecce/conglomerati carbonatici, evaporiti) marcate da una porosità secondaria per fessurazione e carsismo. Nei carbonati il processo carsico è legato all'acqua piovana che assorbe anidride carbonica dall'atmosfera, forma acido carbonico debole, penetra nel terreno e dissolve le rocce, creando le tipiche strutture carsiche esterne ed interne. Nelle evaporiti il processo è legato alla solubilizzazione semplice (per dissociazione e senza l'intervento di acidi) della roccia. Tali condizioni geologiche conferiscono alle aree carsiche degli aspetti geomorfologici ed idrogeologici peculiari, di cui ai criteri successivi.
2. Criterio geomorfologico superficiale: un'area carsica è caratterizzata da una limitata idrografia superficiale e dalla presenza di peculiari morfotipi epigei quali valli cieche, doline, campi solcati, inghiottitoi etc. La genesi e l'evoluzione di questi morfotipi sono condizionate dall'assetto strutturale dell'ammasso roccioso, cioè dall'orientazione dei piani della stratificazione, dalle faglie e dal sistema fessurativo.

Fig. 2 - Le 87 aree carsiche/idrostrutture regionali e transfrontaliere.



3. Criterio geomorfologico sotterraneo: un'area carsica è contraddistinta da processi dissolutivi/erosivi dell'acqua anche all'interno dell'ammasso roccioso. Questi spesso generano grotte e complessi ipogei, costituiti da tipici morfotipi quali gallerie, pozzi, caverne, meandri, abissi etc. Alcune di queste grotte consentono di raggiungere la zona saturata degli acquiferi, costituendo delle vere e proprie finestre idrogeologiche sulla risorsa idrica. Diverse cavità sono talvolta interconnesse tra di loro e danno origine a complessi carsici dagli sviluppi chilometrici. Le grotte sono censite nell'ambito delle attività del Catasto Speleologico Regionale, che si configura quale centro di raccolta dati e di studi del patrimonio speleologico, delle aree carsiche e degli acquiferi carsici.
4. Criterio idrogeologico: un'area carsica è un'idrostruttura in cui le discontinuità allargate dalla dissoluzione carsica permettono un rapido drenaggio delle acque. In quest'ottica vanno redatte delle carte idrogeologiche, dove le litologie di cui al criterio 1 vanno raggruppate e tradotte in classi di permeabilità. È fondamentale definire le direzioni di deflusso sotterraneo, ricostruendo il percorso dell'acqua dalle aree di infiltrazione (concentrata e diffusa) fino alle sorgenti. Queste ultime, a loro volta, vanno contestualizzate nell'ambito dell'assetto idrogeologico del massiccio; in particolare se lo stesso presenta o meno dei litotipi poco permeabili (acquitardo) o impermeabili (acquiclude) che possono agire in termini di limite o soglia di permeabilità.

L'applicazione di tali criteri ha portato alla perimetrazione di 87 aree carsiche/idrostrutture regionali e transfrontaliere, coprenti circa il 28% del territorio regionale e il 69% del territorio montano-collinare (Fig. 2). All'interno di queste aree sono stati delimitati oltre 28.000 morfotipi carsici epigei, principalmente doline (ZINI et al., 2019).

Per le diverse peculiarità geologiche e geomorfologiche (epigee ed ipogee), le aree carsiche sono state inoltre suddivise in 5 tipologie o classi così identificate:

Area carsica di tipo A: area in cui affiorano rocce calcaree o dolomitiche caratterizzate da un carsismo ben sviluppato. La carsificazione è accertata dalla presenza diffusa di forme carsiche superficiali e/o ipogee significative ed eclatanti (doline, campi solcati, ingressi di cavità, sistemi carsici, grotte sorgenti etc.). In questa classe sono state identificate 53 aree.

Area carsica di tipo B: area in cui affiorano rocce calcaree o dolomitiche che presentano un carsismo poco sviluppato e scarsamente diffuso. Si tratta di aree caratterizzate da forme carsiche superficiali e/o ipogee poco significative, seppur presenti. In questa classe sono state identificate 21 aree.

Area carsica di tipo C: area in facies di flysch (ovvero la cui litologia è riconducibile al flysch della successione cenozoica regionale affiorante nelle Prealpi Giulie) in cui si sono individuate cavità, sorgenti e indizi di sprofondamenti legati alla carsificazione degli strati e delle bancate prettamente calcaree (i cosiddetti “megabanchi” o “megastrati carbonatici”) intercalati nelle assise marnoso-arenacee del flysch. Tali litologie sono molto carsificate e presentano numerose cavità con estensioni anche chilometriche. In questa classe sono state identificate 9 aree.

Area carsica di tipo D: area in cui affiorano o sono subaffioranti rocce conglomeratiche a clasti prevalentemente carbonatici con evidente presenza di forme carsiche superficiali e/o ipogee. In questa classe sono state identificate 2 aree.

Area carsica di tipo E: area in cui affiorano o sono subaffioranti rocce evaporitiche con evidenti forme superficiali. Sono aree in cui gli affioramenti evaporitici sono limitati, ma possono essere significative di rocce evaporitiche sepolte e interessate da fenomeni carsici ipogei, possibili cause di dissesti superficiali oltre che di flussi sotterranei. In questa classe sono state identificate 2 aree.

Criteria di individuazione delle aree ad infiltrazione concentrata e diffusa

Le aree soggette a infiltrazione concentrata sono porzioni di territorio caratterizzate dall'affioramento di rocce carsificabili denudate e/o dalla presenza di morfologie carsiche superficiali che condizionano le modalità di infiltrazione delle acque nel sottosuolo, ovvero depressioni naturali quali doline, inghiottitoi, polje, valli cieche o asciutte, che determinano una elevata vulnerabilità degli acquiferi.

A scala regionale, le aree a infiltrazione concentrata nelle aree carsiche sono quelle relative a:

- Depressioni naturali, la cui morfologia determina dei flussi di assorbimento centripeti. Tali aree sono state identificate attraverso l'analisi morfologica in ambiente GIS del modello digitale del terreno (DTM) ricavato dal modello LiDAR a 5 m mediante il tool 'Fill'.
- Aree denudate, la cui mancanza di suolo/vegetazione determina non solo una maggior infiltrazione efficace (la mancanza di vegetazione riduce l'evapotraspirazione), ma anche l'assenza di una protezione fondamentale dell'acquifero, in quanto a fronte di possibili inquinanti il suolo agisce sia in termini meccanici (ritenzione e filtro) che chimico-fisici (adsorbimento). Tali aree sono state identificate attraverso l'analisi di immagini multispettrali e degli indici di vegetazione (NDVI) calcolati su immagini Sentinel-2A, integrando i tematismi della Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRn). I dati sono stati corretti e validati mediante la carta dell'Uso del Suolo MO-LAND2000 e integrati con banche dati territoriali open data (OpenStreetMap).

Criteria di individuazione delle aree sorgentifere

Un'area sorgentifera è una zona in cui sono ubicate le sorgenti di un sistema carsico, nelle quali emerge una parte della risorsa idrica.

La norma parla di aree sorgentifere e non di punti sorgente perché le emergenze di un acquifero carsico quasi mai sono solo puntuali. Alcune possono esserlo perché costituite da ingressi di grotte sorgenti e/o determinate da condizioni geologiche analoghe (discontinuità incarsita), ma spesso l'emergenza di un acquifero è costituita da un'area vera e propria con la presenza di più punti sorgente.

Tipicamente si possono individuare una o più sorgenti perenni (di base), generalmente nel fondovalle, a cui sono associate alcune sorgenti temporanee a quote più elevate (troppo pieni), condizionate dagli apporti infiltrativi, con portate variabili o nulle, ma che si attivano rapidamente in condizioni di piena. Le sorgenti carsiche possono essere costituite anche da ingressi di grotte totalmente sature d'acqua o parzialmente sature, presentando quindi tratti aerei che si alternano a tratti sifonanti. Queste ultime idro-morfologie sono tipicamente osservabili nelle sorgenti di troppo pieno, altimetricamente più elevate rispetto alle sorgenti di base. Alcune sorgenti di fondovalle



Fig. 3 - Tracciamenti di acque carsiche.

possono anche essere sepolte, ovvero ricoperte da una coltre più o meno potente di depositi quaternari, alimentando direttamente corsi d'acqua o falde di acquiferi limitrofi porosi.

Per delimitare correttamente un'area sorgentifera è necessario analizzare il contesto geologico dell'acquifero, individuando le relazioni tra le unità permeabili (calcari, dolomie ed evaporiti) e quelle a minore permeabilità (acquitardi e acquicludi). Fondamentale risulta un rilevamento idrogeologico in campagna, sito per sito. Al rilievo geologico classico vanno associate delle osservazioni di carattere idrogeologico, verificando puntualmente l'ubicazione di tutte le 'venute d'acqua'. Questo rilievo va effettuato in magra e durante le fasi di piena, così da individuare correttamente tutte le emergenze dell'acquifero e perimetrare le aree sorgentifere nel dettaglio.

Poiché mancava un database organico delle sorgenti, sono state raccolte e integrate informazioni da fonti diverse: Catasto Speleologico Regionale, Carta geologico-tecnica, CTRN 1:5000, carte Tabacco, OpenStreetMap, database UNITS e quello del Servizio Gestione Risorse Idriche. Quest'ultimo ha permesso di riconoscere le sorgenti captate a uso idropotabile, correggendone la posizione con confronti incrociati, verifiche sul campo e il contributo degli enti gestori. Sono stati così individuati oltre 2.500 punti sorgenti all'interno o in prossimità delle aree carsiche. Questi punti sono stati poi valutati singolarmente, e molti verificati direttamente sul territorio, fino ad arrivare a un censimento di circa 1250 sorgenti, con portate variabili da pochi litri al minuto ad oltre 100 m³/s. A questi punti sorgenti è stato applicato un buffer di 200 m per identificare, all'interno delle aree carsiche, delle zone di attenzione nelle quali si dovrà prioritariamente investigare al fine di dettagliare le aree sorgentifere vere e proprie. Le stesse saranno demandate a futuri prosiegui progettuali in applicazione dei criteri sopradescritti.

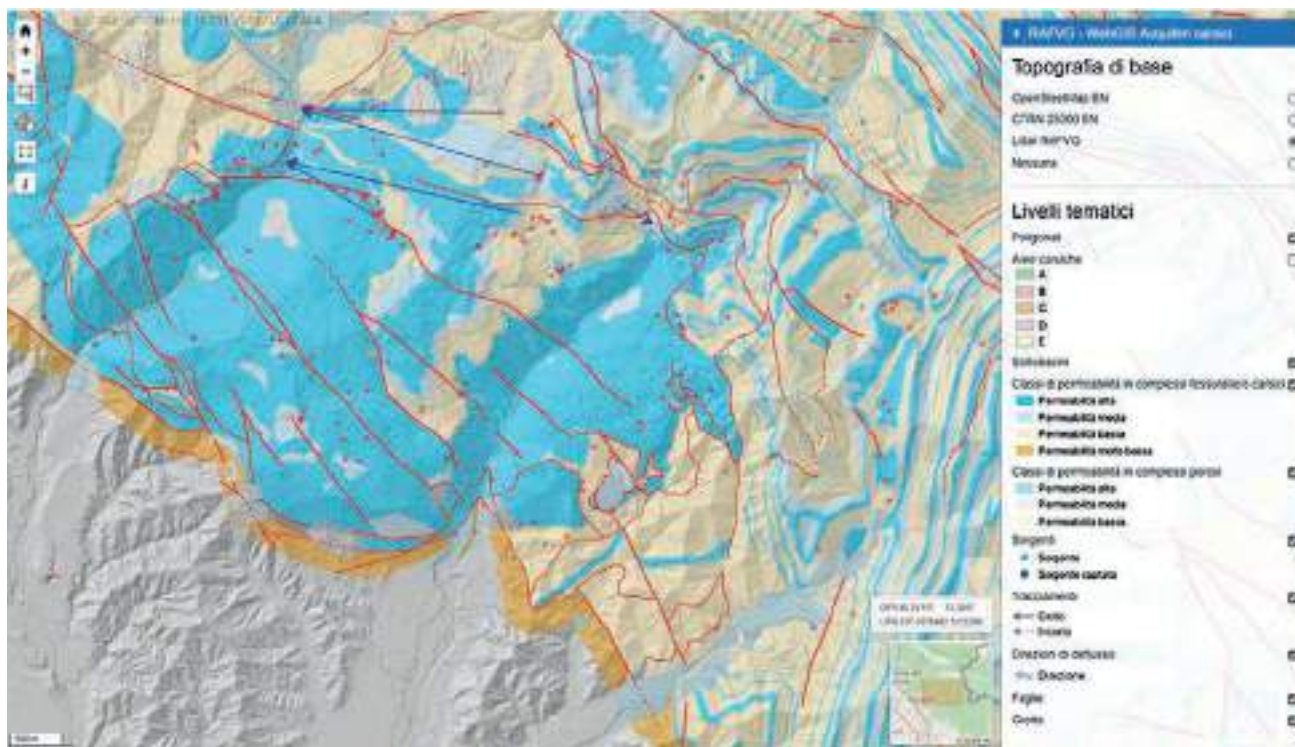


Fig. 4 - Un esempio di carta idrogeologica di un'area carsica: il Massiccio del Bernadia e dintorni.

Carte idrogeologiche

Per ogni area carsica sono state redatte delle carte idrogeologiche alla scala di progetto 1:25.000, nelle quali sono state identificate le unità idrogeologiche, i limiti degli acquiferi, le principali direttrici di deflusso (ove possibile) e la suddivisione dei sottobacini afferenti alle diverse sorgenti. In alcune aree sono stati realizzati degli studi specifici e sono stati acquisiti nuovi dati in campagna ottenuti grazie al monitoraggio in continuo delle sorgenti principali e da test con traccianti (Fig. 3).

Il lavoro si è basato su un'approfondita ricerca bibliografica, sia di carattere scientifico che nell'ambito delle relazioni geologiche di corredo ai Piani regolatori comunali e/o ad opere progettuali. Inoltre, sono state analizzate tutte le pubblicazioni di settore edite dai gruppi speleologici regionali.

La carta idrogeologica traduce le informazioni geologico-formazionali in termini di permeabilità - intesa come l'attitudine del terreno a lasciarsi attraversare dall'acqua che si muove per gravità - ed è stata realizzata sulla base della cartografia geologica, al fine di consentire una lettura dell'area di ricarica in chiave idrogeologica. La cartografia geologica di base, utilizzata per la realizzazione della carta idrogeologica, è composta dalla mosaicatura di carte geologiche di differenti scale (da 1:10.000 a 1:150.000), pubblicate o inedite, prodotte da vari Autori nel corso degli ultimi decenni, che sono state assemblate e omogeneizzate dal punto di vista litostratigrafico e, in ultima istanza, da quello della permeabilità.

Le carte idrogeologiche delle aree carsiche sono pubblicate e consultabili sul webgis del CSR (<https://catastogrotte.regione.fvg.it/webgisacquiferi>), dove vengono riportati anche tutti i traccianti documentati e pubblicati, con la relativa citazione bibliografica degli Autori (esempi in Figg. 4 e 5).

I dati, comprensivi dei perimetri delle aree carsiche, delle aree ad infiltrazione concentrata e ad infiltrazione diffusa e delle sorgenti sono altresì caricati e metadati nell'Infrastruttura Regionale dei Dati Ambientali e Territoriali (IRDAT), visualizzabili e scaricabili attraverso lo strumento EAGLE FVG (<https://eaglefvg.regione.fvg.it/eagle/main.aspx?configuration=Guest&workspacename=68da3618087edfc638f53c4e>).

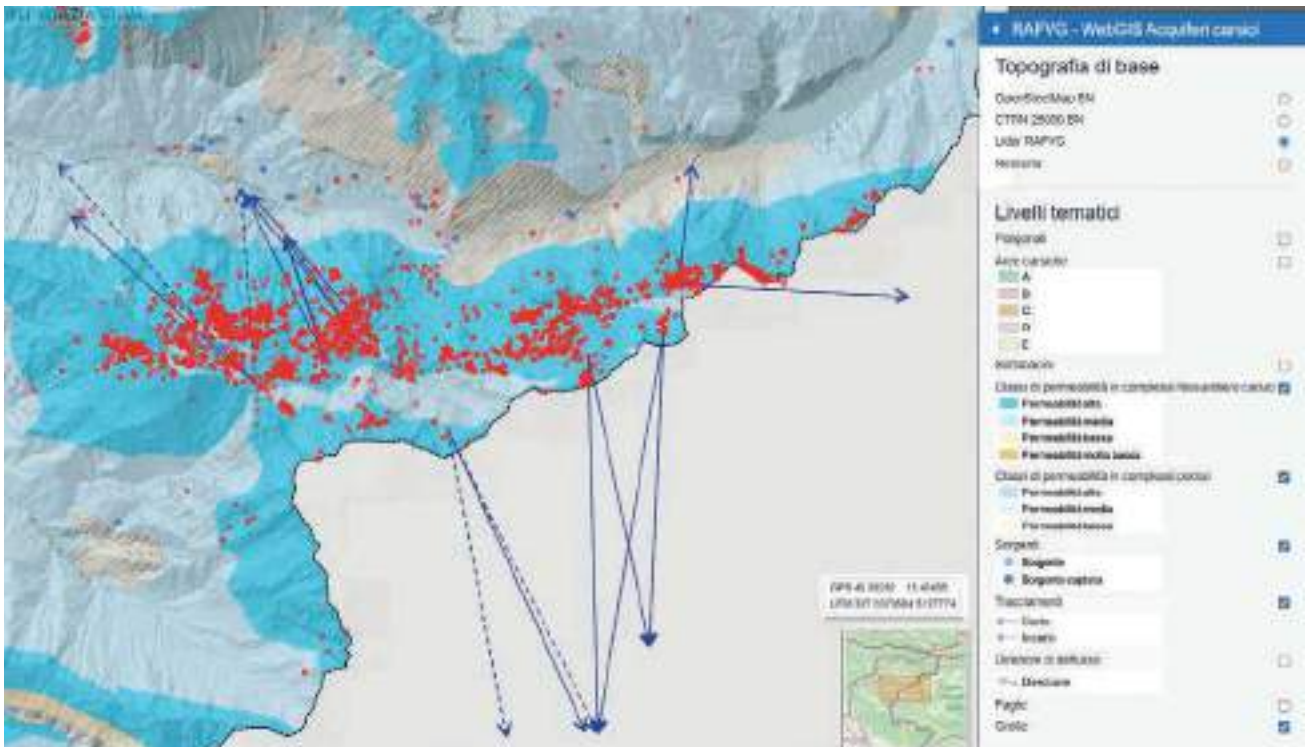


Fig. 6 - Un esempio di carta idrogeologica di un'area carsica: il Massiccio del Monte Canin.

Conclusioni

La definizione dei criteri per l'individuazione delle aree carsiche e la loro applicazione sistematica hanno permesso di ottenere, per la prima volta in Friuli Venezia Giulia, una mappatura omogenea e condivisa delle aree carsiche e degli acquiferi.

Questo lavoro rappresenta un punto di riferimento per la pianificazione territoriale, la gestione delle risorse idriche e la tutela ambientale, in linea con i principi stabiliti dalla normativa nazionale di settore e dalla L.R. 15/2016.

Ringraziamenti

Sono moltissime le persone che hanno contribuito in vario modo alla realizzazione e revisione del presente lavoro. Tra queste si ringraziano i gruppi e le associazioni speleologiche del Friuli Venezia Giulia i cui dati, conoscenze e lavori, attraverso diverse generazioni, hanno reso possibili i risultati qui presentati. In particolare si vogliono citare i partecipanti ai numerosi tavoli di lavoro del progetto: Sara Bensi¹, Fiorella Bieker¹, Chiara Calligaris², Giacomo Casagrande³, Stefano Cimenti⁴, Franco Cucchi², Roberto Cusmich⁵, Valentino De Giorgi⁶, Marcello Del Ben⁷, Fabrizio Fattor¹, Michele Ferneti², Furio Finocchiaro², Elena Grande⁸, Daniela Iervolino³, Mirko Kante⁹, Federica Lippi³, Daniele Karlicek², Giancarlo Massari¹, Shaula Martinolli², Sara Oberti¹, Roberta Paletta⁶, Chiara Piano¹, Maurizio Ponton², Giada Saccavini¹⁰, Giulia Santorso⁶, Danijel Šušteršič⁹, Luca Terribili², Lorenzo Tirello⁵, Philippe Turpaud², Francesca Vatolo⁷, Marzio Voltarel⁶, Massimo Zanetti¹, Alessandro Zucca³ (1: Servizio geologico - Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile; 2: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste; 3: Servizio gestione risorse idriche - Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile; 4: Acquedotto Poiana S.p.a.; 5: Acquedotto AcegasApsAmga; 6: Acquedotto Livenza Tagliamento Acque S.p.a.; 7: Autorità Unica per i Servizi Idrici e i Rifiuti, AUSIR; 8: Acquedotto CAFC S.p.a.; 9: Acquedotto del Carso S.p.a.; 10: Acquedotto HydroGEA S.p.a).

Bibliografia

FINOCCHIARO F., PONTON M., ZINI L., CALLIGARIS C., MANCA P. & POTLECA M., 2023 - *Test di tracciamento delle acque sotterranee della Bernadia (Prealpi Giulie): seconda puntata*. Mondo sotterraneo, n.s., XLVII, 1-2, pp. 99-104.

- HARTMANN A., GOLDSCHIEDER N., WAGENER T., LANGE J. & WEILER M., 2014 - *Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches*. Reviews of Geophysics. 10.1002/2013RG000443.
- PONTON M., ZINI L., CALLIGARIS C., FINOCCHIARO F., MANCA P., POTLECA M. & TERRIBILI L., 2020 - *Test di tracciamento delle acque sotterranee nella Grotta Tirfor (Bernadia, Prealpi Giulie): risultati preliminari*. Mondo sotterraneo, n.s., XLIV, 1-2, pp. 43-48.
- ZINI L., CALLIGARIS C., FINOCCHIARO F., MANCA P., PIANO C., POTLECA M., PONTON M. & TERRIBILI L., 2019 - *Identification and characterization of the karst areas of the Friuli Venezia Giulia Region (NE Italy)*. Conference Proceeding of the Flowpath 2019 - National Meeting on Hydrogeology, 12-14 June 2019, Milan, Italy, pp. 127-128.

Riccardo Corazzi¹, Rino Semeraro², Louis Torelli¹

Conclusione delle ricerche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche 2009-2024 sul Davorjevo brezno (Kras/Carso, Slovenia). Nota informativa

1) Commissione Grotte “E. Boegan” SAG-CAI (CGEB), Trieste; 2) CGEB (Socio onorario), Gorizia

Abstract. Davorjevo brezno is a cave of 6.6 km that extends below the Dane basin immediately south of Škocjanske jame (Slovenia, Classical Karst). In the cave, geologic, geomorphologic and hydrogeological researches in the three hypogean streams, were carried out through two monitoring cycles of physical-chemical parameters in 2020-2021 and 2022-2024. At the same time, stratigraphic investigations and geomorphologic comparisons with the large sink-streams in the surrounding area, were carried out. At present, preliminary or partial results of the 2009-2024 research in Davorjevo brezno have been published, or are in the process of being published, in national and international journals and congress proceedings. The final data, especially concerning karst hydrogeology, are being processed.

Riassunto. Il Davorjevo brezno è una grotta di 6,6 km che si sviluppa al di sotto del Bacino di Dane immediatamente a Sud delle Škocjanske jame (Slovenia) nel Carso Classico. Nella grotta, caratterizzata da tre torrenti ipogei principali, sono state eseguite indagini geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche, soprattutto attraverso due cicli di monitoraggio fisico-chimico negli anni 2020-2021 e 2022-2024. Contemporaneamente sono state eseguite ricerche stratigrafiche e geomorfologiche negli inghiottitoi dell'area. Allo stato attuale i risultati di indagini preliminari o parziali sono stati pubblicati su riviste nazionali e internazionali o atti congressuali. I risultati definitivi, soprattutto concernenti l'idrogeologia carsica, sono in fase di elaborazione.

Introduzione

Il Davorjevo brezno 10060 SLO (Abisso Davorjevo) è una delle maggiori grotte del Carso Classico. Situata nella parte NE del Kras/Carso in Slovenia (Fig. 1), è stata scoperta nel 2009 ed esplorata e studiata dalla Commissione Grotte “E. Boegan” SAG CAI Trieste (CGEB) in collaborazione con gli speleologi sloveni, in particolare del JD Dimnice Koper e del JK Železničar Ljubljana, nonché, recentemente, con speleologi del Gruppo Speleologico S. Giusto di Trieste.

La grotta si apre all'interno del bacino chiuso di Dane, immediatamente a S delle Škocjanske jame/Grotte di San Canziano alla quota 511 m s.l.m. e attualmente è profonda 317 m con uno sviluppo spaziale di 6660 m e planimetrico di 6059 m. Dopo il sistema di pozzi iniziali la grotta prosegue con il Meandro “Tihe Vode”, che riceve il “Meandro dei Carbonari”. Il Meandro “Tihe vode” confluisce nel “Meandro Veneziano”, il quale a monte prosegue con l'asse composto dal “Meandro del Papà” con il “Meandro Marc'Aurelio”. Il “Meandro Veneziano”, a valle, termina con il primo sifone (“vecchio fondo”) alla quota media (livello idrico) di 232 m s.l.m. I citati sistemi di gallerie percorsi da corsi d'acqua, si snodano verso l'alto (a monte), verso le loro zone di origine, fino a raggiungere la quota 417 m s.l.m. (profondità 94 m).

Risalendo la parte finale (a valle) del “Meandro Veneziano” e poi ridiscendendo attraverso una via di by-pass, si raggiunge la “Via di Susy” (Fig. 2), un collettore con portata molto maggiore rispetto ai precedenti corsi d'acqua. Dalla galleria “Susy”, attraverso sifoni posti al suo termine, si riemerge a



Fig. 1 - Ubicazione dell'area.



Fig. 2 - Il collettore Susy in fase di magra (foto P. Gedei).

(trasformati in portata), temperatura e conducibilità elettrica K25. Ne è emerso un primo quadro sulla complessa idrogeologia (CORAZZI et al., 2023; SEMERARO et al., 2023) che ha permesso di iniziare un secondo ciclo, anche con analisi chimiche, negli anni 2022 e 2024, poiché nel frattempo era stato scoperto il collettore della “Via di Susy”, perciò nei tre torrenti ipogei. Inoltre, è stato studiato il fenomeno fisico delle maree atmosferiche nella grotta (ARDETTI & VENICA, 2022), riuscendo anche a registrare variazioni di pressione dovute ad eventi naturali straordinari.

Durante il secondo ciclo sono state effettuate ricerche geologiche, ricostruendo la successione stratigrafica mediante un campionamento delle rocce dal fondo fino alla superficie, nonché geomorfologiche studiando le morfologie primarie e secondarie correlate ai livelli altimetrici. La grotta risulta svilupparsi nel Calcare ad Alveoline e Nummuliti (Ilerdiano), molto carsificabile, raggiungendo nella parte più profonda la Formazione Liburnica (Maastrichtiano-Paleocene p.p.), dove in alcuni punti sono stati trovati strati con lenti e noduli di carbone. Parte del meandro Papà-Marc’Aurelio si sviluppa nei calcari sottostanti il Flysch della sinclinale di Brkini. La grotta è caratterizzata da gallerie singenetiche e paragenetiche, nonché meandri, con al fondo anche strati di concrezione calcitica attualmente in erosione (SEMERARO et al., 2025).

Nel secondo ciclo di monitoraggio, non considerando (per semplificazione) la portata del “Meandro Carbonari” poiché è piuttosto bassa conflueno poi nel “Meandro Veneziano”; per quest’ultimo sono state stimate portate min. 0,1 l/s, med. 26,1 l/s, max. 766 l/s, mentre il collettore “Susy” presenta portate min. 7,7 l/s, med. 104,5 l/s, max. 1107,5 l/s. Interessante osservare che l’apporto del “Meandro Veneziano” nel collettore “Susy” corrisponde mediamente al 17% della sua portata. Tutte le portate ricavate nei tre torrenti ipogei sono state ottenute o dagli stramazzi installati o dalla relazione tra, per il “Susy” data la larghezza dell’alveo, misure di portata effettuate con metodo ionico e altezze idrometriche ottenute da sonda multiparametrica. Pertanto, allo stato attuale delle conoscenze (anche esplorative) il “Susy” è effettivamente un collettore ipogeo, di cui oggi noi

207 m s.l.m. in una galleria areata dove è situato un successivo sifone ancora inesplorato. La profondità massima, posta al fondo del sifone, è a quota 194 m s.l.m. (Fig. 3).

Studi e monitoraggi

Data l’importanza della grotta è stata eseguita, sul sistema idrologico interno, una serie di analisi preliminari (in cicli o puntuali), isotopiche ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$) più temperatura, pH e conducibilità elettrica da giugno 2015 a febbraio 2016, successive misure fisico-chimiche in situ e analisi chimiche nel 2018 e 2019. Nel 2018 è stato realizzato un test di tracciamento, coordinato dal Karst Research Institute ZRC SAZU di Postojna (Slovenia), iniettando fluoresceina nel primo sifone (“vecchio fondo”) e il tracciante è stato trovato nell’acquifero carsico del Carso (Abisso di Trebiciano etc.) dimostrando una direzione di drenaggio verso NW (PETRIČ et al., 2020). Un primo ciclo di monitoraggio, negli anni 2020 e 2021, dei due torrenti ipogei “Carbonari” e “Veneziano” è stato realizzato mediante la costruzione di due stramazzi e l’installazione di due CTD-Diver, registrando in continuo dati di altezza idrometrica

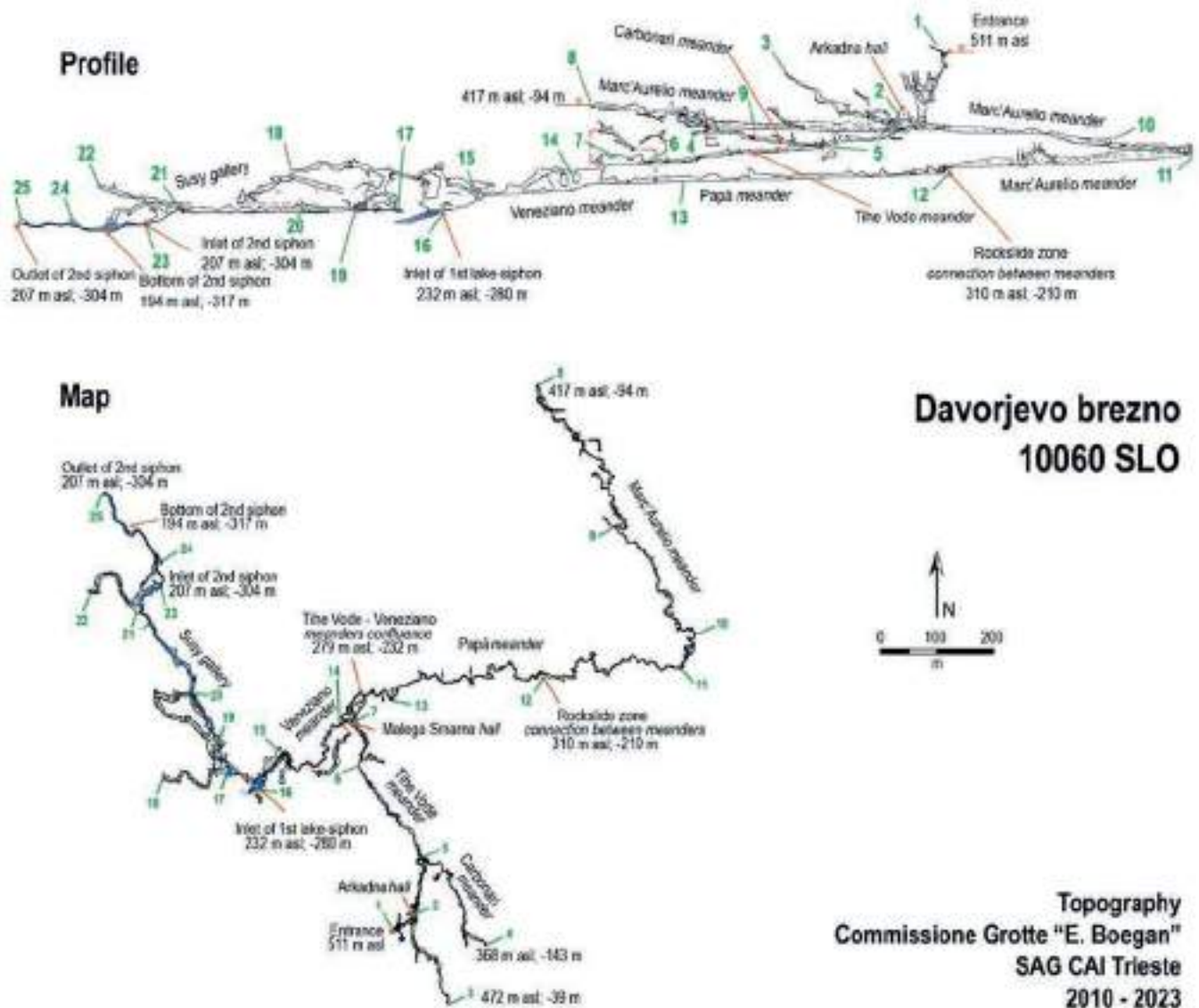


Fig. 3 - Sezione e planimetria del Davorjevo brezno.

conosciamo solo la sua parte a valle del sifone d'uscita del "Veneziano" e dalla frana in roccia lì esistente che impedisce la risalita del collettore a monte. Generalmente, le cavità vadose ed epifreatiche del Davorjevo brezno sono soggette a rapide variazioni di portata connesse con gli eventi pluviometrici. Differenze temporali tra l'inizio di alcuni fenomeni di pistonaggio, che precedono afflussi meteorici locali già invece avvenuti nel medio bacino del Fiume Reka/Timavo, causano nel Davorjevo brezno l'espulsione delle acque più mineralizzate immagazzinate nell'acquifero. Considerando la teorica falda carsica della zona, il bacino sotterraneo, ipoteticamente, potrebbe comprendere il bacino endoreico di Dane ed esternamente una parte della massa rocciosa carbonatica carsificata orientale e nord-orientale. I torrenti interni si differenziano sia nella temperatura [T°C] che nella conducibilità elettrica [EC K25]. Passiamo da temperature minime al "Carbonari" di 10,2 °C a massime di 11,4 °C a "Susy", mentre la conducibilità elettrica varia da quella minima al "Carbonari" di 368 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a quella massima di 676 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al "Susy".

Con il secondo ciclo di monitoraggio idrologico, accompagnato da analisi chimiche delle acque superficiali e sotterranee (Fiume Reka/Timavo, torrenti esterni di bacino di Dane, torrenti sotterranei del Davorjevo brezno), nonché con le ricerche geologiche e geomorfologiche effettuate, valutiamo di aver ottenuto un quadro sufficientemente ampio dei dati e perciò conclusivo delle ricerche nel periodo considerato.

Rimangono, tuttora, problemi irrisolti. Innanzitutto, alcuni nuovi rami sono in corso di esplorazione, ove stiamo investigando su alcuni aspetti geomorfologici. Inoltre, con le analisi chimiche sulle

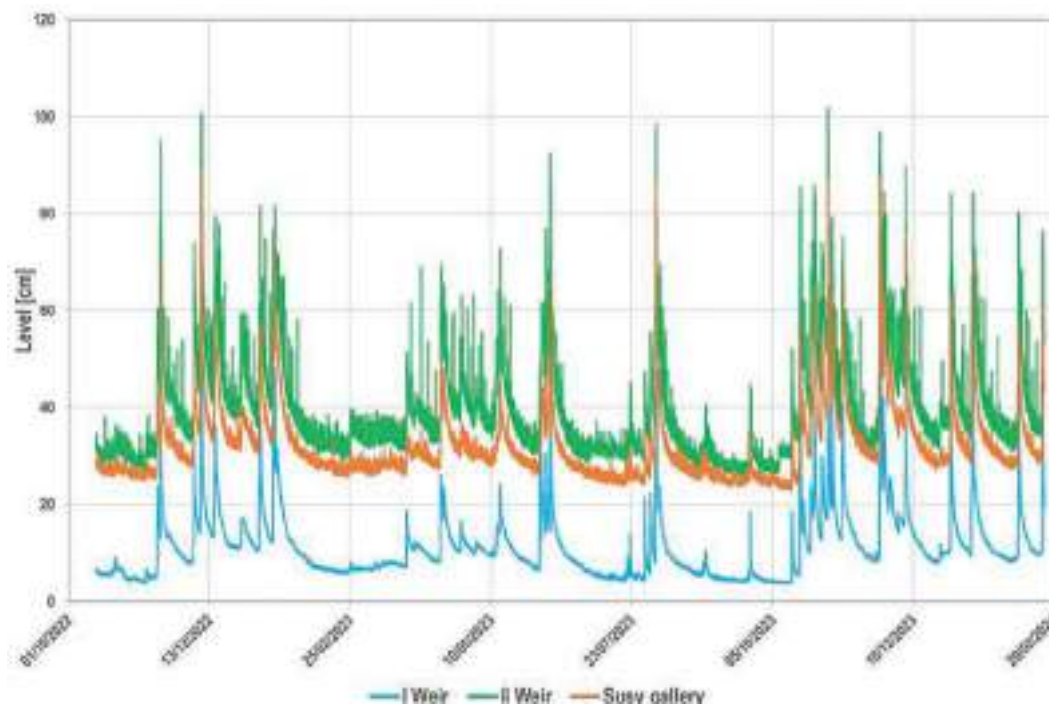


Fig. 4 - Livelli idrometrici (dallo 0 sonda) agli stramazzi del "Carbonari", "Veneziano" e alveo del collettore "Susy".

acque sotterranee del Davorjevo brezno e quelle superficiali abbiamo riscontrato, localmente, dei fenomeni d'inquinamento (*Escherichia coli* e alcuni metalli) d'interesse, che potrebbero anche considerarsi dei traccianti onde valutare le possibili aree-sorgente.

Bibliografia

- ARDETTI I. & VENICA S., 2022 - *Listening to the Davorjevo abyss*. 29th International Karstological School Classical Karst, Abstracts and Guide Book, Postojna, p. 102.
- CORAZZI R., DIQUAL A., SEMERARO R. & TORELLI L., 2023 - *Preliminary hydrogeological researches in Davorjevo brezno (Classical Karst)*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 52, pp. 41-63.
- PETRIČ M., RAVBAR N., ZINI L., CALLIGARIS C., CORAZZI R., ŽITKO Z., RESTAINO M. & KNEZ M., 2020 - *Determining the directions and characteristic of underground water flow in karst for the purpose of traffic route construction: The case of the new Divača-Koper railway (SW Slovenia)*. Acta carsologica, 49, 1, pp. 63-90.
- SEMERARO R., CORAZZI R., ARDETTI I. & VALENTINUZ F., 2023 - *Signal examples from different aquifer source areas in the flood events of Davorjevo brezno*. 30th International Karstological School, Abstracts and Guide Book, Postojna, p. 150.
- SEMERARO R., CORAZZI R. & TORELLI L., 2025 - *Geology, geomorphology and hydrogeology of the "Davorjevo brezno" cave*, Classical Karst. 19th International Congress of Speleology, Brasil, 2, pp. 91-95.

Giuseppe-Adriano Moro¹, Rosa Romanin¹, Loris Biasizzo¹,
Adalberto D'Andrea¹, Furio Finocchiaro^{1, 2}

Note sull'idrologia della sorgente carsica La Fontanate di Torlano (Nimis, Ud)

1) Circolo Speleologico ed Idrologico Friulano, Udine; 2) Dipartimento Matematica,
Informatica e Geoscienze, Università di Trieste

Abstract. In this short paper are reported first data about the hydrologic regime of the Fontanate di Torlano karstic spring. This spring is of major interest as it is believed to be the main outlet of the groundwater of the Monteprato plateau, a conspicuous karstic area of the Prealpi Giulie, where the most important cave so far known is the Grotta Sara (4,18 km; 166 m vertical range). The small cave from where the water runs has been modified to create a diversion aimed to feed the local aqueduct. Since 2023 the water level of the internal artificial pool has been monitored. During the first year the level was measured manually with no fixed frequency; in April 2024 a submersible datalogger was installed allowing to record data with a 15' interval. In this work we discuss the relation between the observed values of water level and temperature with rainfall and water level of the Cornappo Torrent.

Riassunto. In questo breve articolo vengono riportati i primi dati riguardanti il regime idrologico della sorgente carsica della Fontanate di Torlano. Questa sorgente riveste grande interesse poiché viene considerata la risorgenza principale dell'acquifero carsico dell'Altopiano di Monteprato, un'area carsica di rilievo nell'ambito delle Prealpi Giulie, dove la cavità naturale più importante finora nota è la Grotta Sara (4,18 km, 166 m di dislivello). La piccola grotta da cui fluisce l'acqua è stata modificata per consentire la captazione che alimentava l'acquedotto locale. A partire dal 2023 è stato monitorato il livello dell'acqua nella vasca artificiale interna alla cavità. Durante il primo anno di studio il livello è stato misurato manualmente, senza una frequenza predefinita, mentre a partire dall'aprile 2024 è stato installato un sensore di livello dotato di registrazione dati, con intervallo di misurazione di 15'. Viene discussa la relazione fra i valori di livello e temperatura dell'acqua con le precipitazioni ed il livello del Torrente Cornappo.

Introduzione

La sorgente detta La Fontanate di Torlano (254/63Fr) scaturisce lungo il versante sinistro della Val Cornappo, poco a monte dell'abitato di Torlano di Sopra (Nimis, Ud) e viene considerata la principale risorgenza alimentata dall'acquifero carsico dell'Altopiano di Monteprato. L'acqua fuoriesce da un cunicolo, attualmente sommerso con il livello idrico minimo imposto da una soglia realizzata al fine di gestire la captazione della sorgente. Questa, infatti, è stata utilizzata a lungo come fonte di acqua potabile, alimentando l'acquedotto dedicato alla memoria dei martiri dell'eccidio nazifascista di Torlano (25/08/1944).

L'utilizzo della cavità ha fatto sì che questa venisse chiusa con un'opera in muro e dotata di una soglia con due stramazzi posti alla quota di 248,2 m s.l.m., che genera la vasca di captazione dell'acquedotto. Quest'opera risulta danneggiata e parte del flusso non sfiora dagli stramazzi ma si infiltra attraverso una frattura nel calcestruzzo; i due filoni si riuniscono immediatamente all'esterno della cavità e, dopo un breve percorso, l'acqua raggiunge il Torrente Cornappo, posto 20 metri più in basso.

La successione sovrastante la sorgente della Fontanate è costituita da oltre 300 metri di rocce carbonatiche; prevalenti sono i calcari della Formazione del Cellina (Cretaceo inf.-sup.), di colore da biancastro a grigio scuro, ben stratificati con livelli fossiliferi ben marcati da rudiste e gasteropodi: in questa formazione si apre la Grotta Sara (7767/4740Fr), la maggiore cavità dell'Altopiano di Monteprato. Più a Sud affiorano calciruditi e calcareniti bianche e grigie, a stratificazione poco

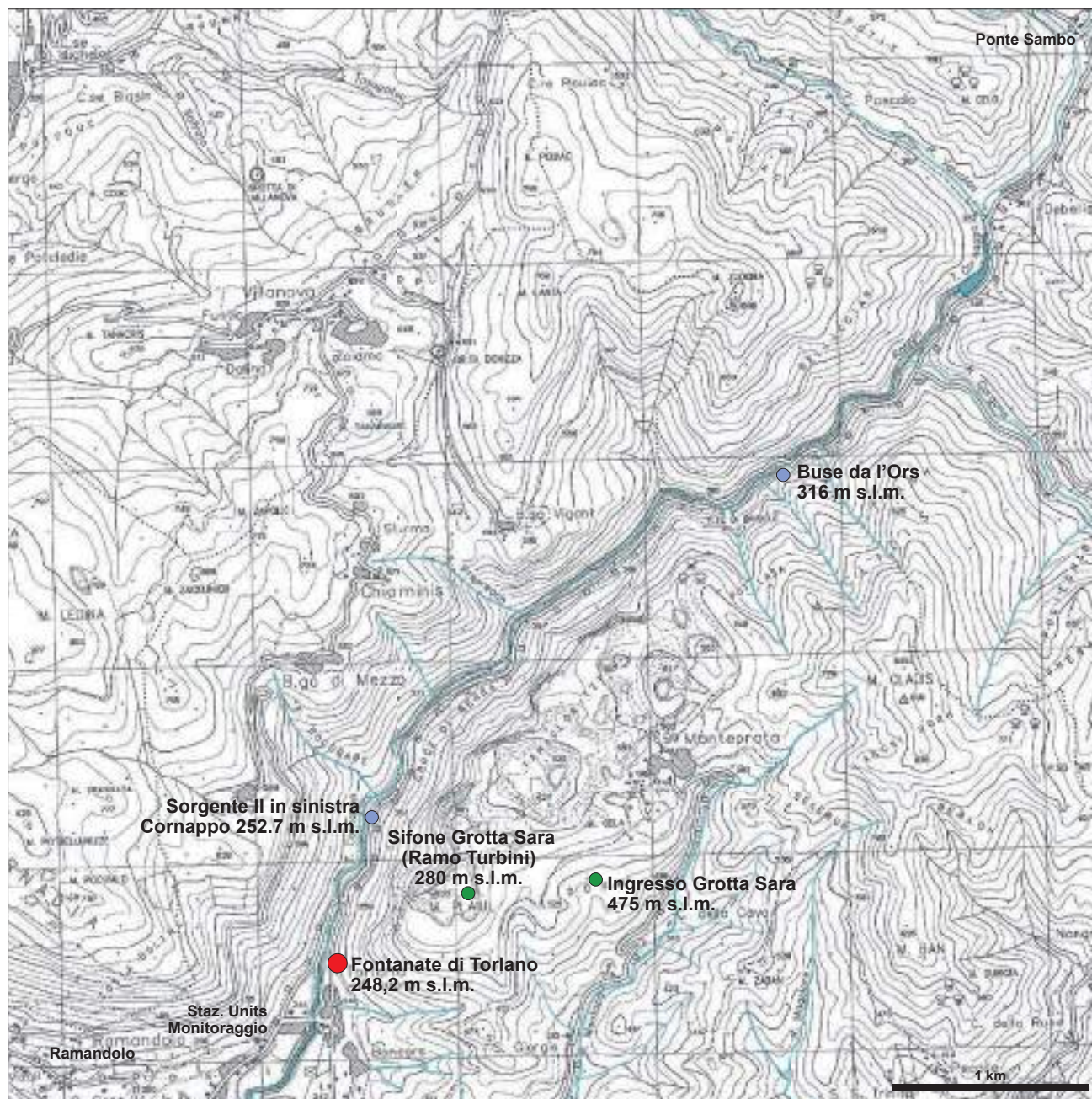


Fig. 1 - Posizione della Fontanate di Torlano, di altri elementi idrografici rilevanti e dei siti citati (base CTR 1:25000, ridotta).

Fig. 2 - L'interno della cavità e una parte della strumentazione installata (foto A. D'Andrea).

marcata, attribuite alla Formazione di Monte Cavallo del Giurassico sup.-Cretaceo inf., mentre piuttosto ridotti sono i lembi di Scaglia Rossa del Cretaceo sup.-Eocene.

Descrizione dei dati raccolti

Le ricerche speleologiche condotte nell'area dell'Altopiano di Monteptrato hanno consentito di individuare numerose cavità, pur di estensione limitata, fino a quando, nel 2014, venne scoperto da Stefano Turco (CSIF) l'ingresso della Grotta Sara, la cui esplorazione ha consentito di raggiungere la parte più profonda del massiccio carsico (BORLINI & TURCO, 2015), individuando una serie di ampie gallerie ad andamento sub orizzontale che sembrano appartenere a un collettore entro cui scorreva in origine un torrente, ormai scomparso per approfondimento della circolazione idrica. Nel corso delle prime esplorazioni è stato raggiunto uno specchio d'acqua sifonante, con superficie libera in condizioni di magra alla quota di 308 m circa. In alcune occasioni sono stati osservati indizi di una risalita delle acque fino alla quota di 325 m circa (Sala della Clessidra) con distruzione del campo interno installato dagli esploratori (Borlini, Simonetti, com. pers.). Grazie alle esplorazioni più recenti è stato raggiunto un sifone "finale" (per ora...) nel Ramo I Turbini Valle, a circa 280 m s.l.m. (Figg. 1 e 8).

A partire dal 2023 il Circolo Speleologico ed Idrologico Friulano ha intrapreso una campagna di studi volti ad approfondire la conoscenza dell'acquifero carsico dell'Altopiano di Monteptrato. Durante la prima fase di studio (dal 05/05/2023), considerata preliminare, la quota di pelo libero dell'acqua nella vasca artificiale posta all'interno della grotticella della Fontanate è stata rilevata "a mano" (235 misure), adottando come riferimento un punto fisso sull'orlo dell'opera in muratura che delimita il bacino.

Una volta definita la quota idrometrica minima in fase di magra, è stato installato (Fig. 2) un sensore di livello Van Essen Diver DI805, capace di misurare il livello idrico fino a 50 m con una risoluzione pari a 1 mm e la temperatura dell'acqua con una risoluzione di 0,01°C; il Diver è dotato di datalogger ed è stato programmato per acquisire una misurazione ogni 15'. L'intervallo temporale è stato scelto per essere coincidente con quello delle misurazioni dei parametri meteorologici e idrologici delle stazioni idro-meteo della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia, in modo da potere effettuare la correlazione fra i dati, senza necessità di trasformazioni. L'installazione del Diver è avvenuta dopo che il Comune di Nimis ha concesso al CSIF l'uso del sito e l'autorizzazione a ripristinare la chiusura della cavità con una porta che proteggesse la strumentazione da eventuali atti vandalici.

La registrazione ha avuto quindi inizio il 06/04/2024. Le misure a mano sono proseguite anche nel primo periodo di funzionamento del sensore al fine di poter confrontare correttamente le diverse curve ottenute.

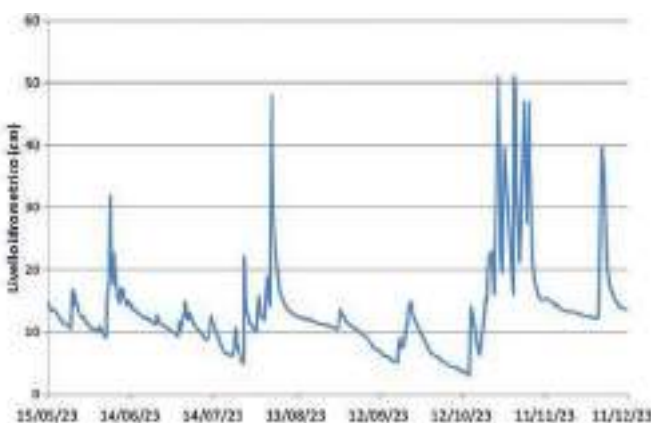


Fig. 3 - Livelli idrometrici della sorgente della Fontanate durante la prima fase di studio (15/5/2023-11/12/2023, misure raccolte a mano).

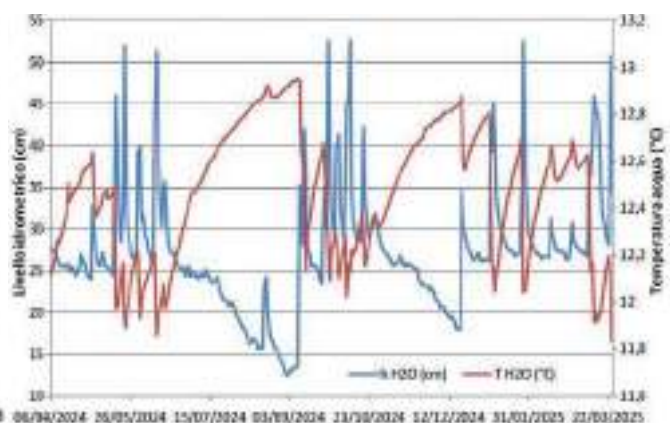


Fig. 4 - Media giornaliera dei livelli idrometrici e temperatura dell'acqua della sorgente durante la seconda fase di studio (6/4/2024-25/3/2025).

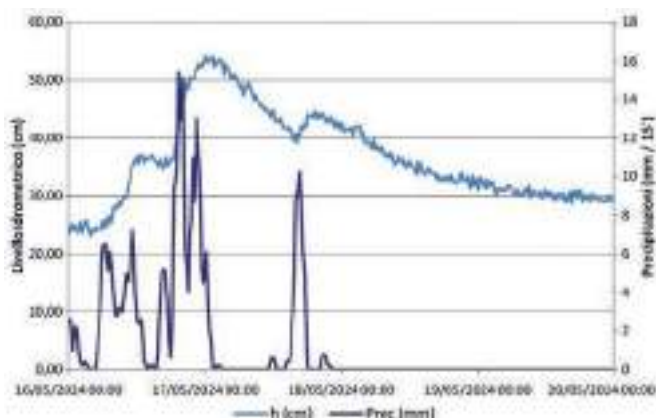


Fig. 5 - Evento del 16 e 17 maggio 2024, livello idrometrico della Fontanate e precipitazioni presso Ramandolo.

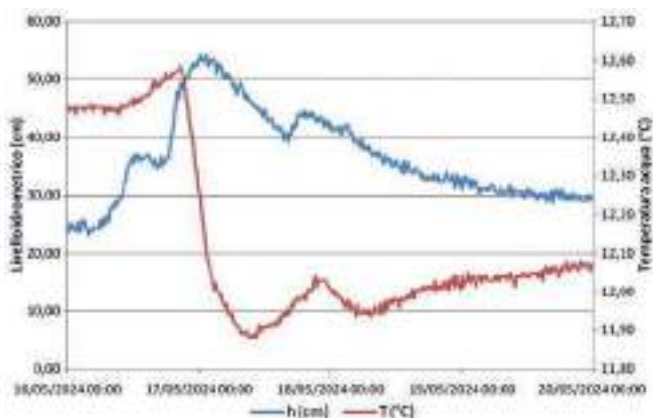


Fig. 6 - Evento del 16 e 17 maggio 2024, livello idrometrico della Fontanate e temperatura dell'acqua.

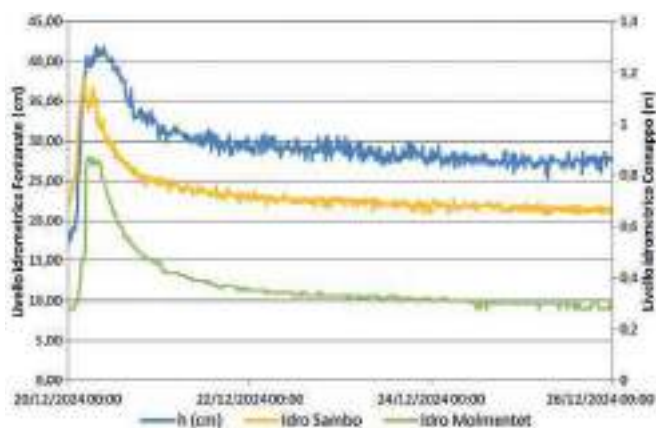


Fig. 7 - Evento del 20-22 dicembre 2024, livello idrometrico della Fontanate (h in cm) e del Torrente Cornappo presso due stazioni idrometriche.

Il sensore utilizzato è di tipo piezometrico, ma non dispone della compensazione automatica della pressione atmosferica, per questo motivo la compensazione stessa è stata effettuata ex post, utilizzando i dati forniti dal Dipartimento Matematica, Informatica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste in una stazione di monitoraggio posta a breve distanza dalla Fontanate sul versante opposto della Val Cornappo. Considerata la frequenza elevata di misurazione e la durata del periodo di osservazione, la prima analisi dei dati è stata effettuata calcolando la media giornaliera dei valori di livello idrometrico e temperatura dell'acqua (Fig. 4).

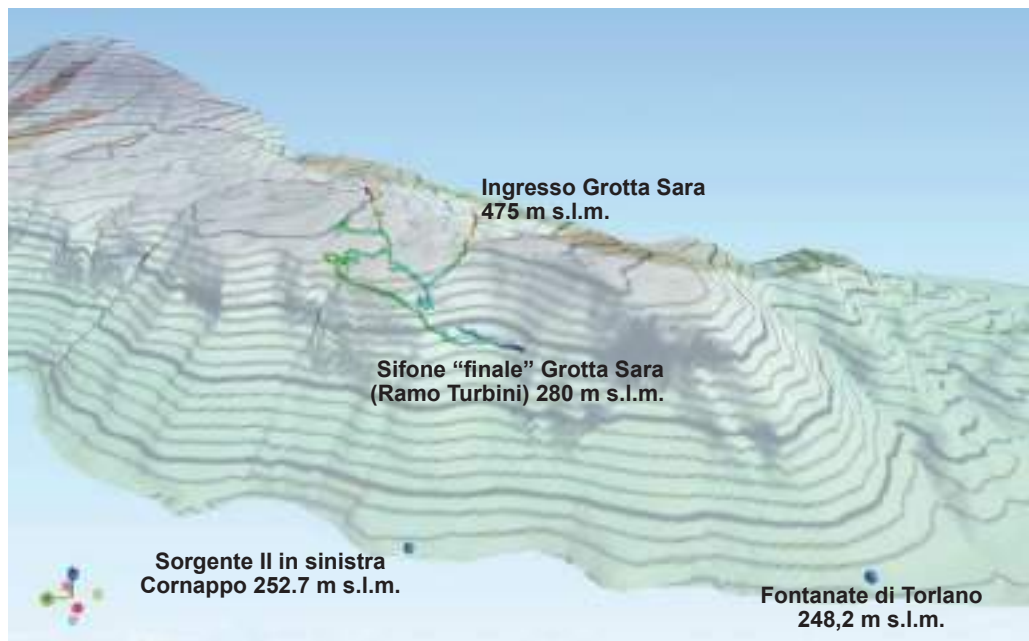
È stato possibile osservare, nel complesso, 17 eventi di piena e due periodi di magra, compreso quello estivo, che ha portato al minimo livello idrometrico. Esaminando le medie giornaliere delle due variabili misurate si nota in modo qualitativo la correlazione inversa, con una rapida diminuzione di temperatura dell'acqua ad ogni evento di piena. Risulta evidente anche l'incremento progressivo di temperatura durante la fase di scarica, che sembra essere asintotico a un valore massimo, mai raggiunto durante le fasi di magra osservate.

Esaminando singoli eventi e mantenendo la risoluzione temporale pari a 15', è stata osservata la correlazione positiva fra il livello idrometrico e le precipitazioni presso la stazione pluviometrica della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia presso Ramandolo (Nimis, UD), posta a 1,7 km dalla Fontanate e a circa 3 km dal centro della probabile zona di assorbimento di Monteprato.

Il livello idrometrico della Fontanate inizia a crescere circa 2 ore dopo l'inizio delle precipitazioni presso Ramandolo. Lo stesso ritardo si osserva nei livelli massimi nel caso di un picco di precipitazioni ben definito come quello osservato nel pomeriggio del 17 maggio.

L'andamento dei valori di temperatura in occasione delle piene ha mostrato un piccolo ma rapido incremento ad inizio evento. Il 15/05/2024 la temperatura media dell'acqua era pari a 12,47°C, ma con l'inizio della piena è salita fino a 12,59°C per poi scendere rapidamente e raggiungere il valore minimo pari a 11,88°C circa 10 ore dopo il picco di piena. Questo ritardo non si verifica nel caso di picchi di piena secondari.

Fig. 8 - Block diagram 3D con l'andamento di Grotta Sara e la posizione della Sorgente La Fontanate e della Sorgente II in sinistra Cornappo.



È stato possibile anche osservare eventi di piena che interessavano sia la sorgente che il Torrente Cornappo. Un esempio è costituito dall'evento del 20-22 dicembre 2024 (Figg. 5-7) in cui l'andamento del livello idrometrico della Sorgente Fontanate è risultato molto simile a quello del Torrente Cornappo presso le stazioni idrometriche di Ponte Sambo (Taipana, UD) e di Molmentet (Nimis, UD) che si trovano, rispettivamente, nel tratto superiore del bacino e in quello terminale (Fig. 1).

A partire dal maggio 2025 è iniziata una serie di misurazioni della portata fluente dalla sorgente, in una sezione dalla geometria regolare dove tutti i deflussi sono riuniti (presso l'attraversamento stradale), tenendo conto delle caratteristiche dell'opera di captazione, già descritte nel paragrafo precedente. I dati finora acquisiti non sono sufficienti per determinare una curva di taratura che consenta di correlare il livello idrometrico misurato con la portata. A titolo puramente indicativo, il 14 maggio 2025 alle ore 15.00, in fase di magra, è stata stimata una portata di circa 7 l/sec.

Osservazioni conclusive

Considerato il fenomeno di incremento della temperatura dell'acqua a inizio piena, si ipotizza la presenza di acque che risiedono a lungo entro l'acquifero e hanno temperatura superiore rispetto a quelle che sono soggette a ricambio frequente dovuto agli apporti meteorici sulla zona di assorbimento di Monteptrato.

Grazie ai dati acquisiti durante le fasi di scarica con magra prolungata, si è ipotizzato un modello che preveda un contributo sempre più rilevante di queste acque alla portata della sorgente, descritto dalla curva T/t apparentemente asintotica a un valore massimo, che si ipotizza essere quello di temperatura delle acque profonde. Applicando un modello di crescita asintotica di Von Bertalanffy (utilizzando il programma PAST 5.0.2) alla serie di dati delle due fasi di magra osservate sono stati stimati due valori dell'asintoto pari a $12,97^{\circ}\text{C}$ per la magra estiva (17/06/2024-10/09/2024) e $12,90^{\circ}\text{C}$ per la fase di magra invernale (22/12/2024-02/01/2025).

Le osservazioni effettuate hanno consentito di verificare la correlazione fra le precipitazioni registrate nell'area attorno all'Altopiano di Monteptrato e il livello idrometrico della Sorgente Fontanate, stimando un tempo di corrvazione fra la zona di assorbimento e la sorgente pari a circa 2 ore. Con l'attuale set di dati non è ancora stato possibile discriminare in modo chiaro il contributo dato dalle piogge sull'altopiano e quello delle perdite dal Torrente Cornappo nel tratto in cui percorre una forra entro i calcari. L'incremento di temperatura osservato all'inizio degli eventi di piena suggerisce la presenza di acque a lungo tempo di residenza entro l'acquifero, espulse alla sorgente

per pistonaggio con l'arrivo delle acque di pioggia. La temperatura di queste acque è stata stimata ipotizzando che corrisponda all'asintoto cui tende il valore osservato alla sorgente durante i periodi di magra, con un valore compreso fra 12,90°C e 13,00°C.

Le osservazioni idrometriche proseguiranno affiancate da nuove misurazioni effettuate con l'installazione di uno strumento al sifone pensile interno alla Grotta Sara.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Comune di Nimis per avere concesso l'utilizzo del sito e il Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste per i dati di pressione atmosferica.

Bibliografia

- BORLINI A., 2019a - *Grotta Sara (Monteprato, Udine): aggiornamenti*. Mondo Sotterraneo, n.s., 43, pp. 91-100.
- BORLINI A., 2019b - *Grotta Sara*. In: Monteprato di Nimis. Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer", Comune di Nimis.
- BORLINI A., SIMONETTI C., PERESSUTTI S. & COMISSO S., 2023 - *La Grotta Sara e l'idrologia dell'Altopiano di Monteprato (Ud)*. Atti del Convegno Speleo2022, pp. 123-130.
- BORLINI A. & TURCO S., 2015 - *Grotta Sara (Fr 4740, Monteprato, Prealpi Giulie)*. Mondo Sotterraneo, n.s., 39, pp. 11-24.
- MORO G.A., ROMANIN R., BIASIZZO L., D'ANDREA A., FINOCCHIARO F. & PONTON M., 2024 . *Osservazioni idrologiche preliminari presso la sorgente Fontanate di Torlano*. Mondo Sotterraneo, n.s., 48, pp. 91-100.
- PONTON M. & TUNIS G., 1996 - *La Geologia del massiccio dei Monti La Bernadia*. In: MUSCIO G. (a cura di), *Il Fenomeno carsico del massiccio dei Monti la Bernadia*, pp. 39-48 (carta geol. a cura di G. CANE), Circolo Speleologico e Idrologico Friulano e Provincia di Udine.
- ZANFERRARI A., MASETTI D., MONEGATO G. & POLI M.E., 2013 - *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 049 Gemona del Friuli*. Ispra-Servizio Geologico d'Italia, pp. 264+1 carta geol. https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/49_Gemona%20_del_Friuli.pdf.

Matteo Monfredo¹, Stefano Rejc¹, Rino Semeraro²

Nota informativa sulla conclusione delle ricerche sulle acque sotterranee del margine nord-occidentale del Carso isontino (Carso Classico)

1) Centro Ricerche Carsiche “C. Seppenhofer” (CRCS), Gorizia; 2) CRCS (Socio onorario), Gorizia

Abstract. This paper summarizes the partial results of a series of groundwater surveys conducted on the northwestern border of the Karst Plateau (Italy). These surveys were conducted in karst cavities that reach the karst aquifer: the Pozzo dei protei di Monfalcone, Pozzo dei Frari, Grotta del Proteo presso Sagrado and Pozzo presso la cava di Polazzo. Multiparameter probes were installed in these caves, monitoring the water table level, temperature, and electrical conductivity over long periods. Chemical analyses were also performed on the water, and the geological and geomorphological characteristics of the karst cavities and the surrounding rock mass were studied. The research began in 2018 and is currently ongoing.

Riassunto. Sono illustrati, in sintesi, i risultati parziali di una serie di indagini sulle acque sotterranee del confine nord-occidentale del Carso in Italia ottenute attraverso monitoraggi. Essi sono stati realizzati in una serie di cavità carsiche che raggiungono la falda idrica carsica: Pozzo dei protei di Monfalcone, Pozzo dei Frari, Grotta del Proteo presso Sagrado e Pozzo presso la cava di Polazzo. Nelle acque sotterranee di queste grotte sono state installate sonde multiparametriche monitorando, sul lungo periodo, altezza idrometrica, temperatura e conducibilità elettrica. Inoltre, sono state effettuate analisi chimiche sulle acque e studiate le caratteristiche geologiche e geomorfologiche delle cavità carsiche e della massa rocciosa circostante. Lo studio è stato iniziato nel 2018 ed è, attualmente, ancora in corso.

Introduzione

Nel 2018 il Centro Ricerche Carsiche “C. Seppenhofer” di Gorizia avviò un progetto, ad ampio raggio, sullo studio dell'idrogeologia carsica del margine nord-occidentale del Carso (detto anche Carso isontino). L'area in oggetto non era certo sconosciuta dal punto di vista idrogeologico, tuttavia essa difettava in particolare di monitoraggi a lungo termine dei parametri fisico-chimici delle acque sotterranee carsiche. Per far ciò si scelse una serie di cavità carsiche, note nell'area, che raggiungevano il livello piezometrico della falda idrica carsica, così da installare, a vari step, sonde multiparametriche per il monitoraggio (sul lungo periodo) dei parametri dell'acqua relativi a livello (H), temperatura (T °C) e conducibilità elettrica (EC K25), installando CTD-Diver della Eijleikamp (Netherlands) accoppiate a sonde Baro-Diver. Tali cicli di misura, ovviamente, furono confrontati con altri parametri locali, quali le precipitazioni, le temperature dell'aria, le portate e altezze del Fiume Isonzo, le variazioni di livello del Mare Adriatico. Contemporaneamente fu eseguita una serie di ricerche geologiche e geomorfologiche specifiche, onde meglio comprendere il contesto geologico-carsico delle cavità interessate dai monitoraggi e, dove ritenuto utile, anche delle aree circostanti.

Le ricerche svolte

Il primo ciclo di monitoraggio avvenne nel Pozzo dei Protei di Monfalcone (4383/5403VG) all'interno della stazione ferroviaria di Monfalcone (Gorizia), dal 14/06/2018 al 25/09/2018 con intervallo di misura di 30', periodo valutato congruo per verificare la trasmissione degli effetti di marea nell'acquifero carsico. Il livello dell'acqua nella grotta è oscillato tra 1,73 e 2,32 m s.l.m. (livello medio 1,89 m s.l.m.). La conducibilità elettrica è oscillata tra 336 e 387 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (media 348 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mentre la temperatura dell'acqua è variata tra 12,16 e 12,71 °C (media 12,40 °C). Il monitoraggio

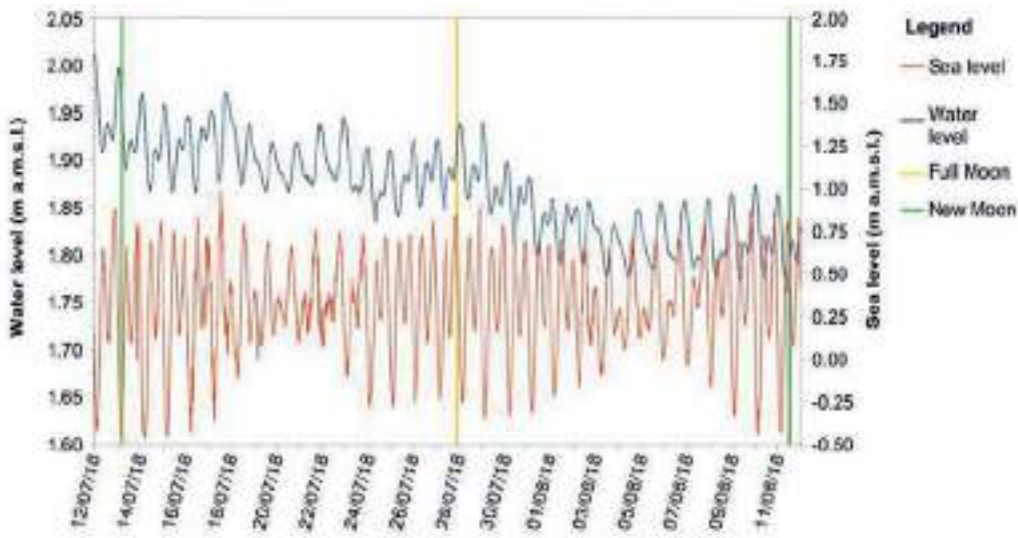


Fig. 1 - Oscillazioni di marea nel mese sinodico e oscillazioni del livello dell'acqua del Pozzo dei Protei di Monfalcone.

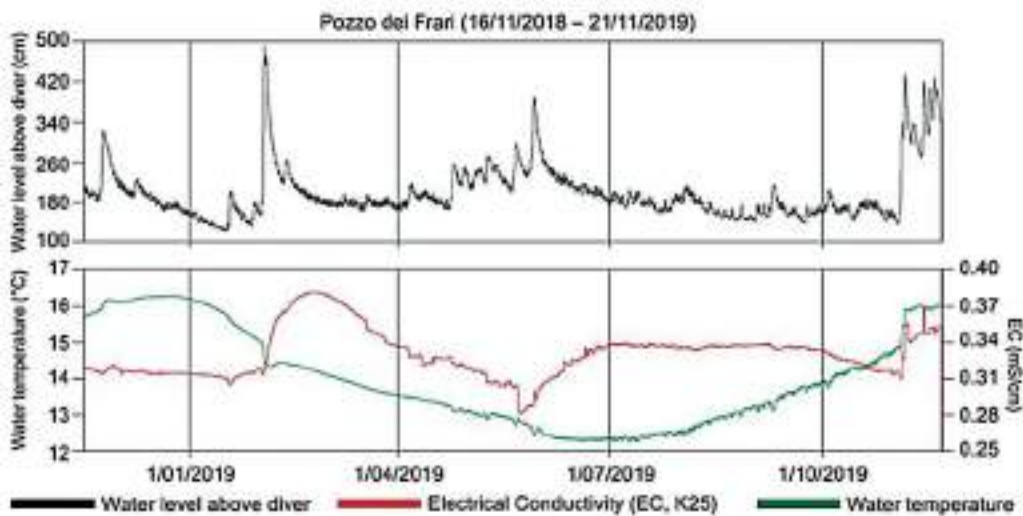


Fig. 2 - Risultati del monitoraggio nel Pozzo dei Frari.



Fig. 3 - Il Pozzo dei Frari all'interno del centro storico di Gradisca d'Isonzo.

ha mostrato che le variazioni idrometriche e della conducibilità risentono direttamente sia dalle maree dell'Adriatico sia della ricarica dell'acquifero del Fiume Isonzo durante le fasi di piena e di quell'autogena delle precipitazioni; quest'ultime due non sono però distinguibili. Gli innalzamenti della tavola d'acqua dipendenti dalle maree hanno oscillazioni da 5 a 12 cm con ritardi di 4-4,5 h. Le variazioni della conducibilità mostrano incrementi tra 2 e 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, secondo il tipo di marea. Mentre durante una ricarica allogena e autogena l'incremento misurato è stato di 51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con un giorno di ritardo rispetto al peaking dell'evento idrologico.

Il secondo ciclo di monitoraggio è avvenuto nel Pozzo dei Frari (2713/4911VG; Fig. 3), sito nel centro storico di Gradisca d'Isonzo (Go), dal 16/11/2018 al 21/11/2019 con intervallo di misura di 30'. Il livello dell'acqua nella grotta è oscillato tra 22,87 e 26,55 m s.l.m. (livello medio 23,62 m s.l.m.). La conducibilità elettrica (K25) ha oscillato tra 281 e 382 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (media 331 $\mu\text{S}/\text{cm}$) men-

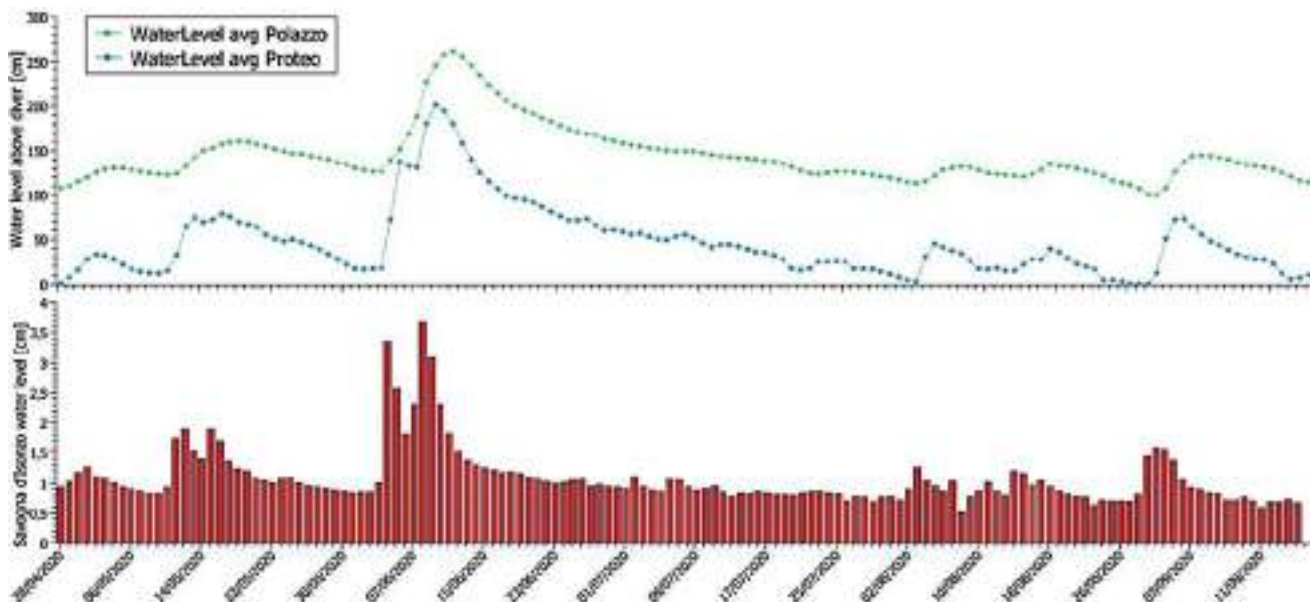


Fig. 4 - Sezione esemplificativa del monitoraggio nelle cavità Pozzo presso la Cava di Polazzo e Grotta del Proteo.

tra la temperatura tra 12,24 e 16,30 °C (media 16,64 °C). Sulla base dei calcoli basati sui rapporti di conducibilità tra le acque carsiche e quella del Fiume Isonzo (acquifero superficiale dell'Alta Pianura dell'Isonzo) e sulla base delle analisi chimiche da noi eseguite sui vari tipi di acque superficiali e sotterranee dell'area, alla composizione delle acque del Pozzo dei Frari quelle delle infiltrazioni provenienti dall'Isonzo concorrono per il 75%. Inoltre, la struttura geologica prelude all'esistenza di un acquifero profondo, di cui però non si hanno precise indicazioni. Si sono registrati interessanti fenomeni di pistonaggio. Durante una piena di 1535 m³/s dell'Isonzo il livello idrico nel pozzo si è innalzato di 3,5 m a 7 h dal picco della di piena. Dopo un iniziale decremento la EC risale fino a 60 µS/cm dalle condizioni iniziali e poi decresce molto lentamente indicando una ricarica da zone a bassa conducibilità idraulica.

Il terzo ciclo di monitoraggio, dal 29/2/2020 al 27/8/2021, è stato effettuato contemporaneamente nella Grotta del proteo (1191/4112VG) presso Sagrado e nel Pozzo presso la Cava di Polazzo (4924/5654VG). Entrambe le grotte raggiungono la falda idrica carsica alla quota media oscillante, rispettivamente, attorno 14,5 e 10,7 m s.l.m. e si sviluppano al bordo NW del Carso, vicine alle alluvioni della Pianura dell'Isonzo.

L'elaborazione dei dati e delle analisi chimiche effettuate è ancora in corso. In generale si sono registrati innalzamenti del livello idrico fino a circa 4 m in concomitanza con le precipitazioni, ma i picchi presentano evidenti ritardi rispetto ai livelli dell'Isonzo (Stazione idrometrica di Savogna d'Isonzo). La EC al Pozzo di Polazzo è quasi costantemente maggiore rispetto alla Grotta del Proteo e le oscillazioni molto più attenuate. Anche se il confronto tra le curve mostra evidenti corrispondenze negli eventi (ovviamente dovute all'unicità dell'acquifero carsico; Fig. 4) le condizioni di circolazione delle acque e il probabile rapporto con l'acquifero freatico isontino sono differenti.

Questo ciclo di ricerche idrogeologiche, durato in campagna 4 anni e con i dati ancora in elaborazione, ha permesso di ottenere interessanti informazioni soprattutto sugli effetti delle maree e sui rapporti tra l'acquifero freatico isontino e l'acquifero carsico. Il dibattito sulle acque carsiche dell'area risale agli anni Sessanta dello scorso secolo. Alcune considerazioni, in passato, sono state viziata dalla non disponibilità di quote altimetriche sufficientemente valide, nelle cavità, e dall'assenza di dati idrometrici in continuo suscettibili di correlazioni; questi aspetti, sono stati invece ottenuti con la presente ricerca. Inoltre, affinando le conoscenze sulle caratteristiche granulometriche dei sedimenti della pianura alluvionale prossimi al bordo del Carso, attraverso l'esame dei dati geognostici disponibili, è stato possibile valutare meglio i possibili effetti della trasmissività tra i due acquiferi.

Questo ciclo di ricerche, inoltre, vuole essere un esempio di sinergia tra speleologia ricerca scientifica, nonché di valorizzazione dei dati in pubblicazioni su congressi e riviste nazionali e internazionali, nonché poster e conferenze.

Bibliografia

- SEMERARO R., VALENTINUZ F., KLASSEN E., PINCIN M., REJC S., RUSSO L., SORANZO M. & TAVAGNUTTI M., 2019 - *Tides of Adriatic Sea in the caves of Classical Karst: The case of Pozzo dei Protei di Monfalcone (Italy)*. 13th EuroSpeleo Forum, Bulgaria Federation of Speleology and Cave Rescue Bulgarian on behalf of the European Speleological Federation, Sofia, Bulgaria 26th-29th September 2019, Proceedings, pp. 57-58. <https://esf2019.speleo-bg.org/wp-content/uploads/2019/09/ESF2019.pdf> - Paper and Poster.
- SEMERARO R., VALENTINUZ F. & TAVAGNUTTI M., 2020 - *Correlation between tides of Northern Adriatic Sea and hydrodynamics of the karstic aquifer in the Pozzo dei Protei di Monfalcone (Classical Karst)*. Acta carsologica, 49, 1, pp. 81-96, Postojna. Doi: <https://doi.org/10.3986/ac.v49i1.n.8966>.
- SEMERARO R., VALENTINUZ F., REJC S. & TAVAGNUTTI M., 2021 - *Relations between Isonzo river high plain phreatic aquifer and groundwater levels in the westernmost part of Classical Karst: Pozzo dei Frari case study (Gradisca d'Isonzo, NE Italy)*. 18th International Congress of Speleology, Savoie Mont Blanc France, Vol. 3, Symposium 05, Karst hydrogeology, physical Chemistry, pp. 73-76, UIS - International Union of Speleology.
- SEMERARO R., VALENTINUZ F., KLASSEN E., PINCIN M., REJC S., RUSSO L., SORANZO M. & TAVAGNUTTI M. 202 - *Effetti delle maree del Mare Adriatico sull'acquifero del Carso Classico*. Atti 23° Congresso Nazionale di Speleologia, Ormea 2020, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, 42, 2, pp. 375-377. <https://www.congressospeleo2020.it/wp-content/uploads/2023/11/ormea2.pdf>.
- SEMERARO R., COMAR M., REJC S. & TAVAGNUTTI M., 2024: *Hydrogeological relations between the karst aquifer of Gradisca and the phreatic aquifer of Isonzo/Soča river (Italy)*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 53, pp. 43-67. <https://www.boegan.it/wp-content/uploads/2024/09/05-043-067-Atti-e-Memorie-Semeraro-et-al.pdf>.

Rino Semeraro¹, Luca Zini², Alice Busetti², Franco Bressan³, Chiara Calligaris²,
Matteo Cavanna⁴, Maurizio Comar^{1, 5}, Loretta Crestani³, Sergio Dambrosi^{1, 6},
Fabio Gemiti⁶, Lorenzo Marini¹, Tullio Quaia², Marco Restaino⁶

Test di tracciamento delle perdite del Fiume Vipacco nell'acquifero del Carso Classico. Nota informativa

1) Laboratorio Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche, Farra d'Isonzo (Go); 2) Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze, Università di Trieste; 3) Società di Studi Carsici "A. F. Lindner", Ronchi dei Legionari (Go); 4) G.S. Talpe del Carso - J.K. Kraski Krti, San Michele del Carso/Vrh (Go); 5) Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer", Gorizia; 6) Società Adriatica di Speleologia, Trieste

Abstract. The connection between the Vipacco river losses and the Karst was first ascertained in 1910 by Guido Timeus with a tracer test using lithium chloride and strontium chloride. After 114 years, we wanted to verify, with current investigation techniques, that historic tracing test by carrying out a modern tracer test by injecting uranine into the Vipacco river losses in the Gabria area and monitoring all the main springs, caves that reach the karst groundwater and the wells of the Klariči aqueduct. The tracer was found after just 3 days in many of the monitored points except Klariči. For the Sardos and Timavo springs, the high turbidity and high flow rate did not allow us to verify the passage of the tracer. The tracer test in question is an example of an important scientific result obtained thanks to the interaction between speleology and scientific research.

Riassunto. Il collegamento tra le perdite del Fiume Vipacco e il Carso è stato accertato da Guido Timeus nel 1910 mediante un test di tracciamento impiegando cloruro di litio e cloruro di stronzio. Dopo 114 anni dall'esperimento abbiamo voluto verificare lo storico test di tracciamento, con le attuali tecniche investigative, con un moderno test di tracciamento iniettando uranina nelle perdite del Fiume Vipacco che avvengono in località Gabria. Monitorando tutte le principali sorgenti, grotte che raggiungono la falda idrica carsica e i pozzi dell'acquedotto di Klariči. Il tracciante è stato accertato dopo tre giorni in alcuni dei punti monitorati, eccetto a Klariči. Per le sorgenti carsiche Sardos e Timavo l'elevata torbidità e le alte portate non hanno consentito di appurare il passaggio del tracciante. Il test di tracciamento in oggetto è un importante esempio di risultato scientifico ottenuto grazie alla interazione tra speleologia e ricerca scientifica.

Introduzione

Dopo una lunga e accurata progettazione, è stato dato l'avvio ad un test di tracciamento di rilevante importanza, volto a verificare l'effettiva alimentazione del Fiume Vipacco/Vipava nell'acquifero del Carso Classico, altopiano carsico di 750 km², tra i più conosciuti al mondo per il carsismo. Com'è noto, l'alimentazione della falda acquifera del Carso nord-occidentale (detto anche Carso isontino), in base a bilanci geochemici e idraulici, sarebbe quantitativamente preponderante dall'infiltrazione dei fiumi Isonzo e Vipacco rispetto alla ricarica autogenica. Dal punto di vista storico (SEMERARO, 2012) un pionieristico esperimento di tracciamento delle perdite del Vipacco fu effettuato nel 1910 dal chimico e idrologo Guido Timeus dell'allora Civico Fisicato del Comune di Trieste. Egli iniettò 10 kg cloruro di litio e 50 kg di cloruro di stronzio in un lembo ghiaioso del Vipacco in località Vrtoče/Vertoce (oggi in Slovenia), sulla sponda sinistra in contatto con i calcari del Carso (TIMEUS, 1910, 1928). Cinque giorni dopo i traccianti furono rilevati nei laghi carsici e nelle sorgenti carsiche, compreso il Timavo, presenti alla base dell'altopiano. Ma un esperimento moderno fino ad ora mai era stato effettuato.

Tale obiettivo, a 114 anni di distanza, è stato oggetto di un progetto organizzato dal Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze dell'Università di Trieste assieme al Laboratorio



Fig. 1 - Le operazioni di iniezione del tracciante in sponda sinistra del Fiume Vipacco il 30 settembre 2024.

Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche di Farra d'Isonzo (Go) e al dott. Fabio Gemiti. Hanno collaborato Geoloski Zavod Slovenije/Servizio Geologico della Slovenia, il Servizio Geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, AcegasApsAmga, Kraški vodovod Sežana, mentre per la speleologia il Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer" (Gorizia), il Gruppo Speleologico Talpe del Carso/Jamarski Klub Kraski Krti (Doberdò del Lago, Go), la Società Adriatica di Speleologia (Trieste) e la Società di Studi Carsici "Lindner" (Ronchi dei Legionari, Go), e altri. La partecipazione degli speleologi, comunque, è stata ampia dato l'interesse che il tracciamento ha suscitato.

Primi risultati del tracciamento

Il 30 settembre 2024 sono stati iniettati 5 kg di uranina (sale sodico della fluoresceina) disciolti in 50 litri d'acqua, in un punto, in Italia, dove in riva sinistra del Vipacco (zona di Gabria, Italia) ci sono evidenti perdite nel sottosuolo carsico, nello specifico mediante una elettropompa in una fessura drenante.

L'impiego di strumentazioni idonee e cicli ravvicinati di campionamenti in tutti gli output del versante sud-occidentale del Carso, compresi i laghi carsici e il campo di pozzi dell'acquedotto sloveno di Klariči, hanno consentito il buon esito del tracciamento. Interessante segnalare la cospicua dotazione strumentale messa in campo: ben sette fluorimetri installati alle sorgenti o in grotta, accoppiati a parecchie sonde multiparametriche (CTD-Diver), mentre in laboratorio si è operato su campioni d'acqua e carboni attivi (fluocaptori) attraverso estrazione degli eluati e analisi secondo procedure standardizzate in spettrofluorimetria.

Dopo l'iniezione del tracciante si è verificato un grosso evento piovoso che ha determinato un significativo evento di piena (portate di picco del Timavo superiori ai 100 m³/s). La piena ha favorito un veloce drenaggio delle acque ipogee, ma ha complicato la fase di campionamento e soprattutto di analisi dei risultati.

Il tracciante immesso è stato rilevato, anche se molto diluito, dopo soli 3 giorni presso le sorgenti del Lago di Doberdò, la Grotta Andrea, il Lago di Pietrarossa e successivamente in corrispondenza del canale emissario di Sablici e nella sorgente di Moschenizze Nord. I valori di picco, negli stessi siti, sono stati osservati tra il 4 e il 5 ottobre.

Le alte torbidità, congiuntamente all'elevata portata delle sorgenti Sardos e Timavo, non hanno permesso di verificare il passaggio del tracciante per queste stazioni di monitoraggio. Nessun campione positivo è stato registrato anche per la stazione di campionamento di Klariči (acquedotto sloveno).

Data l'incertezza dei dati alle sorgenti Sardos e Timavo si è proceduto all'esecuzione di un secondo tracciamento. Questo è avvenuto durante una finestra temporale idonea, dal punto di vista meteorologico e idrologico dei fiumi Vipacco e Reka/Timavo, con l'iniezione di 5 kg di uranina il 16 settembre 2025 nella stessa fessura drenante e con le medesime modalità della volta precedente. Gli stessi punti precedentemente monitorati sono stati attrezzati con fluorimetri. Fra i risultati principali citiamo un picco del tracciante il 18 settembre alle sorgenti del Lago di Doberdò e un successivo picco, con inizio il 19 settembre, alle Risorgive del Timavo.

Lo studio di questa parte del Carso è di fondamentale importanza sia per la conoscenza dell'idrogeologia carsica sia, più in generale, per la speleologia, tenuto conto che dal bilancio idrologico e geochemico, l'apporto delle perdite dei due fiumi Isonzo e Vipacco, in particolare l'Isonzo, ammonterebbe a 10 m³/s (ZINI et al., 2023). Per il Vipacco si sono sempre valutate perdite di circa 1 m³/s, quindi minoritarie, non certo meno importanti nel contesto dell'idrologia del Carso nord-occidentale.

L'area in oggetto, corrispondente alla parte nord-occidentale del Carso Classico, è interamente costituita da rocce carbonatiche di età compresa tra l'Albiano-Cenomaniano e l'Eocene; la struttura è anticlinale e risulta attraversata, nella zona centrale, da faglie trascorrenti SE-NW (JURKOVŠEK et al., 2016). Le diverse sintesi idrogeologiche prodotte (BALLARIN et al., 2000; CUCCHI et al., 2015; CALLIGARIS et al., 2018; etc.) hanno sempre evidenziato la complessità di quest'area, compresa quella dei laghi carsici (Doberdò, Pietrarossa, Sablici) e quella delle risorgive (dal Lisert al Timavo), dove l'acquifero carsico risulta interessato da più apporti allogenicici (Fiume Reka/Timavo, Fiume Vipacco, Fiume Isonzo) oltre all'apporto autogenico delle precipitazioni. Pertanto, il test di tracciamento eseguito si inserisce nel quadro delle ricerche che mirano ad approfondire, oltre alla circolazione delle acque sotterranee, questi complessi rapporti.

Ringraziamenti

Ringraziamo i molti speleologi che hanno prestato la loro opera sul campo, tra i maggiormente assidui citiamo: Isabella Abbona, Marco Agricola, Valentina Bellotto, Elisa Benedetti Fasil, Luca Benvenuto, Raffaele Bruschi, Davio Fabris, Luciano Longo, Edgardo Mauri, Antonella Miani, Andrea Mollo, Elena Sanvincenti, Gabriele Sustersic, Bruno Vojtisek, Massimiliano Werk.

Bibliografia

- BALLARIN, L., D'AMELIO, L., KROKOS, A., SERRA, F. & R. Semeraro, 2000 - *Trieste Karst aquifer: review of hydrogeology and geochemistry*. COST Action 621 "Groundwater management of coastal karstic aquifers", 7th Management Committee and Working Groups Meeting, Karst Research Institute, Postojna 23-25 March 2000, Guide-Booklet for the excursion, 20 pp.
- CALLIGARIS C., MEZGA K., SLEJKO F.F., URBANC J. & ZINI L., 2018 - *Groundwater Characterization by Means of Conservative ($\delta^{18}O$ and δ^2H) and Non-Conservative ($87Sr/86Sr$) Isotopic Values: The Classical Karst Region Aquifer Case (Italy-Slovenia)*. *Geosciences*, 8, 321, pp. 1-25. Doi: 10.3390/geosciences8090321 www.mdpi.com/journal/geosciences.
- CUCCHI, F., ZINI, L. & C. CALLIGARIS, 2015 - *Le acque del Carso Classico / Vodonosnik Klasičnega Krasa. Progetto / Project Hydrokarst*. Edizioni Università di Trieste EUT, 194 pp. <http://book.hydrokarst-project.eu/#1/z>.
- JURKOVŠEK B., BIOLCHI S., FURLANI S., KOLAR-JURKOVŠEK T., ZINI L., JEŽ J., TUNIS S., BAVEC M. & CUCCHI F., 2016 - *Geology of the Classical Karst Region (SW Slovenia - NE Italy). Map 1:50.000*. *Journal of Maps*, 12 pp. [online]. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2016.1215941>.
- SEMERARO R., 2012 - *Guido Timeus, pioniere triestino delle indagini con traccianti, nei cent'anni dagli eventi della prova sulla continuità tra la Reka e il Timavo inferiore, fra il passato e il presente pensiero*

sul Timavo sotterraneo nel problema nell'idrogeologia del Carso. Studi e Ricerche, Società di Studi Carsici A.F. Lindner, n.un. 2011, 7, pp. 73-87.

TIMEUS G., 1910 - *Studi in relazione al provvedimento d'acqua per la città di Trieste. Dati idrologici, chimici e batteriologici*. Comune di Trieste, Fisicato civico, Ufficio d'igiene, Stabilimento Artistico Tipografico G. Caprin, Trieste, 81 pp.

TIMEUS G., 1928 - *Nei misteri del mondo sotterraneo. Risultati delle ricerche idrologiche sul Timavo 1895-1914, 1918-1927*. Alpi Giulie, a. 29, 39 pp.

ZINI L., CALLIGARIS C., TREU F., ZAVAGNO E., IERVOLINO D. & LIPPI F., 2023 - *Groundwater sustainability in the Friuli plain - La sostenibilità dell'utilizzo delle acque sotterranee nella pianura friulana*. Acque Sotterranee, Italian Journal of Groundwater, 12 (3), pp. 77-92. Doi: 10.7343/as-2023-713.

Daniele Pascolo¹, Stefano Rejc¹, Rino Semeraro^{2, 3}

Conclusione delle ricerche idrogeologiche nell'area del Campo di Bonis (Prealpi Giulie)

1) Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer" (CRCS), Gorizia; 2) CRCS (Socio onorario), Gorizia; 3) Laboratorio Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche, Farra d'Isonzo (Go)

Abstract. Campo di Bonis is a large karst depression similar to an "open polje" that develops in the Julian Prealps south of the Gran Monte chain. Since 2000, the karst phenomena and in particular the hydrogeology have been studied in this area. Three preliminary tracing tests were performed and, finally, a fourth tracing test monitoring the two main groundwater outputs (springs) previously identified. At the same time, the physical-chemical parameters of the water in these two springs were studied through long-term monitoring. Chemical analyses of the main ionic species in the waters of the local springs were also carried out, as well as research on the geological and geomorphological characteristics of the caves where the subterranean water circulation occurs. A hydrogeological framework was obtained that allowed us to better understand the complex model of groundwater circulation, which depends above all on the structural setting of the carbonate megabanks confined, or partially confined, between the marly-arenaceous mass of the Flysch of Grivò (Paleocene-Eocene).

Riassunto. Il Campo di Bonis è una grande depressione carsica simile ad un "polje aperto" che si sviluppa nelle Prealpi Giulie a meridione della catena del Gran Monte. Fin dal 2000 in quest'area sono stati studiati i fenomeni carsici e in particolare l'idrogeologia carsica; sono stati eseguiti tre test di tracciamento preliminari e, infine, un quarto test di tracciamento, monitorando le due principali uscite delle acque sotterranee (sorgenti) in precedenza individuate. Parallelamente, in queste due sorgenti sono stati studiati i parametri fisico-chimici delle acque mediante monitoraggio sul lungo periodo. Inoltre, sono state eseguite analisi chimiche delle principali specie ioniche delle acque delle sorgenti dell'area, nonché approfondite le ricerche sulle caratteristiche geologiche e geomorfologiche anche delle grotte interessate dall'idrologia ipogea. Si è così ottenuto un quadro idrogeologico che ha consentito di comprendere meglio il complesso modello di circolazione delle acque sotterranee, dipendente soprattutto dall'assetto strutturale dei megabanchi carbonatici confinati, o parzialmente confinati, tra i corpi marnoso-arenacei del Flysch del Grivò paleocenico-eocenico.

Introduzione

Il Campo di Bonis, situato nelle Prealpi Giulie (Fig. 1), già nella prima decade del 2000 è stato oggetto d'interesse da parte del Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer" (CRCS). Esso scaturiva dalla constatazione che l'area era speleologicamente poco conosciuta e l'idrogeologia carsica ancor meno, a fronte di un particolare assetto geologico e geomorfologico unico nel suo genere in questo settore prealpino. Alcune preliminari ricerche sulla consistenza e caratteristiche del fenomeno carsico superficiale e profondo, accompagnate da analisi chimiche alle sorgenti e mineralogiche sui sedimenti sotterranei, nonché etnografiche sul territorio, consentirono di pubblicare una monografia specifica (AA. Vv., 2012). Ciò costituì la base per progettare una ricerca, a lungo termine, sull'idrogeologia dell'area.

Il Campo di Bonis, secondo la moderna terminologia, è un polje aperto poiché il perimetro sud-orientale è stato aperto dall'erosione regressiva del Torrente Boncic, affluente di destra del Rio Bianco, che confluisce nel Fiume Natisone. L'ampia depressione, con un bacino con assi di



Fig. 1 - Inquadramento geografico.



Fig. 2 - Il Campo di Bonis: polje aperto delle Prealpi Giulie, visto da W verso il Fiume Natisone.

circa 2x2 km, è posta immediatamente a Sud della catena del Gran Monte, costituita dalle formazioni carbonatiche triassiche sovrascorse sul Flysch Friulano. Tutta la depressione si sviluppa nel Flysch del Grivò (Paleocene sup.-Eocene inf.), un'alternanza di torbiditi silicoclastiche ibride intercalate da strati e megabanchi carbonatici generalmente incarsiti. La depressione è caratterizzata da numerose sorgenti che alimentano brevi corsi d'acqua, i quali vengono inghiottiti in sinkholes, aperti nel terreno eluvio-colluviale del piano, ove spesso nella parte inferiore si intravedono cavità impraticabili in uno strato carbonatico.

La ricerca idrogeologica

La specifica ricerca sull'idrogeologia carsica del CRCS ha comportato, a partire dal 2018, anzitutto indagini su una dettagliata caratterizzazione della geologia locale con circa 30 km di percorsi di rilevamento, poi uno studio delle caratteristiche litologiche e soprattutto strutturali del Flysch del Grivò, una ricerca e catalogazione delle numerose sorgenti dell'area, la visita di alcune cavità d'interesse idrogeologico onde documentare i fenomeni connessi con la speleogenesi e l'assetto morfostrutturale. Contemporaneamente, con la collaborazione del Laboratorio Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche (SpeleoLab), sono stati avviati tre tracer test con immissioni di due traccianti, uranina e Tinopal CBS-X, in due inghiottitoi del campo di Bonis ritenuti d'interesse: il sinkhole A) nella parte centrale del Campo di Bonis, il sinkhole B) nella parte SE del Campo di Bonis in transizione con la testata del Rio Boncic.

Questi tracciamenti sono stati, da noi, considerati dei pre-test giacché era necessario, appena, individuare quali potevano essere gli output principali nel sistema idrografico (Torrente Cornappo ad Ovest, Rio Gorgons e Rio Podjama a Sud, Rio Bianco-Fiume Natisone ad Est). È stata usata la tecnica dei soli fluocaptori.

Il 1° pre-test (9/3/2018-31/6/4/2018) ha controllato per 28 giorni 14 siti (sorgenti e corsi d'acqua), con iniezione nel sinkhole A di 50 gr di uranina e 150 gr di Tinopal CBS-X. Questo ha escluso output lungo il Rio Cornappo.

Il 2° pre-test (9/2/2019-22/2/2019) ha controllato 18 siti iniettando 150 gr di Tinopal CBS-X nel sinkhole A e 75 gr di uranina nel sinkhole B; non ha dato risultati poiché incappato in un periodo di forte siccità.

Il 3° pre-test (27/10/2019-23/11/2019) ha controllato per 27 gg. 19 siti, con iniezione di 300 gr di uranina nel sinkhole A e 1000 gr di Tinopal CBS-X nel sinkhole B. Questo test ha accertato, principalmente, come output la Risorgiva Liscovac 5312/2949Fr e la sorgente afferente alla Grotta sopra

il Rio Boncic 4603/2604Fr. Inizialmente il test è avvenuto in un periodo con poche piogge mentre dal 2/11 è iniziato un forte periodo piovoso fino al 23/11 con 933 mm totali di pioggia. Le prime tracce dei traccianti si sono avute dopo una settimana ma le grosse quantità di recupero (sugli eluati dei carboni attivi) sono avvenute a seguito delle intense precipitazioni successive.

Il 4° test di tracciamento, sempre in collaborazione con lo SpeleoLab. è stato effettuato a metà dicembre 2022. Diversamente dai precedenti abbiamo installato due apparecchiature fluorimetriche (Fluorimeters GGUN-FL24) con la disponibilità e collaborazione del Laboratorio speleologico e di tecniche fluorimetriche APS ETS. Esse sono state installate all'interno della Risorgiva Liscovac e nella sorgente che affiora alla Grotta sopra il Rio Boncic, precedentemente individuate quali output principali delle acque da tracciare. Le iniezioni sono state effettuate il 18/12/2022 sempre negli sinkholes A con 1000 gr di Tinopal CBS-X e B con 300 gr di uranina. All'atto dell'iniezione nella Risorgiva Liscovac, il più importante degli output, giacché queste acque sono captate per uso civile, la portata interna era di c.a 15 L/s ma immediatamente a valle scaturivano altre due sorgenti per una portata totale di c.a 25-30 L/S. Nella Risorgiva Liscovac - per fornire un esempio di alcuni risultati del tracer test - entrambi i traccianti sono stati registrati a 21 gg. dall'iniezione in concomitanza di un significativo evento piovoso: il Tinopal CBS-X con un picco di c.a 1,5 ppb (Fig. 3), l'uranina con punte massime attorno 0,4 ppb. Contemporaneamente l'installazione di due sonde multiparametriche (CTD-Diver) nei rispettivi output, sul lungo periodo, hanno consentito di studiare il comportamento dei principali parametri fisico-chimici.

In linea generale, considerando che i dati delle ricerche sono in corso di elaborazione, è stata verificata in tutta l'area una circolazione sotterranea delle acque piuttosto complessa. Essa è attribuibile soprattutto all'assetto mesostrutturale (fratture pervasive, faglie minori etc.) che consente la comunicazione idrica tra acquiferi e acquitardi, cioè tra megabanchi (nonché banchi e strati) carbonatici e alternanze di marne e arenarie. Nei (genericamente) banchi carbonatici, specialmente negli orizzonti calcarenitici che appaiono essere quelli più facilmente carsificabili, grazie a queste reti di discontinuità, che permettono il drenaggio entro relativamente ampi volumi di masse rocciose, riescono a svilupparsi condotti carsici formando grotte anche di estensione importante.

La struttura di queste grotte, nell'area, è bene esemplificata proprio dalla Risorgiva Liscovac e dalla Grotta sopra il Rio Boncic, dove si alternano condotte singenetiche poco approfondite, talora con depositi prevalentemente sabbiosi specie nelle zone sifonanti, pur essendo presenti anche frazioni fini (limi e argille). A volte, in funzione dello spessore o della giacitura del banco carbonatico, possono formarsi, come alla Risorgiva Liscovac, plurilivelli di condotte per evidente stadialità, ove il livello più basso presenta morfologie a forra. Caratteristica, per il momento comune, a queste

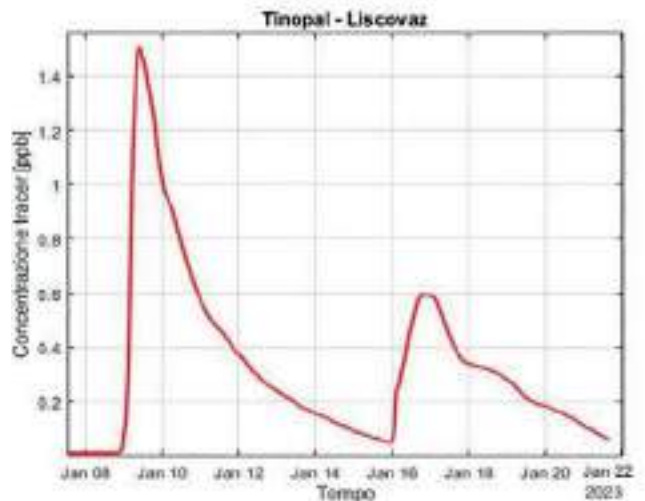


Fig. 3 - Esempio di curva di Tinopal CBS-X alla Risorgiva Liscovac dal 9 al 21 gennaio 2023.



Fig. 4 - Esempio di variazioni della conducibilità elettrica (EC K25) sul lungo periodo (da dicembre 2022 a giugno 2024).



Fig. 5 - Condotte carsiche semi-allagate che si sviluppano nella Grotta sopra il Rio Boncic entro un intervallo calcarenitico.

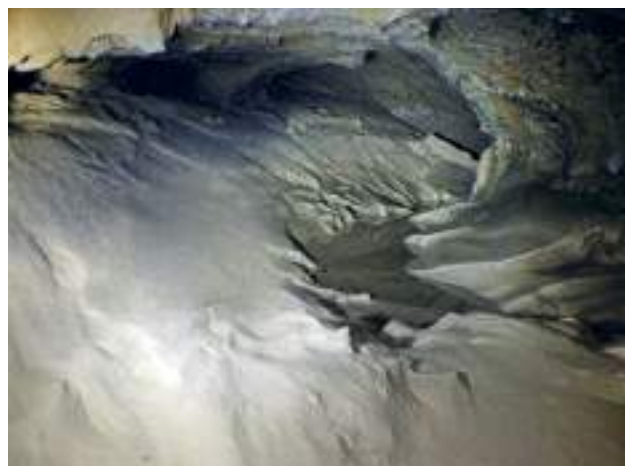


Fig. 6 - Condotta oltre il sifone della Grotta sopra il Rio Boncic con evidenti depositi prevalentemente sabbioso-limosi.

cavità è la presenza della sorgente (all'esterno, nell'alveo torrentizio in cui scaricano) sottostante all'ingresso e ai livelli di gallerie percorribili in grotta. Trattasi, in ambedue i casi, di sorgenti perenni che durante eventi piovosi importanti possono scaturire anche da altre bocche occluse da detriti poste poco più a valle e sul medesimo versante, mentre in grotta (nella Risorgiva Liscovac) sono stati verificati de visu, dagli speleologi rimasti intrappolati nel 1990 nel corso di una esplorazione, innalzamenti veloci del livello idrico con allagamento dei passaggi che portano all'esterno.

Bibliografia

- AA.VV., 2012 - *Il territorio carsico di Taipana. Progetto multidisciplinare di ricerca speleologica*. Centro Ricerche Carsiche "C Seppenhofen", Tip. Budin, 190 pp.
- CANCIAN G., 2020: *Le ghiaie e le sabbie nella grotta sopra il Rio Boncic 4603/2604Fr (Prealpi Giulie)*. Relazione inedita, 8 pp.
- CANCIAN G. & PRINCIVALLE F., 2012 - *Caratterizzazione mineralogica dei sedimenti pelitici delle grotte presso "Stalla Scure di Prossenico", "Taipana" e "Pod Lanisce" (Prealpi Giulie)*. In: CENTRO RICERCHE CARSICHE "C. SEPPENHOFER" (a cura di), *Il territorio carsico di Taipana. Progetto multidisciplinare di ricerca speleologica*, pp. 157-163.
- COMAR M., 2012 - *Caratteristiche delle acque sotterranee del Comune di Taipana*. In: CENTRO RICERCHE CARSICHE "C. SEPPENHOFER" (a cura di), *Il territorio carsico di Taipana. Progetto multidisciplinare di ricerca speleologica*, pp. 47-82.
- PINI G.A. & PONTON M., 2023 - *Carta geologica dei megabanchi del Bacino Giulio (Flysch del Grivò e Marsaròlis)*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Servizio Geologico.
- REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2024 - *WebGIS Acquiferi carsici*. <https://catastogrotte.regione.fvg.it/webgisacquiferi>.
- REJC S. & SEMERARO R., 2023 - *Conclude le operazioni in campagna del 4° test di tracciamento sul Campo di Bonis nelle Prealpi Giulie*. *Sopra e sotto il Carso*, Notiziario online del CRC "C. Seppenhofen", XII, 1, gennaio 2023, pp. 17-18, [https://Sopra e sotto il Carso \(seppenhofen.it\)](https://Sopra e sotto il Carso (seppenhofen.it)).
- SEMERARO R., CELLA G.D., REJC S. & TAVAGNUTTI M., 2023 - *Preliminary hydrogeological investigations on Campo di Bonis (Julian Prealps): Results of three pre-tracer tests*. *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"*, 52, pp. 3-21, *Articolo-1_AM52.pdf* (boegan.it).
- SEMERARO R., 2024 - *Conclude le ricerche sul "Progetto Campo di Bonis": un importante caso di studio sull'idrogeologia carsica nelle Prealpi Giulie*. *Sopra e sotto il Carso*, 13, 9, settembre 2024, pp. 10-11. [https://Sopra e sotto il Carso \(seppenhofen.it\)](https://Sopra e sotto il Carso (seppenhofen.it)).

**Sergio Dambrosi^{1, 2}, Roberto Faggian³, Alberto Giorgi⁴, Lorenzo Marini²,
Marco Mercadante^{2, 6}, Matteo Monfredo^{2, 5}, Daniele Pascolo^{2, 5}, Stefano Rejc^{1, 5},
Rino Semeraro²**

Stato di avanzamento delle ricerche idrogeologiche nel “Progetto Acqua Negra” (Prealpi Carniche). Nota informativa

1) Società Adriatica di Speleologia, Trieste; 2) Laboratorio Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche, Farra d’Isonzo (Go); 3) Unione Speleologica Pordenonese CAI, Pordenone; 4) Commissione Grotte “E. Boegan” SAG-CAI, Trieste; 5) Centro Ricerche Carsiche “C. Seppenhofer”, Gorizia; 6) Gruppo Grotte Associazione XXX Ottobre CAI, Trieste

Abstract. The work in progress “Progetto Acqua Negra” is carried out by a partnership of 5 speleological associations of Friuli Venezia Giulia with the scientific coordination of Laboratory for Speleology and Fluorometric Techniques. The project aims to study the subterranean karst and the hydrogeology of the Foce stream catchment in the Carnic Prealps. In the current phase, a double monitoring of the physical-chemical parameters of the waters (Acqua Negra spring and sink-stream) was performed with monthly discharges and chemical analyses. Geologic and geomorphologic surveys were also carried out in the caves. We also performed a tracer test by injecting into two cavities in the area. The experiment was successful as the exit of both injected substances was recorded.

Riassunto. Il “Progetto Acqua Negra”, in corso d’opera, viene svolto da una partnership di 5 associazioni speleologiche del Friuli Venezia Giulia con il coordinamento scientifico del Laboratorio Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche. Il progetto mira allo studio del carsismo sotterraneo e in particolare dell’idrogeologia carsica del bacino del Torrente Foce nelle Prealpi Carniche. Nella fase attuale è già stato eseguito un doppio monitoraggio dei parametri fisico-chimici delle acque sotterranee (sorgente Acqua Negra e un inghiottitoio), nonché per un anno un ciclo mensile di misure di portata e altre misure fisico-chimiche, accompagnate da alcuni rilevamenti geologici e geomorfologici in alcune cavità dell’area. Inoltre, abbiamo eseguito un tracer test in due cavità dell’area. L’esperimento ha avuto successo avendo registrato l’uscita di ambedue le sostanze iniettate.

Introduzione

Il “Progetto Acqua Negra” mira a studiare, principalmente, l’idrogeologia carsica dell’area del bacino del Torrente Foce nelle Prealpi Carniche; un’area non approfonditamente conosciuta dal punto di vista speleologico (si va ben poco oltre ai rilievi topografici delle grotte) e, soprattutto, quasi sconosciuta dal punto di vista dell’idrogeologia carsica. Il progetto viene realizzato da un partenariato formato da Centro Ricerche Carsiche “C. Seppenhofer” (Gorizia), Commissione Grotte “E. Boegan”, SAG CAI Trieste, Gruppo Grotte Associazione XXX Ottobre CAI Trieste, Società Adriatica di Speleologia (Trieste) e Unione Speleologica Pordenonese CAI (Pordenone), con il coordinamento scientifico del Laboratorio Speleologico e di Tecniche Fluorimetriche aps ets (SpeleoLab).

Descrizione dell’area

Il Torrente Foce è affluente di destra del Torrente Arzino (Fig. 1). L’area carsica si sviluppa nei Calcari del Cellina (Dogger-Malm-Cretacico inf.) circondata da rocce poco permeabili o a media (localmente bassa) permeabilità secondaria come la Scaglia variegata (Aptiano p.p.-Albiano) e il Flysch di Clauzetto (Ypresiano med.-sup.), mentre importanti sovrascorrimenti a loro volta la racchiudono, esternamente, confinandola con la Dolomia Principale (Norico-Retico) a media/medio-alta permeabilità.



Fig. 1 - Bacino del Torrente Foce: vista verso monte, direzione Ovest, ripresa da drone nella zona della Risorgiva dell'Acqua Negra. Si noti la forra che separa i due lembi dell'altopiano incarsito. Sullo sfondo al centro la catena dei monti Taitet (q. 1352) e Ioveit (q. 1305) (foto A. Maizan, SAS).



Fig. 2 - Ingresso della Risorgiva dell'Acqua Negra. Contatto tettonico tra la Scaglia variegata (al letto) e i Calcari del Cellina (al tetto).



Fig. 3 - Ingresso, con portata in morbida del torrente sotterraneo, della Risorgiva dell'Acqua Negra. Si notano i calcari massicci sovrascorsi sulla scaglia lungo un piano a basso angolo.

Caratteristica dell'area è una serie di inghiottitoi, tra i quali l'Inghiottitoio di Minerres 950/422Fr, l'Inghiottitoio di Juris 1610/623Fr, l'Inghiottitoio di Tinei 976/345Fr, l'Inghiottitoio dell'Arco naturale 1249/538Fr (e altri minori), di cui quest'ultimo è il maggiore con 803 m di sviluppo. Nella forra del Torrente Foce (Fig. 1), soprattutto nel tratto medio-alto, sono presenti parecchie risorgive, nonché grotte con circolazione idrica a quote prossime all'alveo, che contribuiscono alla sua alimentazione.

Nell'area descritta risultano catalogate 49 grotte. Tra tutte, quella che riveste maggiore importanza dal punto di vista idrogeologico, e che costituisce un quesito speleologico, è la Risorgiva dell'Acqua Negra 1709/ 683Fr (Figg. 2 e 3), attualmente ancora in esplorazione e rilevamento topografico nell'ambito del progetto.

Essa è costituita, semplificando, da un ramo perennemente attivo che giunge ad un pozzo-sifone che porta, poi, alla profondità massima di 77 metri, alla cui base si sviluppa una galleria finora topografata per 800 m, mentre l'esplorato sommerso raggiunge il chilometro. Attualmente, nel progetto

è impegnato un team di speleosub austriaci e sloveni.

La parte aerata (o "ramo superiore") invece è una galleria (principale) in leggera salita per molte centinaia di metri, attiva in corrispondenza di periodi piovosi; in essa sono presenti punti in cui si formano sifoni temporanei. Questa parte è in corso di esplorazione e rilevamento anche con una documentazione sugli aspetti geologici, geomorfologici e dei depositi di riempimento.

Uno dei problemi nell'esplorazione del ramo superiore è la presenza del sifone temporaneo denominato "Tipperary", che ha già arrestato più volte le esplorazioni e può rivelarsi molto pericoloso in caso di eventi piovosi, come appurato durante uno di questi poiché il livello idrico aumenta rapidamente. Questo ramo è stato finora topografato per oltre 650 m di sviluppo.

La Risorgiva dell'Acqua Negra costituisce, in generale, un problema esplorativo di rilevante impegno; già due spedizioni subacquee, nel corso del 2024, sono state andate a vuoto causa il rischio di eventi piovosi.

Monitoraggio e tracciamento

La Risorgiva dell'Acqua Negra si apre a quota 395 m s.l.m. con una galleria emittente in destra idrografica del Foce, dove confluisce dopo un centinaio di metri. Per la sua importanza nel sistema carsico abbiamo realizzato, da ottobre 2023 a settembre 2024, un ciclo di 12 mesi di monitoraggio installando una sonda multiparametrica e registrando in continuo i parametri di altezza idrometrica (H), temperatura (T °C) e conducibilità elettrica (EC K25). Contemporaneamente abbiamo eseguito, mensilmente, misure di portata con metodo ionico, pH (con misure di controllo temperatura e EC K25 nel torrente in uscita), oltre a ciò, campionando l'acqua che è stata oggetto di 12 analisi chimiche di laboratorio per tutte le principali specie ioniche. Inoltre, una sonda multiparametrica è stata installata, nello stesso periodo, nel sifone terminale dell'Inghiottitoio dell'Arco Naturale allo scopo di monitorare il comportamento idrologico di un tipico inghiottitoio dell'area. Tutti i dati ottenuti sono in corso di elaborazione.

Nello stesso periodo sono state effettuate visite nelle principali grotte a scopo documentativo.

In alcune si esse sono stati osservati e documentati interessanti fenomeni legati a fasi di riempimento, in altre gli aspetti geologici e geomorfologici maggiormente caratteristici onde poi disporre di un quadro generale di riferimento. Inoltre, si stanno controllando con nuove poligonali topografiche i rilievi delle grotte principali (che sono ormai datati), soprattutto per disporre di quote altimetriche sui sifoni in funzione dello studio idrogeologico.

Il 1° maggio 2025 è stato effettuato un test di tracciamento iniettando uranina (fluoresceina sodica; Fig. 5) e Tinopal CBS-X (Fig. 4) rispettivamente nei corsi d'acqua sotterranei del Pozzo della confluenza 3045/ 536Fr e dell'Inghiottitoio di Juris 1610/623Fr. Il test è stato supportato dal Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Esso si è concluso il 25 maggio 2025. Alla Risorgiva dell'Acqua Negra è stata installata una sonda fluorimetrica accompagnata da una CTD-Diver; sono stati eseguiti inoltre, periodicamente, campionamenti (campioni d'acqua e fluocaptori) distribuiti sull'area, nonché misure di portata alla risorgiva. Il test ha avuto successo e sono stati recuperati ambedue i traccianti. Sono stati infatti controllati e/o monitorati i principali punti d'interesse, sia sul bacino del Foce sia dell'Arzino, con l'obiettivo di indagare in merito al comportamento delle acque tracciate nell'acquifero carsico, poiché - come si è appurato - esso raggiunge, con grandi gallerie, una quota ben al di sotto del letto del Torrente Foce (una settantina di metri). Dal letto della forra del Foce, poi, sembra si infiltri nel sottosuolo incarsito una parte delle



Fig. 4 - Iniezione del Tinopal CBS-X nell'Inghiottitoio di Juris.

Fig. 5 - Iniezione di uranina nel Pozzo della confluenza.



sue acque. Peraltro, una condizione di circolazione idrica (in zona presumibilmente epifreatica) già circa una quindicina di metri al di sotto dell'alveo del Torrente Foce, è stata verificata nella zona medio-alta del bacino, nel Pozzo della Confluenza 3045/ 536Fr.

Durante l'estate 2025 sono iniziate le immersioni subacquee volte alla documentazione con un team di specialisti provenienti da Austria e Slovenia. La prima esplorazione, trovando buone condizioni di portata e visibilità, ha raggiunto la profondità di 77 metri, documentando accuratamente la parte esplorata.

Il progetto, dunque, è un esempio di partenariato in ambito speleologico, mediante allocazione di risorse umane, strumentali, laboratoriali e finanziarie funzionali all'ottenimento di risultati che potrebbero essere qualitativamente elevati. Esso, per le diverse tematiche affrontate, è di tipo multidisciplinare e, al suo interno, prevede anche documentazioni, specie in ambienti sommersi profondi di non facile esplorazione. Pertanto, il "Progetto Acqua Negra" si configura pure come un esempio di buon rapporto tra speleologia esplorativa e speleologia di ricerca.

Bibliografia

- CARULLI G.B. (ed.), 2006 - *Carta geologica del Friuli Venezia Giulia alla scala 1:150.000. Note illustrative*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Centrale Ambiente e Lavori Pubblici, Servizio Geologico, Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, Università di Udine, Dipartimento di Georisorse e Territorio, S.E.L.C.A., 44 pp.
- DAMBROSI S. & SEMERARO R., 2024 - *Progetto Acqua Negra: concluso il primo semestre di monitoraggio idrogeologico*. *Sopra e sotto il Carso*, 13, 3, marzo 2024, pp. 27-28, [https://Sopra e sotto il Carso \(seppenhofer.it\)](https://Sopra e sotto il Carso (seppenhofer.it)).
- FERUGLIO, E., 1922 . *Vita del Circolo: la sorgente detta "L'Acqua Nera" in Val d'Arzino*. *Mondo Sotterraneo*, 17/18, pp. 33-35.
- ROSSI D., MASETTI D. & MANTOVANI F., 1988 - *Carta geologica del territorio friulano compreso tra il Torrente Arzino e il Torrente Meduna, Scala 1:25.000*. Litografia Artistica Cartografica, Ferrara.
- SEMERARO R., 2024 - *Progetto Acqua Negra: concluso un anno di monitoraggio idrogeologico*. *Sopra e sotto il Carso*, a. 13, n. 9, settembre 2024, p. 25-26, [https://Sopra e sotto il Carso \(seppenhofer.it\)](https://Sopra e sotto il Carso (seppenhofer.it)).
- SEMERARO R. (a cura del Coordinamento "Progetto Acqua Negra"), 2025 - *News Progetto Acqua Negra: prima immersione e rilevamenti*. *Sopra e sotto il Carso*, 14, 6, giugno 2025, pp. 31-32, [https://Sopra e sotto il Carso \(seppenhofer.it\)](https://Sopra e sotto il Carso (seppenhofer.it)).

Bartolomeo Vigna^{1, 2}

Perché studiare la circolazione dell'acqua e dell'aria nelle grotte

1) DIATI, Politecnico di Torino; 2) Speleo Club Tanaro, Garessio (Cn)

Abstract. Water and air are two fluids that circulate in caves and that speleologists have always observed during their explorations to gather useful information regarding the development and extension of karst networks. This brief paper illustrates the geomorphological and physical factors that influence the circulation of these fluids within mountains, highlighting their significant movements and changes, which are primarily influenced by surface weather conditions. It highlights how detailed monitoring of certain physical parameters can gather a wealth of data essential for understanding these circulations.

Riassunto. L'acqua e l'aria sono due fluidi che circolano nelle cavità e che gli speleologi durante le loro esplorazioni hanno sempre osservato per raccogliere utili informazioni relative allo sviluppo e alla estensione dei reticoli carsici. In questo breve lavoro vengono illustrati quali sono i fattori geomorfologici e fisici che condizionano la circolazione di tali fluidi nel cuore delle montagne, evidenziando i loro significativi movimenti e cambiamenti, condizionati prevalentemente dalla situazione meteorologica di superficie. Si vuole evidenziare come, attraverso un dettagliato monitoraggio di alcuni parametri fisici, sia possibile raccogliere una moltitudine di dati fondamentali per la comprensione di queste circolazioni.

Premessa

Nel cuore delle montagne calcaree circolano due fluidi, con modalità del tutto diverse tra loro, che gli speleologi hanno sempre osservato e sommariamente descritto: l'acqua e l'aria. È stato Giovanni BADINO che a partire dalla sua innovativa pubblicazione del 1995 (*Fisica del clima sotterraneo*) e in tutti i successivi articoli ha descritto i meccanismi che regolano le circolazioni dell'aria nelle cavità, ma pochi sono i lavori finalizzati al monitoraggio dei diversi parametri (BOR-SATO, 2003).

Più numerose sono invece le pubblicazioni riguardanti il monitoraggio delle acque sorgive (VIGNA, 2023). Le rocce carbonatiche caratterizzate da una conduttività termica molto bassa vengono corrose dalle acque circolanti nel reticolo delle fratture e, di conseguenza, raffreddate nell'arco delle migliaia di anni da questo fluido che, scorrendo velocemente nei condotti carsici, conserva le basse temperature acquisite nelle zone di infiltrazione. Alle sorgenti carsiche osserviamo infatti ancora significative variazioni della temperatura dell'acqua che ha attraversato intere montagne, interagendo con la temperatura della roccia scaldata dal flusso geotermico e con valori molto costanti. Nel tempo, le direzioni dei flussi idrici sono quasi sempre le medesime, ma ovviamente condizionate dagli apporti infiltrativi: in occasione di intense precipitazioni o fusione nivale i reticoli più bassi non riescono a smaltire gli ingenti volumi idrici in arrivo e pertanto i livelli idrici risalgono a volte anche di centinaia di metri, attivando percorsi più ampi (presenti nella così detta "zona epifreatica"), spingendosi verso la zona sorgiva, fino a raggiungere le "sorgenti di troppo-pieno".

L'aria, caratterizzata da una bassa capacità termica unitaria, segue in genere direzioni e percorsi diversi da quelli delle acque sotterranee. La sua temperatura è soggetta a continui scambi di calore con gli altri corpi con cui viene a contatto (roccia e acqua) e raggiunge rapidamente una condizione di quasi equilibrio con la roccia, assumendone in pratica la stessa temperatura, quando non è interessata da flussi elevati. Sono innanzitutto le differenze tra le temperature in superficie e quelle in sotterraneo che condizionano le direzioni e i volumi dei flussi d'aria. Maggiori sono tali differenze, più intense sono le circolazioni dell'aria che si sposta, seguendo i percorsi con minime perdite di carico, dal cuore delle montagne verso gli ingressi alti o quelli bassi al variare delle temperature

in superficie. Ovviamente sono anche il numero, le dimensioni e i dislivelli degli ingressi collegati tra loro che giocano un ruolo fondamentale nel condizionare le circolazioni: cavità anche di ampie dimensioni, ma con un unico ingresso percorribile dall'aria, presentano in genere correnti ridotte ad eccezione di temporanee situazioni come quelle del Carso triestino quando le rapide risalite dei livelli idrici in grandi reticoli carsici spingono volumi d'aria molto importanti verso tali ingressi.

I concetti generali che regolano le circolazioni dell'acqua e dell'aria sono abbastanza chiari, ma ovviamente ogni cavità si comporta in modo unico. Quindi per comprendere il funzionamento delle circolazioni di questi due fluidi in un dato sistema occorre eseguire una raccolta capillare di dati che deve passare attraverso il monitoraggio di una serie di parametri fisici con l'utilizzo di strumentazioni opportune. In passato, venivano eseguite solo misure puntuali o monitoraggi con strumentazioni costose e di difficile installazione. Oggi in commercio sono presenti data logger poco costosi che anche un gruppo speleologico o una federazione regionale possono acquistare per raccogliere una considerevole moltitudine di dati. Questo breve lavoro è rivolto in particolare agli speleologi per sottolineare l'importanza della raccolta di dati di monitoraggio dei flussi idrici o dell'aria, finalizzata non solo a studi di carattere conoscitivo sul funzionamento dei sistemi carsici, ma anche ad acquisire informazioni legate alla sicurezza durante una escursione in grotta o alle possibilità esplorative di un massiccio carsico.

La circolazione idrica negli ammassi carbonatici

Organizzazione della rete di drenaggio

In un ammasso carbonatico vengono in genere distinte due differenti zone legate alle modalità di circolazione delle acque sotterranee: la zona non satura, dove prevalgono flussi verticali guidati dalla gravità, e la zona satura con flussi a direzione sub-orizzontale, indirizzati verso le sorgenti dai carichi idraulici del reticolo di drenaggio (Fig. 1). La zona epifreatica, che viene inondata in seguito a rilevanti apporti, separa queste due porzioni. In realtà la distinzione di queste due zone non è così dettagliata e individuare una unica e continua superficie o un livello idrico di separazione è quasi impossibile. Come sappiamo bene sono presenti nei massicci carsificati dei collettori principali e secondari, che hanno unicamente una funzione drenante e che occupano una porzione molto limitata rispetto alla intera struttura carbonatica. In seguito a lunghi periodi con assenza di apporti idrici (piogge o fusione nivale) alle sorgenti in genere il flusso idrico si riduce notevolmente, ma è sempre presente una significativa portata. In tali periodi è fondamentale la funzione delle porzioni capacitive presenti nell'ammasso roccioso, legata alla microcarsificazione e alla fratturazione, che giocano un ruolo fondamentale nell'alimentazione dei dreni principali e secondari. La microcarsificazione di



Fig. 1 - Schema della circolazione delle acque in un acquifero carsificato.

una roccia carbonatica è costituita da una serie di cavità di diametro molto ridotto (centimetriche e decimetriche), impostate lungo giunti di strato, faglie e fratture che si estendono per porzioni molto estese dell'ammasso roccioso e che sono condizionate dalla situazione stratigrafico-strutturale di una data formazione geologica.

Tali piccole cavità sono in genere caratterizzate da condotti con morfologia a "pieno carico", in grado di ospitare volumi idrici molto significativi. Si estendono sia nella porzione della zona non satura che di quella satura. Quindi anche al di sopra dei livelli di saturazione possono essere presenti estese porzioni di queste piccole cavità che costituiscono dei "sottosistemi interdipendenti" con velocità di flusso molto lente. La portata di tali venute è piuttosto costante nel tempo e è caratterizzata da fenomeni di pistonaggio, con incrementi dei valori della mineralizzazione e della temperatura, legate alla rimobilizzazione di acque provenienti dai settori impostati in zone meno permeabili (fratture) del reticolo di drenaggio. In genere le portate di questi singoli "sottosistemi" sono ridotte, anche inferiori ad 1 l/s ma, costituendo un significativo numero e volume nell'intero ammasso carbonatico, contribuiscono in modo rilevante alla portata delle sorgenti durante i periodi in assenza di apporti. Anche la circolazione presente nelle porzioni fratturate dell'ammasso roccioso è importante nell'alimentazione di un sistema carsico, ma i volumi messi in gioco sono in genere molto esigui a causa delle ridotte dimensioni delle aperture delle fratture e della relativa interconnessione di questi reticoli. Fanno eccezione le situazioni in cui l'ammasso roccioso si trova in condizioni di estrema fratturazione e una ridotta carsificazione con uno sviluppo di estesi sistemi con circolazione idrica di tipo dispersivo.

Strumentazioni

Per monitorare i livelli e le portate dei collettori principali, delle sorgenti o anche degli apporti secondari sono utilizzati gli acquisitori automatici di livello. Tali strumentazioni hanno costi piuttosto ridotti, inferiori a 1000 €, e sono in grado di funzionare con alimentazione a batteria per oltre un anno, con una acquisizione di dati molto dettagliata (in genere impostata per gli studi idrogeologici ogni 30 o 60 minuti). La loro precisione è in funzione del range di misura, con possibilità di scegliere apparecchiature per rilevare battenti idraulici, compresi tra pochi metri fino ad oltre 50 metri. I misuratori di livello, finalizzati alla misura della portata idrica, devono essere installati presso delle bocche a stramazzo o in corrispondenza di adeguate sezioni di flusso. Le bocche a stramazzo sono degli sbarramenti del flusso idrico con sezioni calibrate di forma diversa (in genere a sezione rettangolare o triangolare), che creano a monte una vasca di calma e, con opportune formule matematiche, conoscendo i valori di livello nel tempo, permettono di calcolare direttamente la portata idrica. Vengono realizzati alla sorgente o in corrispondenza dei collettori carsici. Nelle zone dove non è possibile realizzare tali opere occorre individuare delle sezioni il più regolari possibili in corrispondenza dei condotti carsici o lungo il corso d'acqua superficiale alimentato direttamente da una o più sorgenti. Il misuratore di livello deve essere adeguatamente protetto per evitare, durante le piene, danneggiamenti da parte dei violenti flussi idrici. La portata viene calcolata attraverso il dato di livello tarato con una serie di misure puntuali, utilizzando dei mulinelli idraulici. Attraverso queste misure manuali, in differenti condizioni di portata, è possibile ricostruire una adeguata scala di deflusso.

Per misurare anche la temperatura e la mineralizzazione dell'acqua (attraverso il valore della conducibilità elettrica) occorre installare una sonda multiparametrica che acquisisce anche tali parametri chimico-fisici. Questi acquisitori hanno un prezzo indicativo intorno a 2500 € e permettono di raccogliere ulteriori informazioni relative al funzionamento dei sistemi carsici.

Modelli concettuali dei sistemi carsici

Le caratteristiche litologiche, lo stato di fratturazione e/o di carsificazione di un ammasso roccioso, l'architettura del reticolo di drenaggio e l'estensione della zona satura condizionano pe-

santemente la portata sorgiva nel tempo e la variazione dei principali parametri chimico-fisici delle acque sotterranee. Sulla base dei dati di monitoraggio di oltre 10 sorgenti alimentate da ammassi carbonatici, è stata individuata una serie di sistemi rappresentativi con differenti situazioni idrogeologiche (VIGNA, 2007), che sono state descritte in tre diversi modelli concettuali di funzionamento (Fig. 2).

I sistemi con elevata organizzazione di flusso o “a dreno dominante” sono caratterizzati da una elevata carsificazione e ridotta fratturazione dell’ammasso roccioso, con una zona satura piuttosto ridotta o assente (prevalentemente costituita da tratti sifonanti dei collettori) e ampie vie di drenaggio in grado di smaltire rapidamente gli apporti idrici. Le variazioni della portata sorgiva sono molto marcate, con picchi pronunciati e di breve durata, direttamente collegati agli apporti superficiali. Le acque sorgive presentano in seguito agli incrementi del flusso idrico, rapide diminuzioni della conducibilità elettrica e in genere anche della temperatura per l’arrivo alla sorgente delle acque di neoinfiltrazione (risposta denominata sostituzione prevalente). La vulnerabilità all’inquinamento di tali sistemi è estremamente elevata, legata alla elevata velocità dei flussi idrici.

I sistemi con moderata organizzazione di flusso o “a dreni interconnessi” si trovano in ammassi rocciosi carsificati e fratturati, con la presenza di diverse vie di drenaggio, prevalentemente impostate in una zona satura ampiamente sviluppata in condotti e sistemi annessi, che costituiscono una significativa porzione capacitiva del sistema carsico. In occasione di importanti apporti infiltrativi alle sorgenti si osservano repentini aumenti della portata, legati prevalentemente all’effetto della trasmissione delle pressioni idrauliche nelle porzioni sature del sistema (onde di pressione). I valori della temperatura e della conducibilità delle acque presentano in tali situazioni aumenti significativi legati a fenomeni di rimobilizzazione delle acque a lenta circolazione, presenti nelle porzioni più capacitive dell’acquifero (risposta denominata pistonaggio). La vulnerabilità all’inquinamento di tali sistemi è piuttosto elevata ed è legata in parte ad una ridotta funzione di filtrazione dell’acquifero carsico e in parte ancora alle relative velocità del flusso idrico.

I sistemi con bassa organizzazione di flusso o “a circolazione dispersiva” caratterizzano ammassi rocciosi altamente fratturati che presentano una carsificazione estremamente ridotta. La circolazione è qui impostata nelle porzioni microcarsificate con alta funzione capacitiva. Possono essere presenti anche cavità di maggiori dimensioni ma isolate in un contesto caratterizzato da cir-

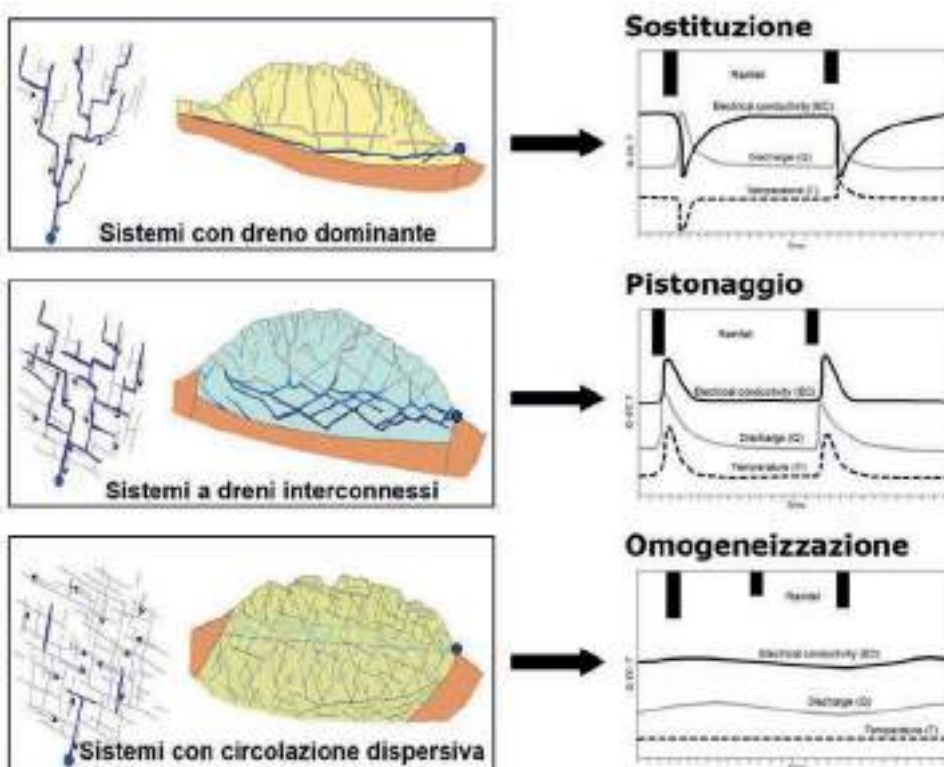


Fig. 2 - Modelli concettuali basati sullo stato di carsificazione/fratturazione di un ammasso roccioso e sulla estensione della zona satura.

colazioni idriche molto lente nell'estesa rete delle discontinuità della struttura carbonatica. La zona satura è molto sviluppata e assimilabile a quella tradizionale degli acquiferi porosi. La portata sorgiva mostra variazioni piuttosto contenute nel tempo, con blandi aumenti non correlati con i singoli eventi infiltrativi e, in genere, con ritardi di diversi mesi rispetto ai periodi con maggiori apporti. La temperatura e la conducibilità elettrica sono molto costanti nel tempo, con valori piuttosto elevati legati alla lenta circolazione e alla notevole intimità di contatto acqua-ammasso roccioso (risposta denominata omogeneizzazione). La vulnerabilità all'inquinamento di tali sistemi è piuttosto ridotta ed è legata alla modesta velocità dei flussi idrici e alla notevole diluizione nell'acquifero di un ipotetico inquinante.

Monitoraggi della circolazione dell'acqua

Gli studi che si possono eseguire sugli acquiferi carsici sono molteplici. Ovviamente l'esplorazione, i rilievi, la descrizione delle cavità che vengono scoperte, i test con traccianti sono contributi fondamentali per la conoscenza di tali acquiferi che soltanto gli speleologi sono in grado di realizzare. Ma gli speleologi possono anche eseguire monitoraggi finalizzati ad approfondire le conoscenze sulle portate, sulle diverse tipologie di questi acquiferi, sulla loro protezione. L'installazione di strumentazioni presso le sorgenti o in corrispondenza dei collettori carsici permette di raccogliere ulteriori dati, che possono essere messi a disposizione della collettività. L'acquisto di tali attrezzature può essere finanziato da enti pubblici o privati, previa adeguata progettazione e finalità delle ricerche.

Ulteriori studi possono essere eseguiti dagli speleologi finalizzati a conoscere le potenzialità esplorative di un dato massiccio carsico e a raccogliere informazioni relative alla sicurezza durante le escursioni nelle cavità. Con un prezzo contenuto è possibile acquistare dei misuratori di livello che possono essere ubicati presso le sorgenti o in corrispondenza dei collettori per conoscere in modo dettagliato le velocità e l'entità delle variazioni dei livelli idrici. Purtroppo, numerose sono le situazioni di rischio per le persone, legate all'allagamento di tratti di cavità in seguito anche ad un singolo temporale. Come evidenziato in precedenza e nei casi descritti di seguito, i livelli idrici in una cavità possono risalire molto rapidamente per diverse decine di metri, allagando ampi tratti e intrappolando gli speleologi.

Vengono ora brevemente descritte le situazioni della portata idrica e degli allagamenti di due cavità attive delle Alpi Liguri appartenenti al sistema carsico delle Vene-Fuse (massiccio carsico del M. Mongioie) e del sistema carsico del Pesio (massiccio carsico delle Carsene-Marguareis). Alla Sorgente delle Fuse, in seguito ad un temporale estivo del 12 settembre 2015, la portata passa da 17 l/s a 1327 l/s in sole 4 ore, mentre nella prima fase della intensa precipitazione del 3 ottobre del 2020 il flusso idrico varia nell'arco di sole 2 ore da 26 l/s a 1046 l/s (Fig. 3). Una decina di metri più in alto si trova la cavità omonima, con uno sviluppo di oltre 1 km, che intercetta, nei punti più bassi in corrispondenza di 2 piccoli sifoni, la falda idrica. Durante i principali picchi di piena (come

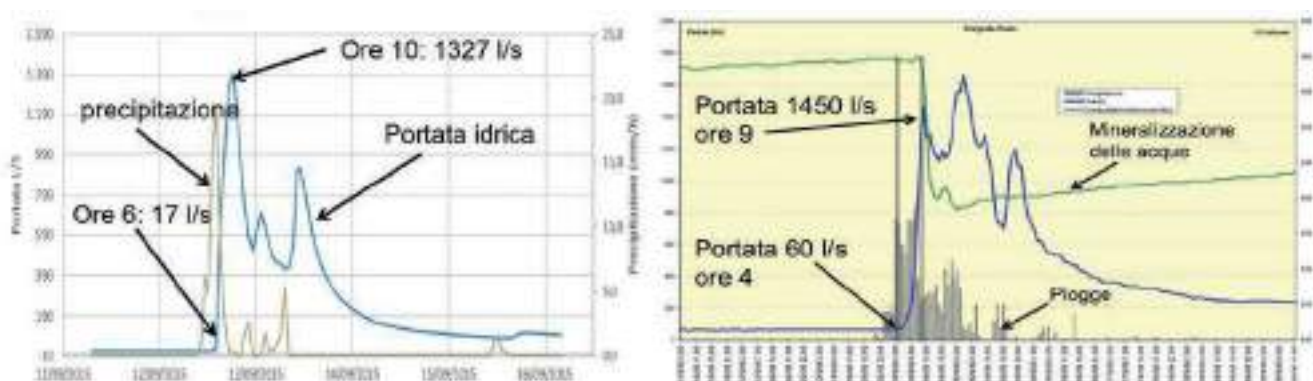


Fig. 3 - Andamento della portata e delle precipitazioni della Sorgente Fuse e portata-conducibilità elettrica-pioggia alla Sorgente Pesio.

evidenziato dai dati di monitoraggio) si verifica in tempi molto brevi l'allagamento quasi completo della cavità con fuoriuscita delle acque dall'ingresso principale. Le sorgenti del Pesio sono alimentate da un importante collettore, che percorre le gallerie più basse del complesso del Cappa e che raggiunge poi attraverso un tratto sifonante, la Grotta del Pis del Pesio. Anche queste sorgenti sono caratterizzate da rapidissime variazioni del flusso come riscontrato il 14 settembre del 2006, quando la portata sorgiva è passata nell'arco di 5 ore da 60 l/s a 1450 l/s. Durante la prima fase di piena il valore della conducibilità elettrica non subisce alcun cambiamento evidenziando l'importanza della trasmissione delle onde di pressione nei tratti sifonanti e con l'arrivo delle acque di neo-infiltrazione (sottolineato da una rapida caduta della conducibilità elettrica) soltanto dopo il primo picco di piena (Fig. 3 a destra). Durante tali eventi la Grotta del Pis del Pesio si allaga in numerosi tratti, ma anche nel Complesso del Cappa si verificano pericolosi e rapidissimi incrementi dei livelli idrici. Il 15 agosto 1999 in seguito ad un singolo temporale due speleologi rimasero intrappolati al fondo delle gallerie del Cappa per quasi una giornata intera, trovando rifugio in una serie di gallerie non raggiunte dalla piena.

La circolazione dell'aria negli ammassi carbonatici

Modelli concettuali sulla circolazione dell'aria

La circolazione dell'aria nelle cavità presenti in un massiccio carsico è guidata da due fattori principali: la presenza o meno di ingressi collegati tra loro e ubicati a diverse quote e la differenza tra la temperatura dell'aria in superficie e quella in sottoterraneo. I modelli concettuali si basano sul numero di ingressi, distinguendo cavità con circolazione "a sacco d'aria" e con circolazione "a tubo di vento" (Fig. 4).

Le grotte con circolazione "a sacco d'aria" (che possono avere anche sviluppi rilevanti), hanno un unico ingresso senza ulteriori collegamenti con la superficie e quindi presentano flussi ridotti, con una serie di celle convettive nella prima parte della cavità. In inverno, l'aria fredda penetra dal pavimento verso l'interno, si riscalda poi a contatto con la roccia e torna verso l'uscita lungo il soffitto. Nei periodi caldi il flusso ovviamente si inverte. In tali cavità possono poi essere presenti altre celle convettive con una medesima circolazione per l'intero anno legate alla morfologia (gallerie inclinate) e al raffreddamento dell'aria condizionato dalla presenza di importanti collettori con acqua molto più fredda rispetto alla temperatura della roccia (vedi situazione nella Grotta di Bossea).

Le cavità con circolazione "a tubo di vento" sono sempre collegate ad altri ingressi (anche non transitabili dagli speleologi) posti a quote diverse o su differenti versanti. La circolazione d'aria presenta direzioni di flusso legate prevalentemente alla differenza di temperatura e di umidità e quindi di densità fra le colonne d'aria interne e quelle esterne. Durante l'estate l'aria interna, più

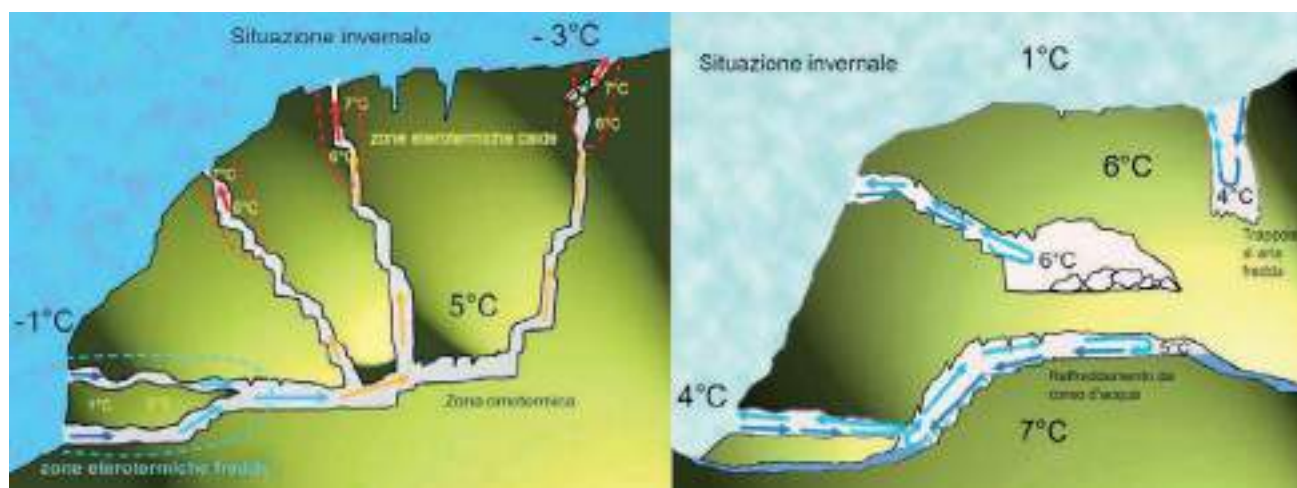


Fig. 4 - Modelli concettuali relativi a cavità con circolazione "a tubo di vento" (a sinistra) e "a sacco d'aria" (a destra) durante periodi freddi.

fredda di quella in superficie, affonda nelle montagne ed esce dalle entrate basse, richiamando aria calda che viene inalata dagli ingressi alti. Durante l'inverno l'aria delle cavità, più calda rispetto a quella in superficie, sale verso gli ingressi alti e, di conseguenza, aria fredda entra dagli ingressi bassi. Quando le temperature in superficie e in profondità sono simili il sistema è in equilibrio e si interrompe la circolazione. Tali circolazioni quando sono molto significative condizionano anche la temperatura della roccia per diverse centinaia di metri dagli ingressi (zone eterotermiche fredde e zone eterotermiche calde). Presso gli ingressi bassi l'aria entrante nella stagione invernale raffredda progressivamente la roccia per tratti più o meno estesi. Anche in seguito alla inversione della circolazione queste zone presentano temperature dell'aria piuttosto ridotte, condizionate dalla temperatura della roccia che, a causa della sua bassa conduttività termica, conserva le frigorifiche acquisite durante la stagione invernale (Fig. 4). Gli ingressi bassi sono infatti soprannominati "bocche fredde". In situazioni particolari, in aree alpine in quota, quando questi tratti di cavità sono interessati anche da percolazione d'acqua, proveniente dai processi di fusione nivale primaverile, si possono formare importanti depositi di ghiaccio che, se permanenti durante l'intero anno, danno origine a dei veri e propri ghiacciai ipogei. Al contrario il medesimo fenomeno condiziona la situazione degli ingressi alti denominati "bocche calde". Nelle cavità con circolazione "a tubo di vento", il flusso d'aria entrante in estate da ingressi alti e in inverno da ingressi bassi è ovviamente interessato da marcate oscillazioni della temperatura legate al ciclo giorno-notte. Tali oscillazioni progressivamente si attenuano scendendo in profondità fino a diventare irrilevanti per le strumentazioni situate nella "zona omotermica". Le due zone eterotermiche (calda e fredda) presentano una estensione condizionata dalla velocità dei flussi d'aria entranti e dalla morfologia della cavità. Se la circolazione dell'aria interessa porzioni piuttosto ristrette, caratterizzate da una maggiore intimità di contatto con la roccia la "zona eterotermica", è poco sviluppata mentre, al contrario, in cavità di grandi dimensioni e con flussi elevati, tale zona si spinge a diverse centinaia di metri in profondità.

Nella Grotta delle Turbiglie (Alpi Liguri) che presenta uno sviluppo di soli 600 m con un ingresso basso (Turbiglie) e uno alto (Vipere) è stata installata una serie di data logger per esaminare in dettaglio le variazioni delle temperature nelle diverse zone della cavità. In figura 5 vengono confrontati i valori di temperatura della roccia e dell'aria dell'ingresso basso (a quota 983 m) e dell'ingresso alto a quota 1020 m s.l.m.. Tra novembre 2023 e dicembre 2024, durante le fasi soffianti dei due ingressi (quindi quando fluisce l'aria provenienti dalle zone profonde della cavità), l'ingresso basso presentava una temperatura della roccia e dell'aria molto simili con valori di 6.16°C mentre la temperatura all'ingresso alto raggiungeva 7.98°C. Nel periodo invernale a 25 m dall'ingresso inferiore (Fig. 5 a destra) sono stati rilevati valori minimi di temperatura compresi tra 0.38°C e 1.05°C il giorno 19 aprile. A 120 m e a 170 m dall'ingresso la temperatura ha raggiunto rispettivamente un minimo di 6.13°C e di 6.93°C soltanto il 26 aprile. Il ritardo di ben 7 giorni evidenzia bene come il flusso d'aria entrante impieghi tempi relativamente lunghi per raffreddare progressivamente le pareti della roccia nello spazio di soli 100 m. Il tempo di transito, calcolato

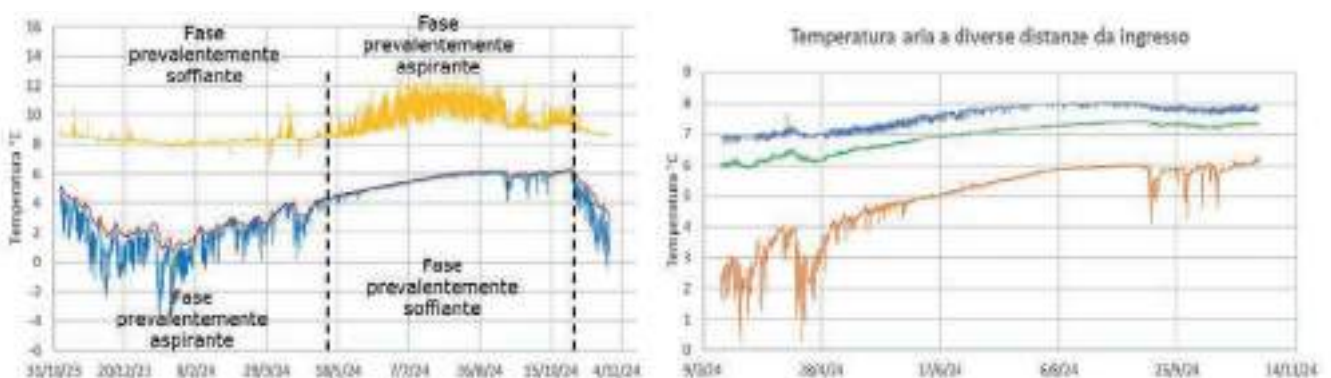


Fig. 5 - Grotta delle Turbiglie: andamento della temperatura dell'aria (in blu) e della roccia (in rosso) dell'ingresso basso e dell'aria (in giallo) dell'ingresso alto. A destra andamento della temperatura aria a 25, 120 e 170 m dall'ingresso.

con un tracciante aereiforme, per percorrere il tragitto dall'ingresso alto a quello basso è di sole 6 ore. La roccia, essendo caratterizzata da una bassa conduttività termica, impiega invece diversi giorni per raffreddarsi in questo tratto e condizionare poi la temperatura dell'aria (che presenta una altissima conduttività termica). Mentre nelle prime decine di metri le oscillazioni termiche giornaliere sono ben visibili, ad una distanza di poco superiore ai 100 m i cicli diurni non sono quasi più percettibili (oscillazioni di qualche centesimo di grado), mostrando quindi unicamente variazioni legate ai cicli stagionali.

Nelle zone profonde la temperatura della roccia è prevalentemente condizionata dalle interazioni tra il flusso geotermico e la circolazione dell'acqua, legata a quella dei collettori principali e secondari. Le acque di infiltrazione, che fluiscono rapidamente in profondità nell'ammasso roccioso, hanno in genere una temperatura più bassa rispetto a quella della roccia. Nei secoli l'acqua ha quindi raffreddato l'ammasso roccioso che, come noto, dovrebbe aver raggiunto una temperatura simile a quella media dell'aria in superficie. Ma in conseguenza del significativo incremento delle temperature, negli ultimi decenni osserviamo oggi delle importanti differenze tra la temperatura media in superficie e quella in profondità. Negli anni 2023-24 nella Grotta di Bossea è stata misurata, ad una distanza dall'ingresso di 600 m e dalla superficie di 180 m, una temperatura della roccia molto costante di 8.75°C. A 200 m dall'ingresso e 80 m dalla superficie la temperatura è variata tra 9.49°C e 9.44°C mentre a 140 m dall'ingresso, ma a soli 20 m dalla superficie, il valore è passato da un minimo di 9.45°C (a giugno 2023) ad un massimo di 10.06°C (a dicembre 2023). Tale ritardo è legato alla lenta propagazione dell'onda termica proveniente dalla superficie. Presso l'ingresso, il valore medio della temperatura dell'aria nello stesso periodo è stato di 11.23°C. In prossimità del sifone a fondo grotta la temperatura dell'acqua ha raggiunto un valore massimo annuale di 7.75°C e un minimo di 7.42°C durante le piene primaverili, condizionando anche la temperatura della roccia (ad una distanza di 3 m), che è passata da un massimo di 8.13°C ad un minimo 7.87°C. La temperatura dell'acqua del reticolo delle fratture è invece compresa tra 9.5°C e 10.02°C.

Strumentazioni

Per monitorare in continuo la direzione e la velocità dell'aria vengono utilizzati gli anemometri ultrasonici o a filo caldo (questi ultimi sono più sensibili ma non rilevano il dato della direzione del flusso d'aria). Tali strumentazioni hanno prezzi elevati (un anemometro ultrasonico ha un prezzo indicativo intorno ai 4.000 €), ma l'inconveniente maggiore è legato all'alto consumo di energia, dovendo funzionare in continuo. Ad eccezione delle grotte turistiche, dove la corrente elettrica è a disposizione, nelle cavità è possibile alimentare tali apparecchiature solo con batterie e quindi



Fig. 6 - Modello concettuale relativo alla circolazione dell'aria basato sui valori di temperatura presso un ingresso alto (in rosso) e un ingresso basso (in blu) e a pavimento e soffitto in una cavità con una circolazione "a sacco d'aria" (da VIGNA, 2023).

con un tempo di funzionamento modesto (con una batteria da 22 Ah la durata è dell'ordine di 10 giorni). I dati acquisiti con tali strumentazioni sono molto interessanti e mostrano bene le relazioni tra i flussi dell'aria nelle cavità e la temperatura in superficie. Risulta evidente come i complessi carsici di grandi dimensioni siano interessati da una risposta molto più inerziale rispetto alle variazioni della temperatura di superficie. Nei sistemi di piccole dimensioni si osserva invece un notevole parallelismo tra velocità dei flussi e andamento della temperatura in superficie. Un ulteriore svantaggio legato a queste strumentazioni è la bassa sensibilità di rilevamento che è solo intorno a 0.2 m/s. Tutti questi inconvenienti indicano, quindi, che tali strumentazioni non sono così valide per gli studi nel campo speleologico. Utilizzando dei semplici data logger di temperatura dell'aria è possibile invece acquisire indirettamente utilissime informazioni relative anche alla circolazione dell'aria. Numerosissimi sono i modelli in commercio: per i monitoraggi nelle grotte occorre utilizzare strumentazioni adatte a funzionare in condizioni ambientali difficili, meglio con sensore su cavo e con accuratezza e risoluzione molto elevate. Oggi sono a disposizione anche apparecchiature che si possono impostare e scaricare con il cellulare, con prezzi inferiori a 200 €, rendendo molto più facile per gli speleologi monitoraggi anche in cavità di difficile progressione.

Come evidenziato in precedenza, nelle zone eterotermiche delle cavità la temperatura dell'aria mostra oscillazioni giornaliere legate alle variazioni diurne quando il flusso è aspirante, e valori molto costanti quando si trova in fase soffiante e l'aria proviene da zone profonde del sistema (Fig. 6). Questa misura viene poi confrontata con quella dell'aria in superficie presso l'ingresso per evidenziare anche, nei periodi di inversione della circolazione, le temperature che condizionano tali situazioni. In genere, come è da aspettarsi, i sistemi carsici di grandi dimensioni presentano una notevole inerzia della direzione dei flussi d'aria al cambiamento delle temperature in superficie, mentre i complessi di dimensioni ridotte mostrano inversioni molto rapide.

Monitoraggi delle temperature e della circolazione dell'aria

Attraverso i dati di monitoraggio delle temperature dell'aria, della roccia e dell'acqua nelle cavità si può acquisire una notevole serie di informazioni su diverse tematiche ora brevemente descritte. Gli studi legati all'impatto dello sfruttamento turistico di una cavità devono essere eseguiti attraverso un adeguato sistema di monitoraggio prima e durante la loro gestione. Come noto a tutti, l'accensione delle luci e il numero di visitatori possono condizionare la temperatura delle cavità, caratterizzate da bassi apporti energetici (ridottissima circolazione d'aria e apporti idrici modesti o assenti), modificandone pesantemente il microclima.

Gli studi legati agli effetti dei cambiamenti climatici nelle grotte devono essere eseguiti attraverso data logger con una accuratezza e una risoluzione molto elevate e, ovviamente, con tempistiche molto lunghe. Il progetto "Underground Climate Change" (UCC) è un progetto nazionale di citizen

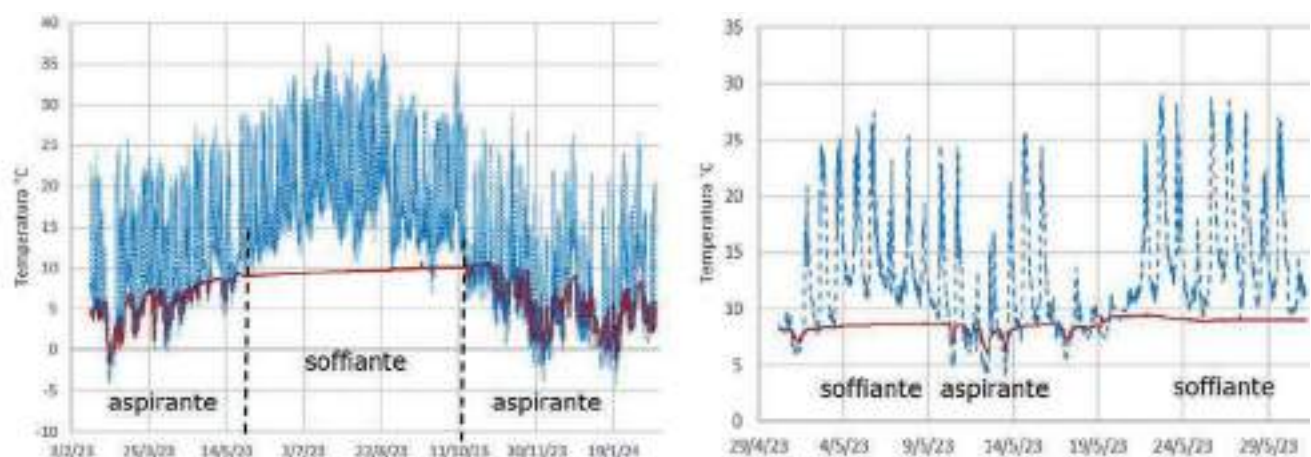


Fig. 7 - Andamento dei valori della temperatura dell'aria in superficie (in blu) e a 15 m dall'ingresso della Grotta di Costacalda. A destra in dettaglio nel mese di maggio 2023.

science avviato nel 2023, con l'obiettivo di monitorare e studiare gli effetti del cambiamento climatico nelle grotte. Per gli speleologi i dati più interessanti legati al monitoraggio sono quelli indirizzati alla conoscenza delle circolazioni dell'aria di un dato sistema carsico con finalità esplorative. Attraverso i dati della temperatura dell'aria, raccolti presso gli ingressi delle cavità o in profondità in corrispondenza di arrivi significativi, è possibile ipotizzare l'esistenza o meno di prosecuzioni importanti. In figura 7 è riportato un esempio di tali monitoraggi eseguiti nella Grotta di Costacalda (Alpi Liguri), dove vengono confrontati i valori della temperatura dell'aria in superficie e nella cavità a poco più di 15 m dall'ingresso, rilevati tra gennaio 2023 e febbraio 2024 e in dettaglio nel mese di maggio 2023. Molto evidente è il comportamento della circolazione dell'aria legato alle variazioni termiche in superficie: sono i valori della temperatura minima giornaliera che condizionano le direzioni del flusso d'aria. Quando questo valore scende sotto dei 10°C (la temperatura della grotta in profondità è di 9.9°C), la circolazione dell'aria si inverte immediatamente, evidenziando la presenza di un complesso carsico di dimensioni non particolarmente elevate.

Bibliografia

- BADINO G., 1995 - *Fisica del Clima Sotterraneo*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, VII, pp. 137.
- BORSATO A., 2003 - *Meteorologia ipogea in cavità della Paganella (Trentino)*. Atti 19° Congresso Nazionale di Speleologia, Bologna, pp. 157-168.
- VIGNA B., 2007 - *Schematizzazione e funzionamento degli acquiferi in rocce carbonatiche. L'acqua nelle aree carsiche in Italia*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, XIX, pp. 21-26.
- VIGNA B., 2023 - *Circolazione dell'acqua e dell'aria nelle grotte: modelli concettuali. Quaderni di monitoraggio*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, XLIV, pp. 55-68.

Renato R. Colucci^{1, 2, 3}, Andrea Securo^{1, 2, 4}, Costanza Del Gobbo^{1, 2},
Paolo Manca⁵, Michele Potleca⁵

CryoKarst FVG: un Progetto dedicato alla Criosfera nei Territori Carsici del Friuli Venezia Giulia

- 1) Istituto di Scienze Polari, CNR, Trieste; 2) Società Meteorologica Alpino-Adriatica, Udine; 3) Commissione Grotte "E. Boegan" SAG-CAI, Trieste; 4) Università Cà Foscari, Venezia;
5) Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile - Servizio geologico, Trieste;

Abstract. The project "CryoKarst FVG (Cryosphere in the Karstic Environments of Friuli Venezia Giulia)" (https://catastogrotte.regione.fvg.it/pagina/147/Progetto_CryoKarst) represents one of the first Italian initiatives dedicated to the systematic study of the underground cryosphere in karst environments. Launched through a collaboration between the Autonomous Region of Friuli Venezia Giulia and the National Research Council (CNR) - specifically the Institute of Polar Sciences (ISP-CNR) - CryoKarst FVG aimed to develop modern methodologies for the analysis, documentation, and preservation of permanent ice, firn, and snow deposits within the region's cave systems.

The project led to the creation of a dedicated survey protocol, based on innovative mapping and monitoring techniques and a multidisciplinary approach combining expertise in glaciology, karst and glacial geomorphology, photogrammetry, LiDAR technology, and geographic information systems (GIS).

Riassunto. Il progetto "CryoKarst FVG (Cryosphere in the Karstic Environments of Friuli Venezia Giulia" https://catastogrotte.regione.fvg.it/pagina/147/Progetto_CryoKarst) rappresenta una delle prime iniziative italiane dedicate allo studio sistematico della criosfera ipogea nelle aree carsiche. Avviato grazie alla collaborazione tra la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia e il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) attraverso l'Istituto di Scienze Polari (ISP-CNR), CryoKarst FVG ha avuto come obiettivo lo sviluppo di metodologie moderne per l'analisi, la documentazione e la tutela dei depositi di ghiaccio, firn e neve permanenti presenti nelle cavità della regione.

Il progetto ha portato alla definizione di un protocollo di rilevamento specifico, fondato su tecniche di rilievo innovative e su un approccio multidisciplinare che integra conoscenze di glaciologia, geomorfologia carsica e glaciale, fotogrammetria, Lidar, sistemi informativi geografici.

La criosfera sotterranea

La criosfera sotterranea, cioè l'insieme di depositi di neve, firn e ghiaccio presenti in cavità naturali come grotte e condotti lavici, costituisce una forma locale di permafrost riconosciuta a livello internazionale.

Il permafrost è definito come qualsiasi materiale con temperatura inferiore a 0°C per almeno due anni consecutivi, indipendentemente dal contenuto effettivo di ghiaccio. A seconda della sua estensione territoriale, viene classificato come continuo, discontinuo o sporadico.

La presenza di ghiaccio all'interno delle grotte rappresenta quindi un importante indicatore climatico, capace di testimoniare le relazioni tra microclima ipogeo e variazioni termiche esterne, in particolare di medio-lungo periodo.

Nelle aree carsiche al di fuori delle regioni polari, la formazione del ghiaccio di cavità non è generalmente legata alla presenza di permafrost diffuso e continuo, ma dipende, essenzialmente, dalle condizioni termiche locali della roccia, dalla morfologia dei condotti e dalla circolazione dell'aria, che possono generare localmente delle sacche di permafrost sporadico. Ciò nonostante, anche in presenza di permafrost continuo montano si possono rinvenire depositi di ghiaccio ipogeo.

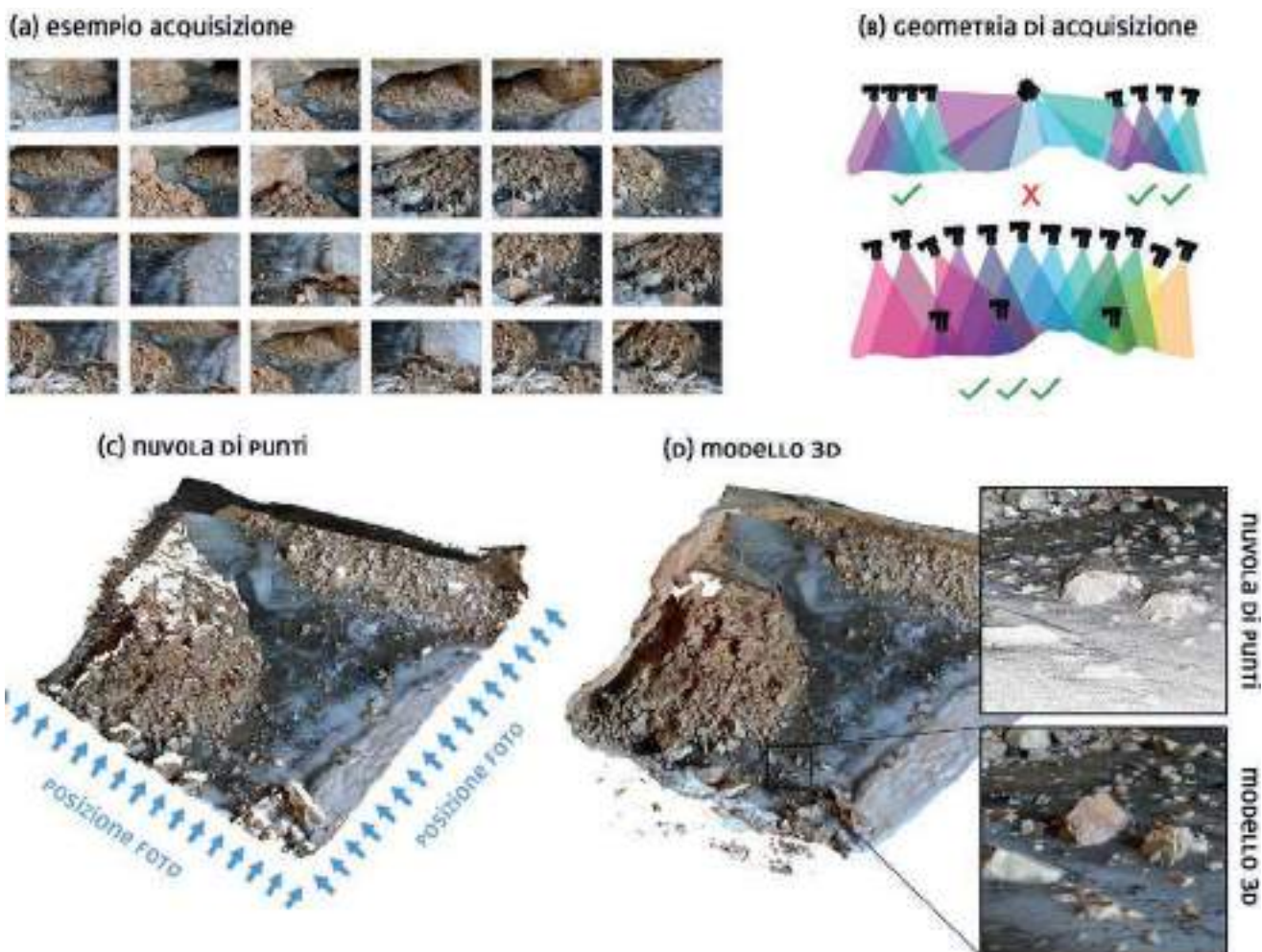


Fig. 1 - Esempio di acquisizione Structure from Motion (SfM); (b) geometria di acquisizione ideale; la fase di processing è costituita da: (c) composizione della nuvola di punti; (d) ricostruzione di un modello 3D della cavità.

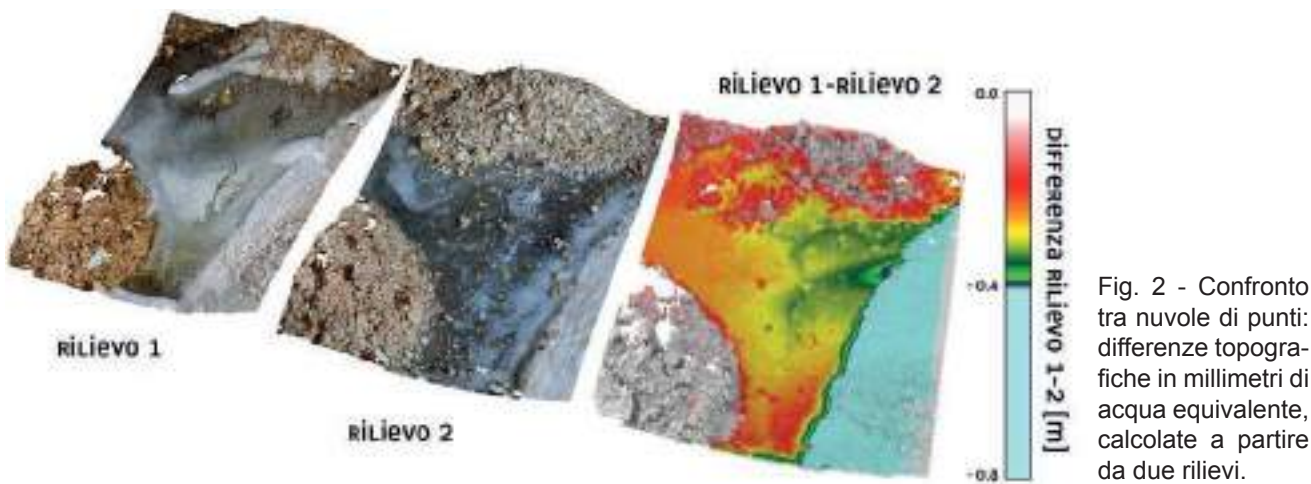


Fig. 2 - Confronto tra nuvole di punti: differenze topografiche in millimetri di acqua equivalente, calcolate a partire da due rilievi.

È utile distinguere tra ghiaccio perenne, che persiste per almeno due anni e può essere considerato una forma di permafrost, e ghiaccio effimero, di durata stagionale o interannuale. Il termine “ghiaccio fossile”, spesso usato in ambito speleologico, non trova invece riscontro nella letteratura scientifica.

Il ghiaccio perenne può originarsi secondo quattro principali processi:

- congelamento dell'acqua di percolazione
- trasformazione metamorfica della neve (simile a quanto avviene nei ghiacciai)
- accumulo e successiva sedimentazione
- sublimazione diretta.



Fig. 3 - Fasi di acquisizione dati nella Caverna del Ghiaccio del Monte Leupa (3595/1938Fr). In alto a sinistra si nota il segnale di misura fisso di colore giallo, posizionato nel 2011 proprio in corrispondenza dell'allora superficie topografica del ghiaccio, che evidenzia la perdita di volume avvenuta negli ultimi anni (foto A. Securo).

Visivamente, il ghiaccio perenne appare massivo e stratificato, con bolle d'aria e inclusioni di impurità disposte in livelli sub-orizzontali. Al contrario, i depositi effimeri si riconoscono per la loro trasparenza e spesso per le tipiche strutture esagonali superficiali se il ghiaccio si rinviene sulle pareti. Esempi di queste formazioni sono le stalattiti e stalagmiti di ghiaccio o le sottili coltri stagionali che si formano agli ingressi delle grotte carsiche, come quelle rinvenibili anche in cavità di bassa quota del Carso triestino.

Il progetto CryoKarst si è concentrato in particolare sullo studio dei depositi di ghiaccio perenne, elaborando un protocollo operativo dedicato alla loro caratterizzazione.

Obiettivi e collaborazioni

CryoKarst FVG è stato realizzato grazie a una rete di collaborazioni che ha coinvolto diversi enti e istituzioni: la Società Meteorologica Alpino-Adriatica, il Parco Naturale delle Prealpi Giulie, il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università di Trieste e la società Divulgando s.r.l.

Questa sinergia ha permesso di unire competenze scientifiche, tecniche e divulgative, ponendo le basi per un lavoro di ampio respiro. Gli obiettivi principali comprendevano l'aggiornamento del Catasto Speleologico Regionale (CSR), l'introduzione di nuove tecniche di rilievo 3D, la definizione di un protocollo operativo standard, la formazione di speleologi locali ed il monitoraggio delle interazioni clima-criosfera in cavità selezionate.

Revisione del Catasto Speleologico Regionale (CSR)

Uno dei traguardi principali del progetto è stato l'aggiornamento del Catasto Speleologico Regionale, la banca dati che raccoglie le informazioni sulle cavità sotterranee del Friuli Venezia Giulia.



Fig. 4 - Esempio di restituzione realistica del modello 3D ricostruito dalla nuvola di punti (sopra) messo a confronto con una fotografia della medesima area della grotta (sotto).

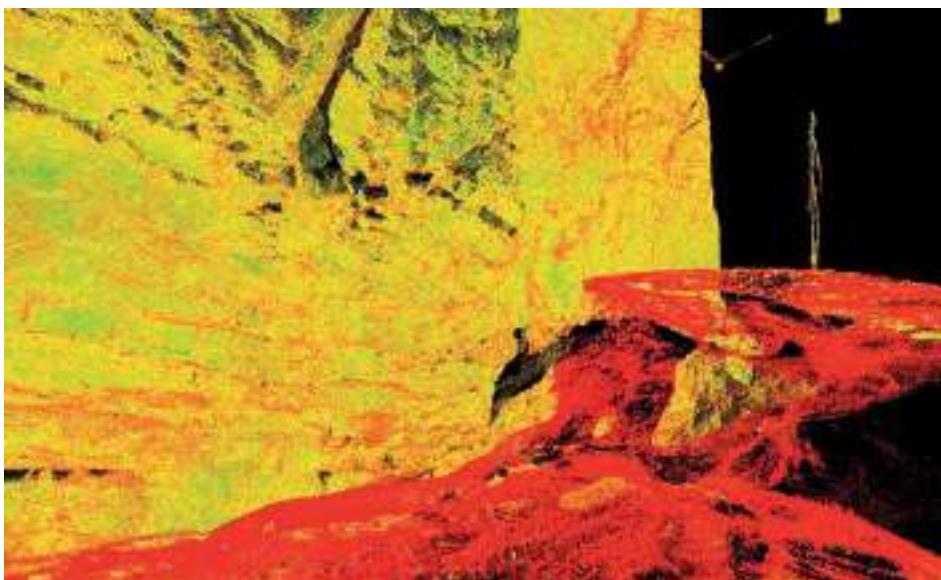


Fig. 5 - Particolare del rilievo laserscan della Caverna del Ghiaccio del Monte Leupa (3595/1938Fr). Nell'immagine, colorata in base all'intensità del laser, si può notare il forte assorbimento del segnale di ritorno (in rosso) del ghiaccio ipogeo.

Prima di CryoKarst, le informazioni sulla criosfera ipogea erano frammentarie e non omogenee. La revisione è avvenuta in tre fasi. La fase esplorativa per l'individuazione delle 177 grotte con ghiaccio e delle 666 con depositi di neve; 85 di queste sono state selezionate per lo studio approfondito dei depositi perenni, localizzate nei gruppi del Canin, dei Musi, di Piancavallo e del Resettum.

Lo sviluppo del database e interfaccia utente è stato realizzato in collaborazione con Divulgando s.r.l.; il CSR è stato così ampliato per accogliere dati su ghiaccio, neve e firm, introducendo anche un sistema partecipativo di *Citizen Science* che consente agli speleologi di contribuire direttamente agli aggiornamenti. La revisione finale ha visto l'aggiornamento e la validazione delle schede delle cavità nella nuova piattaforma digitale.

Tecniche innovative di rilievo: SfM-MVS

Un'altra componente fondamentale del progetto è stata la sperimentazione di rilievi tridimensionali ad alta risoluzione per il monitoraggio del ghiaccio sotterraneo nel tempo. Tra le metodologie impiegate spicca la Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS), che consente di ricostruire modelli 3D da serie fotografiche scattate da diverse posizioni (Figg. 1, 2).

Il metodo, economico e facilmente applicabile in ambienti remoti, si basa sull'uso di fotocamere digitali e illuminazione artificiale. L'elaborazione dei dati richiede tuttavia risorse computazionali significative per ottenere modelli accurati.

Durante le campagne 2022-2023 nel Massiccio del Monte Canin, sono stati realizzati rilievi con tecniche SfM-MVS e LiDAR (Light Detection and Ranging) terrestre, che rimane sicuramente lo strumento più raffinato e di dettaglio per rilievi topografici tridimensionali, confrontando i risultati per valutare le differenze di dettaglio e precisione (Figg. 4, 5).

Il protocollo di rilevamento

Per rendere omogenei i rilievi e facilitarne la replicabilità, il team CryoKarst ha sviluppato un protocollo dedicato destinato alla comunità speleologica. Il documento fornisce istruzioni pratiche per la raccolta dei dati, linee guida per la caratterizzazione dei depositi e indicazioni sull'inserimento dei risultati nel CSR (Fig. 6).

Il protocollo è stato pensato per essere utilizzabile con strumenti comuni quali fotocamere, distanziometri laser, app per smartphone e per promuovere la partecipazione diretta degli speleologi in un'ottica di Citizen Science. Accanto al protocollo è stato redatto anche un manuale di campagna in formato ridotto, utile per le attività sul campo. La struttura del protocollo comprende un'introduzione alle metodologie di rilevamento, istruzioni su come raccogliere dati nei siti glaciali sotterranei, linee guida per l'inserimento dei dati nel CSR e qualche informazione sulle tecniche di rilievo 3D con la Structure from Motion. Il successo del progetto è dipeso in gran parte dal coinvolgimento attivo dei gruppi speleologici regionali.

Nel marzo 2023 si sono svolti due corsi formativi, a Trieste e Udine, con oltre 60 partecipanti, dedicati all'uso della nuova interfaccia CSR e al protocollo di rilevamento. Nel gennaio 2024, presso il Villaggio del Pescatore (Duino-Aurisina), si è tenuto un ulteriore incontro rivolto agli speleologi esperti in fotografia ipogea, focalizzato sulle tecniche 3D e sull'applicazione della SfM-MVS.



Fig. 6 - La copertina del Protocollo di Rilevamento di depositi di ghiaccio e neve in grotta scaricabile dal portale del Catasto Speleologico Regionale.



Fig. 7 - Deposito di neve e ghiaccio all'interno della Grotta del Vasto (8297/5115Fr; foto R.R. Colucci).



Fig. 8 - Fasi di acquisizione con laser-scanner terrestre nella Grotta del Vasto (8297/5115Fr; foto A. Securo).

Monitoraggio clima-criosfera

Una sezione del progetto ha affrontato lo studio delle relazioni tra clima e criosfera sotterranea, analizzando l'evoluzione del bilancio di massa dei depositi di ghiaccio in diverse grotte del Canin e confrontando i dati con le misure microclimatiche interne.

Il monitoraggio ha interessato anche cavità a cielo aperto, i cosiddetti "pozzi a neve" o Schachtdolinen, piccole depressioni verticali che presentano un'area pianeggiante al centro con accumuli di neve residua. Anche queste forme glacio-carsiche rappresentano ambienti chiave per comprendere come il ghiaccio ipogeo reagisca ai cambiamenti climatici. Lo studio di questi ambienti particolari e delle interazioni fra il ghiaccio in grotta e le temperature esterne sono fondamentali per comprendere come la criosfera sotterranea stia rispondendo all'evoluzione attuale del clima. Fino ad ora la letteratura si è infatti principalmente concentrata sugli aspetti geomorfologici e geologici per quanto riguarda pozzi e doline, senza interessarsi della loro eventuale valenza glaciologica.



Fig. 9 - Parte pratica dell'evento formativo dedicato agli speleologi già esperti in fotografia in grotta, focalizzato sulle tecniche di rilievo 3D in ambiente ipogeo (foto R. R. Colucci).

Grazie a rilievi LiDAR condotti tra il 2006 e il 2018 in 75 siti del Massiccio del Canin (45 in Italia e 35 in Slovenia), è stato possibile quantificare le variazioni volumetriche di neve e ghiaccio, confrontandole con quelle osservate nei corpi glaciali esterni.

Divulgazione e valorizzazione dei risultati

La comunicazione dei risultati è stata un obiettivo trasversale del progetto. I contenuti di CryoKarst sono stati diffusi attraverso il sito web del CSR, articoli divulgativi sulla rivista "Meteorologica" edita dalla Società Meteorologica Alpino-Adriatica (www.aametsoc.org) e la partecipazione alla Scuola Internazionale di Carsismo di Postumia, dove è stato presentato un poster sull'importanza dell'approccio partecipativo per lo studio del ghiaccio di grotta.

L'evento conclusivo del progetto ha riunito esperti, istituzioni e speleologi locali, offrendo un momento di confronto e sintesi dei risultati raggiunti.

Conclusioni

CryoKarst FVG ha rappresentato un passo significativo nella conoscenza e nella tutela della criosfera sotterranea del Friuli Venezia Giulia. L'integrazione tra ricerca scientifica, competenze speleologiche e tecniche di rilievo avanzate, ha consentito di creare strumenti duraturi per il monitoraggio e la valorizzazione di questi ambienti unici.

La prosecuzione delle attività di osservazione e di aggiornamento del CSR sarà fondamentale per comprendere come la criosfera regionale stia evolvendo in risposta ai cambiamenti climatici globali, contribuendo a preservare un patrimonio naturale e scientifico di grande valore.

Bibliografia:

- BERTOZZI B., PULVIRENTI B., COLUCCI R.R. & DI SABATINO S., 2019 - *On the interactions between airflow and ice melting in ice caves: A novel methodology based on computational fluid dynamics modeling*. Science of The Total Environment, 669, pp. 322-323.
- COLUCCI R.R., FONTANA D., FORTE E., POTLECA M. & GUGLIELMIN M., 2016 - *Response of ice caves to weather extremes in the Southeastern Alps, Europe*. Geomorphology, 261, pp. 1-11.
- COLUCCI R.R., LUETSCHER M., FORTE E., GUGLIELMIN M., LANZA D., PRINCIVALLE F. & VITA F., 2017 - *First alpine evidence of in situ coarse cryogenic cave carbonates (CCCcoarse)*. Geografia Fisica & Dinamica Quaternaria, 40,1, pp. 53-59.
- COLUCCI R.R. & GUGLIELMIN M., 2019 - *Climate change and rapid ice melt; suggestions from abrupt permafrost degradation and ice melting in an alpine ice cave*. Progress in Physical Geography. 43, 4, pp. 561-573.
- COLUCCI R.R., MANCA P., POTLECA M., DEL GOBBO C., SECURO A., GOI G., FORTE E. & MEREU A., 2023 - *Cryokarst, depositi di ghiaccio e neve in grotta, protocollo di rilevamento*. Convenzione quadro tra

la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ed il CNR (DGR 202/2021), pp. 31. <https://catastogrotte.regione.fvg.it/pagina/105/download>.

MAGGI V., COLUCCI R.R., SCOTO F., GIUDICE G. & RANDAZZO L.G., 2018 - *Ice caves in Italy*. In PERȘOIU A. & LAURITZEN S.E. (eds), *Ice Caves*, 1st edition. ISBN 9780128117392, Elsevier, 750 pp.

SECURO A., DEL GOBBO C. & COLUCCI R.R., 2022 - *Multi-year evolution of 75 snow and ice deposits in Schachtdolines and Shafts of recently deglaciated karst terrain: Observations from Mount Canin-Kanin, Julian Alps*. *Europe Geomorphology*, 417, 108434.

SECURO A., FORTE E., PILLON S., MARTINUCCI D. & COLUCCI R.R., 2022 - *Long term mass balance monitoring and evolution of ice in caves through Structure from Motion - Multi View Stereo and Ground Penetrating Radar techniques*. *Progress in Physical geography* 46, 3, pp. 422-440.

Andrea Bussani¹, Aldo Fedel¹, Igor Ardetti¹

Aspetti teorici e osservazioni sperimentali inerenti agli effetti delle maree atmosferiche termiche sulla temperatura di cavità ipogee

1) Commissione Grotte "E. Boegan" SAG-CAI, Trieste

Abstract. Thermal atmospheric tides, generated by solar irradiation, produce well-known semidiurnal oscillations in atmospheric pressure but much weaker ones in air temperature. Between 2001 and 2025, several measurement campaigns in caves such as the Costantino Doria and the Abisso di Trebiciano (Trieste) detected thermal signals on the order of a few thousandths of a degree, made observable thanks to microclimatic stability and high-resolution instruments. Analyses revealed a systematic phase lead of cave air temperature relative to atmospheric pressure, indicating that heat exchange between cave air and walls plays a key role in the energy balance dynamics. More recent observations also showed a clear seasonal modulation, with more distinct semidiurnal oscillations during the warm season. The use of time-series analysis techniques proves essential to isolate and interpret these weak signals..

Riassunto. Le maree atmosferiche termiche, generate dall'irraggiamento solare, producono oscillazioni semidiurne ben note nella pressione atmosferica ma assai deboli nella temperatura dell'aria. Dal 2001 al 2025 diverse campagne di misura in cavità come la Grotta Costantino Doria e l'Abisso di Trebiciano (Trieste) hanno permesso di rilevare segnali termici dell'ordine di pochi millesimi di grado, resi osservabili grazie alla stabilità microclimatica e a strumenti ad alta risoluzione. Le analisi hanno evidenziato un sistematico anticipo di fase della temperatura dell'aria delle cavità indagate rispetto alla pressione atmosferica, indicando che lo scambio di calore tra aria e pareti della grotta gioca un ruolo determinante nella dinamica del bilancio energetico. Le osservazioni più recenti hanno inoltre mostrato una chiara modulazione stagionale, con oscillazioni semidiurne più nette durante la stagione calda. L'uso di tecniche di analisi delle serie temporali si conferma essenziale per isolare e interpretare questi segnali deboli.

Introduzione

La presente sintesi ripercorre l'evoluzione di una serie di studi condotti tra il 2001 e il 2025 nella Grotta Costantino Doria (724/3875VG) e nell'Abisso di Trebiciano (3/17VG), con l'obiettivo di indagare gli effetti delle maree atmosferiche termiche sulla temperatura dell'aria in ambienti ipogei (BUSSANI, 2005, 2007, 2022).

Le maree atmosferiche termiche sono causate dall'irraggiamento solare e hanno un'ampiezza significativamente maggiore rispetto a quelle gravitazionali. Il loro segnale più evidente è un'oscillazione semidiurna, ossia avente un periodo di 12 ore, che si manifesta nelle misurazioni della pressione atmosferica. Tipicamente, questa variazione di pressione ha un'ampiezza dell'ordine di 1 hPa, con massimi che si verificano approssimativamente alle 10:00 e alle 22:00 e minimi alle 04:00 e alle 16:00 (CHAPMAN & LINDZEN, 1970).

Gli effetti delle maree atmosferiche termiche sulla temperatura delle cavità sotterranee sono stati indagati solo in tempi recenti (CHEN et al., 2003; WU et al., 2003; BUSSANI, 2005, 2007, 2022; DRÄGUŞIN et al., 2018). Il segnale di temperatura indotto dalle maree atmosferiche in questi ambienti è estremamente debole, dell'ordine di 0.001 °C, rendendo le misurazioni una sfida che richiede un ambiente estremamente stabile termicamente, una considerevole quantità di dati - raccolti usualmente con intervalli di campionamento dell'ordine di qualche minuto fino a qualche secondo - e la disponibilità di strumenti digitali programmabili con ampia capacità di memoria nonché accuratezza e risoluzione adatte.

A livello storico, CHEN et al. (2003) hanno evidenziato per primi la presenza di una componente semidiurna nel segnale termico di un laboratorio scientifico sotterraneo, attribuendo tale effetto

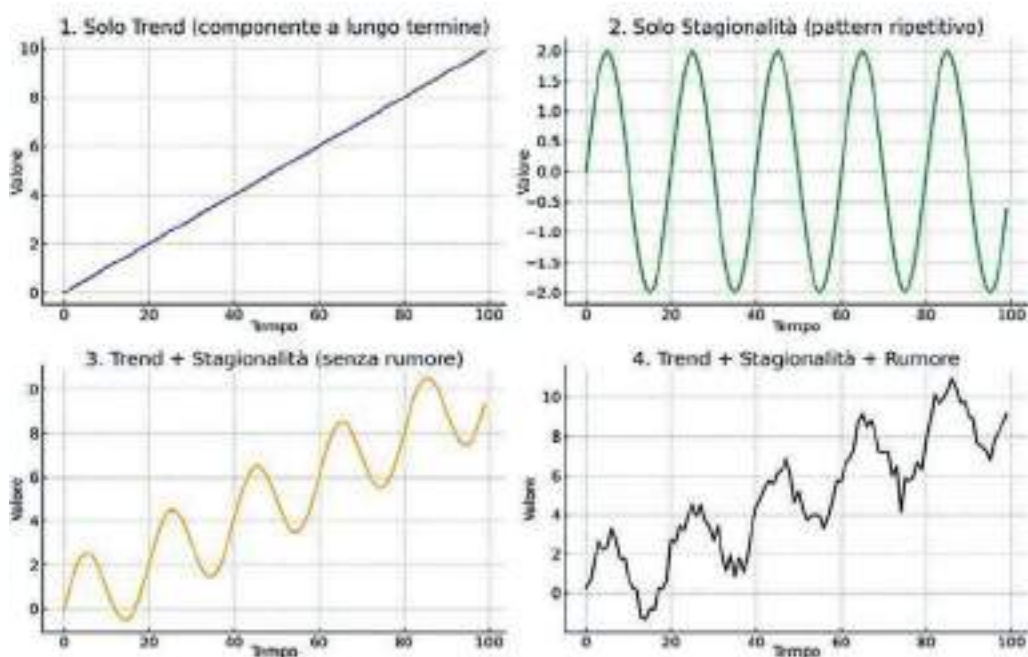


Fig. 1 - I principali costituenti di un segnale secondo la teoria dell'analisi delle serie temporali.

alle maree atmosferiche termiche. Un risultato estremamente importante della loro ricerca è stata l'individuazione di una differenza di fase tra il segnale semidiurno della pressione atmosferica indotto dalle maree atmosferiche termiche e il corrispondente segnale semidiurno delle oscillazioni di temperatura: sorprendentemente, CHEN et al. (2003) hanno osservato un anticipo di fase del segnale di temperatura rispetto al segnale di pressione. Wu et al. (2003) per primi hanno proposto un modello termodinamico per spiegare questo curioso fenomeno, interpretandolo come una conseguenza del passaggio di calore - prodotto o sottratto dalle compressioni ed espansioni dell'atmosfera della grotta - dall'aria della grotta verso le pareti (e viceversa). I successivi studi hanno ampliato il quadro sperimentale, confermando e approfondendo il fenomeno, inserendo le cavità naturali come possibili ambienti per la rilevazione delle oscillazioni di temperatura indotte dalle maree atmosferiche. Infine, BUSSANI (2022) giunge ad una caratterizzazione stagionale delle oscillazioni termiche in una cavità del tipo "cold-trap".

Prima di analizzare in dettaglio i risultati finora raggiunti in questa area di ricerca, è opportuno richiamare l'importanza sulle tecniche statistiche più efficaci per indagare il fenomeno considerato.

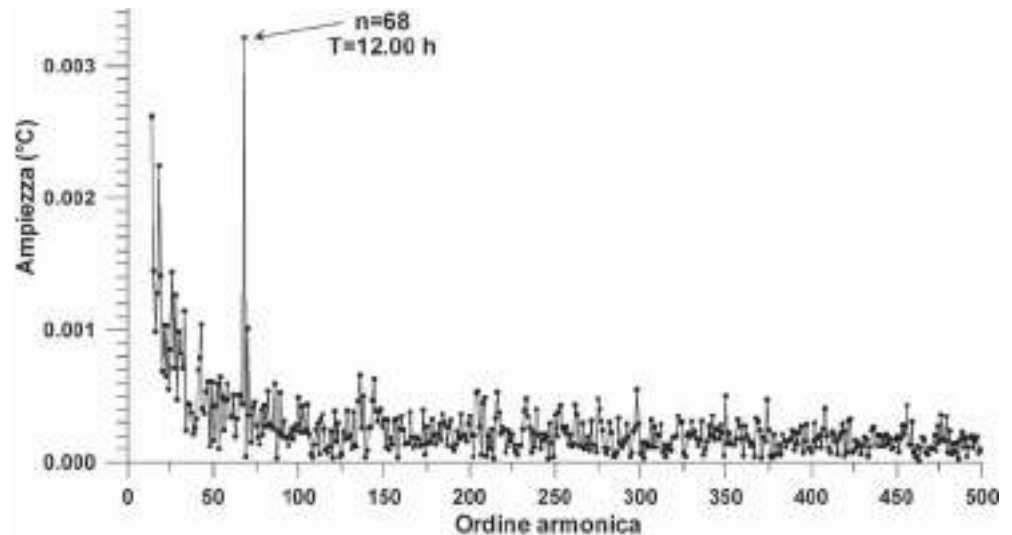
Fondamenti di analisi delle serie temporali

L'analisi delle serie temporali è uno strumento fondamentale per lo studio di fenomeni fisici che si evolvono nel tempo, come le oscillazioni termiche osservate nelle cavità ipogee. Una serie temporale tipicamente può essere scomposta in tre componenti principali (Fig. 1):

- trend: rappresenta l'andamento a lungo termine del segnale, spesso associato a variazioni lente e strutturali (ad esempio, cambiamenti stagionali, deriva strumentale).
- stagionalità: indica le fluttuazioni periodiche ricorrenti, come i cicli giornalieri, semidiurni o annuali. Nel caso delle grotte, la stagionalità può riflettere sia l'alternanza delle stagioni meteorologiche sia periodicità caratteristiche, come nel caso della Grotta Costantino Doria (BUSSANI, 2022).
- rumore: è la componente irregolare, non spiegata dalle prime due, che può includere il rumore strumentale, variazioni casuali o transitorie ma anche fenomeni di carattere deterministico ma la cui caratterizzazione richieda una strumentazione più raffinata rispetto a quella disponibile.

La scomposizione del segnale consente di isolare le oscillazioni significative e di analizzarne la frequenza, l'ampiezza e la fase. Strumenti come il periodogramma e l'analisi armonica permettono di identificare le componenti cicliche dominanti, mentre il calcolo dei cicli medi giornalieri aiuta a visualizzare le variazioni regolari nel tempo. L'analisi dei residui è utile per valutare la qualità del modello e per individuare eventuali anomalie o segnali secondari.

Fig. 2 - Periodogramma della temperatura dell'aria della Grotta Costantino Doria (da BUSSANI, 2005).



Nel contesto delle grotte carsiche, questa metodologia si è rivelata particolarmente efficace per rilevare e caratterizzare quantitativamente le oscillazioni indotte dalle maree atmosferiche.

1. Studio del 2001: Grotta Costantino Doria - Prime evidenze sperimentali

Nel settembre-ottobre 2001, una campagna di misura condotta nella grotta “Costantino Doria” ha permesso di rilevare una componente semidiurna nel segnale di temperatura dell’aria, con ampiezza di circa 0.003 °C (Fig. 2). L’analisi del periodogramma ha evidenziato un picco netto a 12 ore, mentre le componenti diurne e ter-diurne risultavano assenti o trascurabili. Il confronto con i dati climatologici di pressione atmosferica ha rivelato un anticipo di fase di 2.61 ore tra la temperatura della grotta e la pressione atmosferica esterna.

Questa discrepanza ha sollevato dubbi sull’ipotesi di un semplice meccanismo adiabatico di compressione/espansione dell’aria, suggerendo la necessità di ulteriori indagini. Il segnale era al limite della soglia di rilevabilità dello strumento, ma la stabilità termica della cavità ha reso possibile l’osservazione.

2. Studio del 2006: Abisso di Trebiciano - Conferme e nuove osservazioni

Nel 2006, le misure effettuate nell’Abisso di Trebiciano hanno confermato la presenza di una componente semidiurna sia nella temperatura (ampiezza ~0.00085 °C) sia nella pressione atmosferica (ampiezza ~44.4 Pa). Anche in questo caso è stato osservato un anticipo di fase della temperatura rispetto alla pressione, pari a circa 1h 45min. La maggiore profondità e il lungo periodo di osservazione hanno permesso una caratterizzazione più robusta del ciclo giornaliero. È emersa anche una possibile componente armonica a 34 ore nel segnale di pressione, la cui validità richiede ulteriori conferme.

3. Studio del 2019-2021: Grotta Costantino Doria - Caratterizzazione stagionale

Il terzo studio, condotto tra aprile 2019 e maggio 2021, ha rappresentato un salto di qualità nella comprensione del fenomeno. Grazie a una lunga serie temporale, all’alta frequenza di campionamento e alla risoluzione dello strumento utilizzato per le misure, è stato possibile distinguere due stagioni termiche nella grotta:

- stagione fredda (novembre-aprile): dominata da ingressi di aria esterna, con oscillazioni termiche giornaliere marcate (~0.1 °C) e ampia variabilità ed effetti delle maree atmosferiche non evidenti nella temperatura;
- stagione calda: caratterizzata da atmosfera stabile, con variazioni termiche giornaliere marcatamente inferiori rispetto alla stagione fredda (~0.01 °C) ed evidenti oscillazioni semidiurne (~0.003 °C) indotte dalle maree termiche.

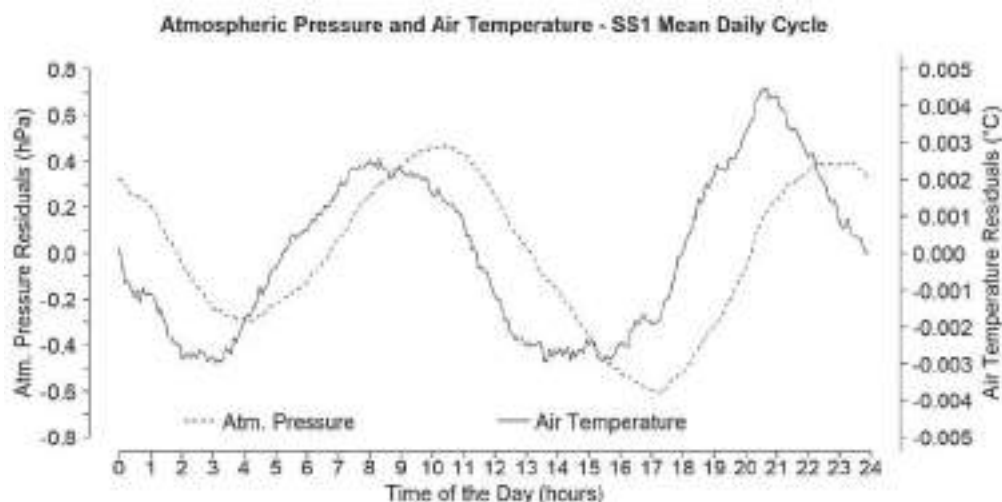


Fig. 3 - Ciclo medio diurno dei residui della temperatura dell'aria e della pressione atmosferica nella Grotta Costantino Doria (da BUSSANI, 2022).

Durante la stagione calda, è stato osservato un ritardo di fase tra temperatura e pressione compreso tra 1 e 2 ore, variabile nell'arco della giornata (Fig. 3). Questo risultato conferma l'ipotesi di un meccanismo termodinamico complesso, in cui la conduzione termica delle pareti della cavità gioca un ruolo fondamentale.

Ringraziamenti

Si ringrazia Diadora Bussani per il supporto durante le operazioni di posa e recupero della strumentazione. Si desidera altresì ricordare il fondamentale contributo di Mario Bussani per l'avvio delle ricerche sulle maree atmosferiche.

Bibliografia

- BUSSANI A., 2005 - *Influenza delle maree atmosferiche sulle misure di temperatura registrate nella grotta 'C. Doria' (N. 3875 V.G.)*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 40, pp. 125-131.
- BUSSANI A., 2007 - *Atmospheric tides effects in a Trieste karst cave: preliminary results*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 41, pp. 17-24.
- BUSSANI A., 2022 - *Seasonal characteristics of atmospheric thermal tides in 'Costantino Doria' cave (N. 3875 V.G.)*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 51, pp. 41-59.
- CHAPMAN S. & LINDZEN R.S., 1970 - *Atmospheric Tides: Thermal and Gravitational*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- CHEN F., WU S., FAN S. & LUO J., 2003 - *Determining the phases of the semidiurnal temperature and pressure oscillations by the cross-correlation equilibrium method*. Meas. Sci. Technol., 14, pp. 619-624.
- DRĂGUȘIN V., TÎRLĂ I., CADICHEANU N., ERSEK V. & MIREA I.C., 2018 - *Caves as observatories for atmospheric thermal tides: An example from Ascunsă Cave, Romania*. International Journal of Speleology, 47, pp. 113-121.
- WU S., CHEN F., FAN S., & LUO J., 2003 - *Phase leading of temperature variations in a cavity caused by heat conduction between air and rock*. Chinese Physics Letters, 12, pp. 2192-2194.

Francesco Serafin¹

Studio quantitativo della dinamica dell'aria nel complesso Abisso dei Cristalli - Grotta dell'Alce

1) Società di Studi Carsici A.F. Lindner APS, Ronchi dei Legionari (Go)

Abstract. Unlike most caves, Abisso dei Cristalli exhibits a persistent air outflow throughout the year. In the 2000s, a stack-like effect caused by a connection to the nearby Grotta dell'Alce was proposed as a possible driving mechanism. We find that Grotta dell'Alce contributes only 5% of the total flux. Moreover, we observe the elusive periodic switching between barometric and unidirectional airflows in summer.

Riassunto. L'Abisso dei Cristalli presenta un flusso d'aria uscente durante tutto l'anno. Negli anni 2000, un effetto camino alimentato dalla vicina Grotta dell'Alce è stato proposto quale forzante naturale. Misurando il flusso relativo, determiniamo che la Grotta dell'Alce contribuisce solo per il 5% al flusso totale. Inoltre, si osserva che in estate il flusso unidirezionale è alternato ad oscillazioni barometriche nell'arco delle 24 ore.

Premessa

L'Abisso dei Cristalli (781/3960VG) si trova sul Carso triestino, in Comune di Sgonico, nei pressi dell'abitato di Gabrovizza (Figg. 1 e 2). L'Abisso presenta un singolo ingresso transitabile (Fig. 3), che si apre su un terreno pianeggiante (212 metri s.l.m.). Si tratta di una cavità a sviluppo verticale profonda 205 metri, costituita da una successione di ampi pozzi intervallati da strettoie e qualche sala di modeste dimensioni (Fig. 4). Il fondo si trova a soli 7 metri s.l.m. Nel 1997 venne scoperto un ramo orizzontale lungo circa 50 metri, alla profondità di 140 metri. Attualmente, non si conoscono altri ingressi transitabili.

L'Abisso è noto per essere una cavità soffiante tutto l'anno (MARINI, 1985). Tale comportamento è anomalo rispetto alle grotte tipiche del Carso triestino, la cui aria oscilla alternativamente in entrata e in uscita a seconda delle condizioni meteorologiche e climatiche esterne. Se la 781 avesse un solo ingresso, necessariamente il flusso totale integrato sulla superficie di una sezione arbitraria dovrebbe essere nullo. Al contrario, monitoraggi realizzati tra il 1972 e il 1976 hanno misurato una portata media uscente di 0,66 m³/s, con un minimo efflusso di 0,36 m³/s nel mese di agosto (POLLI, 1987). Si deve dunque escludere l'ipotesi di un solo collegamento con l'esterno.

Fin dalle prime esplorazioni si è ipotizzato che la 781 fosse collegata con la vicina Grotta dell'Alce (89/62VG), i cui ingressi si aprono a circa 70 metri di distanza, sul bordo di una dolina. La Grotta dell'Alce (Fig. 5) è una cavità ad andamento prevalentemente



Fig. 1 - Localizzazione delle cavità rispetto al territorio regionale.

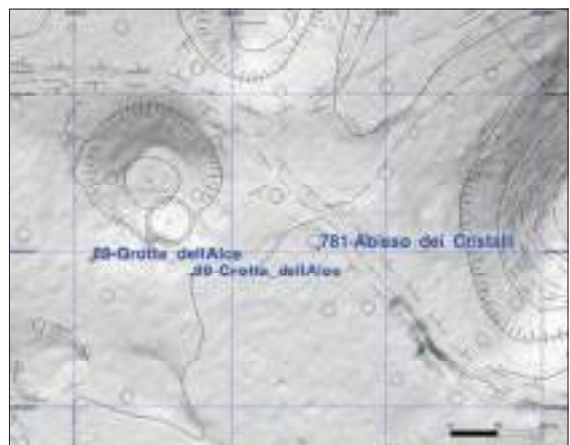


Fig. 2 - Posizione degli ingressi delle cavità oggetto di studio.



Fig. 3 - L'ingresso dell'Abisso dei Cristalli (781/3960VG).

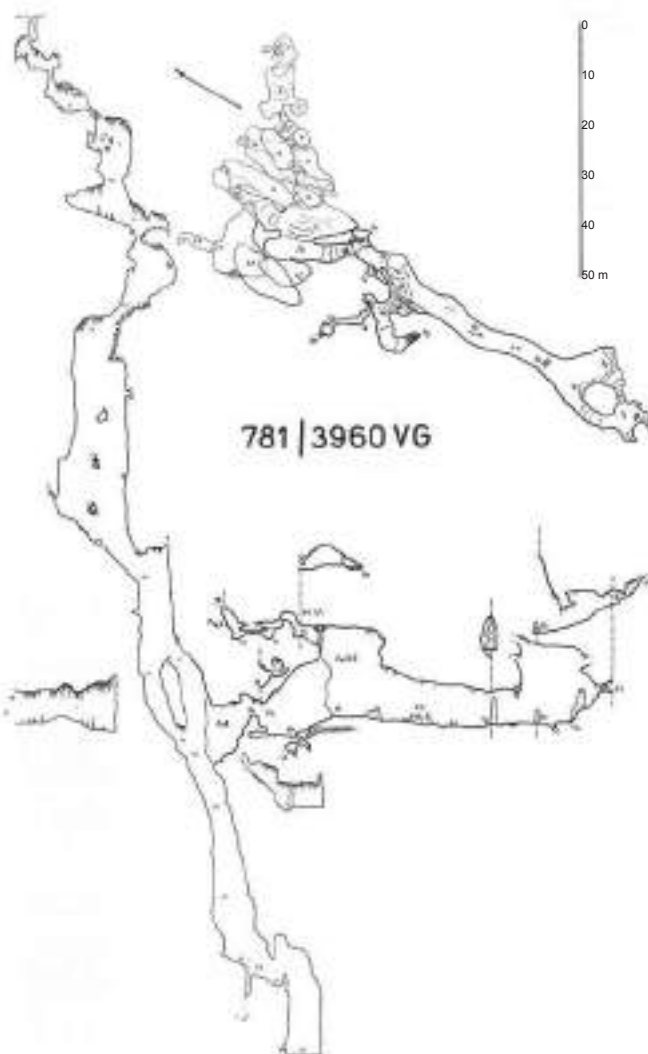


Fig. 4 - Rilievo dell'Abisso dei Cristalli (781/3960VG).

zazione degli strati d'aria in grotta, che possono risalire dal momento che sono meno densi dell'aria esterna. Il meccanismo convettivo appena presentato, pur in linea con l'accelerazione del flusso, non spiega la mancata inversione nel periodo estivo.

Un secondo dato interessante rilevato da POLLI (1987) è la quantità di vapore acqueo emesso dalla 781 in un anno: circa 20 milioni di m^3 . Secondo l'autore, l'elevata umidità indica che l'aria rimane per lungo tempo nella zona profonda, entrando in equilibrio con l'ambiente saturo di umidità.

orizzontale, con due sprofondamenti, che non superano i 43 metri di profondità. Di norma, non si avvertono correnti d'aria a causa delle ampie sezioni della grotta. Nel 2006 E. Padovan e G. Zanini (CGEB), utilizzando tecniche sviluppate da A. Diquál, dimostrano il collegamento fisico tra le due cavità forzando la circolazione con un ventilatore (PADOVAN & ZANINI, 2008). Dunque, per costruire un modello di circolazione si devono considerare le due cavità come un sistema interagente. Ai fini di separare e identificare le cause della dinamica osservata è importante quantificare il contributo della Grotta dell'Alce alla portata totale.

Nei primi anni 2000, viene formulata l'ipotesi che la Grotta dell'Alce agisca contemporaneamente da trappola del freddo e da serbatoio di alimentazione per il vicino Abisso. Scaldandosi e arricchendosi di umidità al contatto con le zone più interne, l'aria risalirebbe grazie alla ridotta densità generando il flusso osservato. Viene inoltre ipotizzato che la differenza di temperatura tra le due cavità causi la mancata inversione del flusso in estate.

Studi passati: 1987-1997 e 2006

Lo studio di POLLI del 1987 riassume le misure di temperatura, umidità e portata (quest'ultima dedotta dalla velocità dell'aria) raccolte nell'arco di 15 anni (1972-1986; POLLI, 1987). Superando alcune difficoltà dovute alle disomogeneità nella presa dati, l'analisi indica che l'Abisso dei Cristalli soffia durante tutto l'anno. La velocità, sempre diretta verso l'esterno, è massima nei mesi invernali (da dicembre a febbraio) e minima nei mesi estivi (da giugno a settembre). Dal momento che la temperatura media interna è di $11^\circ C$ (con una varianza media di $1,5^\circ C$ su 15 anni) nei mesi estivi si ha $T_e - T_i > 0$, il che favorisce uno stazionamento di aria fresca nella grotta, e il conseguente rallentamento del flusso. Viceversa, in inverno si ha $T_e - T_i < 0$, con conseguente destabilizza-

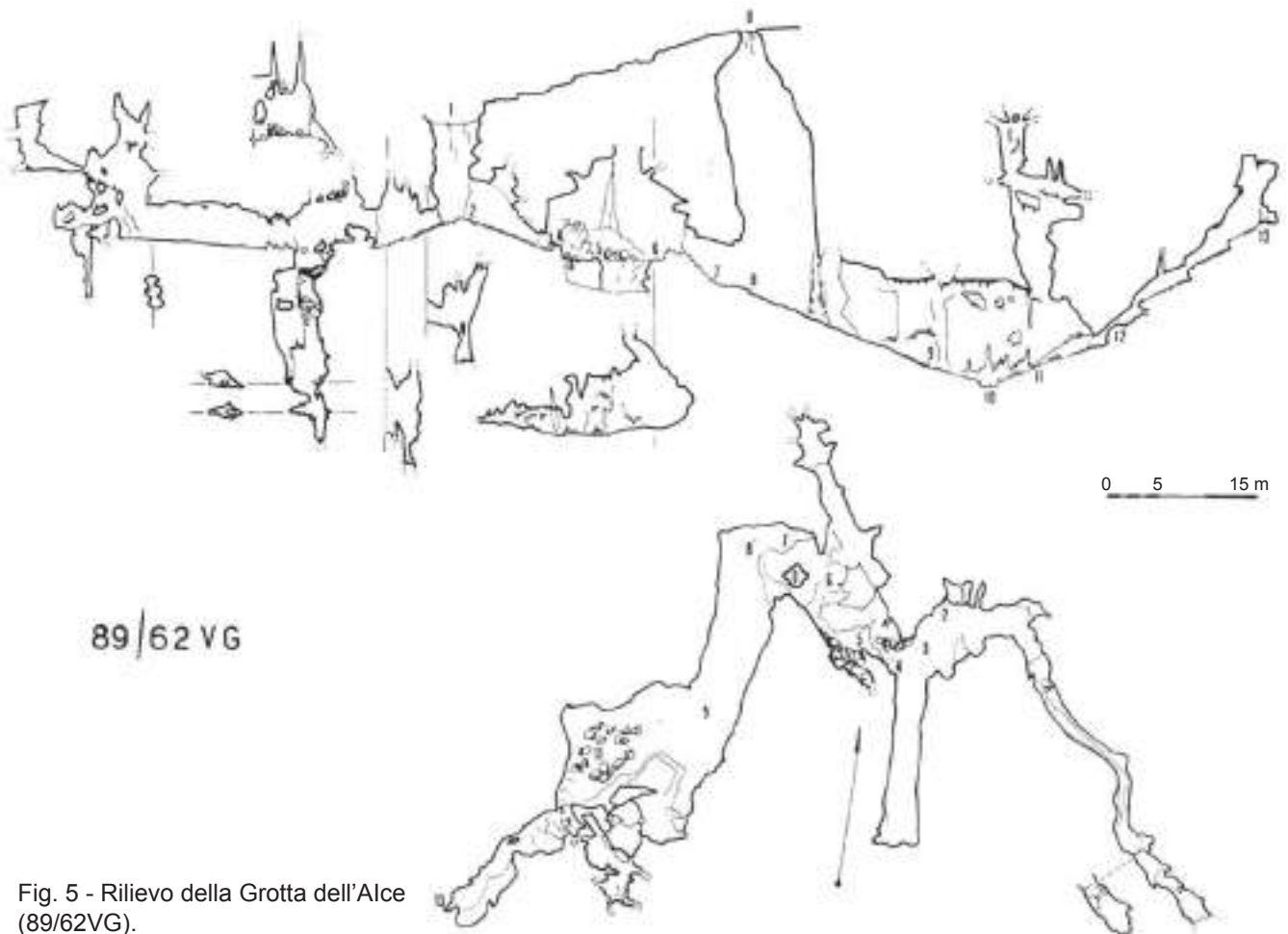


Fig. 5 - Rilievo della Grotta dell'Alce (89/62VG).

Ne deduce che il meccanismo forzante deve coinvolgere tratti profondi della cavità e di conseguenza propone che l'apporto della Grotta dell'Alce sia trascurabile.

Successivamente alla verifica del collegamento, in un articolo pubblicato in rete nel 2008 viene proposto un possibile modello di circolazione (PADOVAN & ZANINI, 2008; Fig. 6). La Grotta dell'Alce fungerebbe da trappola del freddo. L'aria fresca si accumulerebbe nella dolina e poi precipiterebbe negli ingressi invadendo le zone più profonde e questo garantirebbe un apporto d'aria continuo verso la 781 attraverso cunicoli intransitabili. La spinta dell'aria fredda e densa proveniente dalla Grotta dell'Alce farebbe salire gli strati più caldi nella 781: l'89 fungerebbe, a tutti gli effetti, da secondo ingresso per l'Abisso. Nuove misure volte a monitorare la temperatura della 89 sono state programmate e verranno eseguite a breve dagli scriventi.

I nuovi studi quantitativi

Le osservazioni fin qui descritte indicano una situazione complessa. Su scale di tempo annuali, emergono le forzanti periodiche delle temperature stagionali (accelerazione d'inverno, rallentamento in estate). La dinamica giornaliera è molto più complessa: variazioni della densità, variazioni barometriche (CIGNA, 1968), venti (KUKULJAN et al., 2021), precipitazioni influiscono marcatamente sui flussi d'aria ma non abbastanza da cancellare il flusso in uscita. Il presente studio è il primo di una serie di misure volte a quantificare la dinamica dell'aria nelle due grotte.

In questa comunicazione si riassumono i risultati della misura di portata relativa tra le due cavità e l'osservazione di oscillazioni nel flusso estivo nella 781.

1. Misura della portata relativa

Si è deciso di allestire la misura in inverno, in condizioni di flusso massimo e stabile, per minimizzare eventuali fluttuazioni. La raccolta dati è avvenuta il 19 febbraio 2023.

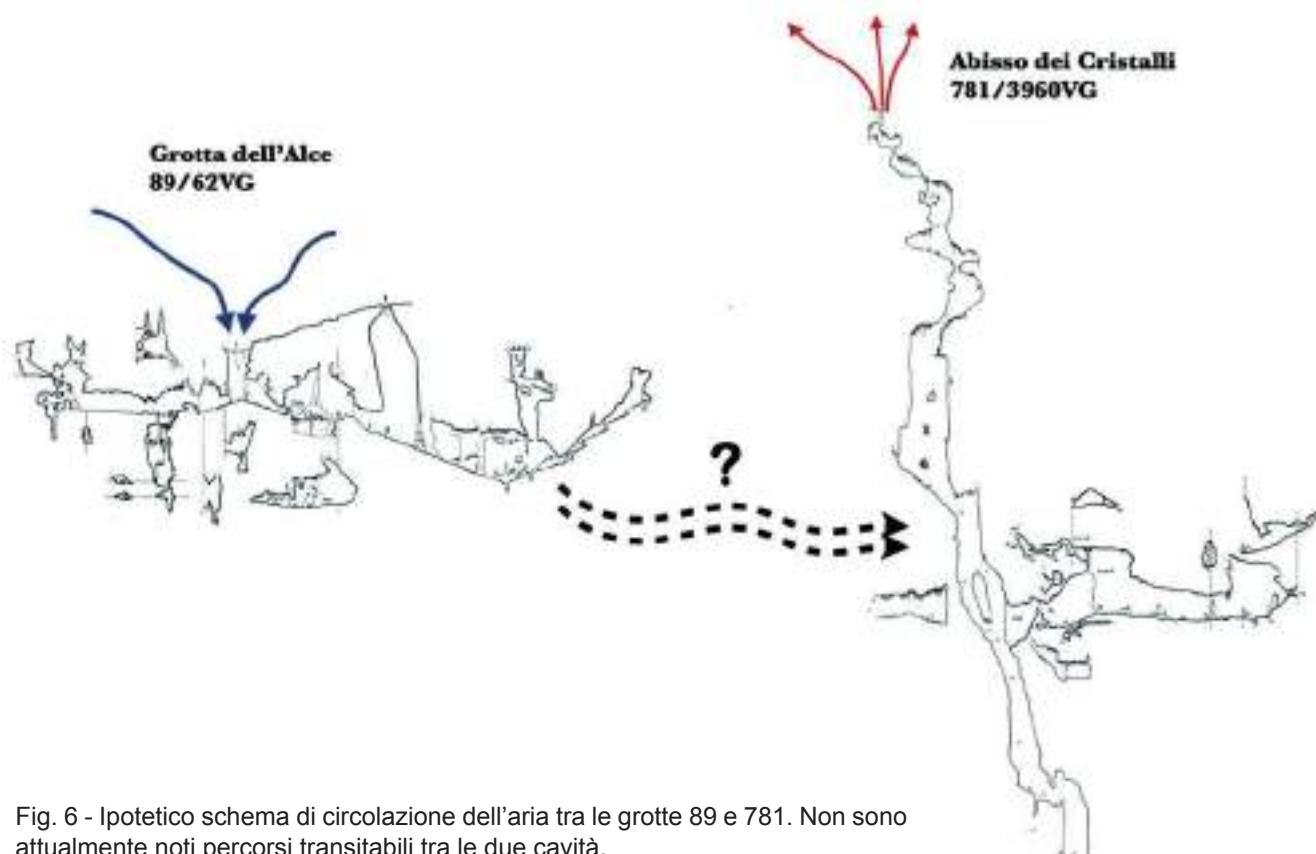


Fig. 6 - Ipotesi schematiche di circolazione dell'aria tra le grotte 89 e 781. Non sono attualmente noti percorsi transitabili tra le due cavità.



Fig. 7 - La strettoia utilizzata per la misura della portata.

Le condizioni meteorologiche esterne si sono mantenute stabili durante tutta la misura: temperatura esterna: 7,6°C, pressione: 989 hPa, umidità: 100%, copertura nuvolosa: foschia/nebbia, assenza di vento (dati Osmer e osservazioni sul posto).

Da un lato la nebbia, schermando l'ingresso dall'irraggiamento diretto, ha ridotto l'effetto indesiderato del progressivo riscaldamento del terreno e dell'aria durante la giornata. Dall'altro, l'elevata umidità ci ha permesso di escludere questa variabile dall'analisi dei dati dal momento che era confrontabile con l'interno. Ci siamo dunque trovati nelle condizioni ideali per l'esperimento.

1.1. Circolazione libera dell'Abisso dei Cristalli

La misura di portata relativa è stata calibrata sul flusso naturale della 781. I parametri di temperatura, umidità, pressione e velocità dell'aria sono stati registrati per circa un'ora. I dati sono stati registrati a circa 10 m di profondità, in corrispondenza della sezione più stretta della grotta (area = 0.27 m², Fig. 7). Una volta analizzati i dati, si è verificato che la direzione del flusso si è mantenuta costante durante la misura. Si è misurata una portata di 0.70 m³/s, non troppo diversa dalla media di febbraio registrata da Polli (0.87 m³/s) (POLLI, 1987).

Si tenga presente che gli ultimi inverni sono più caldi rispetto alle medie precedenti, compatibilmente con un valore ridotto della portata. Un altro fattore di discrepanza potrebbe essere l'incertezza nel determinare la normale alla sezione. Sottolineiamo però che tale incertezza non ha alcun effetto sulla misura della portata relativa, perché gli strumenti rimangono fissi durante l'intera durata della misura.

1.2. Risposta della 781 alla chiusura della 89

Senza interrompere la misura, si sono coperti i pozzi dell'89 con dei teli. La Grotta dell'Alce è rimasta chiusa per circa due ore e mezza. La portata misurata nella 781 durante questo intervallo di tempo è scesa a $0.68 \text{ m}^3/\text{s}$, con una riduzione del 2.9%.

L'ultima fase della misura prevedeva di aprire velocemente gli ingressi della Grotta dell'Alce. Questa operazione è stata molto più rapida della chiusura e ha determinato un aumento discontinuo nel flusso misurato, come ci si aspettava (Fig. 8). Per queste ragioni la valutazione della portata relativa è stata dedotta dalla fase di apertura.

L'analisi effettuata ha rivelato una lieve diminuzione, quasi lineare, della portata tra gli eventi di chiusura e apertura. Dal momento che l'apertura della Grotta dell'Alce è una perturbazione istantanea del sistema, si sono confrontate le portate mediate su intervalli di circa 6 minuti prima e dopo l'apertura. La portata è aumentata da $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,70 \text{ m}^3/\text{s}$, con una perdita di carico di $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$. La variazione relativa, che rappresenta, quindi, l'apporto della Grotta dell'Alce al flusso totale, è del 4,6% (Fig. 9). Questo dato sembra confermare le aspettative di POLLI (1987) circa un modesto contributo della Grotta dell'Alce alla circolazione e un'origine profonda della forzante.

In conclusione, ci aspettiamo che il meccanismo della trappola di freddo non sia l'unica causa del moto d'aria nell'Abisso dei Cristalli.

2. Circolazione barometrica

Il periodo estivo offre la probabilità più alta di osservare inversioni nel flusso d'aria all'Abisso dei Cristalli. Per indagare l'esistenza di eventuali inversioni, si è condotta una campagna di misure dal 24 al 29 luglio 2024. I risultati, al momento in fase di analisi più approfondite, indicano che la dinamica può essere governata dalle oscillazioni di temperatura del ciclo giorno-notte. Si sono osservate fasi marcatamente soffianti nelle ore notturne, intervallate da periodi di flusso caotico e quasi nullo nelle ore più calde. Durante la fase diurna si notano fluttuazioni simili a condizioni di circolazione barometrica in condizioni meteo stabili (CIGNA, 1968; BADINO, 2010). L'alternanza tra le due fasi si ripete identica per tre giornate consecutive e viene "disturta" dall'aumento del vento nella quarta giornata.

Nell'articolo del 1987, POLLI nota la difficoltà nel misurare i deboli flussi barometrici. I risultati ottenuti nel 2024 rappresentano una prima osservazione quantitativa del fenomeno. L'alternanza tra le fasi soffianti e barometriche mostra una regolarità marcata, fatto non comune in sistemi complessi e dominati da fluttuazioni caotiche quali sono gli ambienti ipogei.

Conclusioni

In questo intervento si sono presentati i primi risultati della campagna di misure e di analisi quantitativa dei flussi d'aria nel complesso Abisso dei Cristalli - Grotta dell'Alce. Attraverso una perturbazione diretta e controllata del flusso si è determinato che l'apporto relativo della Grotta dell'Alce alla portata totale è minore del 5%. Questo suggerisce che il meccanismo della trappola di freddo avanzato in MARINI (1985) potrebbe necessitare dei fattori complementari per ottenere

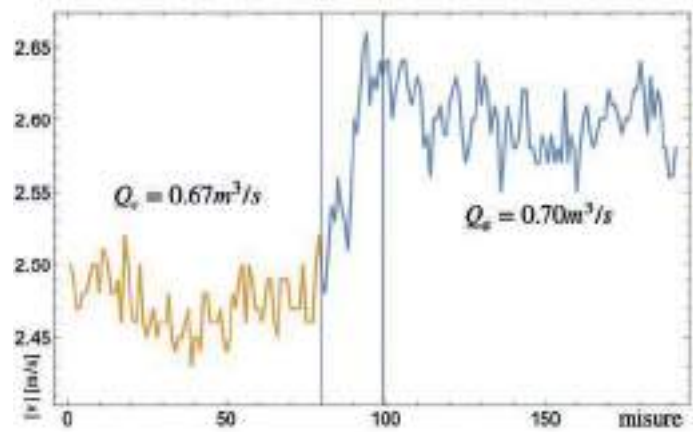


Fig. 8 - Aumento di portata causato dall'apertura della Grotta dell'Alce.

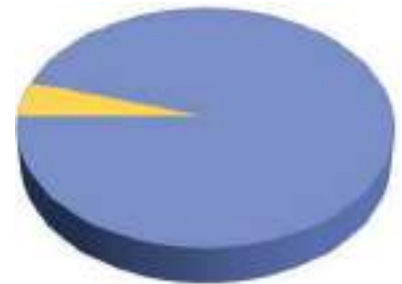


Fig. 9 - Il contributo della Grotta dell'Alce alla portata totale è rappresentato in giallo.

una comprensione completa della dinamica. Il metodo di chiusura e apertura degli ingressi è riproducibile in altri contesti e può fornire un valido metodo per determinare il collegamento tra cavità. Ulteriori misure e analisi sono tuttora in corso.

Si è inoltre misurata la circolazione estiva dell'Abisso dei Cristalli. L'analisi ha rivelato l'esistenza di una dinamica periodica in cui fasi di flusso uscente si alternano a fasi barometriche. L'analisi dei dati e la formulazione di un modello analitico di questa interessante alternanza sono in corso.

Ringraziamenti

Lo studio è stato realizzato dal gruppo di lavoro della Società di Studi Carsici A. F. Lindner APS, i cui componenti sono: Sara Baldo, Franco Bressan, Loretta Crestani, Fabio Deffendi, Mattia Fajdiga, Matteo Frandoli, Lorenzo Lastrucci, Enrico Magrin, Davide Menin, Veronica Pinatti, Alessandro Pintus, Francesca Semeraro, Francesco Serafin, Laura Zonta. L'analisi dei dati è stata curata da Francesco Serafin. Si ringrazia Mattia Fajdiga per l'assistenza nella messa in sicurezza della strumentazione.

Bibliografia

- MARINI, D., 1985 - *Nostra sorella aria*. Progressione 13, Supplemento ad Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", anno VIII, 1.
- POLLI, S., 1987 - *Proprietà fisiche dell'aria uscente dall'Abisso dei Cristalli (3960 VG) sul Carso di Trieste*. Atti e Memorie della Comm. Grotte "E. Boegan", 26, pp. 41-46.
- PADOVAN, E., ZANINI, G., 2008 - *L'enigma dell'Abisso dei Cristalli*. Articolo online: <https://www.boegan.it/2008/06/l-enigma-dell-abisso-dei-cristalli/>.
- CIGNA, A., 1968 - *An analytical study of air circulation in caves*. International Journal of Speleology, 3, pp. 41-54.
- KUKULJAN, L., GABROVSEK, F., COVINGTON, M.D., 2021 - *The relative importance of wind-driven and chimney effect cave ventilation: Observations in Postojna Cave (Slovenia)*. International Journal of Speleology, 50, n. 3, pp. 275-288.
- BADINO, G., 2010 - *Underground meteorology: "What's the weather underground?"* Acta Carsologica, 39, n. 3, pp. 427-448.

Mario Fabretto¹, Graziano Cancian²

Analisi in spettrometria gamma ad alta risoluzione su alcuni campioni di suoli raccolti in grotte e superfici del settore italiano del Carso Classico

1) Multiproject, Gorizia; 2) Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer", Gorizia

Abstract. The aim of this research was to identify and quantify radionuclides in the clayey/silty soils of five caves in the Italian Karst. Three external samples were also examined for comparison. The analyses were carried out at the gamma spectrometry laboratory of Multiproject in Gorizia. Radionuclides belonging to the ²³⁸U decay chain (²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra) were identified, as well as ²²⁴Ac, ²³⁵U, ⁴⁰K, and ¹³⁷Cs. In particular, it was noted that the uranium series radionuclides are in equilibrium with each other, while the concentrations of ²¹⁰Pb are higher.

Riassunto. Lo scopo di questa ricerca è stato l'identificazione e la quantificazione dei radionuclidi nei suoli argillosi/limosi di cinque grotte del Carso italiano. Per confronto sono stati esaminati anche tre campioni esterni. Le analisi sono state eseguite nel laboratorio di spettrometria gamma della Multiproject di Gorizia. Sono stati identificati i radionuclidi appartenenti alla catena di decadimento dell'²³⁸U (²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra), inoltre anche ²²⁴Ac, ²³⁵U, ⁴⁰K e ¹³⁷Cs. In particolare, si è notato che i radionuclidi della serie dell'uranio sono in equilibrio tra di loro mentre le concentrazioni del ²¹⁰Pb sono più elevate.

Premessa

La presenza di alte concentrazioni di radon nelle grotte del Carso italiano è nota e anche i nostri monitoraggi l'hanno recentemente confermato (CANCIAN et al., 2021, 2023). In questi casi è stato osservato che le variazioni della radioattività ambientale beta+gamma seguono la stessa dinamica stagionale e mensile del radon. Quest'ultimo è un prodotto di decadimento dell'uranio (²³⁸U), a sua volta generatore di una sequenza di ulteriori radionuclidi, che poi si depositano al suolo e sulle concrezioni.

Gli studi che si occupano della loro identificazione nelle grotte sono ancora scarsi (EISSA et al., 2005; ÇEVIC et al., 2012; MISDAQ et al., 2011), mentre alcuni si sono focalizzati esclusivamente su aspetti specifici, quali la ricerca del cesio (¹³⁷Cs) dopo l'incidente di Chernobyl (KLIMCHOUK et al., 1996) o l'utilizzo del ²¹⁰Pb a scopi geocronologici (JIANJUN, 2011; BONOTTO et al., 2012; TANG et al., 2020; MCFARLANE et al., 2021).

La nuova ricerca, materiali e metodi

Lo scopo principale di questa ricerca è stato l'identificazione e la quantificazione dei radionuclidi nei suoli di cinque grotte: Antro Casali Neri 326/450VG, Caverna Generale Ricordi 405/1064VG,

	Antro Casali Neri	Caverna Gen. Ricordi	Grotta Proteo	Grotta Tom	Jama Jablenza
mese/anno	marzo 2024	aprile 2024	giugno 2024	febbraio 2024	marzo 2024
profondità	~ 26 m	26 m	11 m	~ 50 m	88 m
temperatura	8,7°C	12,1°C	13,2°C	10,5°C	9,6°C
radioattività	0,08 µSv/h	0,07 µSv/h	0,30 µSv/h	0,60 µSv/h	0,07 µSv/h
CO ₂	520 ppm	741 ppm	~ 3000 ppm	-	795 ppm

Tab. I - Dati ambientali al momento della raccolta dei campioni. Per l'Antro di Casali Neri, nel calcolo della profondità è stata presa in considerazione anche la dolina. In questa grotta e nella Caverna Generale Ricordi, i precedenti monitoraggi avevano dimostrato che la radioattività variava da minimi di 0,05-0,06 µSv/h nei mesi freddi a massimi di 0,65-0,85 µSv/h nei mesi caldi.

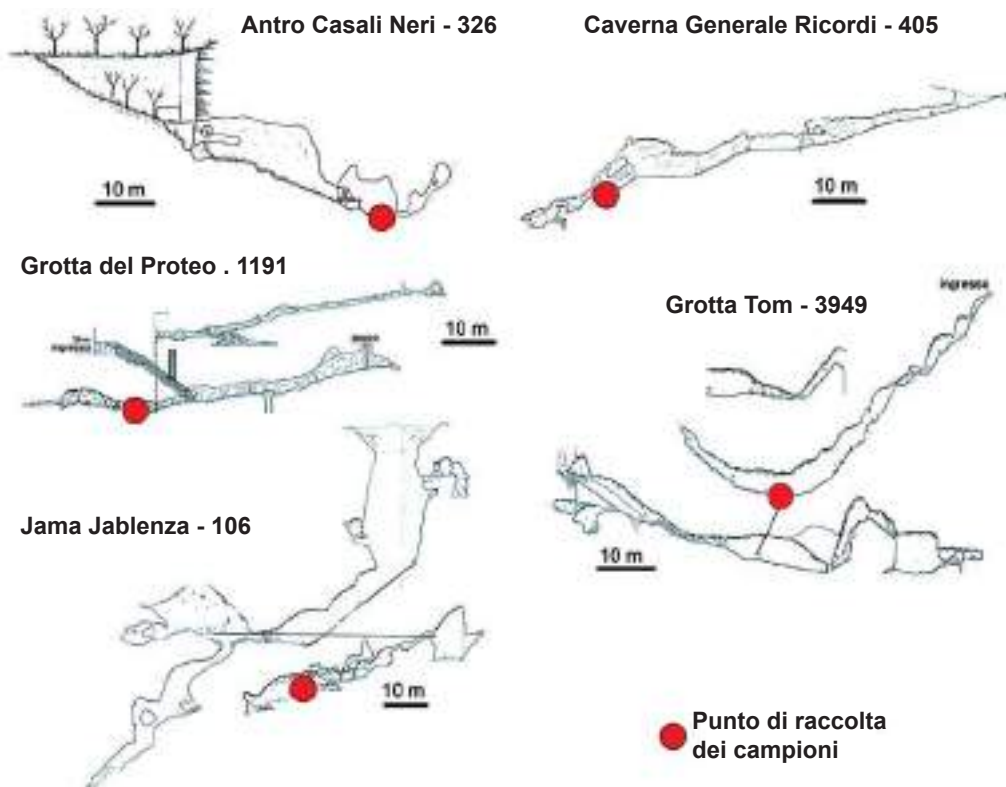


Fig. 1 - Rilievi semplificati delle grotte con indicazione del punto di raccolta dei campioni.



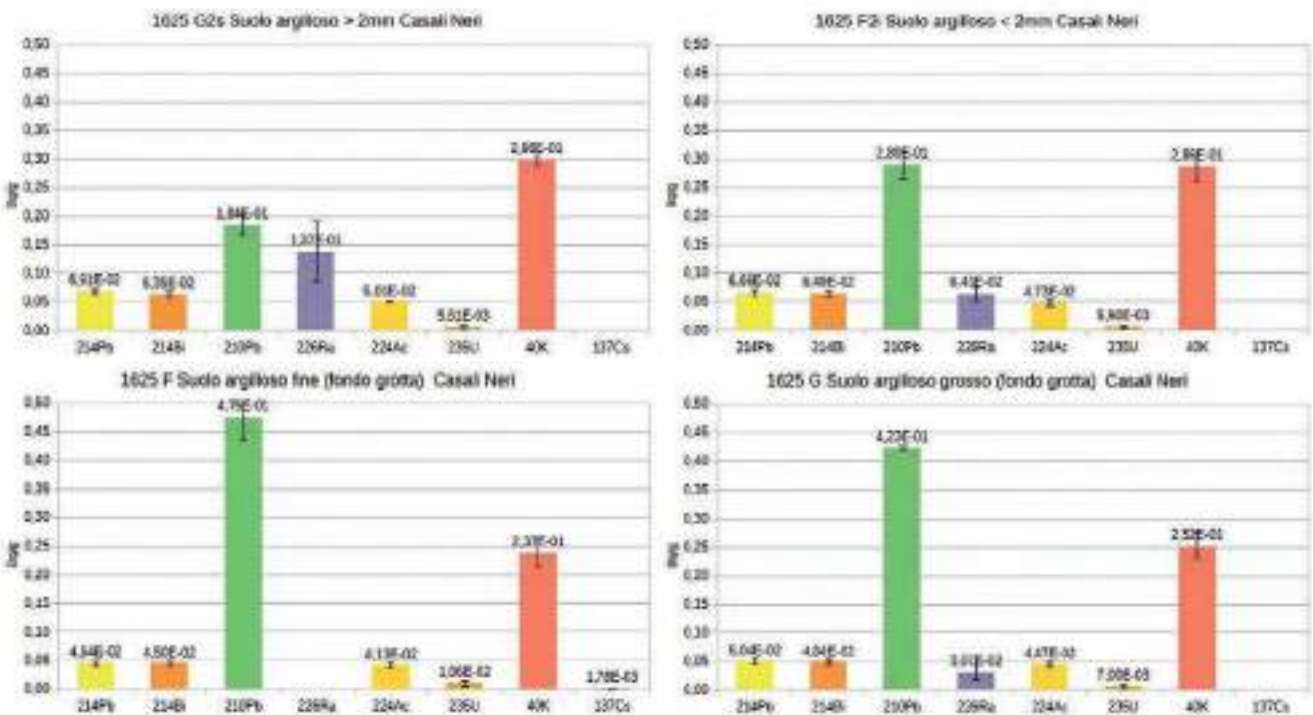
Fig. 2 - Ubicazione delle grotte dove sono stati raccolti i campioni.

n° camp.	provenienza	caratteristiche campione
1	Antro Casali Neri	suolo limoso sabbioso > 2 mm - esterno
2	Antro Casali Neri	suolo preval. argilloso < 2 mm - esterno
3	Antro Casali Neri	suolo argilloso fine, fondo grotta
4	Antro Casali Neri	suolo preval. argilloso, secco, < 2 mm
5	Jama Jablenza	argilla essicata al forno
6	Jama Jablenza	campione essicato, preval. argilloso
7	Grotta Tom	camp. essicato, argilloso limoso
8	Grotta Tom	suolo mediamente argilloso > 2 mm
9	Caverna Generale Ricordi	suolo caverna, componente > 2 mm
10	Caverna Generale Ricordi	suolo caverna, componente < 2 mm
11	Grotta del Proteo	suolo caverna, componente < 2 mm
12	Grotta del Proteo	suolo caverna, componente > 2 mm
13	Caverna Generale Ricordi	suolo esterno (terra rossa)

Tab. II - I campioni esaminati.

Tab. III - Attività dei radionuclidi.

camp.	^{214}Pb (Bq/g)	^{214}Bi (Bq/g)	^{210}Pb (Bq/g)	^{226}Ra (Bq/g)	^{224}Ac (Bq/g)	^{235}U (Bq/g)	^{40}K (Bq/g)	^{137}Cs (Bq/g)
1	0,069	0,064	0,184	0,137	0,050	0,006	0,298	-
2	0,067	0,065	0,289	0,064	0,047	0,006	0,286	-
3	0,045	0,045	0,475	-	0,041	0,011	0,237	0,002
4	0,050	0,048	0,423	0,031	0,045	0,007	0,252	-
5	0,090	0,081	0,224	0,140	0,077	-	0,401	-
6	0,053	0,054	0,135	0,139	0,066	-	0,311	-
7	0,084	0,078	1,524	0,061	0,049	0,008	0,298	-
8	0,087	0,083	1,612	0,127	0,046	-	0,319	-
9	0,028	0,029	0,390	0,026	0,022	0,005	0,116	-
10	0,033	0,031	0,720	0,114	0,024	0,008	0,130	0,001
11	0,012	0,012	0,433	0,053	0,019	-	0,120	0,010
12	0,020	0,019	0,288	0,049	0,017	0,004	0,108	0,007
13	0,078	0,073	0,110	0,106	0,043	0,005	0,313	0,028

Fig. 3 - Attività dei radionuclidi (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{224}Ac , ^{235}U , ^{40}K , ^{137}Cs) in quattro campioni di suolo. I primi due sono stati presi all'esterno e gli altri nel fondo dell'Antro di Casali Neri.

Grotta del Proteo 1191/4112VG, Grotta Tom 3949/5242VG e Jama Jablenza 106/163VG. Le prime due erano già state oggetto di lunghi monitoraggi della concentrazione di radon. A tale scopo sono stati raccolti dei campioni di sedimenti prevalentemente limosi/argillosi, successivamente analizzati nel laboratorio di spettrometria gamma della Multiproject s.r.l. a Gorizia, accreditato ACCREDIA n. 0465.

Il sistema di misura utilizzato è una catena spettrometrica gamma ad alta risoluzione composta da un rivelatore ORTEC GEM-C30P4 al germanio iperpuro (HPGe) di tipo n, raffreddato con azoto liquido, sistemato in pozzetto schermante in piombo dello spessore di 10 cm. Il sistema di rivelazione è collegato a un analizzatore multicanale OR-TEC DISPEC-50. I dati sono stati analizzati mediante il *software* ORTEC-AMETEK Gamma Vision/Maestro Pro.

I risultati delle analisi

Sono stati analizzati 13 campioni, tutti caratterizzati da un'abbondante frazione argillosa/limosa. La loro provenienza e le loro caratteristiche sono riportate in tabella II.

In tabella III, invece, sono elencati i radionuclidi identificati e le loro attività.

Nelle successive figure (Figg. 3-7) sono riportate le attività dei radionuclidi ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{224}Ac , ^{235}U , ^{40}K , ^{137}Cs in 13 campioni raccolti nelle cinque grotte e all'esterno.

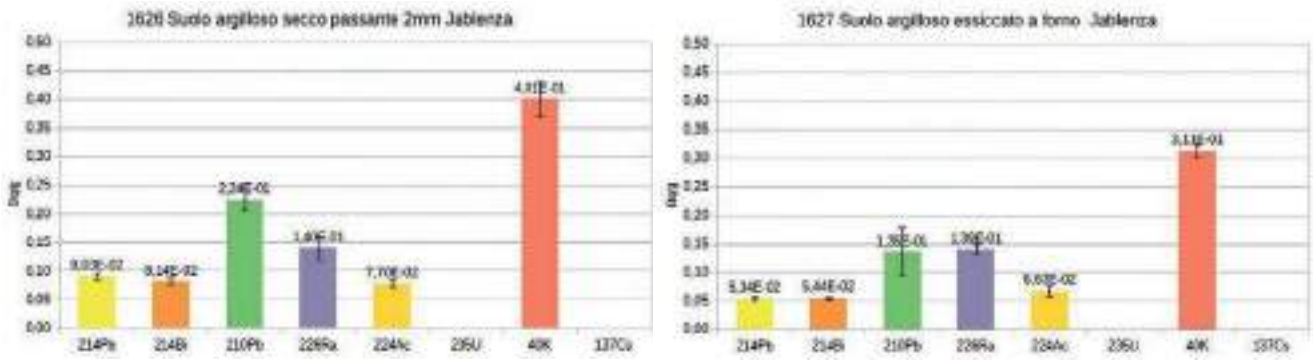


Fig. 4 - Attività dei radionuclidi (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{224}Ac , ^{235}U , ^{40}K , ^{137}Cs) in due campioni di suolo raccolti nella Jama Jablenza.

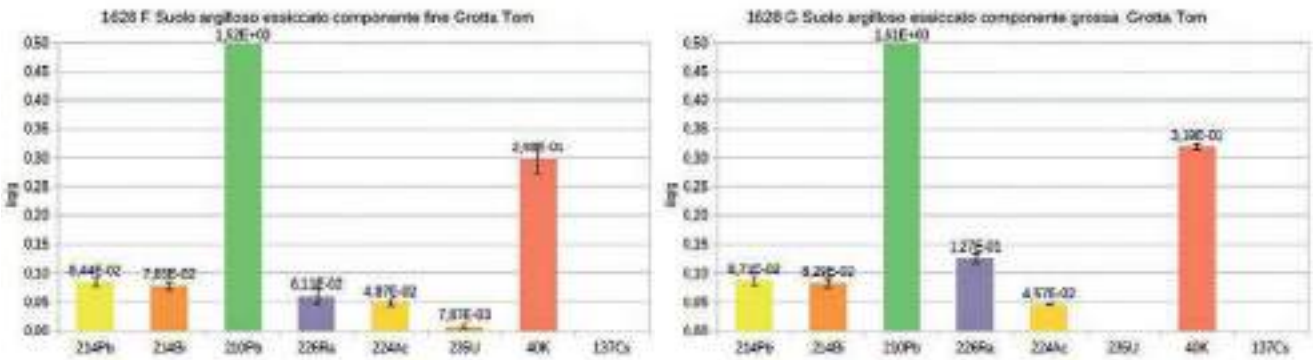


Fig. 5 - Attività dei radionuclidi (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{224}Ac , ^{235}U , ^{40}K , ^{137}Cs) in due campioni di suolo raccolti nella Grotta Tom.

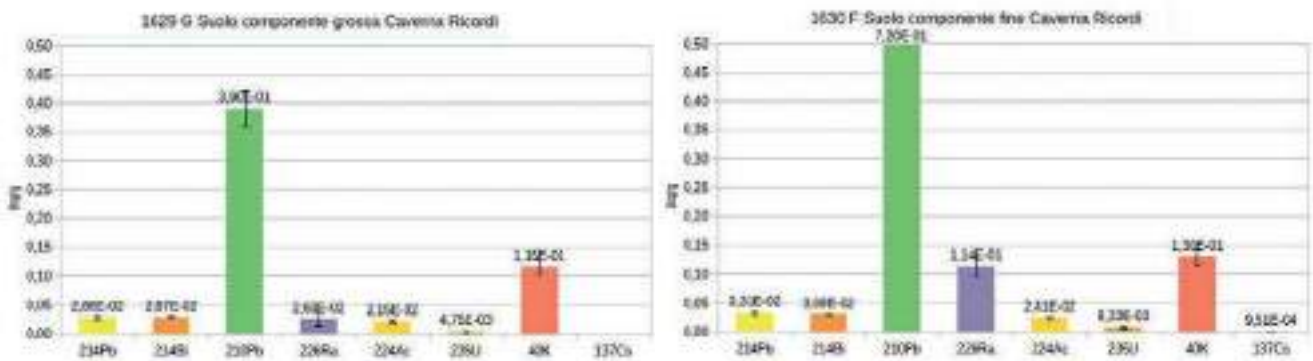


Fig. 6 - Attività dei radionuclidi (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{224}Ac , ^{235}U , ^{40}K , ^{137}Cs) in due campioni di suolo raccolti nella Caverna Generale Ricordi.

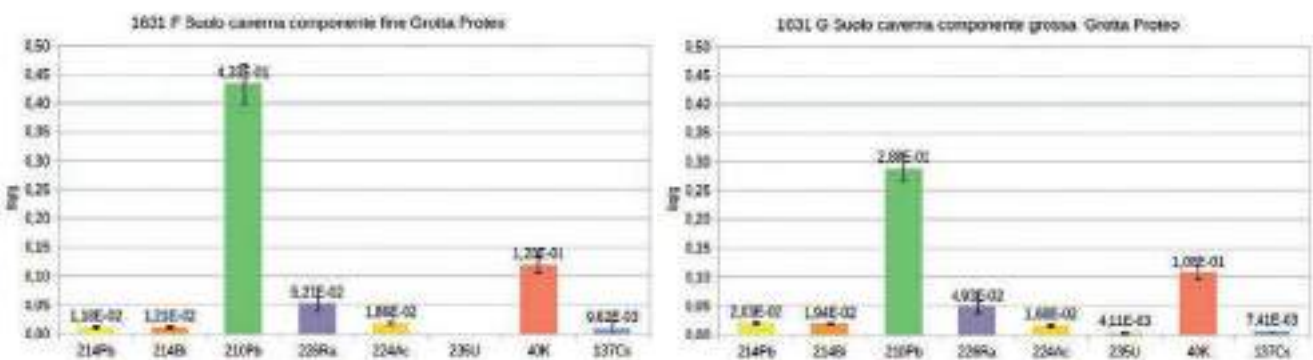


Fig. 7 - Attività dei radionuclidi (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{224}Ac , ^{235}U , ^{40}K , ^{137}Cs) in due campioni di suolo raccolti nella Grotta del Proteo.

Da notare la presenza, anche se scarsa, del ^{137}Cs in un campione dell'Antro di Casali Neri, in uno della Caverna Generale Ricordi e nei due della Grotta del Proteo. La presenza di questo radionuclide, con tutta probabilità, è collegata all'incidente di Chernobyl avvenuto nel 1986 (PA-DOVANI, 2016).

Fig. 8 - Attività misurate nel campione raccolto all'esterno della Caverna Generale Ricordi.

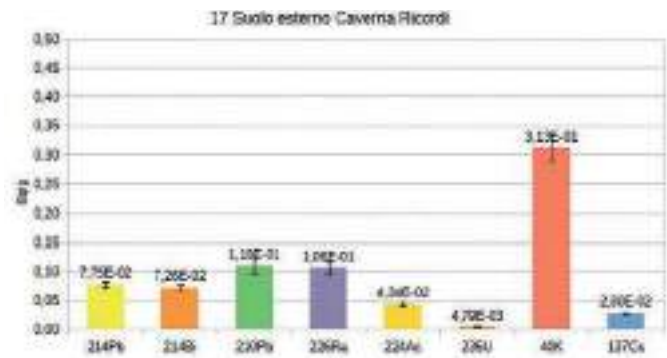


Fig. 9 - Un particolare della Grotta Tom (foto D. Pascolo).

In figura 8 si riportano i dati misurati su un campione raccolto in superficie, sopra la Caverna Generale Ricordi. Si è voluto, infatti, confrontare i valori misurati all'interno della grotta con quelli esterni.

In questo caso, all'esterno, tutti i radionuclidi della serie dell'uranio (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{226}Ra) sono praticamente in equilibrio tra di loro, mentre nei campioni interni si evidenziano elevate concentrazioni di ^{210}Pb (Fig. 6).

In superficie si osservano pure concentrazioni maggiori di ^{40}K e ^{137}Cs . Con tutta probabilità, per questo motivo, nell'interno della grotta sono stati trovati anche modesti valori di ^{137}Cs , dovuti sia all'azione delle acque di percolazione che alla contaminazione trasportata dai visitatori di una cavità facilmente accessibile.

Conclusioni

Questo studio rappresenta uno dei primi sondaggi della radioattività naturale presente nei suoli ipogei del Carso Classico, con identificazione dei radionuclidi, argomento ancora molto poco stu-

diato, correlato sia alle concentrazioni stagionali del gas radon nelle grotte e nelle doline, sia ai fenomeni di accrescimento delle concrezioni al loro interno.

Le diversità nei trattamenti ai quali sono stati sottoposti i campioni prima dell'arrivo in laboratorio, dovute alle situazioni di campionamento e conservazione, non consentono confronti quantitativi con buon livello di confidenza tra grotte diverse. I dati raccolti sono tuttavia d'interesse relativamente alle distribuzioni dei radionuclidi nelle diverse componenti strutturali di suoli con stesso trattamento e per la marcata diversità nelle concentrazioni di ^{210}Pb osservate.

Sulla base di questa prima esperienza esplorativa si conta di porre allo studio procedure di raccolta, campionamento e trattamento standardizzate, anche in associazione con misure della concentrazione di radon e di irraggiamento esterno.

Ringraziamenti

Si ringraziano gli speleologi del Centro Ricerche Carsiche Seppenhofen per la raccolta dei campioni nella Grotta Tom e nella Jama Jablenza.

Bibliografia

- BONOTTO D.M., KARMANN I. & BASKARAN M.M., 2012 - *Growth rates in modern speleothems from Santana Cave, Brazil, by the ^{210}Pb -metod*. Radiation Measurements, 47, 2, pp. 168-177.
- CANCIAN G. & CANCIAN D., 2021 - *Diossido di carbonio, radioattività e radon nella Caverna Generale Ricordi (Carso Classico, comune di Doberdò del Lago)*. Atti Museo Civico di Storia Naturale di Trieste, 62, pp. 5-32.
- CANCIAN G., CANCIAN D. & REJC S., 2023 - *Concentration and dynamics of carbon dioxide, radioactivity and radon in two caves of Italian Classical Karst*. Acta Carsologica, 52, 1, pp. 93-107.
- ÇEVIC U., KARA A., ÇELIC N. & KARABIDAK S.M., 2012 - *Radon Survey and Exposure Assessment in Karaca and Çal Caves, Turkey*. Water Air and Soil Pollution, 214, 1, pp. 461-469. Doi: 10.1007/s11270-010-0437-6.
- EISSA M.F., MOSTAFA R.M., SHAHIN F., MANSY MN, KHALIL F.A. & EISSA H.M., 2005 - *Measurements of Radon concentration at Wad Saner cave in Beni Suef, Egypt*. Isotope and Radiation Research, 37, 7, pp. 1741-1748.
- JIANJUN Y., JIANGMING Q., YUSHI L., HUA W. & WEI T., 2011 - *Application of ^{210}Pb technique to calculate the deposition rate and to test the deposition environment of young stalagmites*. Quaternary Sciences, 31, 5, pp. 883-890.
- KLIMCHOUK A. & GUDZENKO V., 1996 - *Chernobyl radiocaesium in a karst system, Marble Cave, Crimea*. Environmental Geology, 28, pp. 161-166. <https://doi.org/10.1007/s002540050089>.
- McFARLANE D. & LUNDBERG J., 2001 - *Geochronological implications of ^{210}Pb and ^{137}Cs mobility in cave guano deposits*, International Journal of Speleology, 50, 3, pp. 239-248.
- MISDAQ M. & OUGUIDI J., 2011 - *Concentrations of radon, thoron and they decay products measured in natural caves and ancient mines by using solid state nuclear track detectors and resulting radiation dose to the members of the public*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 287, 1, pp. 135-150. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0671-9>.
- PADOVANI R., 2016 - *L'incidente di Chernobyl e le prime misure di radioattività in Friuli Venezia Giulia. Chernobyl 30 anni di monitoraggio e studi in Friuli Venezia Giulia 1986-2016*. ARPA, Regione Friuli Venezia Giulia.
- TANG W., LAN G., YANG H., YIN J.J. & PU J., 2020 - *Variations and influence factors of ^{210}Pb specific radioactivity in modern calcite deposition in a subtropical cave, South China*. Applied Geochemistry, 113, 104468.

Massimo Vascotto¹, Alberto Cherti^{1, 2}, Carmelo Catania³

Trenta anni di misure di radon-222 nella Grotta Costantino Doria: una prima panoramica dei risultati

1) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Trieste; 2) Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Trieste; 3) AZO "Ospedali Riuniti" di Trieste

Abstract. Starting from a degree thesis in Physics, radon gas concentration measurements, have been carried out, on a monthly basis, since 1996. Measurements were taken inside the Costantino Doria Cave (724/3875VG), using the activated carbon canisters. After 24 hours, the radon concentration was determined, by a germanium detector and the associated detection chain, in gamma spectrometry. The aim of this work is to present an initial analysis of the results. In particular, it will examine Summer and Winter variations, as well as the influence of meteorological variables on concentration performance. We also wish to contribute to expanding the knowledge of radon and radon risk among speleologists.

Riassunto. A partire da una tesi di laurea in Fisica, dal 1996 sono state effettuate misure di concentrazione di gas radon, con cadenza mensile, all'interno della Grotta Costantino Doria (724/3875VG), utilizzando la tecnica dei canestri al carbone attivo. Dopo un'esposizione di 24 ore, la concentrazione di radon è stata determinata, in spettrometria gamma, utilizzando un rivelatore al germanio e la relativa catena spettrometrica di rivelazione. L'obiettivo di questo lavoro è quello di presentare una prima analisi dei risultati. In particolare, verranno esaminate le differenze tra estate e inverno e l'influenza delle variabili meteorologiche sulle performance di concentrazione. Vogliamo infine contribuire ad ampliare la conoscenza del radon e del rischio radon tra gli speleologi.

Il radon

Il radon è un gas nobile, inodore, insapore e incolore. Pertanto, non ne avvertiamo la presenza, nonostante sia diffuso in concentrazioni più o meno elevate in qualsiasi ambiente, confinato e non. Essendo un gas inerte, si presta poco a legami chimici e/o fisici, come peraltro avviene per tutti gli elementi che si trovano nell'estremità destra della tavola periodica. Essendo un gas si può però spostare facilmente, sfruttando ogni possibile forma di circolazione presente nell'ambiente in cui si trova. Essendo solubile in acqua, può utilizzare quest'ultima per spostarsi da un luogo ad un altro, anche a grandi distanze, sia in senso orizzontale che verticale.

Il radon interessa la comunità scientifica perché è un gas radioattivo e tutto ciò che è connesso con la radioattività e con le radiazioni ionizzanti, come vedremo, può essere potenzialmente nocivo per l'uomo. La sua concentrazione si misura in Bq/m³. L'isotopo di maggior interesse è il Rn-222, afferente alla catena di decadimento dell'U-238. Avendo un tempo di dimezzamento di quasi quattro giorni (3,82, ad essere precisi), se ci sono le condizioni, può spostarsi anche di molto dal punto in cui è stato generato e, se ci sono i presupposti, accumularsi negli ambienti, in concentrazioni anche notevoli. Il tempo di dimezzamento è un parametro che serve a capire in quanto tempo il numero di nuclei di partenza si dimezza. In sostanza, è un indice di velocità e si correla con i possibili rischi conseguenti. Comprenderemo a breve perché questo parametro sia importante.

A rigore, esistono altri due isotopi del radon: il Thoron (Rn-220, il cui tempo di dimezzamento è di 55,61s, afferente alla catena di decadimento del Th-232) e l'Actinon (Rn-219, con un tempo di dimezzamento di soli 3,96s, appartenente alla catena del decadimento dell'U-235). Si vede subito che entrambi presentano una limitata possibilità di spostamento dal punto di origine e, per questo motivo, pur essendo studiati, non sono "degni" della stessa attenzione che si riserva al Rn-222. Va infine osservato che, affinché il radon possa spostarsi, è necessario che il decadimento

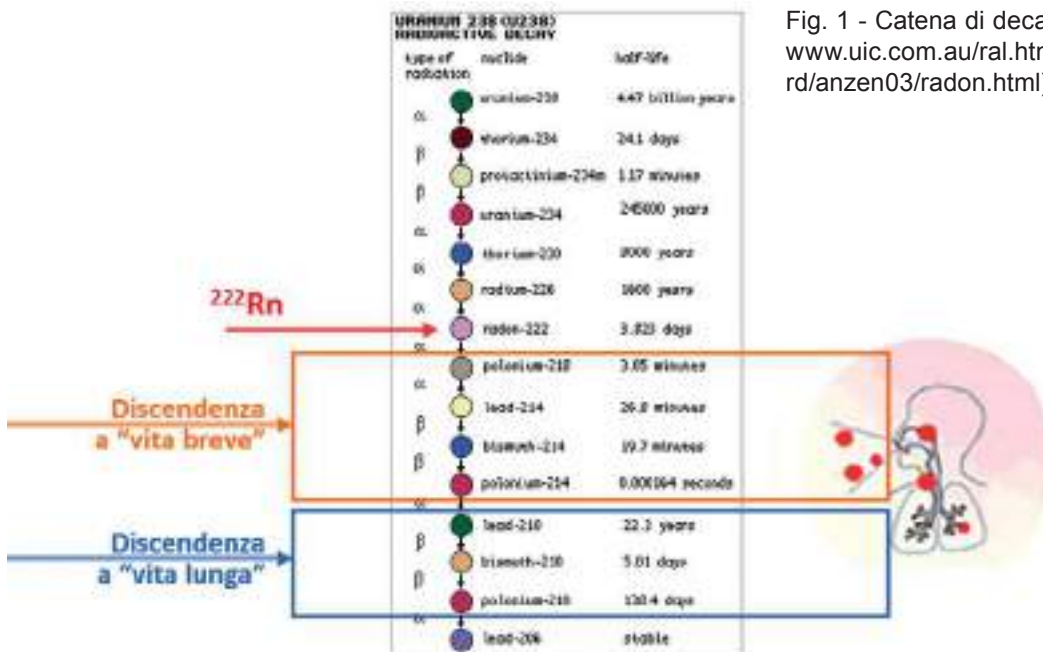


Fig. 1 - Catena di decadimento dell'U-238 (da www.uic.com.au/ral.htm; www.nirs.go.jp/ENG/rd/anzen03/radon.html).

che produce l'isotopo lo conduca in aria o nell'acqua, ma non all'interno della materia solida, ad esempio le rocce.

In figura 1 è riportata la catena di decadimento dell'U-238. Come si può notare, il radon proviene dal decadimento del Ra-226. La catena del decadimento termina con l'elemento stabile Pb-206.

Tutto ciò che sta "a valle" del Radon-222 può essere suddiviso in due macro componenti: la discendenza a vita breve (il cui tempo di dimezzamento è compreso tra i 164 microsecondi del Polonio-214 e i 26,8 minuti del Piombo-214) e la "discendenza a vita lunga" (il cui tempo di dimezzamento è compreso tra i 138,4 giorni del Polonio-210 e i 22,3 anni del Piombo-210). Tutti questi elementi decadono emettendo particelle alfa (nuclei di elio) o beta (elettroni/positroni). Questi decadimenti sono inoltre accompagnati da emissioni gamma (onde elettromagnetiche), conseguenza di successivi riarrangiamenti interni, a livello nucleare.

Normalmente, negli ambienti ad elevata concentrazione del radon, vi è pertanto anche una elevata concentrazione della sua discendenza. Tutti questi elementi, per effetto di come sono stati generati, esistono sotto forma ionica e, come tali, possono aderire all'aerosol, alle superfici, o precipitare. In questo contesto, possono anche essere inalati durante l'atto respiratorio. Gli apparati ciliari, che sono costituenti del nostro sistema respiratorio, hanno il compito di espellere tutte queste sostanze che, di fatto, rappresentano degli intrusi nel processo di respirazione. Però, i "tempi tecnici", necessari per questa operazione, sono dell'ordine dei trenta minuti, quindi tutta la discendenza del radon a vita breve ha il tempo di decadere. In definitiva, se è piuttosto improbabile che il radon possa decadere all'interno dei nostri polmoni, proprio perché il processo respiratorio è enormemente più breve del suo tempo di dimezzamento, il discorso è differente per la discendenza a vita lunga.

Tutte queste particelle, frutto dei decadimenti, nell'attraversare la materia (nel nostro caso dei tessuti), rilasciano una certa quantità di energia. Minore è il tempo di dimezzamento dell'elemento, maggiore sarà l'energia rilasciata in quel particolare tessuto. Questa energia (che si misura in keV) può avere un qualche effetto sul normale funzionamento delle cellule e del nucleo: può ucciderle, alterarne, o inibirne, il processo di riproduzione, o modificarle geneticamente. Chiaramente l'organo bersaglio può anche non subire alcuna conseguenza o guarire.

A questo punto è opportuno precisare che le particelle alfa non sono di particolare interesse se si trovano all'esterno del nostro corpo, in quanto non hanno un grosso potere di penetrazione: basta un foglio di carta per arrestarle. Vi è invece da preoccuparsi, se il decadimento che accompagna la sua emissione, avviene all'interno di un tessuto, in quanto, per le medesime ragioni, l'intera energia si riversa su di esso, esponendolo alle possibili conseguenze ora introdotte. Le particelle beta e

quelle gamma, invece, riescono ad attraversare spessori più consistenti e in ogni caso rilasciano energia nell'attraversare la materia.

Tutte queste considerazioni ci portano a comprendere che un'elevata concentrazione di radon, può comportare l'insorgenza di patologie tumorali. Ci sono voluti circa 500 anni per dimostrare che il radon (ma sarebbe meglio dire la sua discendenza) rappresenta la seconda causa accertata di tumore, a livello polmonare, dopo il fumo da sigaretta. Per aumentare il livello di rischio è però necessario permanere per lungo tempo in ambienti caratterizzati da concentrazioni elevate.

Una volta appurata la pericolosità di questo gas se presente ad alte concentrazioni, la sua presenza è stata oggetto di studi approfonditi. Attraverso opportune azioni di monitoraggio sempre più capillari, soprattutto in ambienti di lavoro, è stata confermata la sua presenza un po' ovunque, in particolare negli ambienti confinati. Si è quindi estrapolato il possibile rischio, in termini statistico/probabilistici, per lunghi periodi di esposizione, anche in presenza di concentrazioni non rilevanti. Il tutto ha infine portato alla definizione, secondo il principio precauzionale, di livelli di guardia e, in tempi più recenti, di limiti di legge, via via sempre più stringenti. Attualmente, in forza al D.lgs. 101/2020, che recepisce la Direttiva 2013/59/Euratom, il livello di riferimento per il Radon nelle abitazioni e negli ambienti di lavoro, corrisponde a 300Bq/m^3 , inteso come media annua. Per le abitazioni costruite dopo il 31/12/2024 è previsto un valore di riferimento di 200Bq/m^3 .

È bene osservare che il radon, benché sia la componente predominante, rappresenta solo una delle fonti di esposizione a radiazioni ionizzanti cui siamo quotidianamente soggetti. Senza dilungarci troppo, ci limitiamo a mostrare, in figura 2, le diverse fonti di radiazioni ionizzanti e ad aggiungere che la dose totale media annua - un parametro che stima l'esposizione alla radioattività per la popolazione mondiale - corrisponde a $2,4\text{mSv}$. Si può pertanto affermare che siamo circondati dalla radioattività e dai suoi possibili effetti e si può anche ritenere che la nostra stessa evoluzione sia forse in qualche modo collegata al contributo di questi agenti fisici. Va infine precisato che non sono ancora del tutto chiari gli effetti dell'esposizione a lungo termine a concentrazioni sia elevate che ridotte (secondo il modello lineare senza soglia).

Il radon interessa gli speleologi in quanto le grotte rappresentano un ambiente confinato ove questo gas può essere presente anche in concentrazioni non banali. Infatti, le caratteristiche della cavità - in particolare, le sue dimensioni, il numero degli accessi, la presenza di acqua, ma anche le condizioni meteorologiche interne ed esterne e la presenza di ventilazione - hanno un ruolo fondamentale nel determinare valori più o meno rilevanti di concentrazione. Poiché lo scopo di questo lavoro, non è sicuramente quello di scoraggiare lo speleologo, ma di metterlo al corrente dell'esistenza di un rischio, è opportuno precisare che il concetto di rischio che si vuole trasmettere non si allontana, più che tanto, da quelli che affrontiamo quotidianamente. Questo perché, come detto, il tempo di permanenza è un fattore molto rilevante e, come in tutti i processi stocastici, gli effetti possono essere causati anche da un singolo evento, quindi anche a seguito dell'esposizione ad una concentrazione molto bassa.

La misura del radon

Esistono numerose tecniche di misura del radon. Negli anni '90 era particolarmente utilizzata la metodologia dei canestri al carbone attivo. Attualmente il progresso tecnologico permette di

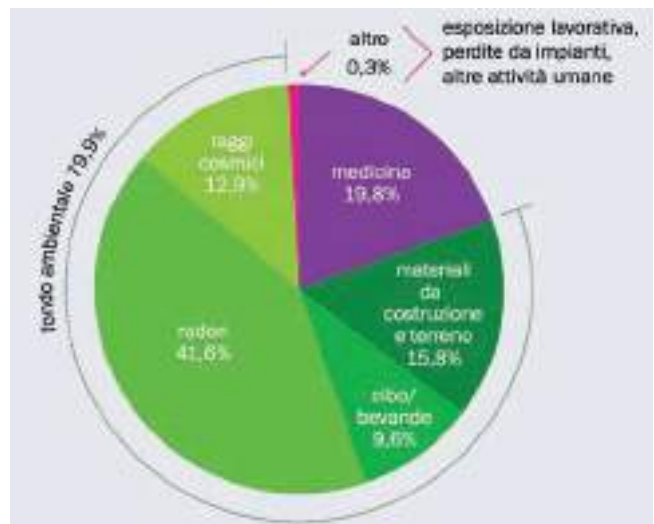


Fig. 2 - Esposizione alle radiazioni ionizzanti (da www.asimmetrie.it/images/35/pdf/asimmetrie-35-07.pdf).



Fig. 3 - Canestro al carbone attivo (da www.researchgate.net/publication/239815223_Radon_adsorbed_in_activatd_charcoala_simple_and_safe_radiation_source_for_teaching_practical_radioactivity_in_schools_and_colleges/figures?lo=1).

sono propri. Trascurare questi aspetti può evidentemente falsare i risultati delle misure, anche di molto. Occorre quindi una certa prudenza nell'interpretazione dei risultati delle misure, specie se 'occasionalì' e/o a bassa statistica. Non a caso, anche il legislatore ha voluto essere prudente e, nello stabilire dei limiti, li ha da sempre considerati, non a caso, "su ampio intervallo temporale".

I canestri al carbone attivo (Fig. 3), costituiscono un sistema di misura passivo. In pratica, sono scatole di tabacco che contengono una settantina di grammi di carbone attivo, che è un carbone particolarmente poroso. Il tutto è protetto superiormente da una griglia metallica. Il canestro viene aperto e posizionato nell'ambiente di misura, ove permane per un intervallo di tempo compreso tra 24 ore e 5 giorni. Campiona l'aria presente nell'ambiente di misura, adsorbendo i gas presenti, fra cui anche il vapore acqueo e il radon. Negli ambienti ad elevata umidità, come ad esempio nelle grotte, il tempo di esposizione viene perciò limitato (di solito a 24 ore), per evitare gli effetti di mascheramento determinati dalla concomitante presenza del vapore.

A questo punto, atteso un opportuno intervallo di tempo, necessario a stabilire all'interno del canestro le condizioni ideali di misura (l'equilibrio secolare, su cui non ci soffermiamo), il canestro può essere 'letto' in spettrometria gamma. Nel nostro caso, abbiamo utilizzato un rivelatore HPGe, cioè un rivelatore a semiconduttore al germanio iper-puro. Il rivelatore, attraverso la sua catena spettrometrica, misura i decadimenti gamma conseguenti ai riarrangiamenti nucleari che seguono i decadimenti della discendenza del radon e che hanno un'energia ben definita e nota, che è funzione di "quel" particolare decadimento. In pratica, il rivelatore misura l'energia dispersa dal raggio gam-

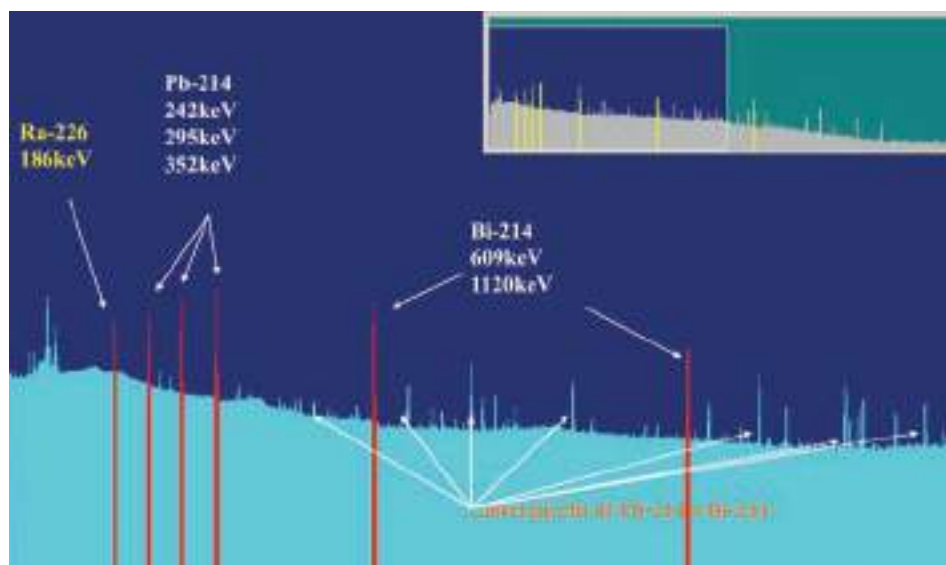


Fig. 4 - Spettro di una sorgente di Ra-226 (dis. Massimo Vascotto).

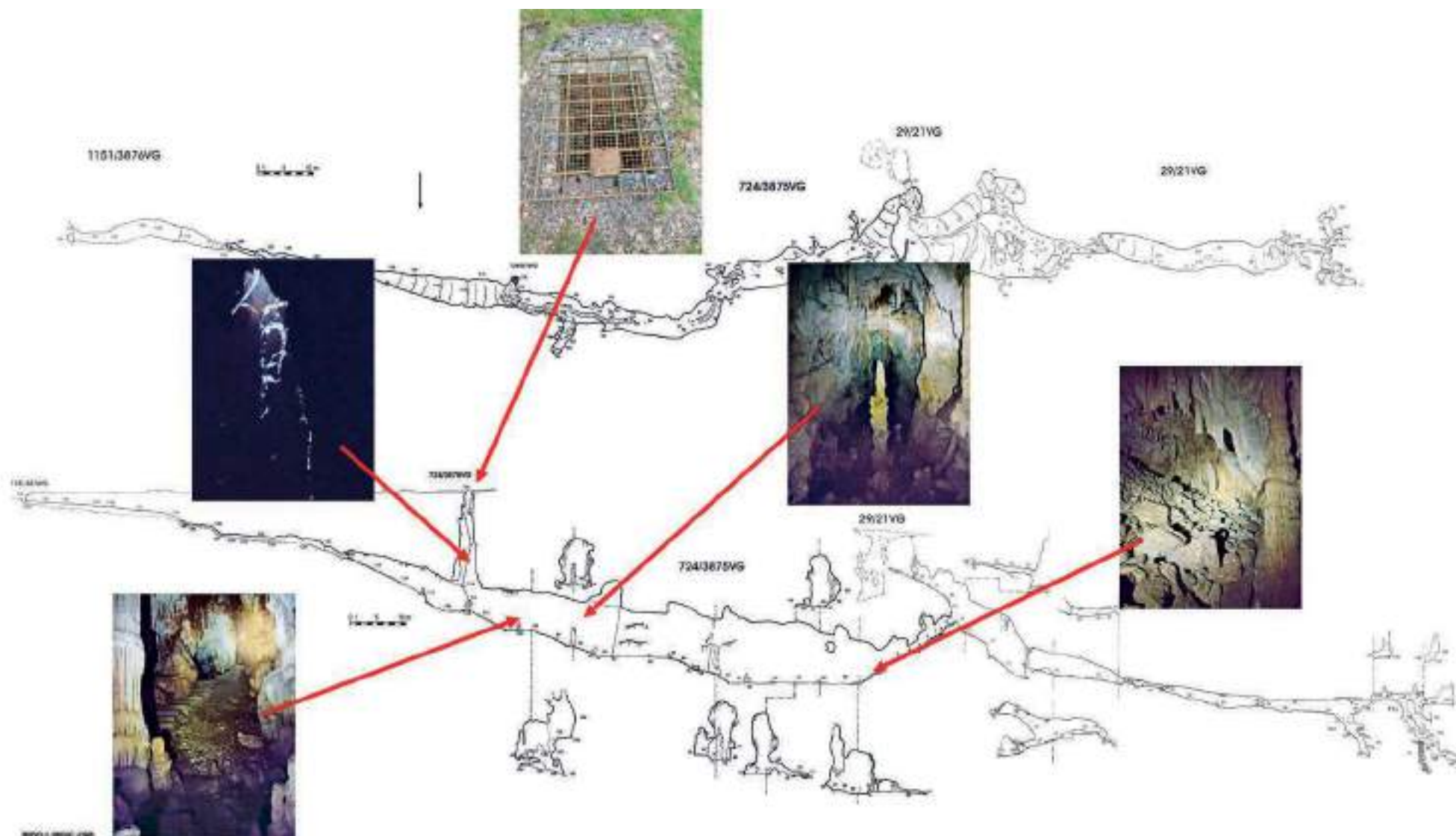


Fig. 5 - Grotta C. Doria (dis. Massimo Vascotto; https://catastogrotte.regione.fvg.it/cartografia?id=724-Grotta_Costantino_Doria).

ma nell'attraversarlo. Tipicamente, sono di interesse i picchi del Piombo-214 (295keV e 352keV) e del Bismuto-214 (609keV), come quelli presenti in figura 4, riferiti allo spettro di una sorgente di Radio-226. Nel caso del canestro al carbone, lo spettro è del tutto identico, eccettuato, appunto, per il picco del Radio-226, che non risulta presente. Si osservi, in particolare, l'importanza della risoluzione del rivelatore che consente di discriminare tra due picchi adiacenti, come pure il fatto che l'assenza di una taratura periodica potrebbe portare a identificare erroneamente un elemento piuttosto che un altro, specie se poco abbondante, come pure falsare il valore della concentrazione.

L'ambiente di misura: la Grotta Costantino Doria

Si tratta ora di caratterizzare il luogo di misura. L'ambiente carsico è costituito da calcare, una roccia sedimentaria formata in prevalenza da carbonato di calcio. In linea di massima non contiene uranio; la sua presenza è perciò conseguenza della 'storia geologica' della matrice rocciosa. Per effetto dell'azione dell'acqua, essa si caratterizza per una consistente fratturazione della roccia, con presenza di cavità più o meno accessibili. Il radon, quale che sia la sua origine, può perciò spostarsi facilmente sfruttando sia l'acqua (di percolazione o di evaporazione), come pure queste fratturazioni, in conseguenza dei possibili gradienti di pressione esistenti (sia interni che esterni).

Nel corso degli anni sono stati effettuati numerosissimi studi, molti anche nel nostro Carso, tesi a misurare la concentrazione del radon nelle cavità carsiche e a correlare i valori con tutte le cosiddette 'misurabili'. Si può però affermare che ogni grotta presenta le sue particolari peculiarità, esattamente come accade per le abitazioni, oggetto di altrettanti studi e misure. Perciò ogni cavità andrebbe misurata.

A partire dal 1996 sono state effettuate misure di radon, utilizzando la tecnica appena introdotta e con cadenza mensile, presso la Grotta Costantino Doria (724/3875VG), situata in prossimità dell'abitato di Borgo Grotta Gigante, sul Carso triestino. La cavità è stata scelta in quanto, oltre ad essere chiusa, completamente attrezzata e oggetto di diversi studi scientifici, è facilmente raggiungibile.

La descrizione della cavità è ben illustrata sul sito del Catasto Speleologico Regionale: l'accesso è costituito da un'apertura di circa 1 m², cui segue un pozzo, attrezzato a scale, della profondità di circa 20 metri. Questo dà l'accesso ad una lunga galleria a scendere, caratterizzata da suolo argilloso e ricca di concrezioni.

La galleria termina con un ghiaione, in corrispondenza del quale si è scelto il punto di misura. Il ghiaione introduce ad un secondo ambiente, ove ha termine la cavità (Fig. 5).

Per le sue caratteristiche si può definire una cavità "cul-de-sac", in cui l'accesso principale rappresenta anche il maggiore punto di interazione con l'ambiente esterno. A rigore, la presenza di una volpe, accertata in qualche occasione, conferma l'esistenza di un secondo accesso, ma che evidentemente non è praticabile dall'uomo.

I risultati delle misure, conclusioni e prospettive

In figura 6 sono riportati i risultati delle numerose misure effettuate (più di trecento). Si può facilmente osservare la variabilità stagionale della concentrazione, con valori massimi di nei mesi estivi e minimi in quelli invernali.

La temperatura nelle cavità con queste caratteristiche si mantiene pressoché costante nel corso dell'anno. La circolazione dell'aria resta prevalentemente rivolta verso l'esterno, nei mesi invernali, quando la temperatura della cavità risulta essere più elevata di quella dell'ambiente esterno, favorendo il ricambio dell'aria per effetto camino. Nei mesi estivi, invece, la circolazione resta interdetta in quanto è l'ambiente esterno ad essere più caldo. Si osservi che le stesse motivazioni valgono per le abitazioni. In questo caso, però, le concentrazioni più elevate si riscontrano nei mesi invernali, quando è l'abitazione ad essere l'ambiente più caldo, consentendo l'accumulo del gas al suo interno.

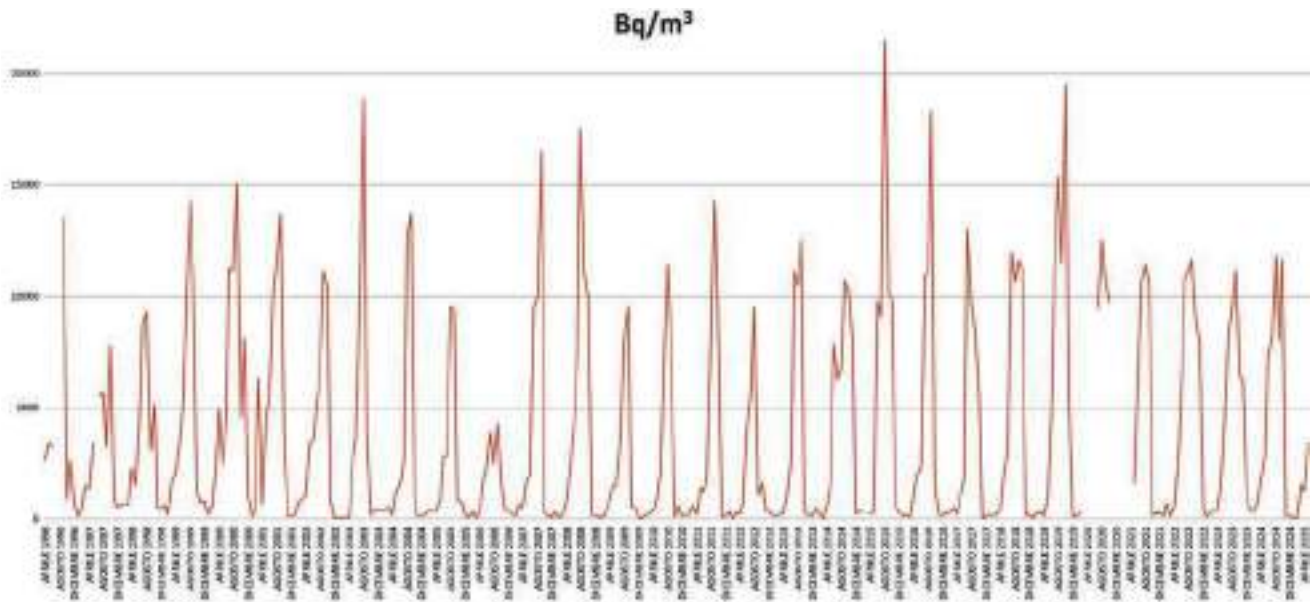


Fig. 6 - Serie trentennale delle misure di concentrazione del radon.

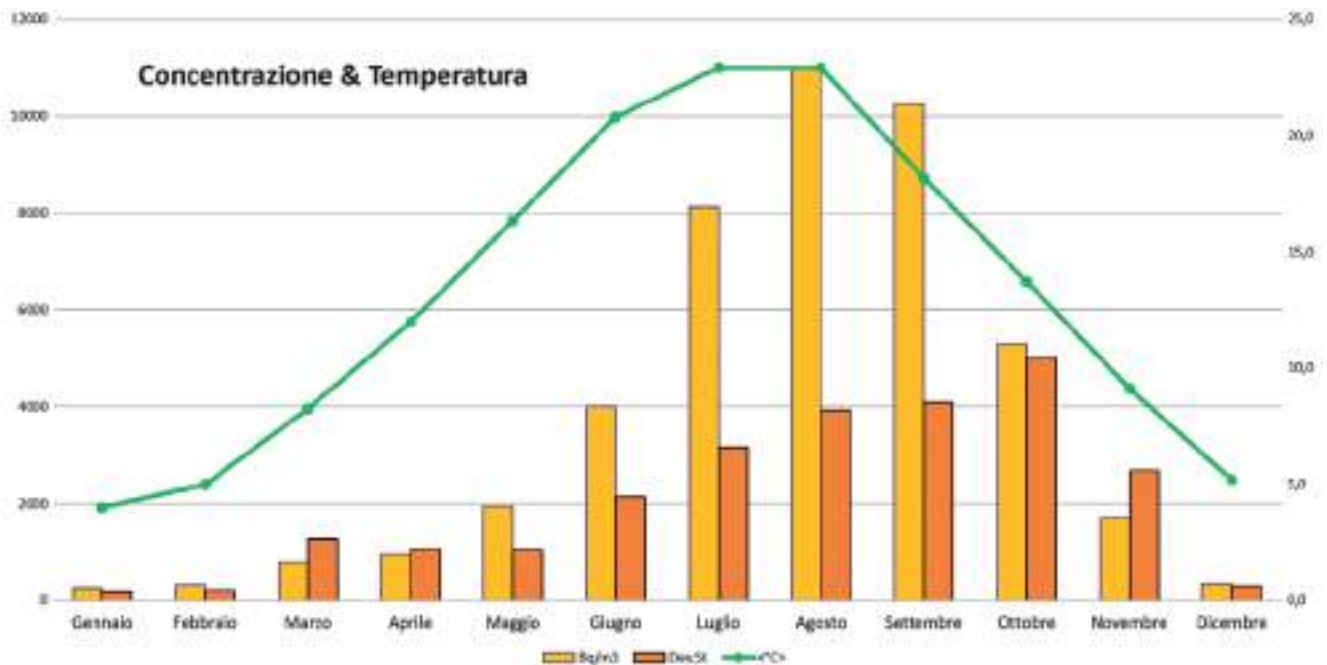


Fig. 7 - Confronto tra concentrazione media mensile del radon e deviazione standard, con l'andamento della temperatura media, su base trentennale.

La temperatura media dell'aria esterna è stata misurata nella capannina meteorologica di Sgonico (Ts), dell'ARPA-FVG, proprietaria dei dati meteorologici. Ciò trova conferma nei risultati in figura 7, dove viene riportato il valore medio della concentrazione, nel mese di riferimento, in funzione del valore della temperatura media dell'aria esterna, sempre per mese di riferimento. Non abbiamo scoperto nulla di nuovo, ma confermato qualcosa di noto. Risulta in particolare apprezzabile l'inerzia termica che ci porta a misurare gli estremi di concentrazione grossomodo un mese dopo i minimi e i massimi di insolazione, cui competono gli analoghi estremi di temperatura dell'aria.

Nel grafico di figura 7 è stata opportunamente inserita anche la deviazione standard, che ci fornisce una chiara informazione circa la variabilità dei valori misurati e che, per comodità di lettura, proponiamo anche nella tabella I.

In definitiva, se da un lato resta evidente che la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno della cavità rappresenta la causa principale del valore di concentrazione misurata, non restano



Fig. 8 - Transiente primaverile.



Fig. 9 - Transiente autunnale.

Fig. 10 - Transiente tardo autunnale (a sinistra).



	Bq/m ³	Dev St
Gennaio	244	169
Febbraio	303	197
Marzo	783	1275
Aprile	943	1063
Maggio	1945	1031
Giugno	4011	2129
Luglio	8124	3164
Agosto	11032	3927
Settembre	10248	4083
Ottobre	5296	5015
Novembre	1688	2686
Dicembre	336	294

Tab. I - Andamento della concentrazione media mensile del radon e deviazione standard, su base trentennale.

altrettanto definite le possibili concause in corrispondenza dei transienti, aspetto su cui potrebbero indirizzarsi ulteriori azioni di misura e di studio, tese, ad esempio, a determinare se esiste una temperatura 'soglia' che attiva il processo di circolazione dell'aria verso l'esterno.

Nelle figure 8, 9 e 10 e in tabella I è possibile osservare che il transiente tra periodo invernale ed estivo (transiente primaverile) sembrerebbe più netto rispetto a quello autunnale. Vi sono poi delle anomalie (ad esempio il valore della concentrazione di marzo 2001, ma non è l'unico) che non sempre trovano riscontro con occasionali variazioni della temperatura, concomitanti alla misura.

Sarebbe necessario intensificare le misure in questi momenti dell'anno, magari con sistemi di misura in continuo, non escludendo le altre possibili variabili in gioco, come ad esempio la presen-

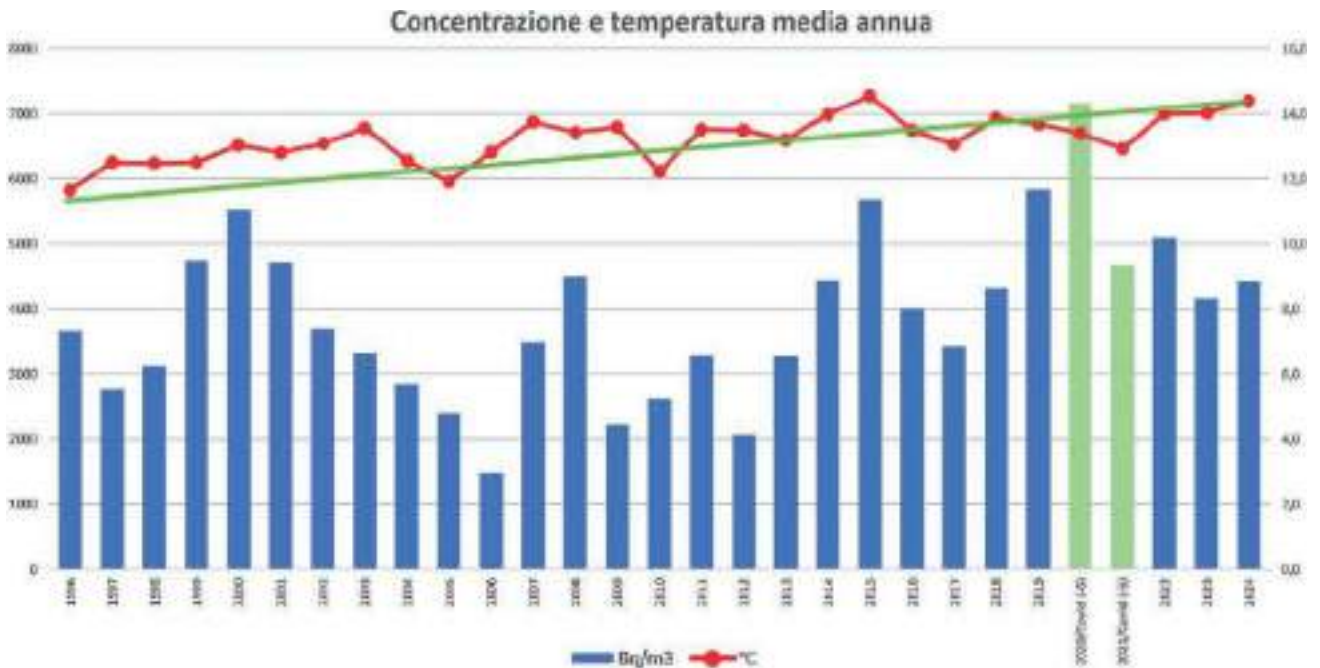


Fig. 11 - Andamento della concentrazione del radon e della temperatura (valori medi annui).

za di acqua per effetto delle precipitazioni o l'azione del vento. Resta in ogni caso chiara la storica variabilità dei parametri meteorologici tipici delle cosiddette "mezze-stagioni".

In figura 11 abbiamo infine riportato l'andamento della concentrazione media annua del radon in funzione del valore della temperatura media annua. Lo scopo era quello di verificare se ci fosse un legame tra il valore della concentrazione media annua con il riscaldamento globale.

È necessario precisare che, a causa della pandemia, non è stato possibile effettuare le numerose misure previste nel periodo invernale 2020-2021. Per questo motivo, i dati relativi agli anni 2020 e 2021 sono inseriti con altra colorazione e vanno "rigettati".

Mentre è evidente l'incremento del trend termico, tra il 1996 e il 2025, non si può affermare altrettanto per la concentrazione del radon. Se ci fosse una correlazione dovrebbe pure essa essere in ascesa, cosa che però non riscontriamo.

Nel prosieguo della ricerca, si tratterà di esaminare meglio la mole di dati acquisiti e di confrontarli, ad esempio, con le altre variabili meteorologiche esterne, cercando possibili correlazioni atte a meglio motivare i risultati ottenuti.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Commissione Grotte "E. Boegan" e il personale della Grotta Gigante. Inoltre, Romeo, Franco, Fabio, Renato, Furio, Angela e Ottone per i diversi contributi, pratici, motivazionali e di esempio concreto, che hanno consentito di perseverare nell'ambito di questa lunga ricerca.

Bibliografia

- VASCOTTO M., 1996 - *Misure di Radioattività ambientale sul Carso triestino*. Tesi di laurea inedita, Giacomich (Relatore), Cucchi (Correlatore), Università degli Studi di Trieste, A.A. 1995/1996.
- CHEN J., 2024 - *A summary of UNSCEAR evaluation on occupational exposure to ionizing radiation and call for more representative data in broader range of occupational sectors*. *Radiation Medicine and Protection*, 5, 1, pp. 11-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666555723000758>.
- COLUCCI R., GROPPI F., 2023 - *Radiazioni che ci circondano*. *Asimmetrie*, 35, 28-30. <https://www.asimmetrie.it/images/pdf/asimmetrie-35.pdf>.
- EURATOM, 2014 - *Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom*. *Official Journal of the European Union*, 57, pp. 1-73.

- UNSCEAR, 2000 - *Sources and effects of ionizing radiation - Annex B: Exposures from natural radiation sources*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, I, pp. 1-156. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2000_Annex-B.pdf.
- UNSCEAR, 2020 - *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation - Annex B: Lung cancer from exposure to radon*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, pp. 1-100. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2019_Annex-B.pdf.
- NRC, 1988 - *BEIR IV Health risks of Radon and other internally deposited alpha-emitters*". NAP. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218124/>.
- THOMAS 2025 - *Deaths from radiation-induced cancer amongst the Hiroshima and Nagasaki bomb survivors*. Journal of Biological Physics and Chemistry, 25, pp. 8-45. <https://www.colbas.org/rad.pdf>.
- BRIENSTENSKY M., AMBROSINO F., SMETNOVA I., THINOVA L., SEBELA S., STEMBERK J., PRISTASOVA L., PLAC., BENAVENTE D., 2022 - *Radon in dead-end caves in Europe*. Journal of Cave and Karst Studies. 84, 2, pp. 41-50. https://caves.org/wp-content/uploads/Publications/JCKS/v84/84_2_41.pdf. Doi: 10.4311/2021ES0101.

Sitografia

- D.lgs 101/2020. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2020/08/12/201/so/29/sg/pdf>.
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059>.
- https://catastogrotte.regione.fvg.it/scheda/724-Grotta_Costantino_Doria.
- [https://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/01_elaborazioni_\(grafici_e_tabelle\)/03_temperatura_aria_a_180_cm/dati_elaborati/dati_rete_micros_dal_1990/tabelle_per_stazione/mensili/02_temperatura_media_giornaliera/05_media_della_temperatura_media_dell'aria_giornaliera/SGONICOM_T18.pdf](https://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/01_elaborazioni_(grafici_e_tabelle)/03_temperatura_aria_a_180_cm/dati_elaborati/dati_rete_micros_dal_1990/tabelle_per_stazione/mensili/02_temperatura_media_giornaliera/05_media_della_temperatura_media_dell'aria_giornaliera/SGONICOM_T18.pdf) (<https://www.meteo.fvg.it/clima.php?ln=>).

Jure Tičar^{1, 2}

Hidden Waste: Investigating Cave Pollution in Slovenia's Bordering Karst Regions

1) ZRC SAZU, Anton Melik Geographical Institute, Ljubljana (Slo); 2) Speleological Association of Slovenia, Ljubljana (Slo)

Abstract. This study examines cave pollution in two bordering statistical regions between Slovenia and Italy, analysing its extent, sources, and environmental impact to support future conservation efforts.

Riassunto. Questo studio esamina l'inquinamento delle grotte in due regioni confinanti tra la Slovenia e l'Italia, analizzandone l'entità, le fonti e l'impatto ambientale per favorire future azioni di conservazione.

Introduction

Cave pollution is a long-standing and significant environmental issue in Slovenia's karst landscapes, reflecting broader societal attitudes toward nature and the trajectory of environmental pressures in the Anthropocene. Historical accounts document intentional cave pollution as early as the 17th century, with VALVASOR (2009) describing the disposal of livestock carcasses into caves during disease outbreaks. However, large-scale contamination emerged after World War II, when rapid economic development and the absence of an organized waste management system led to the widespread use of caves and shafts as illegal dumpsites (PRELOVŠEK, 2011; TIČAR, 2021).

Karst aquifers, which supply drinking water to between one-fifth and one-quarter of the global population (FORD & WILLIAMS, 2007), are especially vulnerable to pollution due to their high permeability, thin soil cover, and rapid subsurface drainage. In Slovenia, around 43% of all drinking water is sourced from karst aquifers (LAH, 1998; BREČKO GRUBAR & PLUT, 2001). Any pollutants deposited in caves can quickly migrate to underground streams and springs, threatening both water quality and the integrity of sensitive subterranean ecosystems (RAVBAR, 2007; GOLDSCHIEDER & DREW, 2007).

Despite the adoption of the *Cave Protection Act* in 2004, which legally designates caves as natural assets of national importance and public property, the enforcement of monitoring and remediation provisions has been inconsistent. The Slovenian Cave Register - an internationally unique archive maintained jointly by the Speleological Association of Slovenia and the Karst Research Institute - listed 15,269 caves in 2024, but information on their condition is incomplete and often outdated. Only 15.8% of entries include a documented assessment of cave status, and methodological inconsistencies hinder reliable nationwide comparisons (CAVE REGISTER, 2024).

Previous studies have often been limited to regional surveys, with highly variable results. For example, 11.3% of caves on the Dolenjska karst were found polluted in the early 1980s (HABE, 1982), while surveys in Kras region documented pollution in 28% of inspected caves (PRELOVŠEK, 2013). TIČAR's (2021) comprehensive doctoral study, based on 6965 caves across 17 Slovenian regions, revealed that 20.0% were polluted, containing an estimated 15,164 m³ of waste. Waste types range from household refuse, plastics, and animal carcasses to hazardous industrial materials and unexploded ordnance, posing diverse ecological and public health risks.

The persistence of such contamination is compounded by the caves' low-energy environment, where decomposition processes are slow, allowing pollutants - particularly plastics and chemical residues - to remain for decades or centuries. Tourism, agriculture, and other land uses can exacerbate the problem, either by direct waste introduction or through contaminated water infiltration.

Growing environmental awareness since the 1970s has inspired numerous cave clean-up campaigns, including large-scale initiatives such as the “*Let’s Clean Slovenia in One Day*” project in 2010, which removed waste from 24 caves. Nevertheless, the overall remediation rate remains low, and new illegal dumping still occurs.

Methodology

Our analysis focuses on two adjacent statistical regions (NUTS 3) straddling the Slovenian-Italian border: Obalno-Kraška (1043 km²) and Primorsko-Notranjska (1456 km²). Together, these regions form a diverse and geologically complex section of the Dinaric karst, encompassing 13 distinct geographical subregions as defined by PERKO (1998). These range from shallow and deep karst plateaus, such as the Kras Plateau and Podgrad Plateau, to fluviokarst valleys shaped by surface-subsurface hydrological interactions, and glaciokarst terrains in high-altitude areas such as Mount Kanin, where past glacial activity has modified the underlying carbonate structure.

The study area is characterized by pronounced altitudinal gradients, from near-sea-level coastal zones in the southwest to alpine karst peaks exceeding 2500 m a.s.l. in the north. This variation influences hydrological regimes, microclimatic conditions, and the vulnerability of karst aquifers to pollution.

Within these two statistical regions, the Slovenian Cave Register lists a total of 4501 documented caves, representing 29.5% of all known caves in Slovenia. The spatial distribution of caves is not uniform: the highest densities are recorded on the Kras Plateau, renowned as a type-locality of karst phenomena; the Podgrad Plateau, which contains multiple vertical shafts with direct waste-disposal access; the Trnovski Gozd Plateau, an elevated karst massif with extensive snow-covered dolines; and Mount Kanin, where glaciokarst processes have generated complex underground networks.

This high concentration of caves, coupled with the regions’ transboundary hydrological connectivity and mixed land-use patterns (including agriculture, forestry, tourism, and transport infrastructure), creates a sensitive environmental setting. The location along the international border further complicates conservation and remediation, requiring coordinated monitoring and management between Slovenian and Italian authorities. The geological heterogeneity, diverse hydrological systems, and dense speleological inventory make this area both a pollution-vulnerability hotspot and a representative case study for broader karst-region environmental assessments.

The study undertook a comprehensive and systematic review of all available entries in the SLOVENIAN CAVE REGISTER (2024), which - at the time of analysis - contained data on 15,269 documented caves. A structured methodological framework was developed, incorporating 60 standardized data categories grouped into seven principal thematic aspects: (1) cave condition (structural integrity, evidence of natural or anthropogenic alterations), (2) cave damage (extent, cause, and type of degradation), (3) pollution type (nature and origin of contaminants), (4) waste classification (hazard potential, persistence, and composition), (5) cave usage (historical and current human activities), (6) entrance morphology (accessibility, physical barriers, and geomorphological features), and (7) data sources (original survey, secondary reports).

Each cave entry was examined individually, cross-referencing information from archival speleological surveys. Inconsistent or incomplete data were reconciled through expert review, and in cases where multiple sources differed, the most recent and verifiable record was prioritized. This approach allowed for both quantitative classification and qualitative interpretation of pollution status.

Drawing on this dataset, the study proposed a refined operational definition of cave pollution: any intentional or incidental alteration of the natural cave environment through the introduction of solid or liquid materials - regardless of biodegradability - that adversely affects groundwater quality, subterranean habitats, or the cave’s natural state. This definition integrates both hydrological and ecological impact considerations, aligning with EU Water Framework Directive principles.

For analytical purposes, caves were categorized into four primary condition classes:
Clean caves - no observable anthropogenic waste or disturbance;
Polluted caves - presence of anthropogenic waste, irrespective of volume or hazard;
Destroyed caves - severely altered morphology or irreversible damage due to quarrying or construction;
Unknown condition - insufficient or absent data for assessment.

Polluted caves were further stratified into three pollution severity levels based on estimated waste volume:

Low pollution (< 1 m³) - scattered or isolated waste items;

Moderate pollution (1-5 m³) - localized accumulations of waste, potentially affecting microhabitats;

Heavy pollution (> 5 m³) - large deposits, frequently including hazardous or persistent materials (e.g., plastics, metals, chemicals).

Where possible, waste was assigned to one or more functional categories (household, agricultural, industrial, construction, biological, hazardous), following modified UNEP waste classification standards. Entrance morphology data were used to assess dumping accessibility, with vertical shafts generally presenting higher contamination risk than horizontal entrances due to ease of disposal from the surface. The final dataset was georeferenced in a GIS environment, enabling spatial analysis of pollution patterns across statistical regions, karst aquifer boundaries, and land-use categories. This geospatial integration supported the identification of pollution hotspots, correlations with human settlement density, and prioritization of remediation efforts.

Results

The survey of 4501 caves in the Obalno-Kraška and Primorsko-Notranjska regions reveals that 3777 caves (83.9%) are classified as clean, 682 caves (15.2%) as polluted, and 42 caves (0.9%)

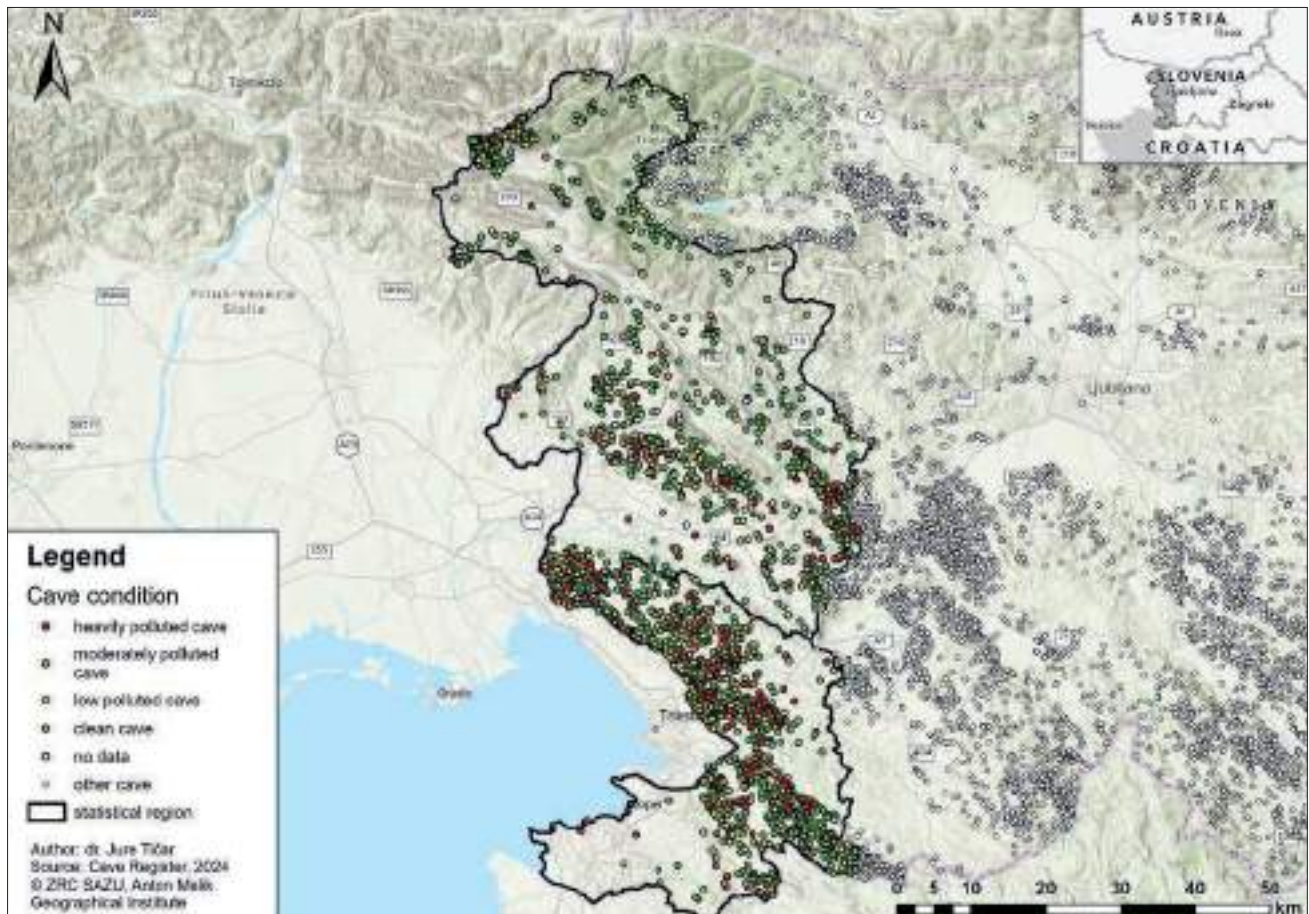


Fig. 1 - Cave condition in the border regions between Slovenia and Italy.

lack sufficient data on pollution status (Fig. 1). This finding sharply contrasts with earlier Cave Register figures, which reported only 2.2% of caves in the area as polluted, underscoring the underestimation in national records. By comparison, Slovenia’s overall national cave pollution rate is 19.9%; however, the regional figure is likely influenced by the prevalence of cleaner alpine karst zones in the dataset, which tend to exhibit lower contamination levels.

Spatial patterns show that pollution is most concentrated in lowland caves near settlements, agricultural land, and road networks, where accessibility and human activity are high. Elevation analysis confirms this trend: clean caves average 1054 m a.s.l., while heavily polluted caves are typically located much lower, at 493 m a.s.l., indicating stronger anthropogenic pressure at lower altitudes.

The severity of pollution varies considerably. Among the polluted caves, 321 (47.1%) exhibit low pollution (<1 m³ waste), often consisting of dispersed litter such as bottles, cans, or small plastic debris. 188 caves (27.6%) fall into the moderate pollution category (1-5 m³), typically associated with localized dumping. The most critical sites are the 173 caves (25.4%) with heavy pollution (>5 m³), where deposits can reach up to 200 m³ of material. Collectively, an estimated 5215 m³ of waste is stored in the polluted caves, averaging 7.6 m³ per site.

Waste classification reveals that non-hazardous waste dominates. Specifically, 457 caves contain primarily inert waste, 409 caves hold communal/household waste, 64 caves contain industrial waste, 124 caves have construction debris, and 5 caves include medical or veterinary waste (Fig. 2). Nevertheless, hazardous waste is present in 139 caves (20.4%), including 98 cases of unexploded ordnance - predominantly World War I munitions - and 24 cases of polluted water infiltration from surface sources.

Of particular concern is the widespread occurrence of plastic waste, documented in 346 caves (50.7%), raising the likelihood of microplastic contamination in subterranean ecosystems (Fig. 3). Animal remains are also frequent, found in 333 caves (48.8%), representing a potential vector for hazardous pathogens. Furthermore, potential human remains were identified in 66 caves (9.7%), necessitating careful archaeological and forensic assessment.

The historical record indicates that cave pollution in the region has been documented as early as 1914, with an average first-recorded date of 1988. While incidents have declined significantly over the last three decades, legacy contamination persists. On a positive note, 33 caves have already undergone clean-up operations (CAVE REGISTER, 2024), demonstrating that remediation is feasible and can yield measurable conservation gains.

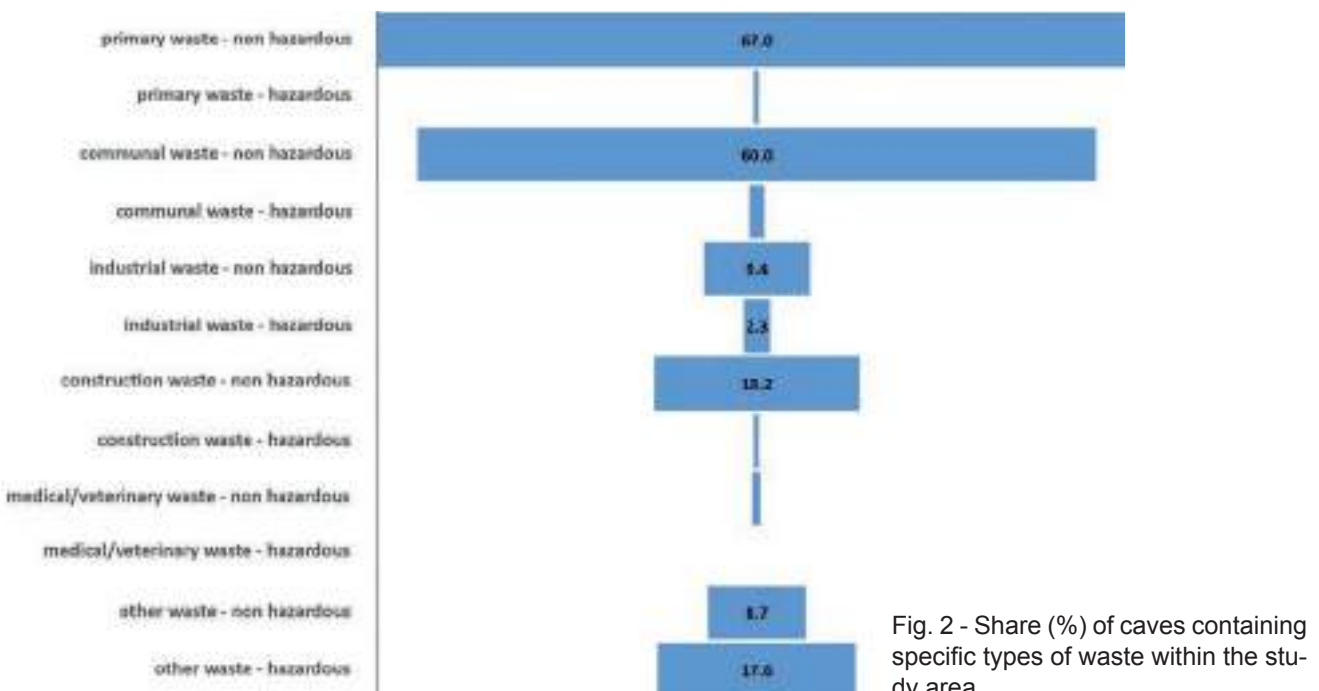


Fig. 2 - Share (%) of caves containing specific types of waste within the study area.

This detailed profile not only quantifies the scope and severity of cave pollution in the region but also identifies priority sites and waste types for remediation, supporting targeted interventions to protect karst groundwater and subterranean biodiversity.

Discussion

Over the last century, and particularly after World War II, human activity has profoundly altered the underground karst environment. The post-war period saw a sharp rise in both the quantity of waste and the number of polluted caves, largely driven by industrialization, agricultural expansion, and the absence of effective waste management. This trend has had direct consequences for the region's karst aquifers, which are highly permeable due to their carbonate rock composition. As a result, pollutants deposited in caves can rapidly migrate into groundwater systems, undermining the quality of drinking water and threatening ecosystems within water protection zones.

The high vulnerability of karst groundwater amplifies the risks posed by hazardous waste. The presence of plastics in over half of polluted caves raises concerns about long-term microplastic contamination, while batteries, electronic devices, and other hazardous materials can leach toxic substances. Additional risks stem from the discovery of unexploded ordnance and other dangerous legacy pollutants, which represent both an environmental and public safety hazard.

Despite legal protection under the Cave Protection Act, enforcement remains inadequate. Weak inspection regimes, the impunity of polluters, and insufficient funding have allowed the problem to persist. Cleanup initiatives are rare, and when undertaken, they typically focus on low-waste caves, neglecting the heavily polluted sites that present the greatest risk. Without a systemic remediation strategy, legacy contamination continues to accumulate alongside ongoing illegal dumping.

The data suggest that the distribution of pollution is not random but strongly linked to accessibility. Lowland caves near settlements and roads show the highest contamination rates, while heavily polluted caves are situated at significantly lower elevations than clean ones (Fig. 4). This indicates a clear anthropogenic footprint and highlights the need for targeted interventions.

To address this, a coordinated, well-funded program of inspection, enforcement, and large-scale remediation is essential. Cross-border cooperation with Italian stakeholders is equally critical, given the hydrological connectivity of the shared karst systems. Only through sustained, systematic action can the long-term degradation of these sensitive subterranean environments be reversed.



Fig. 3 - Large quantities of discarded truck tires in "Brezno 2 pri Korenu" (Reg. No. 1501), Trnovski Gozd Plateau.

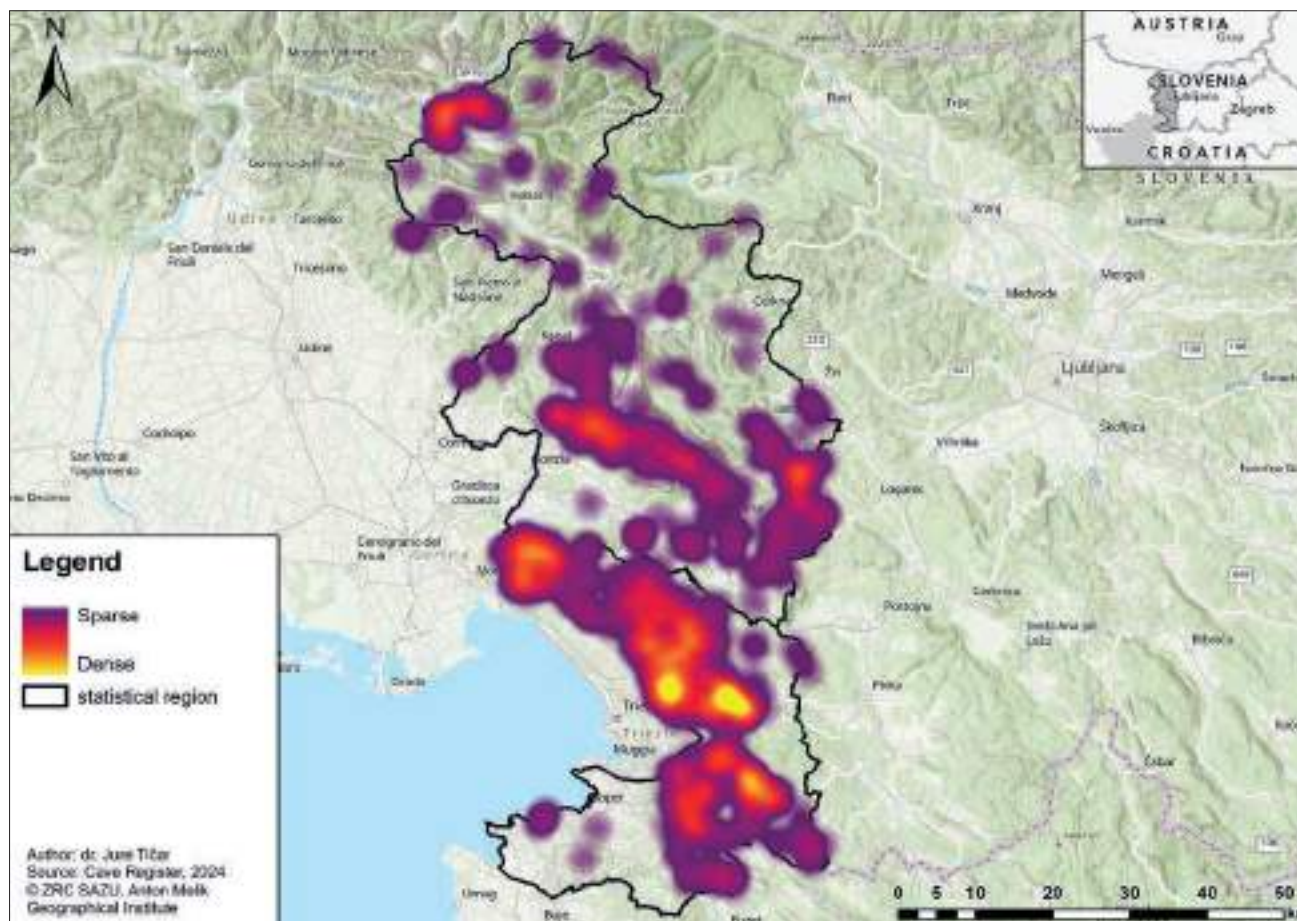


Fig. 4 - Heat map of polluted caves in the border regions between Slovenia and Italy.

Bibliography

- BREČKO GRUBAR, V., PLUT, D., 2001 - *Kakovost virov pitne vode v Sloveniji*. Ujma, 14-15, 1, pp. 238-244.
- CAVE PROTECTION ACT, 2004 - *Official Gazette of the Republic of Slovenia*. N. 2/04. Ljubljana.
- CAVE REGISTER, 2024 - ZRC SAZU, Karst Research Institute and Speleological Association of Slovenia.
- FORD, D, WILLIAMS. P., 2007 - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester. John Wiley & Sons, 562 pp.
- GOLDSCHIEDER, N., DREW, D., 2007 - *Methods in karst hydrogeology*. Leiden. Taylor & Francis, 280 pp.
- HABE, F., 1982 - *Onesnaževanje jam Dolenjskega krasa*. Dolenjski kras, 1, pp. 38-41
- LAH, A., 1998 - *Voda - vodovje: poglobitvi življenjski vir narave in gospodarstva*. Ljubljana. Svet za varstvo okolja Republike Slovenije, 63 pp.
- PERKO, D. 1998 - *The Regionalization of Slovenia*. Geografski Zbornik 38, 1, pp. 11-57.
- PRELOVŠEK, M. 2011 - *Pollution and cleanup of karst caves in Slovenia*. In: PRELOVŠEK, M., ZUPAN HAJNA, N. (eds). Pressures and protection of the underground karst: cases from Slovenia and Croatia, pp. 101-111. ZRC SAZU, Karst Research Institute.
- PRELOVŠEK, M., 2013 - *Projekt 99: popis onesnaženosti jam na Krasu*. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU.
- RAVBAR, N., 2007 - *The protection of karst waters*. Carsologica 6. Postojna. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, 254 pp.
- TIČAR, J., 2021 - *Pollution of karst caves in selected Slovenian regions: an examination of the spatial influential factors and establishment of the priority remediation plan*. Doctoral Thesis. Faculty of Humanities, University of Primorska.
- VALVASOR, J.V., 2009 - *Slava vojvodine Kranjske*. Ljubljana. Zavod Dežela Kranjska, 825 pp.

Corresponding Author Jure Tičar: jure.ticar@zrc-sazu.si, +386 1 470 65 58

Franco Gherlizza¹

Censimento delle grotte naturali della provincia di Trieste interessate da inquinamento, abbandono di rifiuti, ostruite o distrutte

1) Club Alpinistico Triestino, Trieste

Abstract. This report details the work of census of polluted, obstructed or destroyed caves present in the province of Trieste and the work of cleaning and environmental restoration of some of them.

Riassunto. Il presente articolo descrive il lavoro di censimento delle grotte inquinate, ostruite o distrutte presenti nella provincia di Trieste e il lavoro di pulizia e ripristino ambientale di alcune di esse.

Breve cronistoria

A partire dal 1990, in seguito all'intervento di pulizia nella Fessura del Vento (1989), il Club Alpinistico Triestino ha avviato una campagna di informazione sul tema delle grotte a rischio ambientale. In collaborazione con il *Goethe Institut*, venne tenuto un ciclo di conferenze sul tema che, purtroppo, non riuscì a produrre l'effetto sperato nonostante l'interesse di alcuni giornalisti locali soprattutto sul caso dell'Abisso della Cava Boschetti (cfr. GHERLIZZA, 1983 e successivi articoli sul quotidiano locale). Da quell'anno, il CAT ha tenuto aggiornato l'elenco delle grotte inquinate, con rifiuti, ostruite o distrutte, segnalando, di volta in volta, i soggetti interessati al Catasto Regionale delle Grotte del Friuli Venezia Giulia che provvedeva, qualora l'informazione risultasse inedita, all'inserimento delle modifiche nella scheda catastale.

Nel 2000 è iniziata la catalogazione differenziata di queste grotte e, all'epoca, vennero individuate 383 cavità che presentavano degradi di vario tipo.

Dal gennaio 2002 si è passati al censimento di dette grotte con l'aggiunta di una scheda personalizzata, presso il Catasto Regionale delle Grotte, che riporta sia i dati catastali aggiornati che la situazione di degrado riscontrato al momento del sopralluogo.

Oggi il fenomeno si è sensibilmente ridotto, grazie esclusivamente all'impegno volontaristico di alcune associazioni speleologiche (CAT, GSSG, SAG, SAS e Grmada) e non (Mi.Ti., SOS Carso).



Fig. 1 - Carcassa di un'autovettura nel Pozzo di Borgo Grotta Gigante (6/131VG; foto S. Vianello).



Fig. 2 - Cumulo di immondizie varie sul fondo dell'Abisso di Precenicco (539/2709 VG; foto S. Vianello).



Fig. 3 - Sotto, a sinistra: resti di molti animali nel Pozzo presso Ceroglie (1427/4367 VG; foto S. Vianello).

Nell'elenco che segue, aggiornato dal Gruppo Grotte del Club Alpinistico Triestino al 1° giugno 2025, vengono segnalate per la Provincia di Trieste 462 casi dei quali: 17 grotte inquinate; 77 grotte con abbandono di rifiuti; 349 grotte ostruite; 19 grotte distrutte.

Siti interessati dal censimento

Dopo aver valutato le varie situazioni che interessavano ogni singola cavità naturale, le grotte sono state suddivise in quattro distinte categorie: inquinate - con abbandono di rifiuti - ostruite - distrutte.

Grotte inquinate

I casi più gravi, e persistenti, sono rappresentati dallo scarico di grandi quantità di bitumi e di altri derivati dall'industria petrolchimica. Non mancano episodi di inquinamento dovuto allo scarico di materiali oleosi o, comunque, di

accessori connessi all'industria automobilistica (batterie, filtri d'olio, olii esausti, pneumatici, ecc.).

In queste situazioni diventa difficile (e pericoloso) sia il recupero dei materiali versati all'interno che il conseguente ripristino ambientale delle cavità interessate (in buona parte si tratta di pozzi anche di notevole profondità).

In questa categoria abbiamo aggiunto anche le grotte nelle quali sono state incanalate o, purtroppo, si continuano a disperdere le acque nere.

Grotte con abbandono di rifiuti

I casi più frequenti sono quelli dovuti allo scarico di immondizie d'uso domestico (frigoriferi, lavatrici, divani, ecc.), di veicoli (automobili, motorini, biciclette, ecc.: Fig. 1) e di materiali inerti provenienti dall'edilizia che, nella maggior parte dei casi, risalgono agli anni tra il '60 e l'80 (Fig. 2).

Nel tempo, si sono riscontrate anche situazioni che riguardavano l'occultamento di carcasse animali (spesso cani) pratica, per fortuna, quasi del tutto scomparsa (Fig. 3).

Fig. 4 - Basovizza (Trieste):
28 aprile - 19 maggio 2013.
Pulizia dell'Abisso di Padri-
ciano (foto F. Gherlizza).



Fig. 5 - Sotto, a destra: targa
posta a ricordo della pulizia
effettuata nell'Abisso di Pa-
driciano. (foto S. Vianello)

Grotte ostruite

A questa categoria appartengono soprattutto le grotte scoperte nel corso dei lavori per la viabilità (sia su gomma che su rotaia) o per la posa di cavi e tubature sotterranee (vedi oleodotto).

Alcune sono state riempite dai contadini in conseguenza allo spietramento di terreni agricoli o in seguito al taglio e allo sfalcio della vegetazione.

Alcune sono venute alla luce durante gli scavi per le fondamenta di abitazioni private e soltanto in alcuni casi è stato possibile produrre una documentazione. Trovandosi all'interno della proprietà privata, diventa problematico determinare lo stato di conservazione e l'eventuale presenza di acque di percolazione o di "trasformazione" in pozzo nero.



Grotte distrutte

Di queste grotte, se abbiamo un po' di fortuna, rimane il rilievo e la descrizione. Rare le immagini. Sono cavità "mangiate" dallo sbancamento delle cave, dai tracciati delle autostrade, da opere ad uso civico (case, campi sportivi, ecc.) o dallo sviluppo di zone industriali che hanno causato la loro completa distruzione.

Note conclusive

Il problema dell'inquinamento delle grotte sul nostro Carso non può riguardare soltanto la speleologia locale, ma deve essere attenzionato e portato a conoscenza anche agli enti preposti alla tutela e alla conservazione del territorio. Una sinergia più marcata tra questi ultimi e la componente volontaristica, in gran parte fornita dai gruppi speleologici, sarebbe di notevole supporto per poter continuare nell'opera di bonifica del sottosuolo carsico.

Non dimentichiamo (credo sia impossibile farlo) che tutto ciò che va a finire nelle grotte, prima o poi si riversa nella falda acquatica e, di conseguenza, nella fornitura idrica che assiste la nostra città (e non solo) o nelle sorgenti che si dirigono direttamente verso il mare.

Una mirata informazione del fenomeno è auspicabile che venga introdotta già a livello scolastico, essendo i nostri giovani molto interessati e attenti ai temi che riguardano l'ecologia in genere.

Questo è il nostro auspicio.

Ordine cronologico per le pulizie delle grotte

- 6 maggio 1989, Fessura del Vento (Club Alpinistico Triestino)
- 1994, Grotta del Bosco dei Pini (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 1994, Grotta Priamo (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 23 dicembre 1994, Grotta Azzurra (Club Alpinistico Triestino e Società Adriatica di Speleologia)
- 1995, Grotta del Monte dei Pini (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 1996, Pozzo ad ESE di Basovizza (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 1998, Grotta Verde (Gruppo Triestino Speleologi)
- 1999, Pozzo dei Colombi di Basovizza (Tei spa, Programma Interreg) (parziale)
- 11 febbraio 2001, Caverna presso Aurisina / Jama na Gmajni (Gruppo Sportivo "Grmada")
- 28-29 settembre e 5, 6, 12 ottobre 2002, Grotta Nemez (Federazione Speleologica Triestina)
- 26 settembre 2005, Grotta degli Occhiali (Federazione Speleologica Triestina e Legambiente)
- 24 settembre 2006, Caverna a NE di Duino (Federazione Speleologica Triestina)
- 24 settembre 2006, Pozzetto a W di Precenico (Federazione Speleologica Triestina)
- 13 maggio-1 luglio 2007, Abisso Plutone (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 30 settembre 2007, Caverna del Cimitero Militare (Federazione Speleologica Triestina)
- 2007, Grotta Bosco dei Pini (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 2007, Caverna III ad Est di Basovizza (Regione FVG) (parziale)
- 27-28 settembre 2008, Grotta dei Colombi di Duino (Federazione Speleologica Triestina)
- 20 dicembre 2009, Grotta Natale (Club Alpinistico Triestino)
- 20 marzo 2010, Grotta delle Spine (Gruppo Sportivo "Grmada")
- 12 giugno 2010, Grotta Bac (Gruppo "Beppe Grillo")
- 27 giugno 2010, Caverna dell'Infermeria (Federazione Speleologica Isontina)
- 18 dicembre 2011, Grotta Noè (Club Alpinistico Triestino)
- 21-23 febbraio 2013, Grotta Teresiana (Cooperativa Gemina con G.S. "Flondar" e Club Alpinistico Triestino)
- 28 aprile-19 maggio 2013, Abisso di Padriciano (Club Alpinistico Triestino)
- 2014, Grotta Lesa / Lesa Pečina (Azienda agricola Lupinc di Prepotto)
- 1 febbraio 2014, Grotta Bac (Club Alpinistico Triestino)
- 2 febbraio 2014, Grotta della Tartaruga (Commissione Grotte "Eugenio Boegan")
- 28 settembre 2014, Bus de la Lum (USP e gruppi del Veneto)
- 4-5 ottobre 2014, Grotta dei Morti (Club Alpinistico Triestino)
- 31 marzo 2015, Grotta Romana (Club Alpinistico Triestino e Scuola Media Caprin)
- 6-7 giugno 2015, Abisso del Diavolo (Club Alpinistico Triestino)
- 1 agosto 2015, Grotta di San Lorenzo (Club Alpinistico Triestino)
- 3 ottobre 2015, Pozzo Mattioli (Federazione Speleologica Regionale FVG) (parziale)
- 11 ottobre 2015, Caverna di Aurisina (Club Alpinistico Triestino e Decathlon)
- 19 ottobre 2015, Abisso di Ferneti (Club Alpinistico Triestino)
- 13 febbraio 2016, Grotta dell'Elmo (Club Alpinistico Triestino)
- 30 giugno 2016, Abisso Silvano Zulla (Club Alpinistico Triestino)
- 31 agosto 2016, Grotta del Carbone (Club Alpinistico Triestino)
- 16 ottobre 2016, Pozzo presso Precenico (Club Alpinistico Triestino / Associazione MiTi / ICS)
- 27 novembre 2016, Abisso fra Ferneti e Orle (Società di Studi Carsici "A. F. Lindner")
- 25 febbraio 2017, Abisso presso Santa Croce (Gruppo Speleologico "San Giusto")
- 1 aprile 2017, Riparo Marchesetti (Club Alpinistico Triestino / Associazione MiTi / ICS) (parziale)
- 18 giugno 2017, Pozzo presso Sgonico (Società di Studi Carsici "A.F. Lindner")
- 21 novembre 2017, Grotta Benedetto Lonza (Club Alpinistico Triestino)
- 25 marzo-26 novembre 2017, Jablenza Jama (Club Alpinistico Triestino & Friends)
- Aprile 2018, Pozzo presso Basovizza (Società di Studi Carsici "A. F. Lindner")
- 22 luglio 2018, Pozzo ad ESE di Basovizza (SOS Carso / Società Adriatica di Speleologia)
- 20 agosto 2018, Grotta Mattioli (Club Alpinistico Triestino)
- 16 dicembre 2018, Vasca d'acqua nella Grotta Azzurra di Samatorza (SOS Carso)
- 2 aprile-22 dicembre 2018, Pozzo presso Gabrovizza (Società di Studi Carsici "A. F. Lindner")
- 30 marzo 2019, Burrone a NW di Trebiciano (SOS Carso / Società Adriatica di Speleologia)

- 31 marzo 2019, Gr. a S del Casello ferr. di Ferneti (SOS Carso / Soc. Adriatica di Speleologia)
- 2 aprile-22 dicembre 2018, Pozzo presso Gabrovizza (Società di Studi Carsici "A. F. Lindner")
- 10 aprile-22 ottobre 2019, Grotta Pocala (Club Alpinistico Triestino)
- 13 aprile 2019, Grotta ai piedi del Monte Cocusso (Associazione MiTi / Associazione Alt / Club Alpinistico Triestino)
- 15 settembre-12 ottobre 2019, Grotta presso Prosecco (SOS Carso e Società Adriatica di Speleologia)
- 21 settembre 2019, Grotta 2 a SW di Monteprato (Circolo Speleologico Idrologico Friulano)
- 15 settembre 2019, Pozzo ad ESE di Basovizza (SOS Carso / Società Adriatica di Speleologia)
- 12 giugno 2020, Grotta Pocala (Club Alpinistico Triestino)
- 11 maggio 2021, Grotta Bac (Club Alpinistico Triestino)
- 30 marzo 2022, Grotta degli Sterpi / Grotta dei Tesori / Grotta dei Ciclami (Club Alpinistico Triestino)
- 1 aprile 2022, Grotta sopra Chiusa (Club Alpinistico Triestino)
- 10-19 giugno 2022, Grotta Vittoria (Club Alpinistico Triestino)
- 16 ottobre 2022, Cavernetta tra Basovizza e Padriciano (Club Alpinistico Triestino / GAAST)
- 28 ottobre 2023, Cavernetta presso il Bivio per Samatorza (Club Alpinistico Triestino)
- 30 marzo 2024, Caverna presso Aurisina (Club Alpinistico Triestino)
- 1 giugno 2025, Abisso Rodolfo Battelini (Club Alpinistico Triestino).

Bibliografia Cronologica

- CATASTO REGIONALE DELLE GROTTTE DEL FRIULI VENEZIA GIULIA - Schede Catastali.
- GARIBOLDI I., 1926 - *Catalogo delle Cavità Carsiche della Regione Giulia*. Istituto Geografico Militare.
- FARAONE E., 1969 - *Una grotta distrutta: La Grotta del Diavolo Zoppo (225 VG)*. Alpi Giulie, vol. 64, Trieste.
- FARAONE E., 1975 - *Grotte di interesse preistorico distrutte o danneggiate sul Carso Triestino dalla fine della guerra ad oggi*. Atti 1° Convegno di Speleologia del Friuli Venezia Giulia, Trieste 8-9 dicembre 1973.
- PIERI N. & SPINELLA G., 1981 - *Il problema dell'inquinamento ipogeo nelle cavità del Carso triestino*. Atti 1° Convegno sull'ecologia dei territori carsici. 27-28-29 aprile 1979. Ed. La Grafica.
- RADACICH M., 1982 - *Elenco di cavità d'interesse archeologico distrutte, inagibili o in procinto di esserlo e le cause che hanno contribuito a questo degrado speleo-archeologico*. Atti del V Convegno Regionale di Speleologia del Friuli Venezia Giulia.
- GHERLIZZA F., 1983, - 100 Gruppo Grotte del C.A.T. ed., pp. 1-208.
- DALLE MULE R., 1990 - *Pulizie di primavera*. Tuttocat, Bollettino del Club Alpinistico Triestino, numero unico 1990, p. 6.
- GEREBIZZA A., 1990 - *Pulizia "a fondo" della Fessura del Vento*. La Nostra Speleologia, numero unico 1989-1990, pp. 109-111.
- MONACO L., 1990 - *Per qualche cartina in meno*. Tuttocat, Bollettino del Club Alpinistico Triestino, numero unico 1990, pp. 10-11.
- MAIS K., 1990 - *La città, il traffico, il Carso, il mare*. Relazione dattiloscritta tenuta dal prof. Mais (Università di Vienna) in occasione dell'incontro "Salvaguardia delle grotte - salvaguardia dei paesaggi carsici", Goethe Institut.
- CAROSI R., 1991 - *Le grotte e l'inquinamento*. El Teston de Grotta, a. I, n. 1, pp. 36-43.
- RADACICH D. & RADACICH M., 1993 - *Censimento e quantificazione del degrado ipogeo della Venezia Giulia*. El Teston de Grotta, a. II, n. 2.
- RADACICH M. & SPINELLA G., 2004 - *La lista nera*. La Nostra Speleologia, Numero unico 2004, pp. 65-80.
- BRUN C., 2009 - *Grotta Natale (Carso triestino) Un nuovo paesaggio...* Tuttocat, Bollettino del Club Alpinistico Triestino, numero unico 2008, pp. 11-12.
- VIANELLO S., 2014 - *Pulizia dell'Abisso di Padriciano*. Tuttocat, Bollettino del Club Alpinistico Triestino, numero unico 2013, pp. 20-21.
- VIANELLO S., 2015 - *Operazione di pulizia all'Abisso del Diavolo*. Cronache Ipogee, pp. 5-6, giugno 2015.
- PUGLIESE A., 2016 - *La Grotta dell'Elmo messa in sicurezza e pulita*. Cronache Ipogee, p. 1, febbraio 2016.
- GHERLIZZA F., 2016 - *Recupero ambientale dell'Abisso Zulla sul Carso triestino*. Cronache Ipogee, p. 3, giugno 2016.
- GHERLIZZA F., 2016 - *Intervento di pulizia nella Grotta del Carbone (Pese - Pesek)*. Cronache Ipogee, p. 9, agosto 2016.

- GASPARO D., 2016 - *Progetto "grotte pulite". Liberato dai rifiuti il Pozzo presso Precenico*. Cronache Ipogee, pag. 7, ottobre 2016.
- MIANI A., 2016 - *Pulito l'Abisso fra Ferneti e Orle*. Cronache Ipogee, pp. 2-3, dicembre 2016.
- GHERLIZZA F., 2017 - *Censimento delle grotte a rischio ambientale. Aggiornamento al 31 dicembre 2016*. Tuttocat, Bollettino del Club Alpinistico Triestino, numero unico, dicembre 2016, pp. 30-31.
- PUGLIESE A., 2017 - *Pulizia e messa in sicurezza della Grotta dell'Elmo*. Tuttocat, Bollettino del Club Alpinistico Triestino, numero unico, dicembre 2016, p. 32.
- GASPARO D., 2017 - *Prima pulizia del Riparo Marchesetti a Sistiana*. Cronache Ipogee, pp. 1-2, aprile 2017.
- MIANI A., 2017 - *Pulito dai rifiuti anche il "Pozzo presso Sgonico"*. Cronache Ipogee, pp. 1-2, giugno 2017.
- GHERLIZZA F., 2017 - *Ripristino ambientale della Grotta Benedetto Lonza*. Cronache Ipogee, pp. 8-9, novembre 2017.
- GASPARO D., 2018 - *Prima pulizia del Riparo Marchesetti a Sistiana (TS)*. Tuttocat, numero unico, dicembre 2017, pp. 21-24.
- GHERLIZZA F., 2018 - *Ripristino ambientale della Grotta Benedetto Lonza*. Tuttocat, numero unico, dicembre 2017, pp. 25-26.
- DOLCE S., 2018 - *Pulizia a fondo e messa in sicurezza della Grotta Mattioli a Gropada (Trieste)*. Tuttocat, numero unico, dicembre 2018, p. 14.
- GHERLIZZA F. & VIANELLO S., 2019 - *Censimento delle grotte naturali della Regione Friuli Venezia Giulia interessate da inquinamento, abbandono di rifiuti, ostruite o distrutte*. La Nostra Speleologia, numero unico, pp. 13-54, Trieste.
- PERHINEK D., 2019 - *Jablenza Jama. Ma ... il diavolo è dentro o fuori la grotta?* La Nostra Speleologia, numero unico, pp. 55-68, Trieste.
- PREMIANI F., 2019 - *Grotte e rifiuti*. Atti del Convegno Speleo2018, pp. 13-20.
- CANU A., 2023 - *Svuotata dai rifiuti anche la Grotta Vittoria di Aurisina*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2022, pp. 44-46.
- DOLCE S., 2023 - *Nuove indagini sullo stato di degrado della Grotta presso la 17 VG* - Tuttocat, numero unico online, dicembre 2022, p. 39.
- FERRARI R., 2023 - *Pulite tre grotte del Carso triestino: Caverna degli Sterpi, Grotta dei Tesori e Caverna dei Ciclami* - Tuttocat, numero unico online, dicembre 2022, pp. 40-41.
- FERRARI R. & GHERLIZZA F., 2023 - *Pulizia della Cavernetta tra Basovizza e Padriciano (4768/3915 VG) / Grotta dei tre Pini (1921-4641 VG)*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2022, pp. 47-50.
- GHERLIZZA F., 2022 - *Pulizia primaverile nella Grotta sopra Chiusa*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2022, pp. 42-43.
- GHERLIZZA F., 2022 - *Terminate le operazioni di pulizia nella Caverna Pocala di Aurisina*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2022, p. 51.
- GHERLIZZA F., 2024 - *Pulizia della Cavernetta presso il Bivio di Samatorza (8418/6706 VG)*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2023, pp. 40-41.
- MARANZANA E., 2024 - *Pulizia della Grotta sopra Chiusa: quando la gita diventa... green*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2023, pp. 37-39.
- GHERLIZZA F., 2025 (in corso di stampa) - *Pulizia della Caverna presso Aurisina*. Tuttocat, numero unico online, dicembre 2024, p. 94.
- RIOS A F., 2025 - *Pulizia dell'Abisso Battelini (1497/4401 VG)*. Cronache Ipogee, n. 6, pp. 12-14.

Gregor Aljančič¹, Magdalena Aljančič¹, Edgardo Mauri²

Contributi alla ricerca, alla conservazione,
alla divulgazione culturale del proteo (*Proteus anguinus*)
e del suo habitat vulnerabile:
iniziative del Laboratorio della Grotta Tular e dello Speleovivarium

1) Jamski laboratorij Tular - Laboratorio carsico di Tular, Kranj (Slo); 2) Società Adriatica di Speleologia, Trieste

Abstract. Karst subterranean habitats host a unique but fragile biodiversity, highly threatened by human activities. Their protection requires research, monitoring, and public awareness. Speleology contributes both to scientific study and to education, bringing this hidden world closer to public attention and supporting conservation efforts. Educational and museum centres further enhance public understanding and promote best practices. We present two exemplary cases: the Tular Cave Laboratory with its SOS Proteus Information Centre in Kranj, and the Speleovivarium Erwin Pichl of the Adriatic Speleological Society in Trieste. Over decades, both institutions have combined research, education, and conservation, becoming key references for the protection of *Proteus anguinus* and its subterranean habitat.

Riassunto. Gli habitat sotterranei carsici ospitano una biodiversità unica ma fragile, fortemente minacciata dalle attività umane. La loro tutela richiede ricerca, monitoraggio e sensibilizzazione pubblica. La speleologia contribuisce sia allo studio scientifico sia all'educazione, avvicinando questo mondo nascosto all'attenzione del pubblico e sostenendo gli sforzi di conservazione. I centri educativi e museali ampliano ulteriormente la comprensione pubblica e promuovono le buone pratiche. Presentiamo due casi esemplari: il Laboratorio carsico di Tular, con il suo Centro informativo SOS Proteus a Kranj, e lo Speleovivarium Erwin Pichl della Società Adriatica di Speleologia a Trieste. Entrambe le istituzioni, nel corso dei decenni, hanno unito ricerca, educazione e conservazione, divenendo punti di riferimento per la tutela di *Proteus anguinus* e del suo habitat sotterraneo.

Introduzione

Gli habitat sotterranei carsici custodiscono un'incredibile biodiversità. Gli organismi che li popolano sono altamente specializzati, adattati a un ambiente buio, relativamente stabile ma vulnerabile, strettamente connesso con la superficie. In questo contesto si distingue il proteo (*Proteus anguinus*), specie simbolo della fauna sotterranea europea. La sua biologia e la sua conservazione richiedono strategie mirate e metodologie complesse, rese difficili dall'inaccessibilità dell'ambiente e dall'oscurità perpetua (Fig. 1).

Oggi, l'osservazione di queste specie criptiche progredisce grazie a tecnologie avanzate e a laboratori specializzati. Sebbene sia rigorosamente protetto dalla legge, la tutela del proteo e del suo habitat non può basarsi unicamente sulla legislazione. La ricerca scientifica, il monitoraggio a lungo termine e la divulgazione culturale costituiscono pilastri essenziali per progetti di conservazione sostenibile. La speleologia, come disciplina esplorativa e al tempo stesso comunità scientifico-culturale, svolge un ruolo fondamentale nel rivelare ciò che altrimenti resterebbe invisibile. Musei e centri dedicati alla fauna sotterranea contribuiscono anch'essi accrescendo la consapevolezza pubblica e sostenendo la ricerca.

Lo studio del proteo affascina da lungo tempo gli scienziati. Per superare l'inaccessibilità del suo habitat e consentire osservazioni a lungo termine, vennero creati laboratori in grotte facilmente accessibili. Tra il 1928 e il 1931, i professori Albin Seliškar e Roman Kenko fondarono il laboratorio biospeleologico nella Grotta di Podpeška (vicino a Podpeč, Grosuplje, Slo). Poco dopo, nel 1930,



Fig. 1 - Studio e documentazione nell'ambiente estremo della Grotta di Planina (dic 2018; foto Mauri).

Fig. 1 - Study and documentation in the extreme environment of Planina Cave (December 2018; photo Mauri).

Ivan Andrej Perko istituì la Stazione biospeleologica nella grotta di Postumia, realizzando inventari faunistici e studi *ex situ* sui protei. Il laboratorio fu chiuso nel 1960 e, nel 2002, ricostituito come Vivarium Proteus - centro educativo delle grotte di Postumia - su iniziativa dello speleobiologo Slavko Polak.

Nel 1948, a Moulis (Ariège, Francia), lo zoologo Albert Vandel fondò il Laboratoire souterrain du CNRS, considerato il prototipo dei moderni centri di ricerca sotterranea, dove dal 1955 furono avviati con successo allevamenti e osservazioni a lungo termine del proteo. Nel 1960, il prof. Marko Aljančič istituì il Jamski laboratorij Tular (Laboratorio carsico di Tular) nella Grotta di Tular a Kranj, in Slovenia, segnando l'inizio di un'importante linea di ricerca sui protei e sulla fauna sotterranea.

Il presente contributo si concentra su due esperienze complementari: il Laboratorio carsico di Tular a Kranj e lo Speleovivarium Erwin Pichl a Trieste, gestito dalla Società Adriatica di Speleologia, entrambe realtà che integrano valori scientifici, storici e culturali per promuovere lo studio e la diffusione delle conoscenze sul proteo.

Laboratorio carsico di Tular

Fondato dal prof. Marko Aljančič sotto la custodia dell'Istituto biologico della Facoltà di Medicina (Università di Lubiana) e con il sostegno della Città di Kranj, il Laboratorio carsico di Tular nacque per studiare la fauna cavernicola in condizioni controllate, in particolare per consentire osservazioni a lungo termine del proteo, altrimenti difficilmente accessibile nel suo habitat naturale (Fig. 2).

Dopo il 1976, il laboratorio ha proseguito il proprio programma in modo indipendente, concentrandosi sull'ecologia e sul comportamento del proteo, sulla sua distribuzione nel Carso Dinarico e sulla storia della ricerca, promuovendo al contempo la consapevolezza pubblica sulla vulnerabilità della specie, in Slovenia e nel mondo.

Il Laboratorio di Tular sviluppa metodi innovativi e non invasivi per superare l'inaccessibilità dell'habitat del proteo, come l'uso di tecniche video a infrarossi per documentarne il comportamento e l'applicazione pionieristica del rilevamento del DNA ambientale per monitorarne la presenza nelle acque sotterranee. Questi studi offrono un quadro di riferimento fondamentale per approfondire la conoscenza del ciclo vitale del proteo e costituiscono la base per un programma di moni-

Fig. 2 - Marko Aljančič nel laboratorio della Grotta di Tular (1962, foto archivio Tular).

Fig. 2 - Marko Aljančič in the Tular Cave laboratory (1962, Tular archive photo).



toraggio della specie. Il laboratorio è inoltre membro dei consorzi nazionali delle infrastrutture di ricerca europee LifeWatch ERIC ed eLTER.

Per promuovere la collaborazione internazionale, organizza la conferenza biennale SOS Proteus International Conference, unico evento scientifico dedicato alla ricerca e alla conservazione del proteo. Dal 2015, cinque edizioni hanno già ospitato 373 partecipanti e prodotto 115 contributi. Tra le più riuscite si ricorda quella del 2022, tenutasi a Trieste in proficua collaborazione con lo Speleovivarium, la Società Adriatica di Speleologia, il Museo di Storia Naturale di Trieste e il Comune di Trieste.

Dal 1964, il laboratorio studia il fenomeno dei protei trascinati fuori dalle grotte durante le piene stagionali, iniziando anche a soccorrere questi individui. Nel 2008, tale iniziativa si è evoluta nel primo santuario mondiale per protei, che combina attività di salvataggio, quarantena, riabilitazione veterinaria e rilascio degli esemplari curati nelle popolazioni d'origine, fornendo preziosi dati sullo stato di salute della specie e sulle procedure di trattamento.

Nell'ambito della partnership pubblico-privata con la Città di Kranj, avviata nel 2022, il laboratorio ha sviluppato il Centro informativo SOS Proteus, una struttura di divulgazione pubblica che diffonde conoscenze e sensibilizza sulla protezione degli ecosistemi idrici sotterranei. Tutti i proventi vengono reinvestiti in attività di conservazione e di ricerca.

Speleovivarium Erwin Pichl

A Trieste, città dalla lunga tradizione speleologica, lo Speleovivarium Erwin Pichl è un piccolo museo situato in un ex rifugio antiaereo che riproduce fedelmente l'ambiente di una grotta naturale. Gestito dalla Società Adriatica di Speleologia, conserva e comunica il patrimonio speleologico cittadino, promuovendo al contempo la conoscenza degli ecosistemi carsici e la tutela del proteo.

Fondato nel 1990 come vivarium, il suo obiettivo iniziale era studiare e riprodurre ex situ i protei, proteggendoli da ambienti fortemente inquinati. Con l'applicazione della Direttiva Quadro sulle Acque dell'Unione Europea e della rete Natura 2000, la qualità delle acque è migliorata e, a causa delle difficoltà dell'allevamento ex situ, il progetto è stato interrotto. Ciononostante, ha stimolato importanti collaborazioni per la ricerca in situ e per la divulgazione al pubblico (Fig. 3).

Oggi, lo Speleovivarium funge da ponte tra comunità scientifica e società civile, con programmi destinati a scuole, turisti e istituzioni locali. Più che un museo, è un centro culturale in cui ricerca, educazione e patrimonio si intrecciano. Di recente, una collaborazione con l'Elettra-Sincrotrone



Fig. 3 - Lo Speleovivarium dal 1990 al 2025 con Erwin Pichl all'ingresso nel 1990 (foto Longo).

Fig. 3 - The Speleovivarium from 1990 to 2025 with Erwin Pichl at the entrance in 1990 (photo Longo).

ha dato origine a un'iniziativa scientifica d'avanguardia: la creazione di un atlante 3D della testa del proteo, risultato di un network di centri di ricerca europei, collegati attraverso lo Speleovivarium.

Grazie alle sue condizioni microclimatiche e alle attrezzature tecniche, lo Speleovivarium è inoltre l'unica struttura italiana che, in collaborazione con le autorità regionali e i servizi veterinari, può soccorrere e curare i protei accidentalmente intrappolati in strutture artificiali (stazioni di pompaggio idrico, sistemi di drenaggio, ecc.). Senza interventi tempestivi e cure adeguate, questi individui non sopravviverebbero fuori dal loro ecosistema naturale.

Valore aggiunto delle attività congiunte

Nonostante i contesti differenti, il Laboratorio di Tular e lo Speleovivarium condividono obiettivi e valori comuni. Entrambi agiscono come catalizzatori di ricerca, promotori di buone pratiche di conservazione e strumenti di sensibilizzazione pubblica.

La loro collaborazione si esprime in modo evidente nel programma SOS Proteus, che ha rafforzato i legami scientifici e culturali tra Slovenia e Italia (Fig. 4). Questa sinergia dimostra come la conservazione di una specie emblematica possa favorire la cooperazione transfrontaliera e costituire un modello replicabile.

La condivisione di dati e di metodologie nei rari casi di esemplari soccorsi contribuisce direttamente alla sopravvivenza della specie. Le valutazioni sullo stato di salute e sullo stress forniscono indicatori biologici che arricchiscono la comprensione della gestione degli habitat sotterranei. Parallelamente, le attività di divulgazione accrescono la consapevolezza collettiva: i cittadini comprendono che proteggere gli ambienti sotterranei significa tutelare le risorse idriche da cui tutti dipendiamo.

Anche il valore culturale è rilevante: mentre lo Speleovivarium conserva la memoria storica della speleologia triestina, il Laboratorio di Tular integra ricerca ed educazione in un contesto transnazionale.

Conclusioni

Il caso del proteo e delle iniziative legate al suo studio e alla sua tutela dimostra che la conservazione della biodiversità sotterranea richiede un approccio integrato e multidisciplinare. Legislazione e ricerca sono fondamentali ma non sufficienti: è essenziale una rete transnazionale di centri

Fig. 4 - I due più recenti incontri internazionali SOS Proteus in alto Kranj SLO 2024, e Trieste IT 2022 hanno mostrato alti contributi scientifici ed una sinergica collaborazione internazionale (foto archivio Tular).

Fig. 4 - The two most recent international meetings SOS Proteus in upper Kranj SLO 2024, and Trieste IT 2022 have shown high scientific contributions and a synergic international collaboration (Tular archive photo).



che agiscano come osservatori, mediatori culturali e custodi del patrimonio naturale, traducendo l'evidenza scientifica in messaggi concreti di conservazione.

Lo Speleovivarium Erwin Pichl e il Laboratorio carsico di Tular rappresentano un modello efficace e trasferibile di collaborazione in cui scienza, educazione e cultura si intrecciano. Pur operando in contesti differenti, sono uniti da un impegno comune nella protezione di una specie simbolo e del suo fragile ecosistema.

La tutela del proteo costituisce un paradigma per la salvaguardia degli ambienti sotterranei in senso più ampio. Sulla base dei risultati presentati, si raccomanda di:

- (I) formalizzare protocolli transfrontalieri di salvataggio e riabilitazione (SOS Proteus) con standard di dati condivisi;
- (II) istituire un monitoraggio sanitario coordinato e trattamenti veterinari degli individui soccorsi, come indicatori dello stato delle acque sotterranee;
- (III) integrare i programmi rivolti al pubblico (musei, centri visite) con canali di citizen science;
- (IV) allineare i flussi di lavoro istituzionali ai principi FAIR (Findable Accessible Interoperable Reusable), per garantire la reperibilità e il riuso dei dati tra iniziative di Italia e Slovenia.

Insieme, questi passi possono rafforzare la cooperazione internazionale, accrescere il coinvolgimento pubblico e rendere la conservazione non solo un dovere scientifico, ma anche una responsabilità culturale e sociale condivisa.

Contributions to Research, Conservation, and Cultural Dissemination of the olm and Its Vulnerable Habitat: Initiatives of the Tular Cave Laboratory and the Speleovivarium

Introduction

Karst subterranean habitats harbour an extraordinary biodiversity. Subterranean organisms are highly specialized, adapted to a dark, relatively stable yet vulnerable environment, intrinsically linked to the surface. Within this context stands out the olm (*Proteus anguinus*), a flagship species of European subterranean fauna. Its biology and conservation demand targeted strategies and complex methodologies, hindered by the inaccessibility of its environment and the perpetual darkness (Fig. 1).

Today, observation of these cryptic species is progressing thanks to advanced technologies and specialized laboratories. Although strictly protected by law, the protection of the olm and its habitat cannot rely solely on legislation. Scientific research, long-term monitoring, and cultural dissemination are essential pillars of sustainable conservation projects. Speleology, as both an exploratory discipline and a scientific-cultural community, plays a crucial role by revealing what would otherwise remain invisible. Museums and centres dedicated to subterranean fauna also contribute by raising awareness and supporting research.

The study of the olm has long fascinated scientists. To overcome the inaccessibility of its habitat and to facilitate long-term observations, laboratories were created in easily accessible caves. Between 1928 and 1931, Professors Albin Seliškar and Roman Kenko founded the biospeleological laboratory in the Podpeška Cave (near Podpeč, Grosuplje). Soon after, in 1930, the Biospeleological Station was established in the Postojna Cave by Ivan Andrej Perko, producing faunistic inventories, and ex situ studies of olms. This laboratory was closed in 1960, in 2002 rebuilt into the Vivarium Proteus, an education centre of the Postojna caves through the initiative of speleobiologist Slavko Polak

In 1948, at Moulis (Ariège, France), zoologist Albert Vandel founded the Laboratoire souterrain du CNRS, considered the prototype of modern subterranean research facilities. Since 1955, successful long-term breeding and observation of olms was initiated. In 1960, Prof. Marko Aljančič established the Jamski laboratorij Tular [Tular Cave Laboratory] in the Tular Cave in Kranj, Slovenia, marking the beginning of a significant line of research on olms and subterranean fauna.

This contribution focuses on two complementary experiences: the Tular Cave Laboratory in Kranj, and the Speleovivarium Erwin Pichl in Trieste, managed by the Adriatic Speleological Society, both of them integrating scientific, historical, and cultural values to advance the study and dissemination of knowledge on the olm.

Tular Cave Laboratory

Founded by Prof. Marko Aljančič under the custody of the Biological Institute of the Faculty of Medicine (University of Ljubljana) and with the support of the City of Kranj, the Tular Cave Laboratory was established to study cave fauna under controlled conditions, in particular to facilitate long-term observations of the olm otherwise so difficult to access in its natural habitat (Fig. 2). After 1976, the laboratory continued its programme independently, focusing on ecology and behaviour of olm, distribution across the Dinaric Karst, and the history of research, while also raising public awareness on vulnerability of the olm, both in Slovenia and around the world.

The Tular Cave Laboratory is developing innovative non-invasive methods to overcome the inaccessibility of the olm's habitat, such as infrared video techniques to document the olm's behaviour and pioneering detection of the olm's environmental DNA to monitor its presence in groundwater. These studies provide an important framework to advance the understanding of the olms's life history and form the basis for establishing the olm monitoring scheme. The laboratory is also a member of the national consortia of EU research infrastructures LifeWatch ERIC and eLTER. To promote international collaboration, the laboratory organises the biennial International Conference "SOS Proteus", the only scientific conference focused on the research and conservation of the olm. Since 2015, five conferences have already hosted 373 participants and produced 115 contributions. One of the most successful was the 2022 conference organised in Trieste, in fruitful partnership with the Speleovivarium, Adriatic Speleological Society, Natural History Museum Trieste, and Municipality of Trieste.

Since 1964, the laboratory studies the phenomenon of olms being occasionally washed out from caves during seasonal flooding, starting also to salvage these individuals. In 2008, this initiative evolved into the world's first olm sanctuary, combining rescue, quarantine and veterinary rehabilitation, and release of treated olm back to its source population, providing valuable data on the species' health and treatment procedures. In the public-private partnership with the City of Kranj established in 2022, the laboratory develops the SOS Proteus Information Centre, a public outreach facility that disseminates knowledge and raises awareness on the protection of groundwater ecosystems. All revenues are reinvested into conservation and research efforts.

Speleovivarium Erwin Pichl

In Trieste, a city with a long speleological tradition, the Speleovivarium Erwin Pichl is a small museum located in a former air-raid shelter that closely resembles a natural cave. Managed by the Adriatic Speleological Society, it preserves and communicates the city's speleological heritage while promoting knowledge of karst ecosystems and the conservation of the olm.

Originally established in 1990 as a vivarium, its goal was to study and reproduce olms *ex situ*, safeguarding them from severely polluted environments. With the implementation of the EU Water Framework Directive and the Natura 2000 network, water quality improved and, given the difficulties of *ex situ* breeding, the project was discontinued. Nonetheless, it catalyzed significant collaborations for *in situ* research and public dissemination (Fig. 3).

Today, the Speleovivarium serves as a bridge between the scientific community and civil society, with programs for schools, tourists, and local institutions. More than a museum, it is a cultural hub where research, education, and heritage converge.

Recently, a scientific initiative arose from collaboration with the Elettra-Sincrotrone, where Speleovivarium connected research centres across Europe, resulting in a cutting-edge 3D atlas of olm's head. Furthermore, due to its cave-like conditions and technical equipment, Speleovivarium is also the only Italian facility that, in collaboration with regional authorities and veterinary services, can rescue and care for olms accidentally trapped in artificial structures (drinking water pumping stations, drainage systems, etc.). Without prompt intervention and proper care, these individuals would otherwise perish outside its natural ecosystems.

Added Value of the Joint Activities

Despite their different contexts, the Tular Cave Laboratory and the Speleovivarium share common goals and values. Both act as catalysts for research, promotion of good conservation practices, and vehicles for public awareness.

Their collaboration is most evident in the SOS Proteus program, which has strengthened scientific and cultural ties between Slovenia and Italy (Fig. 4). This synergy shows how the conservation of an emblematic species can foster cross-border cooperation and provide a replicable model.

Sharing data and methodologies in the rare cases of rescued specimens directly contributes to species survival. Health and stress assessments provide biological indicators that enrich our understanding of subterranean habitat management.

At the same time, public outreach enhances awareness: citizens learn that protecting underground environments is closely tied to safeguarding the water resources on which we all depend.

Cultural value is equally significant: while the Speleovivarium preserves the historical memory of Triestine speleology, the Tular Cave Laboratory integrates research and education in a transnational context.

Conclusions

The case of the olm and the initiatives connected to its study and protection illustrate that subterranean biodiversity conservation requires an integrated multidisciplinary approach. Legislation and research are crucial but not sufficient; a cross-national network of centres acting as observatories, cultural mediators, and custodians of natural heritage is essential to translate evidence into practical conservation message.

The Speleovivarium Erwin Pichl and the Tular Cave Laboratory demonstrate an effective, transferable collaboration model where science, education, and culture intertwine. Different in context though complementary, they are united by a shared commitment to protecting a symbolic species and its fragile ecosystem.

Protecting the olm provides a paradigm for safeguarding subterranean environments more broadly. Building on the results presented here, we recommend:

- (1) formalizing cross-border rescue and rehabilitation protocols (SOS Proteus) with shared data standards;

- (II) establishing coordinated health monitoring and veterinary treatment of rescued individuals as sentinels of groundwater status;
- (III) integrating public-facing programs (museums, visitor centres) with citizen-science reporting pipelines; and
- (IV) aligning institutional workflows with FAIR (Findable Accessible Interoperable Reusable) principles to ensure data discoverability and reuse across initiatives between Italy and Slovenia.

Collectively, these steps can strengthen international cooperation, strengthen public engagement, and embed conservation as both a scientific duty but also a cultural and social responsibility.

Azzurra Tommasi¹, Raffaele Bruschi^{1, 2}, Marco Restaino²,
Renata Rozman³, Samo Šturm³, Borut Peric³, Piero G. Giulianini¹,
Alberto Pallavicini¹, Chiara Manfrin^{1, 2}

Grotte transfrontaliere a confronto: uso del DNA ambientale e studio della fauna ipogea, per indagare la continuità idrologica del Reka-Timavo sotterraneo

1) Dipartimento di Scienze della Vita, Università di Trieste; 2) Società Adriatica di Speleologia, Trieste; 3) Park Škocjan Jame (Slo)

Abstract. Monitoring with environmental DNA (eDNA) in transboundary caves between Italy and Slovenia has successfully identified DNA from various families, genera, and species inhabiting both the surrounding and hypogean environments, reinforcing the effectiveness of this method in detecting subterranean fauna. Notably, DNA from the alien freshwater hydrozoan jellyfish *Craspedacusta sowerbii* was detected in water samples from the Luftloch Cave (Italy), despite established populations of this Asian jellyfish being previously reported only in the Upper Reka-Timavo area (Slovenia).

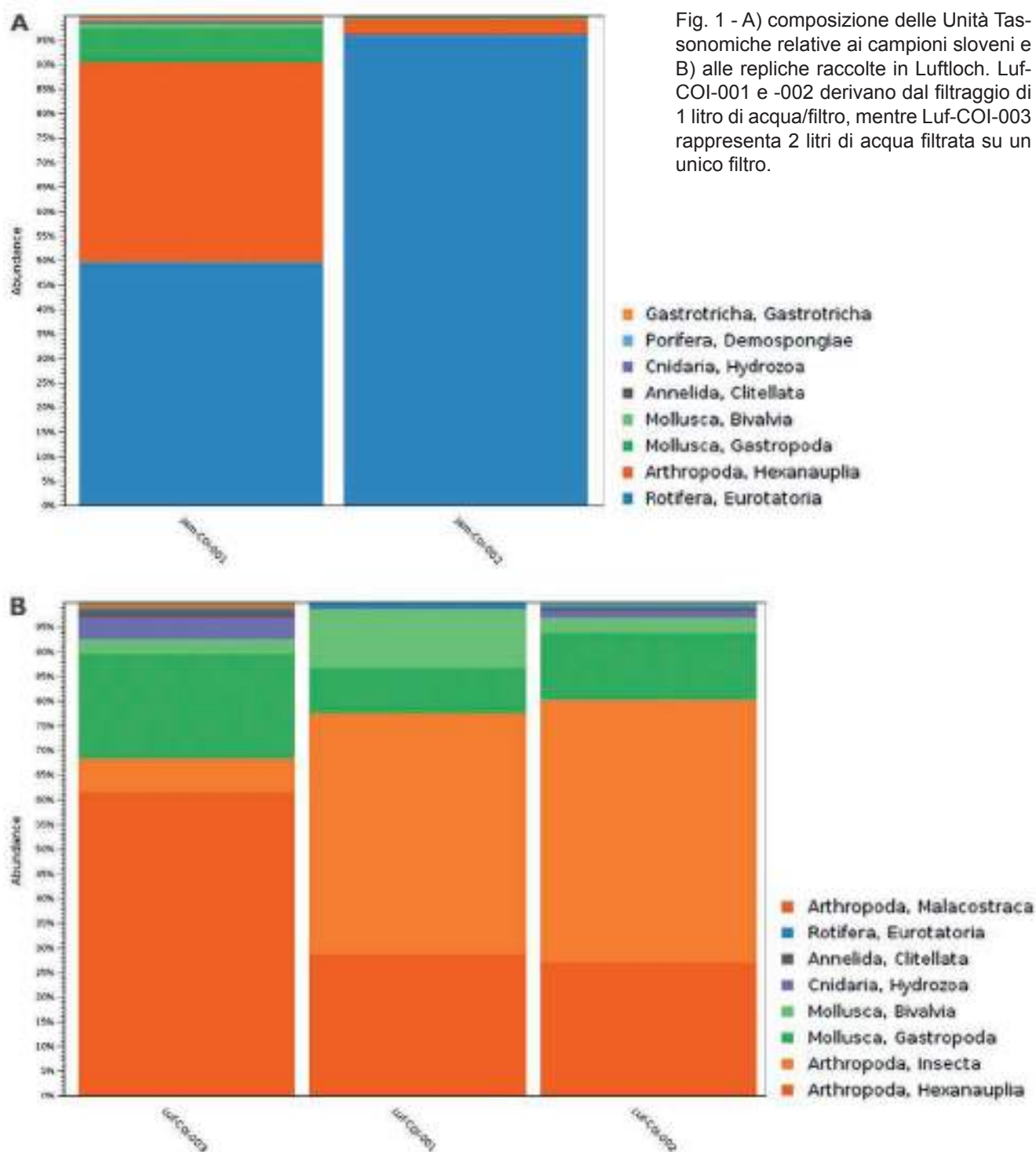
Riassunto. Il monitoraggio mediante DNA ambientale (eDNA) nelle grotte transfrontaliere tra Italia e Slovenia ha consentito di rilevare con successo il materiale genetico appartenente a diverse famiglie, generi e specie presenti sia negli ambienti superficiali sia in quelli ipogei, confermando l'efficacia di questo approccio anche nello studio della fauna sotterranea. In particolare, tracce di DNA della medusa aliena d'acqua dolce *Craspedacusta sowerbii* sono state individuate in campioni prelevati dalla Grotta Luftloch (Italia), sebbene popolazioni stabili di questa specie asiatica fossero state finora segnalate esclusivamente nell'area dell'Alta Reka-Timavo (Slovenia).

Introduzione

Il termine di DNA ambientale (eDNA, dall'inglese environmental DNA) è stato coniato per la prima volta nel 2008 (FICETOLA et al., 2008). Da allora, la sua applicazione ha notevolmente ampliato la nostra capacità di raccogliere dati sulla distribuzione delle specie in una vasta gamma di ecosistemi (FICETOLA et al., 2016; LUNGHU et al., 2022). L'eDNA si è affermato come uno strumento molecolare per il monitoraggio della biodiversità, mostrando un potenziale particolarmente promettente nello studio degli ambienti ipogei: questi pongono sfide uniche alle indagini biologiche tradizionali a causa della loro difficile accessibilità, fragilità e delle condizioni spesso estreme. Gli ecosistemi sotterranei ospitano una notevole biodiversità, ma la valutazione della distribuzione delle specie che vi abitano rimane ancora estremamente complessa. In questo studio preliminare ci siamo focalizzati sul Fiume Reka-Timavo, il cui sistema idrologico ha un percorso sotterraneo che si estende per circa 40 km, e che rappresenta un ambiente ancora in parte inesplorato nell'area transfrontaliera tra Slovenia e Italia.

Descrizione dati

Per la valutazione preliminare dell'area di studio mediante eDNA sono stati selezionati diversi punti lungo il corso sotterraneo del fiume tra Slovenia e Italia. Due siti di campionamento sono stati localizzati in Slovenia, all'interno del Parco Nazionale delle Grotte di San Canziano, e campionati da speleosub. In Italia è stata presa in esame la Grotta Luftloch (7477/6442VG), scoperta il 23 marzo 2024 e nuovamente visitata nel luglio 2024 per la raccolta dei campioni analizzati in questo studio.



L'eDNA è stato estratto e purificato mediante un kit basato su biglie magnetiche per la separazione degli acidi nucleici. Il DNA è stato successivamente amplificato attraverso un approccio metabarcoding, utilizzando marcatori specifici per il gene della Citocromo Ossidasi I (COI) e la regione V4 del 18S rDNA. Il sequenziamento è stato effettuato con tecnologia Illumina Nova-Seq6000 SP (2×250 bp).

I tre ambienti analizzati, due in Slovenia e uno in Italia, presentano differenti composizioni delle comunità metazoiche. Nei siti sloveni, la maggior parte della componente zooplanctonica è risultata appartenere al phylum Rotifera, in particolare al genere *Ploima* (Fig. 1A). Nel sito italiano della Grotta Luftloch, invece, la comunità dominante è risultata appartenere al phylum Arthropoda, con una prevalenza di organismi della classe Copepoda, in particolare del genere *Acanthocyclops*, e della classe Insecta, rappresentata esclusivamente da membri dell'ordine Diptera (Fig. 1B).

Gli avvistamenti di Hydrozoa in ambienti sotterranei sono rari; pertanto, riportiamo di seguito i risultati relativi al DNA appartenente a questa classe tassonomica.

Il DNA di *Craspedacusta sowerbii*, una medusa d'acqua dolce originaria dell'Asia orientale, in particolare della valle del Fiume Yangtze, è stato rilevato in tutte le grotte analizzate (Fig. 2). La prima segnalazione della specie in Europa risale al 1901 in Francia. Sebbene sia considerata comune nelle acque interne dell'Europa occidentale, la sua presenza è spesso sottostimata, poiché la specie è difficile da osservare, soprattutto nello stadio più frequente di polipo.

La sua individuazione nel sistema Reka-Timavo non è sorprendente, considerando che in concomitanza con il nostro risultato nel tratto del Timavo ipogeo, il Museo Civico di Storia Naturale di Trieste (BRESSI & COLLA, 2024) ne ha documentato la presenza nelle acque del Timavo superiore (Slovenia). Nei campioni sloveni è stato inoltre rilevato il DNA di *Hydra vulgaris*, una specie già nota nella regione. Di particolare interesse è anche il rinvenimento, seppur con un numero inferiore di sequenze, di *Hydra circumcincta* (SCHULZE, 1914), una piccola specie (polipo esteso: 5-15 mm) generalmente fotofobica, e dell'idrozoo *Velkovrha enigmatica* (MATJAŠIČ & SKET, 1971), l'unico idrozoo d'acqua dolce stigobio, endemico delle Dinaridi. Quest'ultimo dato risulta particolarmente significativo e sono in corso ulteriori approfondimenti, data la peculiarità del ritrovamento.



Fig. 2 - Immagine di *C. sowerbii* (© A. Sbulez, 25 Ago 2024), la barra dimensionale equivale a 10 mm.

Osservazioni conclusive

Uno dei principali vantaggi dell'eDNA è la capacità di rilevare *taxa* rari, criptici o altrimenti difficilmente accessibili senza necessità di cattura fisica o disturbo (LUNGHU et al., 2022). Negli ambienti ipogei questo aspetto risulta particolarmente rilevante, poiché molte specie ipogee sono endemiche, minacciate o estremamente sensibili alle perturbazioni ambientali. Ad esempio, saggi mirati basati su eDNA hanno permesso di rilevare il proteo (*Proteus anguinus*), specie a rischio di estinzione, in sistemi di acque sotterranee, rivelando nuove località di presenza e supportando le attività di conservazione (GORIČKI et al., 2018 e il presente studio). L'eDNA è in grado di rilevare segnali a scala ecosistemica anche quando l'assegnazione tassonomica risulta incompleta. COUTON et al. (2023) hanno dimostrato come il metabarcoding delle acque sotterranee permetta di evidenziare pattern di composizione comunitaria legati all'uso del suolo e a fattori geologici, dimostrando come l'eDNA possa fungere da strumento di biomonitoraggio per valutare gli impatti antropici sugli ecosistemi sotterranei. Tale approccio, tuttavia, presenta anche criticità, riconducibili alla bassa biomassa disponibile, a limitazioni di natura tecnica e a problematiche interpretative. Il raggiungimento di risultati affidabili richiede pertanto una progettazione accurata dei protocolli, un rigoroso controllo di qualità e l'integrazione con metodologie complementari.

Con il progredire delle conoscenze e delle applicazioni, il superamento delle attuali limitazioni - attraverso avanzamenti metodologici, lo sviluppo di database dedicati e processi di standardizzazione - potrà incrementare in modo significativo l'efficacia dell'eDNA nella ricerca e nella conservazione della biodiversità ipogea. Questa tecnologia si configura come particolarmente promettente per il rilevamento di specie rare o criptiche, per l'analisi dei pattern comunitari e per il supporto al monitoraggio a lungo termine di ecosistemi unici e intrinsecamente fragili.

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento va a tutti i volontari della Società Adriatica di Speleologia, il cui impegno ha reso possibile la raccolta dei campioni italiani in contesti particolarmente impegnativi, come la Grotta Luftloch.

Si ringraziano, inoltre, gli speleosub sloveni per la raccolta dei campioni d'acqua nelle Grotte di San Canziano. Un ringraziamento speciale va ad Andrea Colla e Nicola Bressi per aver integrato nella loro nota museale sulle osservazioni di *Craspedacusta sowerbii* nel Timavo epigeo il nostro rilevamento tramite eDNA di *C. sowerbii* nelle acque del Timavo ipogeo, a dimostrazione concreta di come la collaborazione tra enti locali possa generare risultati rilevanti per la conoscenza e la conservazione del territorio.

Bibliografia

- BRESSI N. & COLLA A., 2024 - *Alien freshwater hydrozoan jellyfish Craspedacusta sowerbii in Reka river, Slovenia*. Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Trieste, 65, pp. 175-176.
- COUTON M., HÜRLEMANN S., ALTHERR R. & ALTERMATT F., 2023 - *Groundwater environmental DNA metabarcoding reveals hidden diversity and reflects landuse and geology*. Molecular Ecology, 32,11, pp. 2988-3004.
- FICETOLA F.G., MIAUD C., POMPANON F. & TABERLET P., 2008 - *Species detection using environmental DNA from water samples*. Biology Letters, 4, 4, pp. 423-425. Doi: 10.1098/rsbl.2008.0118.
- FICETOLA F.G., TABERLET P. & COISSAC E., 2016 - *How to limit false positives in environmental DNA and metabarcoding?* Molecular Ecology Resources, 16, 3, pp. 604-607. Doi: 10.1111/1755-0998.12508.
- GORIČKI Š., SNOJ A., STANKOVIĆ D., KUNTNER M., ALJANČIČ M., BLEJEC A., ... & TRONTELJ P., 2018 - *Environmental DNA in subterranean biology update: from "Where?" to "How many?"*. Subterranean Biology, 28, pp. 1-14.
- LUNGI E., VALLE B., GUERRIERI A., BONIN A., CIANFERONI F., MANENTI R. & FICETOLA GF., 2022 - *Environmental DNA of insects and springtails from caves reveals complex processes of eDNA transfer in soils*. Science of the Total Environment, 826, 154022. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154022.

Benedetta Rigo¹, Josef Vuch², Alberto Riva^{3, 4, 5}

Censimento della presenza di “batteri oro e argento” nelle grotte del Friuli Venezia Giulia

1) Unione Speleologica Pordenonese, Pordenone; 2) Club Alpinistico Triestino, Trieste;
3) Gruppo Grotte Solve CAI, Belluno; 4) Gruppo Grotte Treviso; 5) Dipartimento di Fisica
e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

Abstract. The microbial community known as “golden and silver bacteria” typically forms biofilm-like layers coating the walls of caves, often covered by water droplets. These layers are visible only under light with specific wavelengths. This study presents the objectives of a newly launched research project focused on the identification and characterization of golden and silver bacteria in the caves of Friuli Venezia Giulia. The project aims to contribute to a better understanding of the ecological role of these microbial communities and their potential applications in environmental and scientific research.

Riassunto. In questo breve articolo viene riportato lo studio afferente al progetto di censimento della presenza dei “batteri oro e argento” nelle grotte del Friuli Venezia Giulia. Il gruppo di lavoro è stato il grado di sperimentare un metodo per rilevare la presenza di colonie batteriche, note come “golden and silver bacteria”, sulle pareti delle grotte. I pigmenti delle membrane batteriche assorbono le lunghezze d’onda caratteristiche del vicino ultravioletto (UV) e luce visibile (380-420 nm) emesse dalle lampade frontali a diodi a emissione di luce (LED), emettendo fluorescenza a 460 nm e 600 nm. Il gruppo di lavoro si è occupato dello studio di lampade commerciali UV per comprendere quale potesse al meglio aiutare lo speleologo nella rilevazione di tali colonie. È stato sviluppato un protocollo per documentare le colonie batteriche nelle cavità censite dal Catasto Speleologico Regionale e creato un sistema di raccolta dati tramite modulo Google, accessibile agli speleologi per registrare informazioni e immagini.

Introduzione

Osservando l’albero della vita, a partire dall’ultimo antenato comune universale (LUCA), si può evidenziare come la maggior parte degli organismi viventi sia rappresentata da procarioti, batteri e archea. A differenza di piante, animali e funghi, i procarioti costituiscono la base della vita sulla Terra e colonizzano gli ambienti più disparati, dalle profondità oceaniche ai ghiacci polari, fino agli ambienti ipogei.

Le grotte sono ecosistemi estremamente poveri di nutrienti, in cui la catena trofica si regge principalmente sull’attività microbica e sui nutrienti arrivati dall’esterno. I batteri costituiscono quindi la fonte primaria di energia e nutrimento per molti altri organismi cavernicoli (TURRINI et al., 2020).

Nonostante questo ruolo cruciale, le colonie batteriche sono state per secoli trascurate dagli studi speleologici, soprattutto perché invisibili a occhio nudo con le fonti di illuminazione tradizionali (candele, lampade a carburo, lampade a incandescenza e alogene). La possibilità di osservare i cosiddetti “batteri oro e argento” è legata ad un fortunato sviluppo tecnologico.

Descrizione dati

Le moderne lampade a diodi ad emissione luminosa (LED) emettono radiazioni luminose nello spettro del blu-viola (lunghezze d’onda attorno ai 400 nm; Fig. 1), che coincidono con il picco di assorbimento dei pigmenti presenti nei biofilm batterici. Una volta eccitati, questi pigmenti emettono fluorescenza nel blu (460 nm) e nell’arancione (600 nm), producendo i caratteristici riflessi argentati e dorati che si osservano sulle pareti delle grotte. Ciò che per secoli era sembrata semplice umidità sulle rocce si rivela oggi un fenomeno biologico straordinario: colonie di batteri capaci

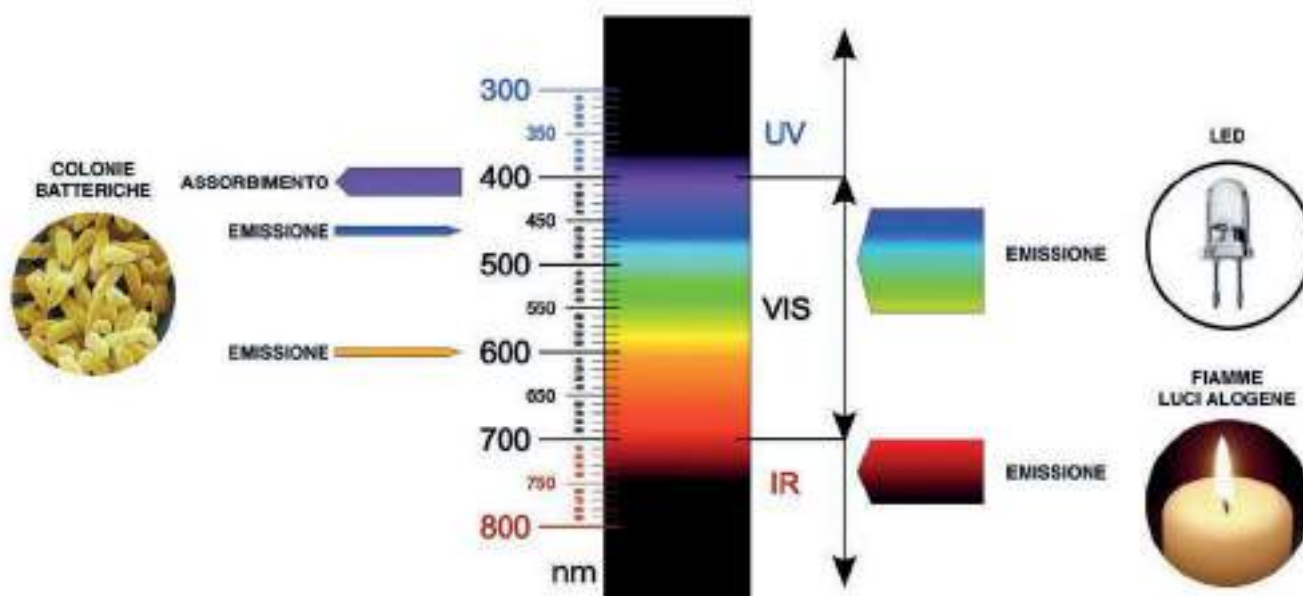


Fig. 1 - I pigmenti dei biofilm batterici assorbono luce tra 419-393 nm (viola) ed emettono fluorescenza a 460 nm (blu) e 600 nm (arancione). Le luci tradizionali emettono nell'intervallo rosso-infrarosso (>700 nm), mentre i LED, utilizzati in speleologia, emettono luce tra 446 e 556 nm, vicino al massimo assorbimento del biofilm. Questo ha permesso l'osservazione delle colonie batteriche solo con l'illuminazione LED, rispetto a quella tradizionale.



Fig. 2 - Spettrometro autocostruito utilizzato per misurare lo spettro di emissione delle varie sorgenti luminose studiate durante le fasi preparatorie di questo progetto.

di colorare le tenebre (MULEC et al., 2015; VUCH, 2023). Questo ribalta la percezione delle grotte, trasformandole in ecosistemi luminosi e complessi.

Al fine di comprendere quali lampade a LED rivelassero al meglio le colonie batteriche è stato costruito uno spettrometro (Fig. 2). In questo modo è stato possibile misurare i picchi di emissione delle varie sorgenti luminose e confrontarli con i valori di assorbimento dei pigmenti batterici presenti in letteratura.

Queste prove hanno confermato che molte lampade LED emettono in lunghezze d'onda compatibili con la fluorescenza dei batteri (Fig. 3). Inoltre, è stata individuata una lampada LED ultravioletta economica, leggera e facilmente trasportabile, particolarmente utile per gli speleologi che intendono osservare le colonie e contribuire al censimento (Torcia UV 365 nm filtrata, DARKDAWN, Cina).

La scelta delle sorgenti luminose, validata dalle misurazioni spettrometriche, rappresenta quindi un supporto pratico e concreto per chiunque parteciperà a tale progetto che ha coinvolto l'Unione Speleologica Pordenonese (USP), il Club Alpinistico Triestino (CAT) e il Gruppo Grotte Solve CAI Belluno e il Gruppo Grotte CAI Treviso per monitorare la presenza di "golden" e "silver bacteria" nelle grotte del Friuli Venezia Giulia.

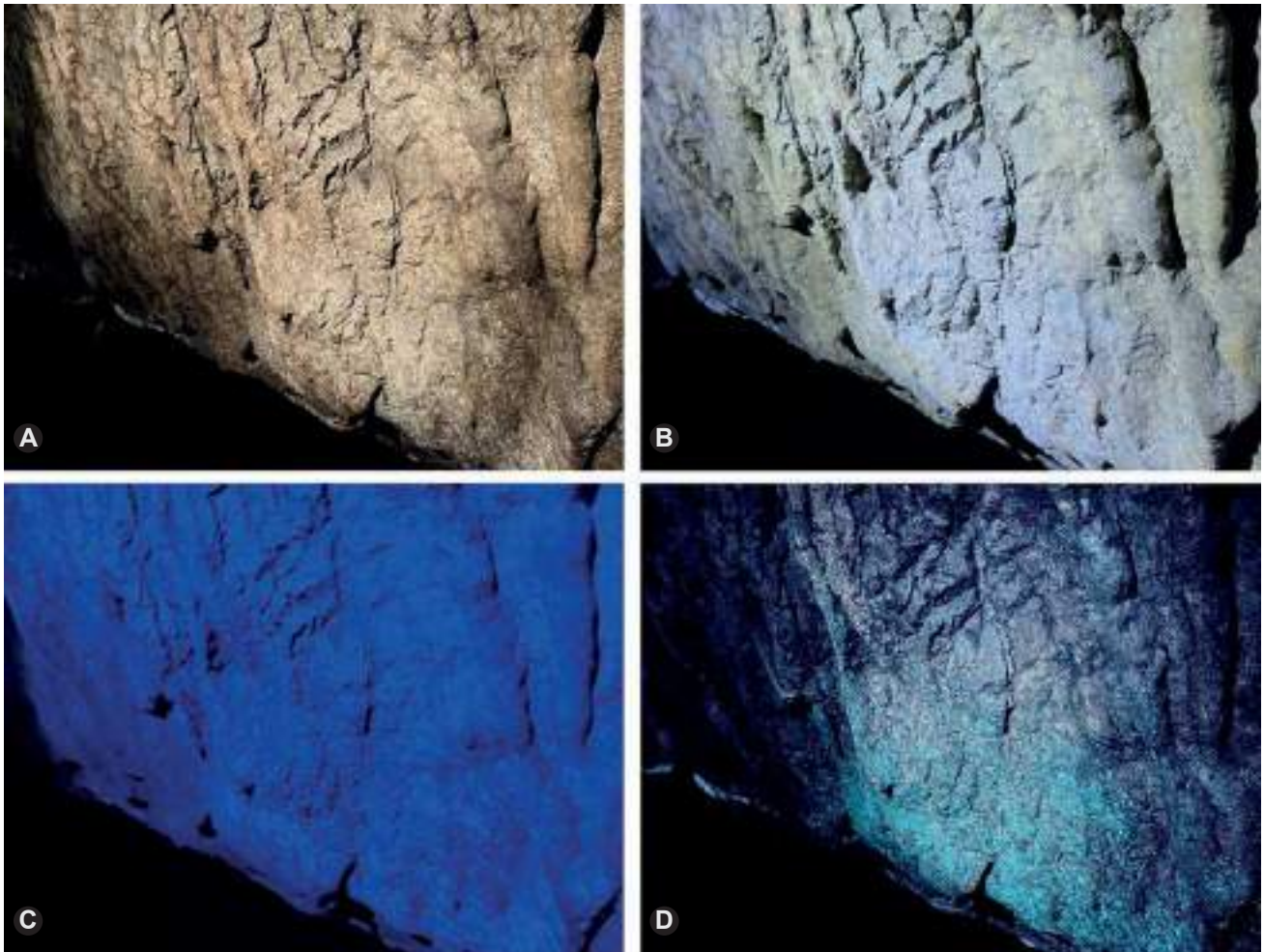


Fig. 3 - Osservazione delle colonie microbiche fluorescenti esposte a diverse fonti luminose.

A: parete rocciosa della Grotta Azzurra (34/257 VG) illuminata con lampada a incandescenza. L'illuminazione diffusa non rivela la presenza di biofilm microbici, che rimangono invisibili sotto questo spettro luminoso. B: stessa area fotografata utilizzando lampada speleologica a LED (437 nm). L'emissione nello spettro blu-viola inizia a rivelare riflessi argentati sulla superficie rocciosa, indicatori della presenza di comunità microbiche fluorescenti. C: parete illuminata con sorgente LED blu (450 nm). Non è visibile fluorescenza. D: medesima sezione sotto illuminazione LED ultravioletta (365 nm). L'eccitazione dei pigmenti batterici produce una fluorescenza intensa, rivelando la complessa distribuzione spaziale delle comunità microbiche e la loro associazione con zone di maggiore umidità superficiale.

È stato realizzato un protocollo per documentare la presenza di batteri nelle cavità censite dal Catasto Speleologico Regionale e creato un sistema di raccolta dati tramite modulo Google, accessibile agli speleologi per registrare informazioni e immagini.

All'interno del modulo Google è possibile trovare il link per visualizzare la comunicazione orale presentata al Convegno Speleo25 "Acque e grotte senza frontiere" e il link per acquistare la lampada LED ultravioletta che meglio rivela la presenza dei "batteri oro e argento". Infatti la presenza di goccioline di condensa sulle pareti delle grotte può, con la sola luce frontale a LED, dare falsi positivi, portando lo speleologo a testimoniare (erroneamente) la presenza di batteri argento.

In figura 4 vengono riportate le principali informazioni contenute all'interno del modulo e si riferiscono alla presenza o assenza di tali colonie batteriche e al loro luogo di osservazione (grotta: ingresso, metà, fondo). È, inoltre, prevista una sezione in cui, se presenti, si possono riportare i parametri ambientali; una sezione relativa alla data di osservazione; una sezione in cui ciascuno speleologo può apportare una descrizione dettagliata relativa all'oggetto delle sue osservazioni e una sezione in cui caricare le fotografie delle colonie batteriche di quella specifica grotta.

Si ricorda che osservare la presenza e osservare l'assenza dei batteri oro e argento nelle grotte rappresenta un dato equamente importante ai fini di questo studio, ovvero è necessaria la compilazione del modulo in entrambe le situazioni.

Fig. 4 - Protocollo utilizzato per il censimento dei “batteri oro e argento” nelle grotte della regione Friuli Venezia Giulia.

Fig. 5 - QR code con il link al modulo google da compilare per partecipare al censimento.



Il modulo Google è visibile anche scansionando il QR code, illustrato in figura 5, con uno smartphone o tablet.

Osservazioni conclusive

Alla luce dell’importanza ecologica di queste comunità microbiche, e della loro sorprendente visibilità resa possibile dalla tecnologia LED, è stato deciso di avviare un progetto di censimento nelle grotte del Friuli Venezia Giulia. L’obiettivo è documentare sistematicamente la distribuzione delle colonie di batteri oro e argento, attraverso la collaborazione degli speleologi.

È stato quindi realizzato, come detto, un modulo online per raccogliere segnalazioni, fotografie e dati catastali delle grotte. Tutte le informazioni saranno integrate in un Geographic Information System (GIS), che consentirà di elaborare mappe di distribuzione e di porre le basi per studi ecologici e microbiologici più approfonditi.

Questo approccio partecipativo mira a coinvolgere la comunità speleologica e a valorizzare il contributo di chi frequenta le cavità del territorio (RIGO & VUCH, 2024).

Ringraziamenti

Si ringraziano tutti gli speleologi che hanno contribuito e contribuiranno al compimento di questo progetto.

Bibliografia

MULEC J. et al., 2015 - *Characterization and fluorescence of yellow biofilms in karst caves, southwest Slovenia*. International Journal of Speleology, 44, 2, pp. 107-114.
 RIGO B., & VUCH J., 2024 - *Brillanti curiosità nel buio*, Esplorare, Appunti di Speleologia Pordenonese, 14/2024.
 TURRINI P. et al., 2020 - *The microbial community of a biofilm lining the wall of a pristine cave in Western New Guinea*. Microbiological research 241, 126584.
 VUCH J., 2023 - *Arcobaleno nel buio*. Cronache ipogee, 3/2023.

Raffaele Bruschi^{1, 2}

Studi ecotossicologici e microbiologici in due grotte carsiche inquinate da idrocarburi (Trieste, Italia) finalizzati allo sviluppo di un protocollo di biorisanamento

1) Società Adriatica di Speleologia, Trieste; 2) Dipartimento di Scienze della Vita,
Università di Trieste

Abstract. Oil-derived hydrocarbons (PHCs) and associated metals severely impact fragile karst systems. We characterized two polluted caves near Trieste (Colombi Pit and Trebče Cavern) by integrating chemical, ecotoxicological (*Aliivibrio fischeri*, *Raphidocelis subcapitata*, *Brachionus* spp.) and microbiological analyses. PHCs >C12 and multiple metals greatly exceeded legal thresholds in mud and water layers; the water layer in Trebče showed extreme acidity (pH ~0-1). A Before-After design assessed the effect of a lab bioremediation trial using an in situ isolate (17_L8) grown on toxic elutriates. After 34 and 21 days, *A. fischeri* tests indicated toxicity reductions up to ~40% at the highest toxic load, suggesting that native strains may act as effective bioremediation catalysts. Given the 'severe' integrated hazard (TBI), urgent mitigation is warranted and field-scale optimization of indigenous consortia is recommended.

Riassunto. Gli idrocarburi da petrolio (PHCs) e i metalli associati impattano gravemente i sistemi carsici. Abbiamo caratterizzato due grotte inquinate nel Carso triestino (Pozzo dei Colombi e Caverna presso la 17VG) integrando analisi chimiche, ecotossicologiche (*Aliivibrio fischeri*, *Raphidocelis subcapitata*, *Brachionus* spp.) e microbiologiche. La frazione >C12 dei PHCs e vari metalli hanno superato ampiamente le soglie legali in fanghi e strati acquosi; lo strato acquoso della 17VG ha mostrato acidità estrema (pH ~0-1). Con un *Design* sperimentale Before-After abbiamo valutato l'effetto di un biorisanamento in laboratorio con un ceppo indigeno (17_L8) coltivato su elutriati tossici. Dopo 34 e 21 giorni, i test su *A. fischeri* hanno evidenziato riduzioni di tossicità fino a ~40% al carico più elevato, indicando il potenziale dei ceppi autoctoni come 'biorisanatori'. Considerato il rischio integrato 'severo' (TBI), risultano necessari interventi di mitigazione e un'ottimizzazione in campo dei consorzi indigeni.

Introduzione

L'inquinamento da composti del petrolio è considerato uno dei problemi ambientali più diffusi e pericolosi a livello globale: si stima che circa 4 milioni di tonnellate di idrocarburi vengano rilasciati ogni anno nell'ambiente (ADIPAH, 2019). Il petrolio è una miscela complessa, costituita principalmente da idrocarburi di diversa natura e da metalli associati, i quali hanno destini ambientali differenti e, in combinazione, possono produrre effetti tossici persistenti (MCKEE et al., 2015). Una volta dispersi, tali contaminanti possono infiltrarsi nelle falde acquifere o legarsi alla frazione organica del suolo, determinando danni significativi alla salute umana, agli ecosistemi e ai servizi ecosistemici (MITRA et al., 2022). Particolarmente vulnerabili a questo tipo di pressioni sono gli ambienti carsici, caratterizzati da rocce solubili come calcari e gessi, da un'elevata fratturazione e da una rete idrografica sotterranea che favorisce la rapida propagazione degli inquinanti (FORD & WILLIAMS, 2007; Fig.1).

Per questo motivo il carso è tra gli ecosistemi più fragili e difficili da gestire, sia dal punto di vista della tutela idrica sia per la complessità degli interventi di bonifica. Il Carso triestino rappresenta un caso emblematico: un'area di circa 750 km² al confine tra Italia e Slovenia, che ospita oltre 2700 cavità censite. Qui gli impatti antropici hanno lasciato tracce profonde. Oltre a discariche di rifiuti urbani e industriali, eventi storici hanno aggravato la situazione: l'attentato del 4 agosto 1972 al terminale dell'oleodotto SIOT provocò lo sversamento e la combustione di circa 160.000 tonnellate di greggio, parte delle quali venne interrata nel Pozzo dei Colombi a Basovizza, causando la

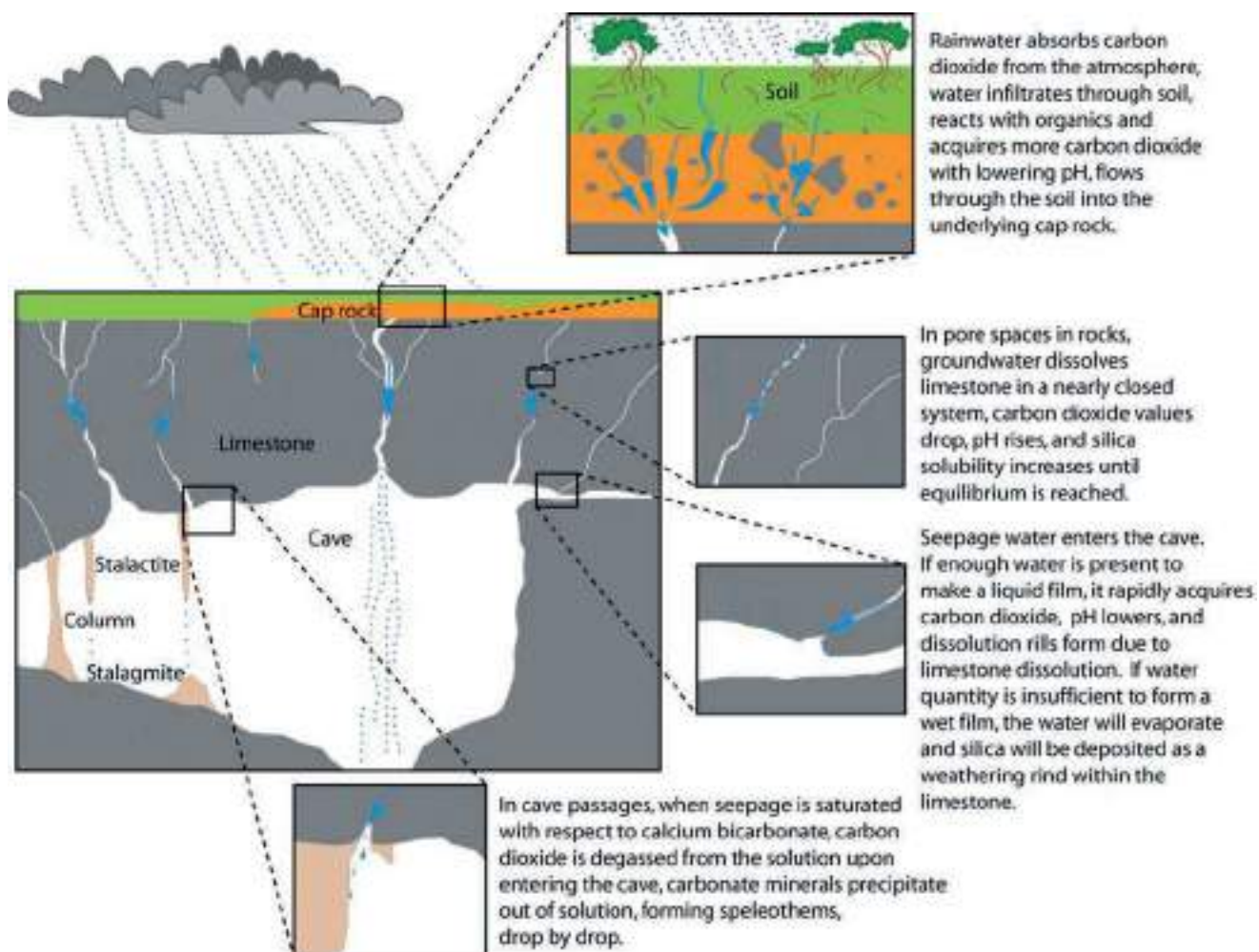


Fig. 1 - Schema generale di un paesaggio carsico: doline e torrenti pendenti in superficie, pavimento calcareo, cavità sotterranee con stalattiti e stalagmiti, e circolazione idrica fino alla falda con serie di sezioni trasversali rappresentative del percorso dell'acqua e di possibili inquinanti (Illustrazione di Trista L. Thornberry-Ehrlich, Colorado State University).

contaminazione del sottosuolo (SABA, 2015). Analogamente, tra gli anni '50 e '70, una cava presso Trebiciano fu utilizzata come discarica, con accumulo di rifiuti solidi urbani e scarico di oli esausti all'interno della Caverna presso la 17VG, in un'area direttamente collegata al reticolo idrico sotterraneo del Fiume Timavo (BRUN, 2020). Il lavoro qui presentato si inserisce in questo contesto, con l'obiettivo di caratterizzare due siti storicamente inquinati (Pozzo dei Colombi, 42/33VG e Caverna presso la 17VG, 1423/4362VG) attraverso un approccio integrato: analisi chimiche, ecotossicologiche e microbiologiche, finalizzate a valutare il grado di rischio ambientale e a sperimentare protocolli di biorisanamento basati sull'impiego di ceppi microbici autoctoni.

Descrizione dati

Il campionamento è stato condotto suddividendo le matrici in differenti strati, al fine di cogliere le caratteristiche verticali della contaminazione (Fig. 2). Nel Pozzo dei Colombi e nella Caverna presso la 17VG sono stati prelevati fanghi superficiali (L1) e profondi (L2), lo strato acquoso (WL) e, ove presente, la fase oleosa (OL). Questa strategia ha permesso di distinguere il contributo delle diverse frazioni e di comprendere meglio le dinamiche di migrazione degli inquinanti.

Le analisi chimiche hanno messo in evidenza la presenza diffusa di idrocarburi da petrolio (PHCs), in particolare della frazione >C12, che nei fanghi raggiunge concentrazioni elevate e persistentemente superiori ai limiti di legge. Nello strato acquoso della 17VG si è inoltre riscontrata la presenza di idrocarburi totali disciolti, accompagnati da una forte acidità ($\text{pH} \approx 0-1$), condizione che favorisce la mobilità di metalli potenzialmente tossici. In entrambe le cavità, infatti, sono state rile-

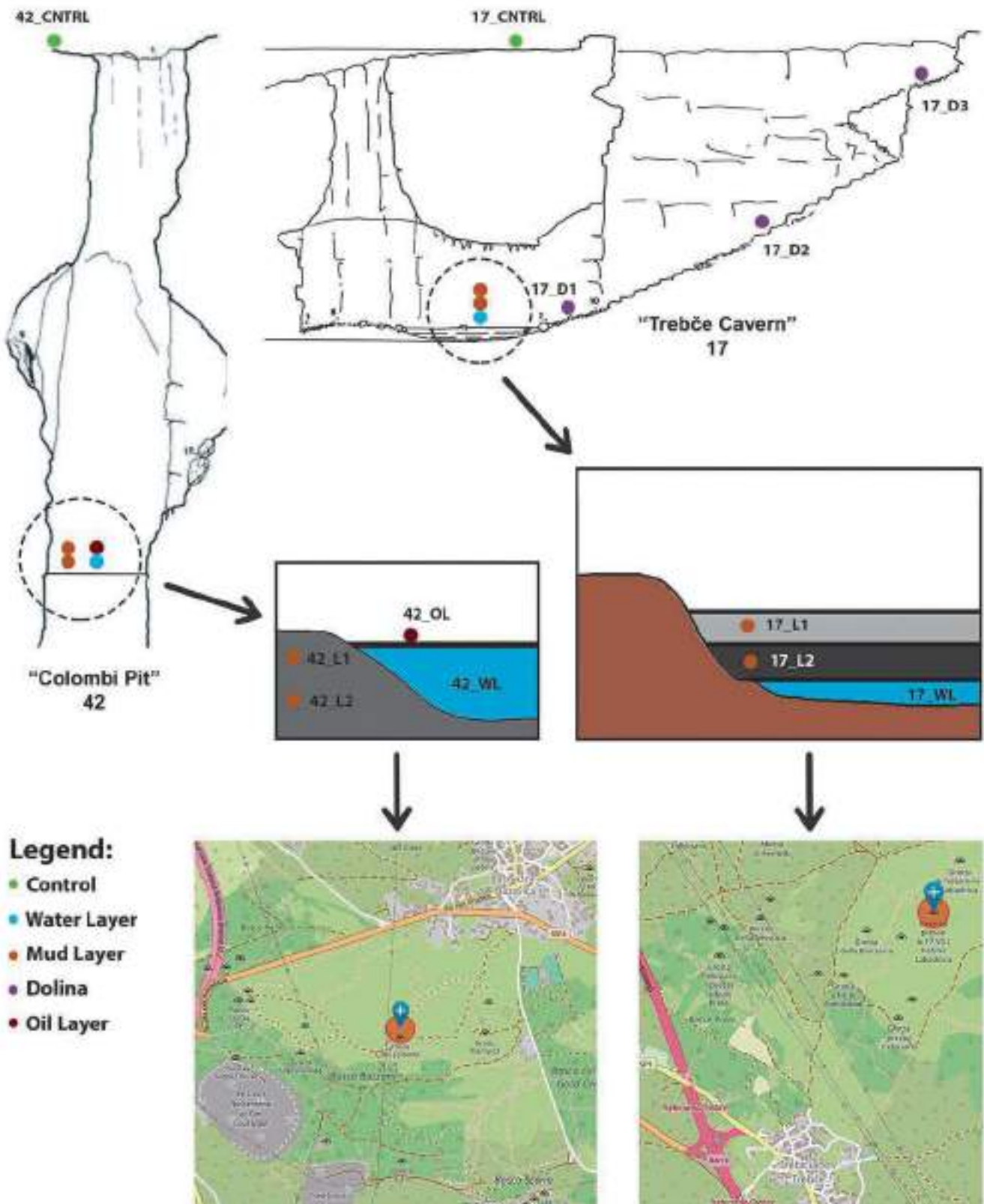


Fig. 2 - Schema di campionamento: a sinistra il Pozzo dei Colombi (42), a destra la Caverna presso la 17VG (17). Schema dei livelli campionati. Le mappe con la posizione delle cavità sono ottenute da OpenStreetMap.

vate concentrazioni anomale di metalli quali alluminio, arsenico, cadmio, cromo, ferro, manganese, nichel, piombo, rame, selenio, tallio e zinco, in misura superiore alle soglie normative previste per acque e fanghi. La combinazione di idrocarburi pesanti, metalli e condizioni chimico-fisiche estreme configura un quadro di rischio ecologico particolarmente critico. La valutazione della tossicità è stata condotta attraverso una batteria di saggi ecotossicologici che ha coinvolto organismi appartenenti a diversi livelli trofici. I test con *Aliivibrio fischeri* hanno evidenziato un'inibizione marcata della

Sample	Eb	Σpsi	Fn	TBI	Ecotoxicological risk	Chemical level of ecotoxicological risk
42_L1	555.05	5.93	0.0017	0.9	Severe	D
42_L2	457.72	5.93	0.0017	0.8	Severe	D
42_WL	560.98	8.98	0.0011	0.6	Severe	D
17_L1	577.34	5.93	0.0017	1.0	Severe	D
17_L2	547.51	5.93	0.0017	0.9	Severe	D
17_WL	415.58	9.20	0.0011	0.5	High	C

Fig. 3 - Livelli di rischio ecotossicologico nei due siti sulla base dei risultati dei saggi ecotossicologici. Eb: punteggio complessivo dei bioassay; ΣPsi: peso del bioassay; Fn: fattore di normalizzazione; TBI: indice integrato della batteria di organismi.

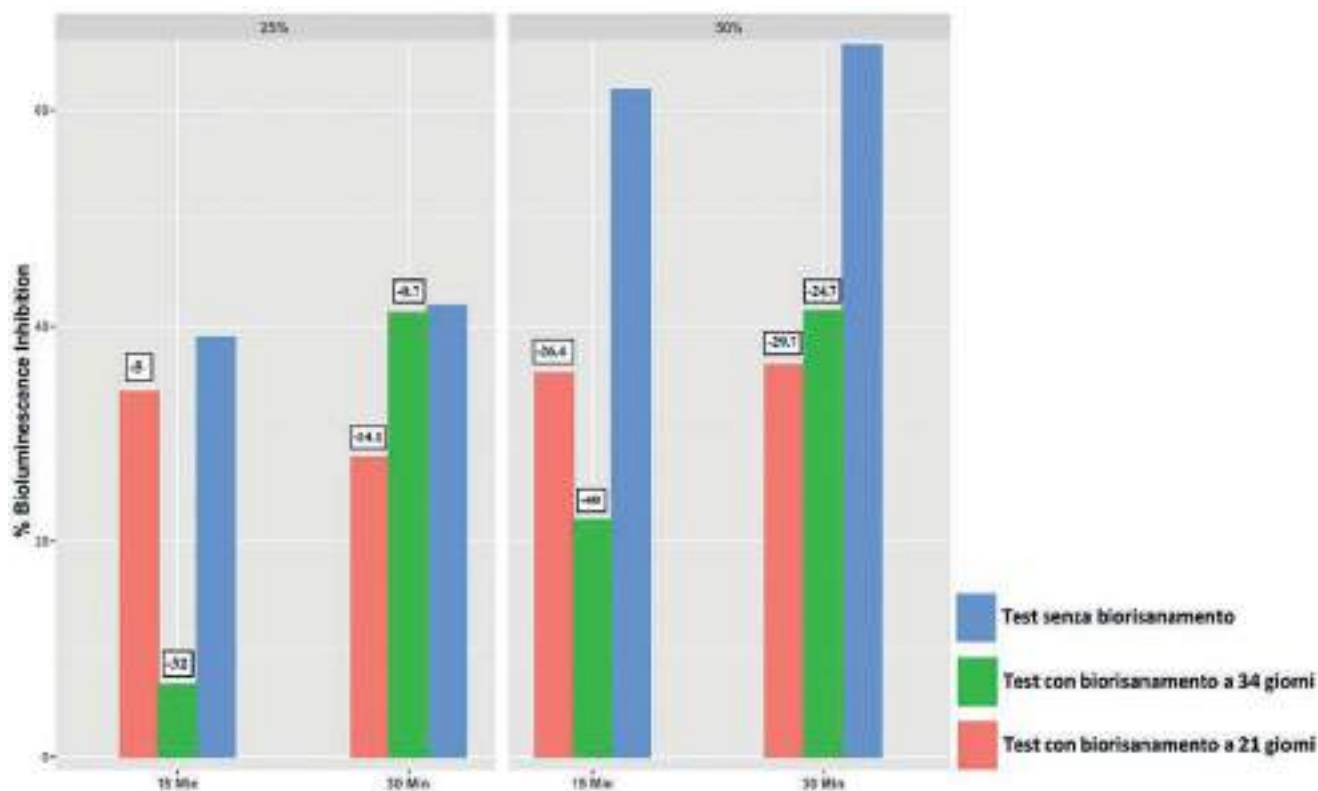


Fig. 4 - Confronto Before-After della percentuale di inibizione della bioluminescenza in *Aliivibrio fischeri*. I numeri nei riquadri bianchi rappresentano la differenza percentuale tra i test After e Before.

bioluminescenza nei campioni di fango e negli strati acquosi, mentre *Raphidocelis subcapitata* ha mostrato riduzioni significative della crescita algale e i rotiferi del genere *Brachionus* hanno risposto con elevati tassi di mortalità. L'elaborazione dei dati mediante l'indice integrato TBI (*Toxicity Battery Index*) ha collocato entrambi i siti nella classe di pericolo "Severo", sottolineando la gravità della contaminazione e l'assenza di margini di sicurezza ecologica (Fig. 3).

Parallelamente, l'analisi microbiologica ha permesso di isolare complessivamente 24 ceppi batterici dai fanghi contaminati. Tra questi, un ceppo in particolare - denominato 17_L8 e isolato dallo strato profondo della caverna presso la 17VG - è risultato capace di metabolizzare diversi substrati organici e di crescere in condizioni chimiche difficili, mostrando caratteristiche potenzialmente utili per applicazioni di biorisanamento. Il ceppo isolato ha dimostrato una notevole motilità e capacità di tolleranza ai contaminanti presenti negli elutriati di fango.

Su queste basi è stato avviato un trial di biorisanamento in laboratorio. Il ceppo 17_L8 è stato coltivato in batch su elutriati ottenuti dal fango contaminato della Caverna presso la 17VG, diluiti in percentuali variabili dal 10% al 50%. L'esperimento, condotto per 34 e 21 giorni, ha permesso di valutare la crescita batterica e gli effetti sulla tossicità residua dei campioni. I test ecotossicologici "After" hanno mostrato, in particolare per il trattamento a 34 giorni con elutriato al 50%, una riduzione della tossicità fino a circa il 40% nei confronti di *A. fischeri*, rispetto ai valori registrati nella fase "Before" (Fig. 4).

Sebbene i risultati siano preliminari e limitati al laboratorio, essi suggeriscono che ceppi autoctoni adattati alle condizioni locali possano costituire una risorsa preziosa per ridurre l'impatto ecologico delle matrici contaminate. Nel complesso, la descrizione dei dati conferma la presenza di una contaminazione grave e persistente, con un profilo tossicologico complesso, determinato dalla sinergia tra idrocarburi pesanti e metalli. Allo stesso tempo, l'esperimento di biorisanamento indica una possibile via di mitigazione, aprendo la strada a ulteriori prove su scala più ampia.

Osservazioni conclusive

Sebbene i risultati siano preliminari e limitati al laboratorio, essi suggeriscono che ceppi autoctoni adattati alle condizioni locali possano costituire una risorsa preziosa per ridurre l'impatto ecologico delle matrici contaminate. Nell'insieme, come detto, i dati confermano una contaminazione grave e persistente, con un profilo tossicologico complesso, determinato dalla sinergia tra idrocarburi pesanti e metalli.

Entrambi i siti risultano fortemente compromessi e necessitano di interventi di messa in sicurezza e bonifica. Tuttavia, il trial con il ceppo 17_L8 ha mostrato riduzioni di tossicità fino a circa il 40%, aprendo alla possibilità di sviluppare protocolli di biorisanamento basati su microbi indigeni specifici per il contesto carsico. Anche in un quadro ambientale profondamente segnato dall'inquinamento, questi risultati indicano che percorsi di recupero e mitigazione sono possibili.

Ringraziamenti

Si ringraziano la prof.ssa Francesca Malfatti e la prof.ssa Monia Renzi, relatrici della tesi di laurea da cui questo lavoro trae origine, per il costante supporto scientifico e la guida durante tutto il percorso di tesi. Grazie al Bioscience Research Center (BsRC) e al CONISMA per il contributo tecnico e scientifico, e al Dipartimento di Scienze della Vita dell'Università di Trieste, in particolare al prof. Alberto Pallavicini. La Società Adriatica di Speleologia (SAS) ha garantito un sostegno fondamentale, sia economico che logistico, oltre a fornire il prezioso contributo dei propri soci nelle attività di campionamento e sicurezza in grotta.

Bibliografia

- BRUSCHI R., 2023 - *Ecotoxicology and microbiology of two hydrocarbon-polluted karst caves (Trieste, Italy): towards the development of a bioremediation protocol*. MSc Thesis, University of Trieste, 147 pp.
- ADIPAH S., 2019 - *Introduction of petroleum hydrocarbons contaminants and its human effects*. Journal of Environmental Science and Public Health, 3, 1, pp. 1-9.
- MCKEE R.H., ADENUGA M.D. & CARRILLO J.-C., 2015 - *Characterization of the toxicological hazards of hydrocarbon solvents*. Critical Reviews in Toxicology, 45, 4, pp. 273-365.
- MITRA S., CHAKRABORTY A.J., TAREQ A.M., EMRAN T.B., NAINU F., KHUSRO A., IDRIS A.M., KHANDAKER M.U., OSMAN H., ALHUMAYDHI F.A. et al., 2022 - *Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity*. Journal of King Saud University-Science, p. 101865.
- FORD D. & WILLIAMS P.D., 2007 - *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- SABA G., 2015 - *Il Grande Fuoco: 4 agosto 1972: l'attentato all'oleodotto di Trieste*. Mgs Press, 2015.
- BRUN C., 2020 - *Indagini preliminari sulle forme di inquinamento della Caverna presso la 17 VG*. La Nostra Speleologia, v.u. 2020.

Giacomo Canciani^{1, 2}, Martina Colautti³, Caterina Bearzotti¹

La fauna cavernicola delle grotte nella Valle di Prestento (Prealpi Giulie meridionali). Nuovi dati

1) G.S. Talpe del Carso - J.K. Kraski Krti, San Michele del Carso/Vrh (Go);
2) Gruppo Entomologico Triestino "Giuseppe Muller", Trieste; 3) Associazione Speleologica
Forum Julii Speleo, Cividale del Friuli (Ud)

Abstract. In this note we present updated data on cave fauna of the Prestento Valley. The study is based on faunistic surveys carried out between 2018 and 2025 in the Foran di Landri and Foran des Aganis caves, integrated with a review of the existing literature. Almost 60 taxa were recorded, mostly trogliphilic species, 24 of which are reported for the first time in the area. Among them are three troglobiotic species: the gastropod *Zospeum isselianum*, the beetle *Aphaobius forojulienis* and the millipede *Stygiulus fimbriatus*. Particularly noteworthy are two entities potentially new to science: a dendrocoelid flatworm and a dysderid spider of the genus *Mesostalita*. These findings significantly expand current knowledge of subterranean biodiversity of the Julian Prealps and underline its biogeographic importance.

Riassunto. In questa nota vengono presentati i dati aggiornati sulla fauna cavernicola della Valle di Prestento. Lo studio si basa su ricerche faunistiche condotte tra il 2018 e il 2025 nelle grotte Foran di Landri e Foran des Aganis, integrate da una revisione della letteratura esistente. Sono state censite quasi 60 entità faunistiche, per lo più specie troglifile, di cui 24 segnalate per la prima volta nell'area. Tra queste vi sono anche tre specie troglobie: il gasteropode *Zospeum isselianum*, il coleottero colevide *Aphaobius forojulienis* e il diplopode *Stygiulus fimbriatus*. Particolarmente rilevanti sono due entità potenzialmente nuove per la scienza: un plateminta dendrocoelide e un ragno disderide del genere *Mesostalita*. Questi risultati ampliano in modo significativo le conoscenze sulla biodiversità sotterranea delle Prealpi Giulie e ne sottolineano l'importanza biogeografica.

Introduzione

La Valle di Prestento è una piccola valle fluviale che si apre a Nord dell'omonima località, nel comune di Torreano (Udine), nelle Prealpi Giulie meridionali. Si sviluppa in direzione Nord-Sud, a un'altitudine compresa tra circa 200 e 500 metri s.l.m. La valle è attraversata da una fitta rete di piccoli corsi d'acqua che confluiscono nel torrente Chiarò di Prestento, affluente del torrente Torre. Dal punto di vista geologico, la porzione più bassa (a Sud) è costituita dal Flysch di Masarolis, mentre quella più alta (a Nord) dal Flysch di Grivò. Quest'ultimo è localmente intervallato dal megastrato di Vernasso, un banco carbonatico al cui interno si sviluppano i principali fenomeni carsici dell'area (AVIANI & DREOSSI, 2019). Nella valle è nota una dozzina di cavità, per lo più di dimensioni modeste. Fanno eccezione due grotte di dimensioni maggiori, il Foran di Landri (11/46Fr) e il Foran des Aganis (122/48Fr), entrambe a sviluppo orizzontale e percorse da un corso d'acqua che fuoriesce dall'ingresso. Per la loro estensione, accessibilità e rilevanza storica, le indagini biospeleologiche si sono concentrate su queste due cavità.

La Valle di Prestento è stata oggetto in passato di diverse segnalazioni faunistiche, a partire dai primi anni del '900. Le ricerche sono proseguite, seppur in modo discontinuo, fino ad anni relativamente recenti. Tuttavia, fino al 2018, anno di inizio delle nostre ricerche, le segnalazioni si riferivano per lo più a osservazioni occasionali effettuate nel corso di visite alle due cavità. Inoltre, le conoscenze erano frammentarie e mancava ancora un catalogo faunistico dettagliato dell'area. In quell'anno, nel corso della campagna esplorativa organizzata dall'A.S. Forum Julii Speleo, fu condotta la prima indagine approfondita nel Foran di Landri, i cui risultati (CANCIANI, 2019) sono oggi da considerarsi già superati. Dal 2019 le ricerche sono proseguite in modo più sistematico e

sono state estese anche al Foran des Aganis, con l'obiettivo di delineare un quadro complessivo della fauna cavernicola dell'area. In questa nota presentiamo una sintesi aggiornata dei dati raccolti negli ultimi anni, con particolare attenzione alle nuove segnalazioni.

Descrizione delle due cavità

Il Foran di Landri (Fig. 1) ha uno sviluppo planimetrico di 314 m e un dislivello positivo di 60 m. L'ampio portale d'ingresso conduce a una sala circolare di 16 m di diametro occupata da un laghetto perenne che convoglia le acque interne. Da qui si sviluppa il ramo principale, sub-orizzontale, che dopo due sifoni consecutivi conduce a un tratto fangoso, seguito da ambienti concrezionati con colate, vaschette limpide e sottili stalattiti. La galleria assume un andamento a spirale e porta a una sala semiallagata che termina nel terzo sifone. Oltre il sifone si apre una saletta con vaschette e un camino laterale di 13 m, alla base del quale si trova il quarto sifone. Quest'ultimo immette in un meandro allagato, che rappresenta la porzione più interna finora esplorata. Sopra il portale d'ingresso si apre il ramo alto, che conduce a una sala concrezionata sormontata da un camino di circa 30 m terminante in strettoie impraticabili (A.S. FORUM JULII SPELEO, 2019).

Il Foran des Aganis (Fig. 2) ha uno sviluppo planimetrico di 761 m e un dislivello per lo più positivo di 90 m. Dal portale d'ingresso si sviluppa una galleria, percorsa da un torrente che ha origine nella parte più interna della cavità, che dopo circa 160 m raggiunge un sifone non superabile senza attrezzatura speleo-subacquea. Le ricerche faunistiche degli ultimi anni hanno riguardato solo



Fig. 1 - Rilievo del Foran di Landri (11/46Fr; A.S. FORUM JULII SPELEO, 2019).

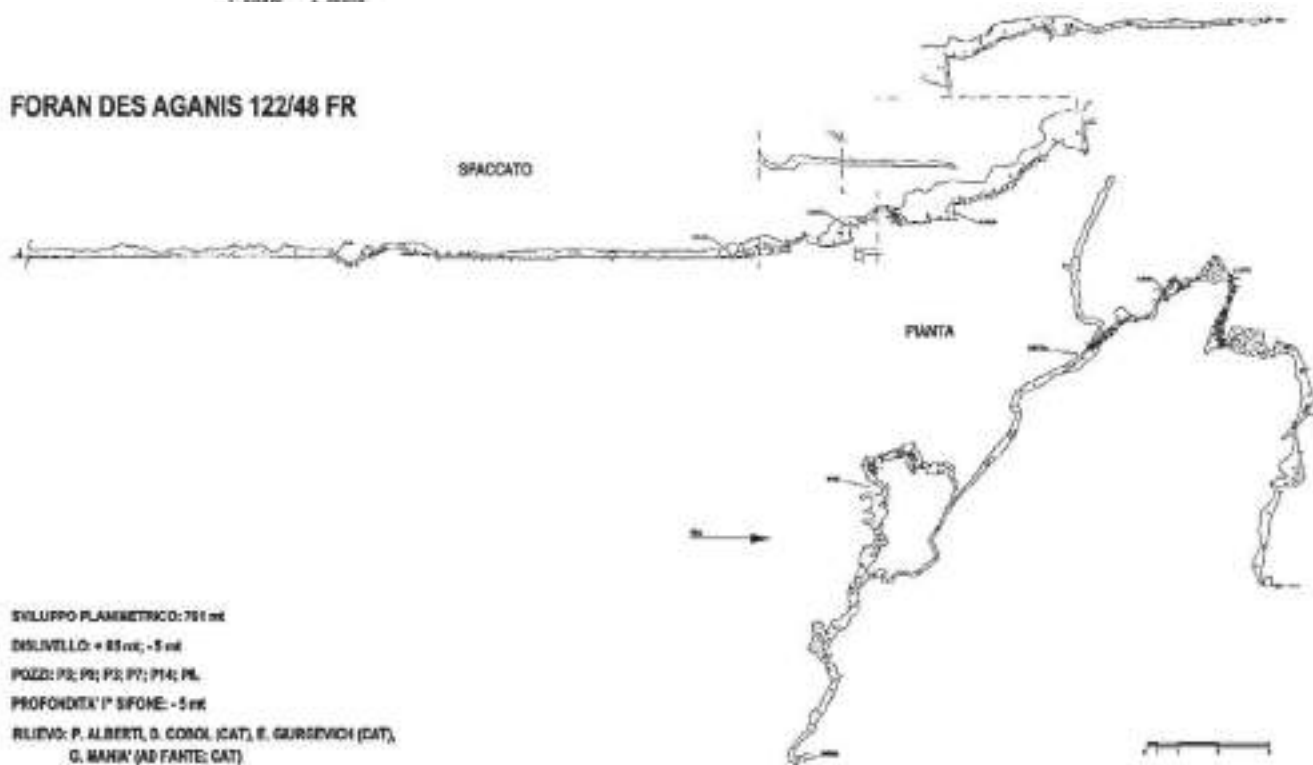


Fig. 2 - Rilievo del Foran des Aganis (122/48Fr; Catasto Speleologico Regionale del Friuli Venezia Giulia).

questa porzione di cavità. Dopo il sifone la cavità prosegue con un'ulteriore galleria orizzontale allagata che a circa 350-400 m dall'ingresso tende ad assumere un andamento ascendente con alcuni brevi pozzi, fino a raggiungere un ramo ancora in parte inesplorato. Le concrezioni interne sono piuttosto scarse, mentre predomina l'argilla depositata dall'acqua sulle pareti e sul fondo della cavità (Catasto Speleologico, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia).

Materiali e metodi

Le indagini hanno integrato ricerca sul campo e ricerca bibliografica. La ricerca sul campo è stata condotta attraverso campionamenti effettuati tra il 2018 e il 2025 in diversi periodi dell'anno, con il prezioso supporto di A.S. Forum Julii Speleo, Jamarski Klub Kraški Krti e Gruppo Entomologico Triestino "G. Muller". Nel Foran di Landri le campagne esplorative del 2018 e del 2019, che hanno previsto anche lo svuotamento dei sifoni, hanno consentito di indagare anche le zone più interne della cavità. Le ricerche successive si sono concentrate sulla parte iniziale e sul ramo alto. Nel Foran des Aganis, invece, le indagini hanno riguardato solo la parte iniziale, fino al primo sifone.

L'identificazione delle specie è stata effettuata con il contributo di vari specialisti: Riccardo Cecchini (imenotteri), Andrea Colla, Luca Dorigo e Federica Losacco (coleotteri), Sergio Cosoli (lepidotteri), Willy de Mattia (gasteropodi), Bruno Grego (ditteri), Omar Lodovici (tricotteri), Raoul Manenti (platelminti), Emiliano Peretti (chilopodi), Luca Turolo (ragni e opilioni), Boyan Vagalinski (diplopodi). Contestualmente è stata condotta una revisione bibliografica per raccogliere tutte le precedenti segnalazioni faunistiche riferite alle due cavità. Questo approccio ha permesso di delineare un quadro complessivo e aggiornato della fauna cavernicola dell'area.

Risultati

Le ricerche svolte hanno permesso di censire quasi 60 entità faunistiche presenti nella Valle di Prentento. Di queste, circa la metà sono specie strettamente legate agli ambienti sotterranei, sia terrestri (troglubi ed eutroglofili) che acquatici (stigobi ed eustigofili). Le nuove indagini hanno consentito di individuare 24 entità non segnalate in precedenza, raddoppiando il numero di specie note. Alcune sono state già oggetto di pubblicazioni recenti, come il diplopode *Stygiulus fimbriatus* (VAGALINSKI et al., 2022; CANCIANI et al., 2023) e l'imenottero icneumonide *Dyphius quadripunctorius* (CANCIANI & CECCHINI, 2023). Le nuove segnalazioni riguardano soprattutto la fauna terrestre, che è stata oggetto di indagini più approfondite. Il risultato più significativo riguarda il rinvenimento di due entità potenzialmente nuove per la scienza (un platelminta della famiglia Dendrocoelidae e un ragno Dysderidae del genere *Mesostalita*), descritte in un paragrafo dedicato.

Le nuove segnalazioni per la Valle di Prentento

Le nuove segnalazioni per la Valle di Prentento riguardano diversi gruppi tassonomici.

Tra i vertebrati sono state documentate due nuove specie: la salamandra pezzata (*Salamandra salamandra*) tra gli anfibi e il ghiro (*Glis glis*) tra i mammiferi. Esemplari adulti di salamandra, specie legata agli ambienti umidi, si osservano con frequenza agli ingressi di entrambe le cavità, mentre numerose larve sono presenti nel laghetto nella prima sala del Foran di Landri e nel torrente che fuoriesce dal Foran des Aganis. La presenza del ghiro, invece, è stata accertata dal ritrovamento di resti ossei ed escrementi attribuibili alla specie.

La maggior parte delle nuove segnalazioni riguarda gli artropodi, che costituiscono il gruppo più rappresentato in ambiente ipogeo. Sono state rinvenute per lo più specie troglofile, alcune delle quali piuttosto comuni all'ingresso e nelle parti iniziali delle grotte. Tra gli insetti sono stati documentati i lepidotteri *Triphosa dubitata*, *Scoliopteryx libatrix* e *Hypena rostralis*, l'ortottero ensifero *Troglophilus neglectus*, il tricottero *Micropterna sequax*, il dittero nematocero *Limonia nubeculosa*, il coleottero colevide *Leptinus testaceus* e l'imenottero icneumonide *Dyphius quadripunctorius*. Quest'ultimo, pur essendo ampiamente diffuso in Europa, è stato segnalato per la prima volta nelle



Fig. 3 - Nuove specie troglomiche segnalate nel Foran di Landri. Da sinistra, *Zospeum isselianum* (circa 10x), *Aphaobius forojuliensis* (circa 5x; foto F. Losacco), *Stygiulus fimbriatus* (circa 5x; foto A. Colla).

Prealpi Giulie (CANCIANI & CECHINI, 2023). Degno di nota è il rinvenimento di *Troglophilus neglectus* in un settore interno del Foran di Landri tra il secondo e il terzo sifone (denominato “cunicolo delle cavallette”), accessibile solo superando tratti perennemente sommersi. Ciò suggerisce l’esistenza di un ingresso secondario alla cavità, di dimensioni sufficienti per il passaggio di questo insetto, ma probabilmente non adatte all’uomo (CANCIANI, 2017). Nel Foran des Aganis è stata registrata l’insolita presenza contemporanea di tre specie di ditteri nematoceri del genere *Culex*: *C. pipiens* (largamente predominante), *C. hortensis* e *C. torrentium*, la cui presenza è stata confermata tramite analisi molecolari (B. Grego, com. pers, 2025). Tra gli aracnidi sono stati osservati i ragni *Kryptonesticus eremita* e *Clubiona* sp., mentre tra i miriapodi si segnala la presenza del centopiedi litobide *Eupolybothrus tridentinus*.

Particolare rilievo riveste il rinvenimento nel Foran di Landri di tre specie troglomiche mai segnalate in precedenza nell’area: il mollusco gasteropode *Zospeum isselianum*, a distribuzione alpino-dinamica, il colevide *Aphaobius forojuliensis*, endemico delle Alpi e Prealpi Giulie, e il diplopode julide *Stygiulus fimbriatus* (Fig. 3). In particolare, quest’ultimo era noto finora unicamente nella Grotta di San Giovanni d’Antro (4/43Fr) e il Foran di Landri rappresenta quindi la seconda stazione conosciuta. Questo ritrovamento è stato fondamentale per comprendere meglio le abitudini ecologiche della specie, che ha uno stile di vita semiacquatico, e le relazioni filogenetiche all’interno della famiglia Julidae (VAGALINSKI et al., 2022; CANCIANI et al., 2023).

Potenziali specie nuove per la scienza

Nel corso delle ricerche sono state individuate due entità faunistiche potenzialmente nuove per la scienza. Entrambe sono tuttora in fase di studio e richiedono ulteriori analisi morfologiche e genetiche per definire il loro status tassonomico.

La prima è un plattelminta triclade (planaria) della famiglia Dendrocoelidae, verosimilmente ascrivibile al genere *Dendrocoelum*. Alcuni esemplari di piccole dimensioni (circa 2 mm), anoftalmi e di colore bianco lattiginoso sono stati osservati nelle acque e sulle pareti umide nelle zone più interne del Foran di Landri, oltre il quarto sifone. Per le caratteristiche morfologiche e l’habitat frequentato si tratta di organismi stigobi. Le conoscenze sulle planarie sotterranee risultano ancora frammentarie e la letteratura a riguardo è piuttosto scarsa. Al momento, nelle Prealpi Giulie è noto soltanto *Dendrocoelum collinii*, segnalato da DEL PAPA (1959) per la Grotta Nuova di Villanova (939/323Fr) e successivamente citato in altre pubblicazioni. Altri Dendrocoelidae stigobi non identificati sono stati segnalati recentemente in altre cavità dell’area: Grotta di Viganti (110/66Fr), Risorgiva sotto il cimitero di Chialminis (1791/735Fr), Grotta Egidio Feruglio (3895/2175Fr) e Grotta Tirfor (7739/4721Fr) (STOCH, 2008; MANENTI et al., 2018). I primi riscontri sugli esemplari del Foran di Landri indicano differenze rispetto a *D. collinii*, tali da far ipotizzare l’appartenenza a una specie

Fig. 4 - Esemplare di *Mesostalita* del Foran di Landri (foto A. Colla).



non ancora descritta. Sono in corso analisi genetiche per chiarire la loro identità. Qualora questa tesi venisse confermata, sarà necessario un ulteriore campionamento per descrivere formalmente la nuova specie.

La seconda è un ragno della famiglia Dysderidae, appartenente al genere *Mesostalita*. Un singolo esemplare, morto ma ben conservato, è stato rinvenuto nel Foran di Landri tra i massi di crollo della sala situata poco oltre i primi due sifoni. Si tratta di una femmina lunga 3,1 mm, con caratteristiche tipiche delle specie troglobie: corpo depigmentato, anoftalmia e zampe allungate (Fig. 4). L'individuo è attribuibile a un taxon, segnalato da GASPARO (1997) per la Grotta di Canebola (2370/1080Fr) come *Stalita* sp. prope nocturna (oggi da riferire al genere *Mesostalita*) per la somiglianza con *M. nocturna* (endemico del Carso italiano, sloveno e croato). Tale taxon non è ancora stato formalizzato come nuova specie ed era noto soltanto in tre cavità nelle Prealpi Giulie: Grotta di Canebola, Voragine a Sud di Prepotischis (2240/1025Fr) e Pozzo 1° di Miscecco (2780/1342Fr) (GASPARO, 1997; BOGNOLO, 2002). Il Foran di Landri rappresenta la quarta stazione della specie. Al momento è noto solo un individuo per ogni sito, tutte femmine. Tuttavia, a causa delle scarse conoscenze sulla variabilità dei genitali femminili, per poter formalizzare la specie è necessario raccogliere almeno un maschio. Indagini genetiche potranno aiutare a comprendere la posizione di questo taxon all'interno del genere. Dal punto di vista biogeografico, il dato è di particolare interesse: *Mesostalita* è un genere dinarico, che attualmente comprende tre specie distribuite tra il Carso italiano e la Bosnia-Erzegovina. La presenza di individui nelle Prealpi Giulie implica un ampliamento dell'areale di questo genere verso Nord-Ovest. Considerando che l'Isonzo rappresenta una barriera per molti organismi troglobi, la distribuzione di *Mesostalita* su entrambi i lati del fiume ne fa uno dei pochi generi cavernicoli dinarici a superare questo limite biogeografico (CANCIANI et al., 2025).

Conclusioni

Le ricerche degli ultimi anni hanno reso la Valle di Prentento l'area delle Prealpi Giulie meglio conosciuta dal punto di vista biospeleologico. Tuttavia, il quadro faunistico dell'area non può ancora considerarsi completo e il numero di specie note è destinato a crescere. Diversi gruppi (anellidi, collemboli, dipluri e ragni) sono ancora in fase di studio e nuovi dati potrebbero emergere da ulteriori analisi. Inoltre, poiché ogni uscita di campionamento ha portato all'individuazione di specie nuove per l'area, è verosimile attendersi ulteriori segnalazioni.

Particolare attenzione è attualmente rivolta alle due entità potenzialmente nuove per la scienza (il plateminta della famiglia Dendrocoelidae e il ragno Dysderidae del genere *Mesostalita*), entrambe rinvenute nelle porzioni più interne del Foran di Landri. Un contributo specifico sulla presenza del genere *Mesostalita* nelle Prealpi Giulie è stato recentemente pubblicato (CANCIANI et al., 2025). Le prossime ricerche mireranno a superare nuovamente i sifoni interni per raggiungere le zone di

rinvenimento. La raccolta di nuovi dati e ulteriori indagini morfologiche e genetiche saranno indispensabili per chiarire la reale entità di questi taxa.

Per tali motivi le attività di studio nell'area proseguiranno anche in futuro, con la prospettiva di estenderle anche alle cavità minori, finora non indagate. Ciò consentirà di ampliare la documentazione su un'area che si conferma di grande interesse biospeleologico, auspicando un sempre maggiore coinvolgimento della comunità speleologica.

Ringraziamenti

Ringraziamo sentitamente tutte le persone e le associazioni che hanno reso possibile l'esplorazione del Foran di Landri e ci hanno supportato nelle ricerche faunistiche. Un ringraziamento particolare va a Simone Del Ben (A.S. Forum Julii Speleo). Ringraziamo gli specialisti che hanno contribuito all'identificazione delle specie: Riccardo Cecchini, Andrea Colla, Sergio Cosoli, Bruno Grego, Luca Turolo (Trieste), Willy de Mattia (Vienna), Luca Dorigo (Udine), Omar Lodovici (Bergamo), Federica Losacco (Udine), Raoul Manenti (Milano), Emiliano Peretti (Trento), Boyan Vagalinski (Sofia). Infine, ringraziamo Andrea Colla e Federica Losacco per il materiale fotografico e Bruno Grego per le informazioni relative ai ditteri rinvenuti nel Foran des Aganis.

Bibliografia

- A.S. FORUM JULII SPELEO, 2019 - *Foran di Landri. Il Landri svelato: ricerche e approfondimenti su una grotta tra storia e folklore*, 127 pp.
- AVIANI U. & DREOSSI I., 2019 - *La geologia dell'alta valle di Prestento e del Foran di Landri*. In: A.S. FORUM JULII SPELEO (ed.), *Foran di Landri. Il Landri svelato: ricerche e approfondimenti su una grotta tra storia e folklore*, pp. 35-64.
- BOGNOLO M., 2002 - *I coleotteri cavernicoli della valle dello Judrio*. In: C.R.C. "CARLO SEPPENHOFER" (ed.), *La valle dello Judrio. Progetto di ricerca speleologica Judrio 2000*, pp. 135-142.
- CANCIANI G., 2019 - *La fauna cavernicola del Foran di Landri*. In: A.S. FORUM JULII SPELEO (ed.), *Foran di Landri. Il Landri svelato: ricerche e approfondimenti su una grotta tra storia e folklore*, pp. 65-79.
- CANCIANI G. & CECHINI R., 2023 - *Due nuove stazioni per Diphysus quadripunctorius (O.F. Müller, 1776) (Hymenoptera, Ichneumonidae) nelle Prealpi Giulie e nella Tuscia viterbese*. *Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Trieste*, 64, pp. 81-86.
- CANCIANI G., COLAUTTI M. & DEL BEN S., 2023 - *Foran di Landri: la seconda stazione per il millepiedi cavernicolo Stygiulus fimbriatus*. In: FINOCCHIARO F. & MUSCIO G. (eds), *Atti del Convegno Speleo2022*, pp. 155-162.
- CANCIANI G., TUROLO L., TRINGALI L., COLAUTTI M. & COLLA A., 2025 - *The presence of the Dinaric genus Mesostalita Deeleman-Reinhold, 1971 (Arachnida: Araneae: Dysderidae) in the Julian Prealps (NE Italy)*. *Acta Carsologica*, 54, 1, pp. 95-106. <https://doi.org/10.3986/ac.v54i1.13918>.
- CATASTO SPELEOLOGICO REGIONALE, REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA - <https://catastogrotte.regione.fvg.it/>.
- DEL PAPA R., 1959 - *Presenza di un Dendrocoelum nelle grotte friulane*. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie B*, 66, pp. 56-59.
- GASPARO F., 1996 - *Sulla presenza del genere Stalita Schiödte (Araneae, Dysderidae) in Friuli (Italia nordorientale)*. *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"*, 33, pp. 47-53.
- MANENTI R., BARZAGHI B., LANA E., STOCCHINO G.A., MANCONI R. & LUNGHU E., 2018 - *The stenoendemic cave-dwelling planarians (Platyhelminthes, Tricladida) of the Italian Alps and Apennines: Conservation issues*. *Journal for Nature Conservation*, 45, pp. 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2018.08.001>.
- STOCH F., 2008 - *La fauna cavernicola delle Prealpi Giulie settentrionali*. In: MUSCIO G. (ed.), *Il fenomeno carsico delle Prealpi Giulie Settentrionali. Memorie Istituto Italiano di Speleologia*, s. II, 20, pp. 97-121.
- VAGALINSKI B., BORISSOV S., BOBEVA A., CANCIANI G. & ANTIĆ D.Ž., 2022 - *The mostly cavernicolous millipede genus Stygiulus Verhoeff, 1929, stat. nov.: taxonomy, distribution and phylogenetic relationships (Diplopoda, Julida, Julidae)*. *European Journal of Taxonomy*, 798, 1, pp. 30-69. <https://doi.org/10.5852/ejt.2022.798.1669>.

Enrico Merlak¹

Terre rare (rare earth elements - REE) nelle bauxiti carsiche del Nord Adriatico

1) Commissione Grotte "E. Boegan" SAG-CAI, Trieste

Abstract. The European Union, through the "European Commission for the Development of a sustainable exploitation scheme for Europe's Rare Earth ore deposits", has created EURARE, a project aimed at researching geological resources potentially suitable for the extraction of REE minerals. The evolution of studies on REE contained in the karst bauxites of the Northern Adriatic is here described. The topic is currently the subject of great interest by the EU due to the possible exploitation of bauxites and processing sludge (red muds).

Riassunto. L'Unione Europea, attraverso la "European Commission for the Development of a sustainable exploitation scheme for Europe's Rare Earth ore deposits" ha creato l'EURARE, progetto destinato alla ricerca delle risorse geologiche potenzialmente favorevoli all'estrazione dei minerali REE. Nel corso delle prospezioni è emerso che anche le bauxiti in giacitura carsica e anche i relativi prodotti residui di lavorazione del processo Bayer rappresentano una potenziale risorsa di REEs. Tutto ciò si concretizza in una nuova possibilità di sfruttamento dei depositi bauxitici dei Balcani e dei fanghi residui di lavorazione.

Introduzione

Le bauxiti sono il residuo finale di un processo di alterazione delle lateriti di superficie, limitato ad aree emerse sottoposte ad intensa dissoluzione chimica e fisica (*weathering*) con formazione di nuovi minerali (dissoluzione incongruente e neo-mineralizzazione).

Il fenomeno richiede una lunga esposizione subaerea, condizioni climatiche tropicali o subtropicali, con temperature elevate e abbondante piovosità.

Possono suddividersi in due tipi:

- *bauxiti lateritiche*, derivanti da un processo di laterizzazione di sottostanti rocce allumino-silicatiche
- *bauxiti carsiche o in giacitura carsica*, sviluppate su rocce carbonatiche durante le lunghe fasi di emersione (D'ARGENIO & MINDSZENTY, 1995).

Oggi è accertato che le bauxiti carsiche, e tutte le strutture paleo-carsiche associate, testimoniano importanti discordanze stratigrafiche regionali e alla luce delle attuali visioni scientifiche danno risposte alle relazioni tra tettonica, eustatismo, paleo-climatologia e paleo-geografia (Fig. 1).

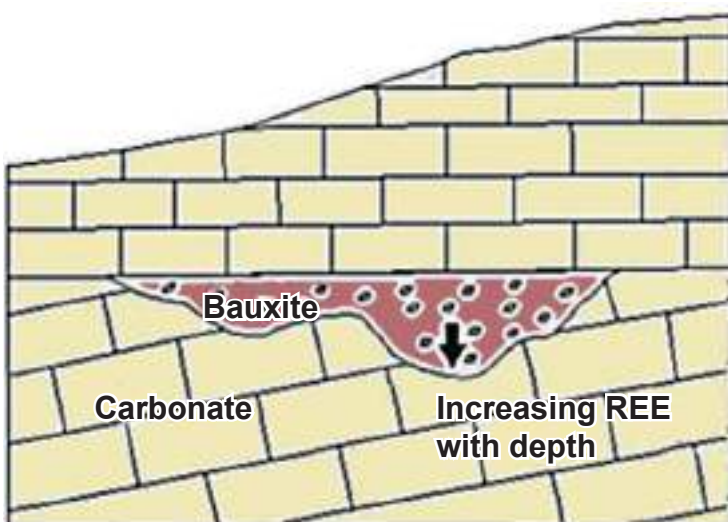


Fig. 1 - Diagramma schematico illustrativo della classica tipologia di accumulo di bauxite carsica nell'area mediterranea (da BARDOSSY, 1982).



Fig. 2 - Ingrandimento al SEM di frammento di bastnäsite; nel caso specifico MAXIMOVIĆ & PANTO (1985) hanno identificato il minerale con la seguente specifica formula: $(Nd_{0,41} La_{0,36} Pr_{0,11} Sm_{0,06} Eu_{0,02} Ca_{0,01} Gd_{0,02}) \Sigma_{0,99} (CO_3)_{1,03} [(OH)_{0,55} F_{0,38}] \Sigma_{0,93}$.

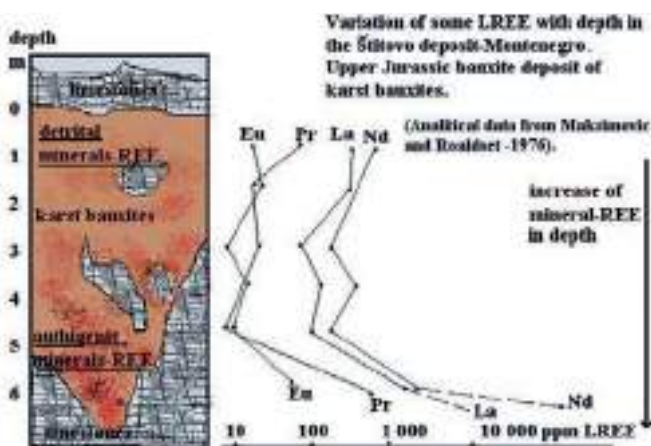


Fig. 3 - Variazioni delle concentrazioni di terre rare (REE - rare earth elements) in un deposito di bauxite carsica del Montenegro in funzione della profondità del deposito stesso.

Si è sviluppato così il concetto che le bauxiti carsiche sono markers regionali di eventi globali e la loro presenza negli intervalli stratigrafici testimonia una coincidenza di eccessi climatici caldo-umidi e prolungata esposizione subaerea di estesa area di piattaforma carbonatica, in corrispondenza di fenomeni di intenso vulcanesimo di tipo esplosivo con attività eolica.

I protoliti responsabili dell'accumulo delle lateriti possono essere riconducibili a rocce femiche e ultrafemiche, a residui di affioramenti ofiolitici e a materiale vulcanico trasportato dal vento, con apporto di minerali contenenti terre rare (REE - rare earth elements).

La presenza di terre rare nelle bauxiti carsiche di Istria, Adriatico settentrionale e Dinaridi esterne (Croazia, Bosnia Erzegovina, Montenegro) è stata accertata già negli anni Settanta del Novecento. I primi studi italiani sono riconducibili alle ricerche dell'Università degli Studi Federico II di Napoli, ma analisi, studi geochimici e ricerche di campagna sono state eseguite soprattutto da studiosi croati, serbi e ungheresi. Le analisi hanno rivelato soprattutto la presenza di minerali LREE di Y, La, Nd e Ce (MERLAK, 2021).

I minerali più frequenti e presenti nei depositi bauxitici sono di natura autigena e appartengono al gruppo della bastnäsite-(Nd) e -(Ce) e della hydroxylbastnäsite.

Tra quelli identificati in Europa e che caratterizzano i depositi di bauxiti in giacitura carsica dell'area circum-mediterranea e del nord-Adriatico, sono presenti con frequenza i seguenti minerali-REE qui di seguito indicati con formula generica:

- *bastnäsite*: $REE(CO_3)F$
- *monazite*: $REE(PO_4)$
- *xenotime*: $(Y, HREE)PO_4$

Le concentrazioni REE attualmente accertate nei giacimenti di bauxite carsiche sono diverse (con variazioni dell'ordine compreso tra $n \cdot 10^2$ e $n \cdot 10^3$ ppm) e dipendono essenzialmente dalla concentrazione iniziale nei protoliti. Ricerche approfondite condotte hanno consentito di accertare importanti concentrazioni di REE in particolare nelle bauxiti carsiche di Grecia, Croazia e Montenegro, con valori stimati tra 600ppm e 6.000 ppm.

Si è osservato che nello stesso deposito bauxitico possono coesistere più minerali-REE autigeni in associazione tra loro. La concentrazione di minerali-REE autigeni è intensa verso il fondo dei depositi, dove le pareti e le ostruzioni calcaree operano come un efficiente barriera geochimica.

Un aspetto economico di rilevante importanza riguardante le bauxiti in giacitura carsica dell'area circum-mediterranea è rappresentato dai fanghi prodotti attraverso il processo Bayer (*red mud*). Fino a tempi recenti questi prodotti residui venivano impiegati per la produzione di cementi e ceramiche e costituiscono tuttora un problema di conservazione e smaltimento.

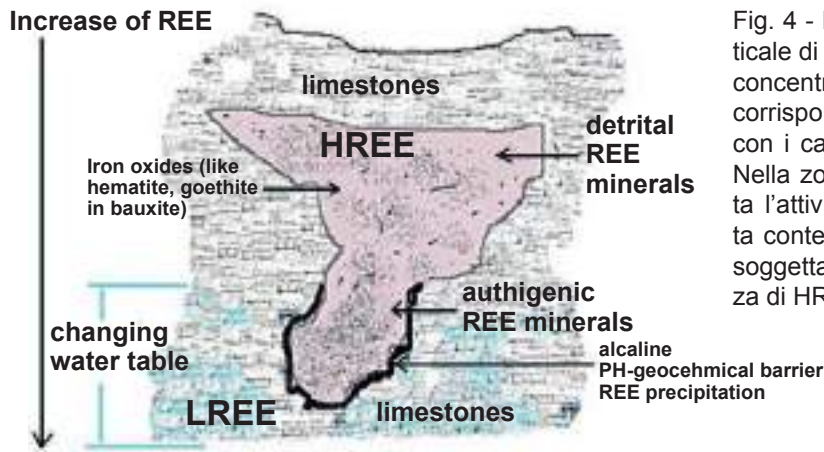


Fig. 4 - Distribuzione delle REE lungo il profilo verticale di un deposito di bauxite carsica. La massima concentrazione (prevalentemente LREE) si rileva in corrispondenza del fondo del deposito al contatto con i calcari che fungono da barriera geochimica. Nella zona freatica (*changing water table*) aumenta l'attività dei carbonati per corrosione e aumenta contemporaneamente il pH. Verso la superficie, soggetta ad ossidazione, si riscontra una prevalenza di HREE (disegno: Merlak).

Conclusioni

Con l'approfondimento degli studi sulle terre rare presenti nelle bauxiti carsiche dei terreni calcarei si è aperta una nuova fase di studi, promossa anche dalla UE (DEADY et. al., 2016; EURARE, 2013, 2017), che consentirà di acquisire maggiori conoscenze sull'evoluzione della Piattaforma Calcarea Adriatica e sui rapporti tra tettonica ed eventi climatici.

Contemporaneamente la scienza offre in questa occasione una attenzione per una nuova tematica da inserire nel complesso mondo della Speleologia.

Bibliografia

- BARDOSSY GY., 1982 - *Karst Bauxites*. Elsevier Science. Amsterdam. 441 pp.
- DEADY E., MOUCHOS E., GOODENAUGH K., WILLIAMSON B. & WALL. F., 2014 - *Rare earth elements in karst-bauxites: A novel untapped European resource?* <https://www.researchgate.net/publication/298576499> - Conference Paper - September 2014.
- D'ARGENIO B. & MINDSZENTY A., 1995 - *Bauxites and related paleokarst: tectonics and climatic events markers at regional unconformities*. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 88, pp. 453-499.
- EURARE, 2013, 2017 - *Research and development for the Rare Earth Element supply chain in Europe*. www.eurare.org.
- MAKSIMOVIĆ Z. & PANTO G., 1985 - Neodymian goyazite in the bauxite deposit of Vlasenica, Yugoslavia. *Mineralogy and Petrology*, 34, 2, pp. 159-165.
- MERLAK E., 2021 - *Le terre rare (REE - Rare Earth Elements) nelle bauxiti Carsiche dei Balcani e della Grecia*. *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"*, 44, pp. 99-113.

Marco Corvi¹

Il rilievo tra arte e tecnica

1) Speleo Club Ribaldone, Genova - InGrigna!

Abstract. The drafting of a cave map is a peculiar cartographic problem, with roots in the three-dimensionality of the object that is mapped. An accurate analysis of the different solutions used to address the cartographic issues that arise in cave maps, goes well beyond the limits of this note. Here we summarize only general principles. There is no unique solution suitable for all cases. The cartographer is lead to apply different approaches depending on the complexity of the cave map. The development of a cartographic expertise is usually left to self-learning, but nowadays many resources on the web are available to help new cave cartographers.

Riassunto. La stesura della mappa di una grotta è un problema cartografico peculiare che ha radici nella intrinseca tridimensionalità dell'oggetto rappresentato. Un'analisi accurata delle soluzioni adottate di fronte a problemi cartografici riscontrati nelle mappe di grotta richiederebbe molto spazio. In questa nota si accennano solo principi generali. Non esiste un'unica soluzione valida per tutte le situazioni, ma il cartografo si trova ad applicare soluzioni diverse a seconda della complessità del rilievo. Lo sviluppo delle capacità cartografiche è usualmente lasciato all'autoapprendimento, ma è oggi facilitato dalle risorse reperibili in internet.

Introduzione

Mappe e disegni, al pari di scritti e discorsi, sono un modo per documentare e comunicare informazione. L'informazione d'eccellenza per le mappe è quella "spaziale", cioè le interrelazioni spaziali fra entità. Una specificità delle mappe di grotta è che l'oggetto che rappresentano è un vuoto tridimensionale. La grotta è un "vuoto" all'interno dell'ammasso roccioso della montagna, qualcosa che non c'è. Ma non si può disegnare quello che non c'è; e allora le mappe di grotta riportano quello che non è "vuoto", cioè il bordo della grotta, e quello che è contenuto dentro la grotta.

La seconda caratteristica delle grotte è che si sviluppano in tre dimensioni. Questo problema è stato risolto da oltre un secolo con mappe composte da più proiezioni piane che preservano le relazioni metriche: pianta, profilo (esteso o proiettato) e sezioni trasversali. Questo porta ad avere occlusioni fra porzioni di grotta. La realizzazione di una mappa di grotta è dunque un problema genuinamente cartografico in cui bisogna rappresentare una entità tridimensionale, trattando le occlusioni.

Ogni mappa di grotta, per quanto accurata, non è mai la grotta stessa. La mappa presenta un modello che serve per descrivere e comunicare una sintesi della nostra percezione della grotta: come è fatta, quanto è grande, cosa vi è dentro. La realizzazione di una mappa è quindi frutto di scelte, risultato delle intenzioni e delle cognizioni acquisite che decidiamo di trasmettere. Le mappe sono registrazioni di un processo cognitivo, strumenti conoscitivi grafici (FAVERJON, 2024). La loro qualità non si misura in base alla loro attinenza con il reale, la grotta, ma in funzione dell'uso per cui sono state concepite e realizzate. Il valore d'uso delle mappe dipende dalle intenzioni per cui sono state prodotte, e dalla usabilità nel tempo in cui sono state create: sono "corrette" se convogliano le informazioni di cui abbiamo bisogno e che desideriamo comunicare.

Le mappe sono caratterizzate dalla scelta delle informazioni incluse e da come queste sono scritte tramite disegni, diciture e testi. Le relazioni metriche, dimensioni e orientazioni, sono molto importanti per contestualizzare geograficamente gli elementi di una grotta. La mappa di grotta è quindi una modellizzazione in scala ridotta dell'oggetto grotta, in cui sono enfatizzati elementi

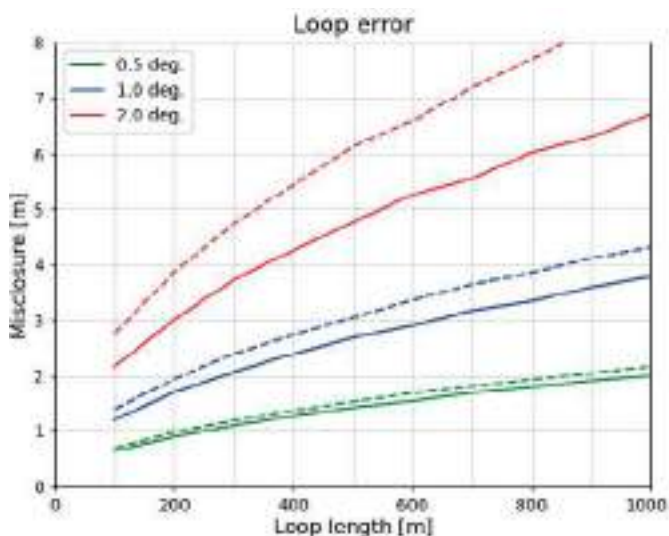


Fig. 1 - Limiti per gli errori di chiusura di anelli, per diversi gradi di accuratezza dei dati (adattato da VARILD, 2007).

della leggibilità. Altre inaccurately e incompletezze sono finalizzate alla leggibilità della mappa. Due rami sovrapposti sono rappresentati in pianta tralasciando i dettagli di quello inferiore, per evitare confusione. Quando la sovrapposizione è marginale, questa può essere eliminata riducendo un poco la dimensione dei rami e/o deformandone leggermente la rappresentazione.

Questo non vuol dire fare acquisizioni inaccurate o senza dettagli. Le misurazioni topografiche devono essere quanto più accurate possibile, compatibilmente con le finalità del rilievo e l'accuratezza nella registrazione dei dettagli, è essenziale per poi estrarre gli elementi salienti da mettere nella mappa. Un'adeguata accuratezza dei dati metrici della topografia è importante nella esplorazione di grandi complessi e sistemi carsici, per farsi un'idea di come si sviluppano le grotte. L'accuratezza di un rilievo può essere verificata attraverso un'analisi statistica degli errori di chiusura degli anelli (cicli chiusi). Chiaramente questo è possibile solo per rilievi di grandi grotte o complessi con dozzine e dozzine di anelli. Sommarariamente, l'accuratezza è rappresentata dal raggio della sfera di errore in cui cadrebbe il 99% delle misurazioni. Poiché il raggio è grossomodo proporzionale alla distanza, qui si utilizza l'errore sugli angoli. Per esempio, con un DistoX ben calibrato, un errore medio di 0.5° è facilmente ottenibile, con bussola e clinometro si arrivava a circa 2° . L'accuratezza dei rilievi è codificata nella scala UIS, che deriva dalla scala BCRA (HAUSELMANN, 2011).

La figura 1 mostra le regioni di errore di chiusura di anelli, in funzione della lunghezza dell'anello, statisticamente accettabili per tre valori di errore sugli angoli. Per esempio, se l'errore di chiusura di un rilievo a 0.5° cade sotto la riga verde, le misurazioni sono "accettabili". Se cade sopra, sono indicative di un possibile errore di misura o di composizione dei diversi rilievi, cioè di identificazione fra capisaldi di differenti rilievi.

L'utilizzo della mappa determina come viene disegnata, quali elementi includere e quali tralasciare. Un rilievo steso durante le fasi di esplorazione della grotta deve contenere i punti lasciati in sospeso, le possibili prosecuzioni, i flussi dell'aria e ogni altro particolare utile all'esplorazione. Un rilievo focalizzato sulla progressione contiene le posizioni degli ancoraggi, l'identificazione delle strettoie, la presenza di pozze, scorrimenti d'acqua, etc.

Il valore d'uso e la fruibilità del rilievo dipendono dalla leggibilità e dalla completezza dei dati. La mappa di grotta è un documento, al pari di una relazione scritta. Ha un suo linguaggio, che unisce elementi grafici e testuali, e ha una sua sintassi. Come per un racconto, la leggibilità e quindi il valore comunicativo della mappa variano a seconda di come è stata composta nelle sue parti e disegnata.

Le mappe di grotta sono dunque una interpretazione della realtà, di cui vengono selezionate le informazioni da includere ai fini della comunicazione. Le entità sono rappresentate nelle mappe

che reputiamo importanti e soppressi altri che giudichiamo poco rilevanti per il messaggio che vogliamo registrare e trasmettere. L'accuratezza e la completezza di una mappa, inoltre, dipendono dalla scala di restituzione, dalla precisione di misurazione e osservazione, e dalla riduzione delle informazioni che vengono codificate. Certe inaccurately e incompletezze sono inerenti alla scala di rappresentazione. Nella mappa a piccola scala 1:5000 di una grande grotta, una parete rappresentata con una linea con spessore di 0.5 mm ha una indeterminata di circa due metri. Una mappa a grande scala può essere più ricca di dettagli di una a piccola scala, nella quale quelli meno rilevanti sono soppressi o accorpati, in favore

attraverso il disegno. Gli elementi identificati vengono poi generalizzati ed espressi attraverso una rappresentazione simbolica, un alfabeto grafico che è stato sviluppato durante i decenni del secolo scorso fino ad arrivare alla codificazione nella simbologia ufficiale UIS. Questa, pur lasciando aperta la possibilità di aggiungere simboli specializzati, rappresenta una base comune che copre gran parte delle necessità per le mappe di grotta. Un'accurata disanima della simbologia UIS si trova in CAPPA-FERRARI (1999).

Il momento del disegno fatto in grotta è epistemico; siamo portati ad osservare l'ambiente in cui siamo immersi, a riconoscere gli elementi e i dettagli e a selezionare quelli rilevanti per il rilievo. In questo processo ci muoviamo all'interno della grotta nel tentativo di ottenere informazioni da diversi punti di vista. Il disegno che facciamo ha valore conoscitivo: la sua esecuzione è un passo nella acquisizione e registrazione di conoscenza. Da un lato fare il disegno ci porta ad osservare con attenzione la grotta, a conoscerla più approfonditamente, dall'altro possiamo controllare attraverso lo schizzo che stiamo facendo se esso compendia gli elementi di conoscenza che abbiamo identificato. Il disegno ci aiuta a comprendere la grotta quando ancora ne siamo dentro. *“Il rilievo disegnato contiene l'immagine mentale che lo speleologo si è formato durante l'esplorazione. È necessario osservare bene la grotta per poi tradurla in un rilievo. Osservare significa cogliere la morfologia funzionale dei vari ambienti, valutare volumi e distanze, distinguere limiti reali (roccia) da limiti visuali.”* (PICCINI, 2020). Si fa il rilievo perché permette di capire meglio la grotta, e quindi di esplorarla e conoscerla in modo più completo.

Il rilievo tradizionale si basa completamente sulla interpretazione della grotta da parte del rilevatore. Quindi dipende dalle condizioni di illuminazione, dalla facilità di osservazione, e dal background di conoscenze del topografo. L'avvento della illuminazione LED, con fasci di luce focalizzati, ha permesso di arrivare a vedere meglio zone abbastanza lontane. Tuttavia, resta l'impossibilità di arrivare a vedere tutto. Per esempio durante la discesa di pozzi, non vediamo cosa si cela dietro quinte di roccia lontane dal percorso di discesa. L'identificazione degli elementi rilevanti da disegnare dipende dal bagaglio culturale dello speleologo nelle discipline afferenti la speleologia (geologia, biospeleologia, archeologia, paleontologia, etc.). Di tutto quel che lo speleologo osserva, viene fatta una selezione, perché il supporto di memoria ha una capacità limitata (taccuino cartaceo). Alla fine il risultato, la mappa di grotta, resta soggettivo e rappresenta la percezione che il topografo ha della grotta nel momento del rilievo. È sufficiente osservare rilievi a catasto di qualche grotta fatti da persone diverse per rendersi conto che, sebbene si tratti della stessa grotta, i modi di vederla e interpretarla possono essere molto differenti (Fig. 2).

L'avvento del DistoX in accoppiata a programmi di topografia ipogea, cioè il rilievo paperless, ha migliorato l'accuratezza delle misurazioni e ridotto gli errori di trascrizione, ma ha meccanicizzato il processo di comprensione dimensionale: il trasferimento automatico delle misure dallo strumento a programmi che vi-

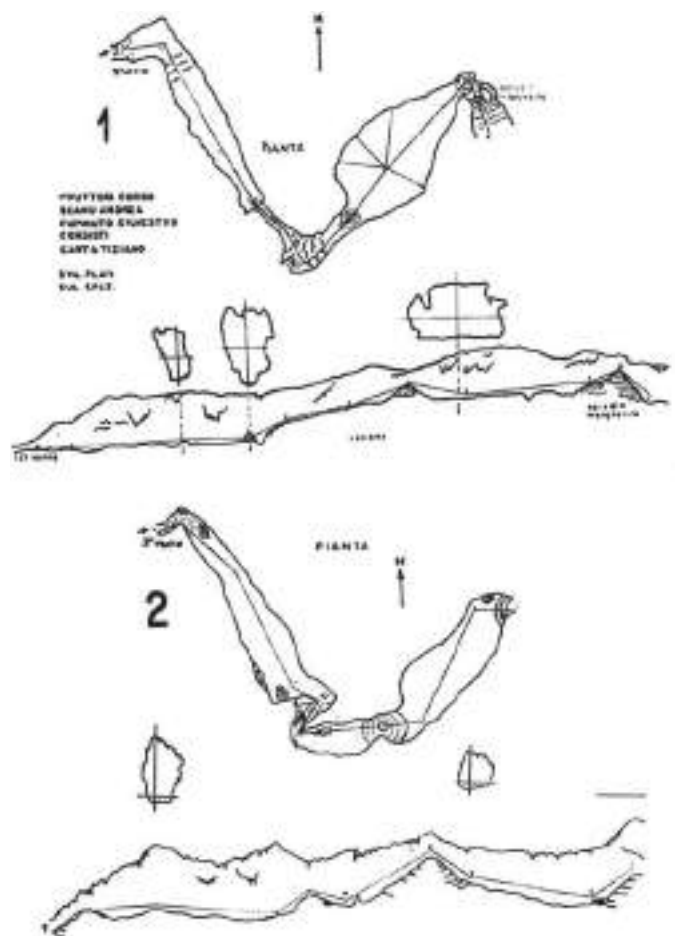


Fig. 2 - Esempio di due rilievi della stessa grotta (da Speleologia Sarda, n. 56).

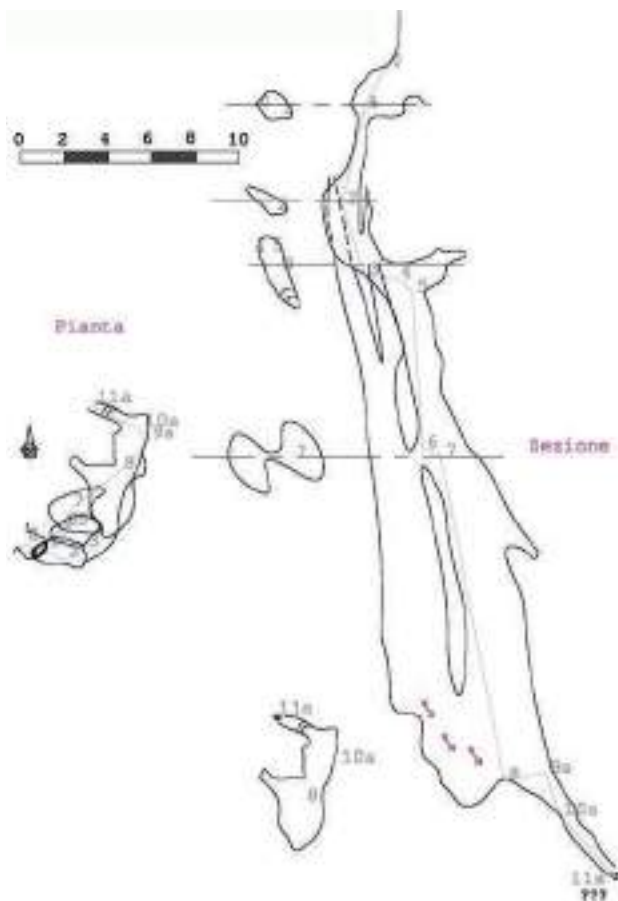


Fig. 3 - Mappa povera nelle morfologie delle pareti.

ipogeo, e rappresentano uno strumento molto importante per lo studio e la documentazione delle grotte. Il rilievo 3D aggiunge maggiore accuratezza nei dettagli ma ancora non elimina la fase di interpretazione (LOZANO BRAVO, 2023). Aprendo il rilievo 3D la strada a sistemi capaci di estrarre categorie semantiche interpretative, come ad esempio il riconoscimento di elementi geomorfologici, non è escluso che si arrivi ad automatizzare quasi completamente la creazione delle “mappe” di grotte. Il rilievo in grotta e la stesura della “mappa” potrebbero diventare un processo quasi completamente automatico.

La visualizzazione 3D di semplici modelli (basati sulla poligonale, le dimensioni trasversali e un DEM della orografia esterna), si è dimostrata molto importante per la speleologia. È presumibile che le mappe 2D saranno affiancate da rappresentazioni tridimensionali fruibili sullo schermo di un palmare, come le mappe cartografiche sono accompagnate da foto aeree nelle applicazioni di navigazione e nei programmi GIS. Da questo punto di vista i tentativi di “tridimensionalizzazione” di mappe 2D vanno verso una compartecipazione delle due rappresentazioni. Quando l'esecuzione di rilievi 3D diventerà semplice come il rilievo *paperless* anche nei contesti di grotte complesse e difficili, il rilievo 3D sarà rilevante anche ai fini esplorativi, cioè alla speleologia vera e propria. Esso sarà ancor più utile se effettuabile sul posto, in grotta, dove si ha modo di verificare il risultato, analizzarlo di fronte al reale e completarlo con le informazioni non derivabili dalla acquisizione 3D.

Cosa si può mettere nel rilievo ? Per esempio, tra gli altri elementi,

- le pareti, cioè la separazione fra il vuoto della grotta e il resto della montagna.
- i capisaldi; almeno quelli più importanti. In particolare, il “punto zero”, quello a cui sono riferite le coordinate della grotta, e i dati speleometrici.
- la geomorfologia: faglie, fratture, stratificazioni, ...
- riempimenti: massi, ciottoli, sabbie, argille, formazioni, ...
- pericoli e ostacoli: pozzi, risalite, strettoie, ...

sualizzano le proiezioni delle battute e degli *splay* porta a tracciare la grotta su questo scheletro, trascurando di formare mentalmente una percezione tridimensionale della grotta. Una conseguenza è la tendenza ad unire i punti dei pochi *splay*, senza interpretare e registrare le morfologie. Senza capire la grotta.

Il risultato sono mappe di grotte che sembrano salsicciotti (Fig. 3). Il momento migliore per comprendere la grotta è quando ne siamo ancora dentro e possiamo muoverci per osservare meglio la cavità. La tecnica *paperless* permette una comprensione dello spazio della grotta più accurata. Può esser usata per anticipare parte del lavoro di restituzione sviluppando le relazioni spaziali della mappa sulla base dell'elaborazione delle misure. Se usato con cervello il metodo *paperless* non riduce la qualità epistemica del rilievo, ma fornisce una base metricamente più ricca per contestualizzare spazialmente la conoscenza acquisita.

Le tecniche di rilievo 3D (fotogrammetria, scansioni laser, LiDAR) promettono di rimpiazzare l'osservazione diretta in grotta con una registrazione estremamente accurata dell'ambiente

Fig. 4 - Esempio di gallerie sovrapposte (adattato da MARTINEZ I RIUS, 1983).

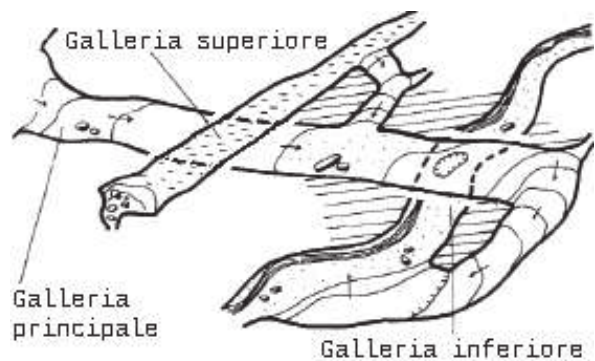


Fig. 5 - Sotto, differenti morfologie di pareti: da dissoluzione, erosione, e controllo strutturale (da MARTINEZ I RIUS, 1983).



- possibili prosecuzioni: camini, finestre, fessure, ...
- la presenza d'acqua: pozze, sifoni, flussi, stillicidi, cascate, ...
- i flussi dell'aria (con data)
- osservazioni di carattere "scientifico" (per esempio temperature).

Una regola generale per facilitare la lettura di una mappa è quella di creare una gerarchia visuale. Per esempio, le pareti, cioè il contorno della grotta, che sono gli elementi più importanti, vengono messi in risalto rispetto al contenuto, ai dettagli. La gerarchia visuale viene usata anche per formare una percezione tridimensionale portando in primo piano gli elementi più vicini rispetto a quelli sottostanti come nelle figure 4 e 6 (Vedi anche gli esempi in SIVELLI, 2015).

La rappresentazione grafica curata dei dettagli, oltre a rendere più immediata la lettura del rilievo, può fornire informazioni sulla grotta. Negli esempi in figura 5 si vedono tre differenti modi di disegnare le pareti, relativi a differenti morfologie della galleria.

Anche gli elementi grafici accessori, come l'indicazione del Nord e la barra di scala, possono essere disegnati in modi diversi che si ripercuotono sull'usabilità del rilievo. L'inserimento di un riferimento metrico verticale per il profilo è usato spesso già per grotte con modesto dislivello e permette di valutare facilmente lo sviluppo in profondità. Il grigliato per la pianta è invece poco usato forse perché, a scapito della leggibilità, aggiunge limitata informazione, essendo oggi più semplice fare sovrapposizioni, cioè posizionare i rilievi sulle carte topografiche, usando un GIS.

Non ci sono regole definite su come deve essere composta una mappa di grotta. Unica regola seguita da tutti gli speleocartografi è che la direzione verticale nel profilo e nelle sezioni trasversali verticali sia allineata ad un lato (in genere quello verticale) della pagina. Chiaramente la mappa deve contenere un riferimento metrico (in genere una barra di scala) e, per la pianta e le sezioni trasversali orizzontali, di orientazione (indicazione del Nord). La direzione del Nord è solitamente lungo la verticale del foglio, ma, a volte, risulta ruotato per esigenze di impaginazione, oppure per allineare la pianta con il profilo, migliorando così la leggibilità della mappa.

Le soluzioni di stesura dipendono dalla finalità (pubblicazione, catasto, presentazione, etc.) e dal valore d'uso. La disposizione delle viste e il modo di disegnare gli elementi del rilievo ne condizionano la leggibilità e la fruibilità. Un rilievo per una pubblicazione deve adattarsi alle dimensioni del foglio. Questo impone una scelta di scala e quindi una selezione dei dettagli e delle diciture da metter nel disegno. Questi poi dipendono dall'argomento della pubblicazione: il rilievo dovrebbe essere parte integrante del testo e complementare graficamente al discorso testuale, non inserito

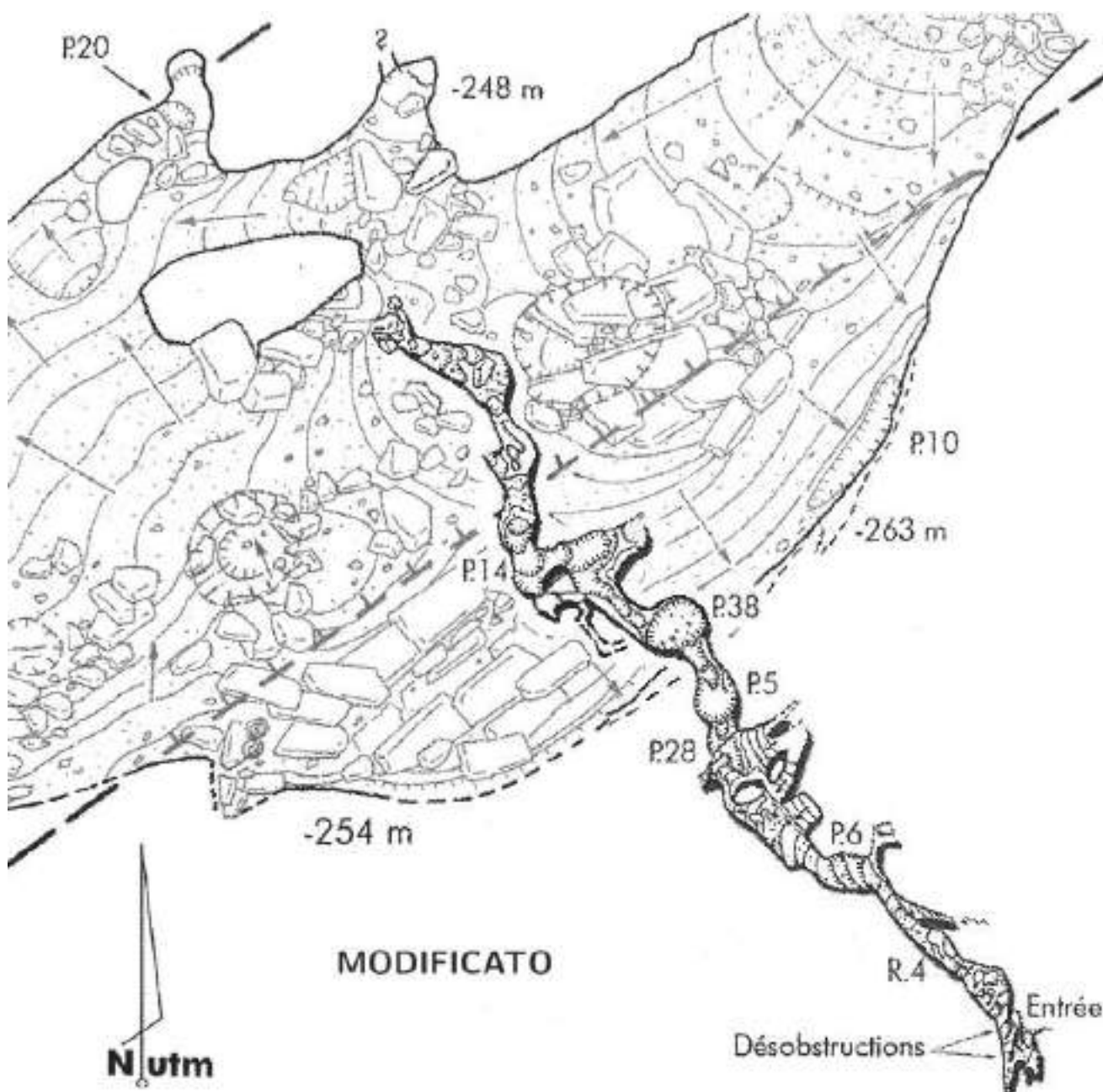


Fig. 6 - Gerarchia visuale. Il ramo di ingresso, con tratto più forte, è posto in primo piano. Da notare i dettagli in grigio chiaro (adattato da FAUCHET MAUTREF, 1991, riducendo il numero di dettagli e usando livelli di grigio).

solo per riempire una pagina. Pianta, profilo (sezione longitudinale) e sezioni trasversali non devono andare ognuno per conto suo, ma esser disposte in modo da facilitare il collegamento visuale fra di esse, cioè l'identificazione di punti in corrispondenza. Le sezioni trasversali risultano più facili da leggere se sono orientate tutte nello stesso verso e se sono poste vicino a pianta o profilo, collegate alla linea di sezione. D'altra parte se le sezioni trasversali sono tante e disturbano la leggibilità di pianta o profilo, si può considerare la soluzione di identificarle con lettere e raccoglierle in un riquadro a parte.

La connessione fra pianta e profilo è aiutata dai toponimi e dalle indicazioni di profondità di pozzi e risalite. A volte si usano anche lettere per indicare punti in corrispondenza fra pianta e profilo. Dettagli, diciture e pareti devono esser coerenti fra le varie viste.

Spesso, appena la grotta diventa un poco complessa, ci si trova ad avere sovrapposizioni sia in pianta sia nel profilo, che se esteso ha ulteriori complessità dovute alla scelta del verso in cui disegnare le gallerie e alla necessità di interrompere gli anelli. Svariate tecniche sono usate per rappresentare rami sovrapposti.

Vi sono diverse tecniche per rendere la tridimensionalità pur nel disegno sul foglio della pianta e aiutare la lettura. Se nella vista in pianta i rami più alti sono più marcati, si crea una gerarchia visuale, che ce li fa percepire in primo piano, quindi sopra quelli sottostanti, come nella figura 6.

L'uso del colore è uno strumento molto potente, usato sempre più spesso nelle mappe di grotta. Se ben usato, può evitare traslazioni, aiuta la lettura del contenuto. I dettagli opportunamente colorati sono meglio riconoscibili; un esempio "classico" è l'uso del colore azzurro per l'acqua. Il colore può essere usato per identificare la natura del fondo della galleria, senza riempire lo spazio con tanti elementi grafici. Con differenti colori si possono distinguere rami quasi sovrapposti (SIVELLI, 2015). Tinte diverse possono essere usate per distinguere differenti rami della grotta. Nello stesso ramo diverse intensità del colore contraddistinguono rami meno profondi da quelli più profondi. Il colore è utilizzabile anche come collegamento visuale fra pianta e profilo, usando lo stesso colore per le due viste per parti in corrispondenza. Ad ogni modo un eccesso di uso del colore è controproducente, come pure l'uso di quelli troppo forti (saturati). Al pari del colore, le sfumature di grigio possono essere usate per portare visivamente su piani diversi porzioni del disegno. Il grigio più intenso è un primo piano, mentre quello debole un piano lontano. In genere, però si arriva al più a tre o quattro livelli.

Quando la sovrapposizione è tale da occludere una parte significativa dei dettagli del ramo sottostante si ricorre a traslazioni. Inevitabilmente esse rompono la visione metrica "spaziale" e, per quanto possibile, si cerca di evitarle. La figura 7 è un esempio di vista in pianta di un profondo pozzo, rappresentato con quattro sezioni orizzontali traslate lungo una stessa direzione. Nelle tre viste superiori è inclusa una ombreggiatura della vista sottostante. La coerenza semantica dei dettagli deve essere curata anche nelle traslazioni: un pozzo nel ramo superiore diventa un camino in quello inferiore.

Diversi accorgimenti sono usati per semplificare la leggibilità delle traslazioni. In genere è bene che le traslazioni di parti del profilo siano in orizzontale, di modo da preservare la percezione della profondità dei diversi punti. La "continuità" di lettura può essere aiutata replicando una porzione della galleria nella parte traslata. In figura 8, a sinistra, è riportato un rilievo (vista in profilo) tratto da una recente pubblicazione. A destra un possibile riarrangiamento delle traslazioni per evitare la confusione nella lettura della profondità. È stato ottenuto con un editor di immagini. Una miglior soluzione sarebbe forse stata possibile avendo i dati e gli schizzi della topografia.

Il disegno del profilo esteso (sezione longitudinale) è proprio un'arte: il cartografo deve fare delle scelte relativamente a come sviluppare le varie parti della grotta e come "tagliare" gli anelli,

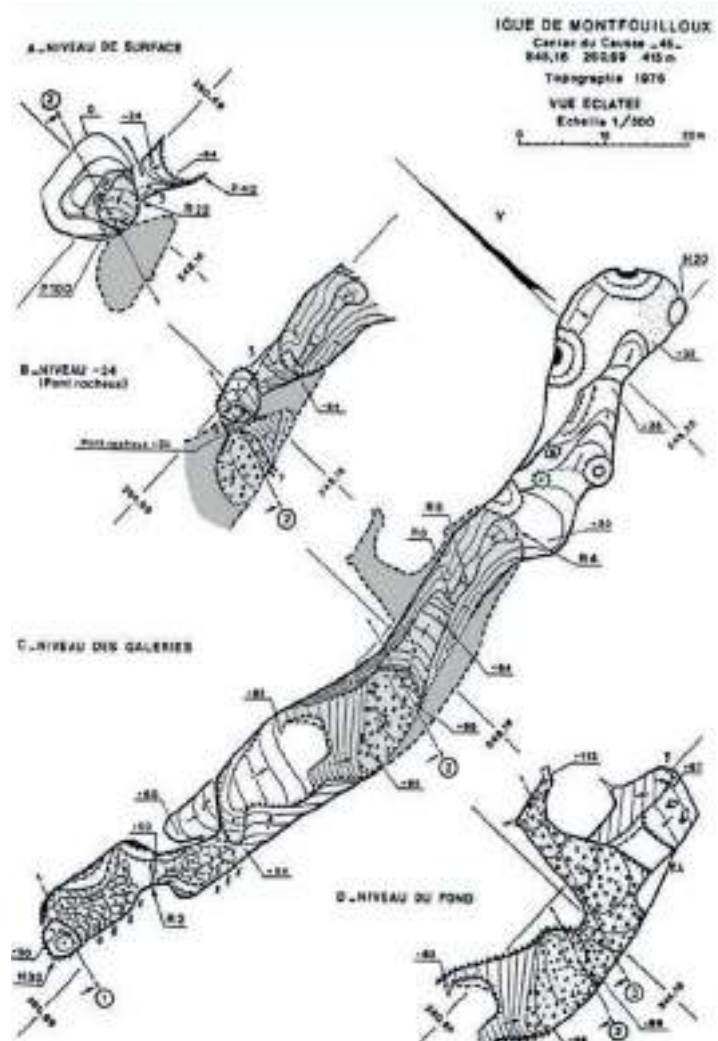


Fig. 7 - Esempio di traslazioni: quattro livelli di un profondo pozzo (da FAUCHET MAUTREF, 1991).

che nella vista in profilo esteso difficilmente si chiudono. Ogni taglio è una interruzione, uno iato nella lettura del rilievo. Bisogna decidere come sviluppare i pezzi di grotta in modo da limitare le interruzioni, preservando la percezione tridimensionale. I programmi da rilievo per PC in genere hanno solo poche opzioni per lo “sviluppo” delle battute nel profilo esteso: verso sinistra, verso destra, o verticale (cioè solo dislivello). Uno sviluppo delle battute che ammetta anche valori intermedi permetterebbe un maggior controllo sul profilo esteso, a discapito di una non indifferente complessità di interfaccia e risolverebbe solo alcune situazioni molto particolari. I programmi più usati non lo gestiscono.

In genere, nei “corsi di rilievo” si tende a trattare precipuamente la parte di acquisizione, cioè la topografia ipogea con particolare enfasi sulle misurazioni, e a considerare poco la parte di restituzione, cioè la cartografia ipogea, la realizzazione della mappa di grotta. Si dà quasi per scontato che gli allievi sappiano esprimersi tramite il disegno. Tuttavia, nei percorsi scolastici la competenza di espressione grafica (artistica e tecnica) è messa in secondo piano rispetto alle competenze di espressione linguistica (scritta e verbale), proprio per la predominante importanza sociale della seconda.

La maggior parte dei cartografi ipogei si trova, quindi, piuttosto impreparata quando si appresta a disegnare la mappa della grotta. Con un poco di impegno dedicato all’auto-apprendimento si può però arrivare a realizzare buone mappe di grotta.

La prima risorsa sono i manuali di topografia speleologica. La maggior parte non approfondisce la parte di restituzione, al di là della riduzione dei dati (che è ormai una cosa automatica che si fa con un qualsiasi programma di rilievo). Ce ne sono alcuni, tra cui MARTINEZ I RIUS (1983), FAUCHET-MAUTREF (1991) e GANTER (2000), che restano tuttora validi, anche se datati.

Moltissimo si impara “leggendo” con attenzione i rilievi pubblicati, fatti da altri. A volte si trovano soluzioni ingegnose di cui fare tesoro e da applicare, quando serve, nei propri rilievi. Altre volte il rilievo è di difficile lettura. In questo caso un esercizio veramente utile consiste nello sforzarsi a comprendere come è fatta la grotta e poi provare a modificare il disegno con un editor di immagini, per tentare di renderlo più immediato da leggere, come nell’esempio di figura 7.

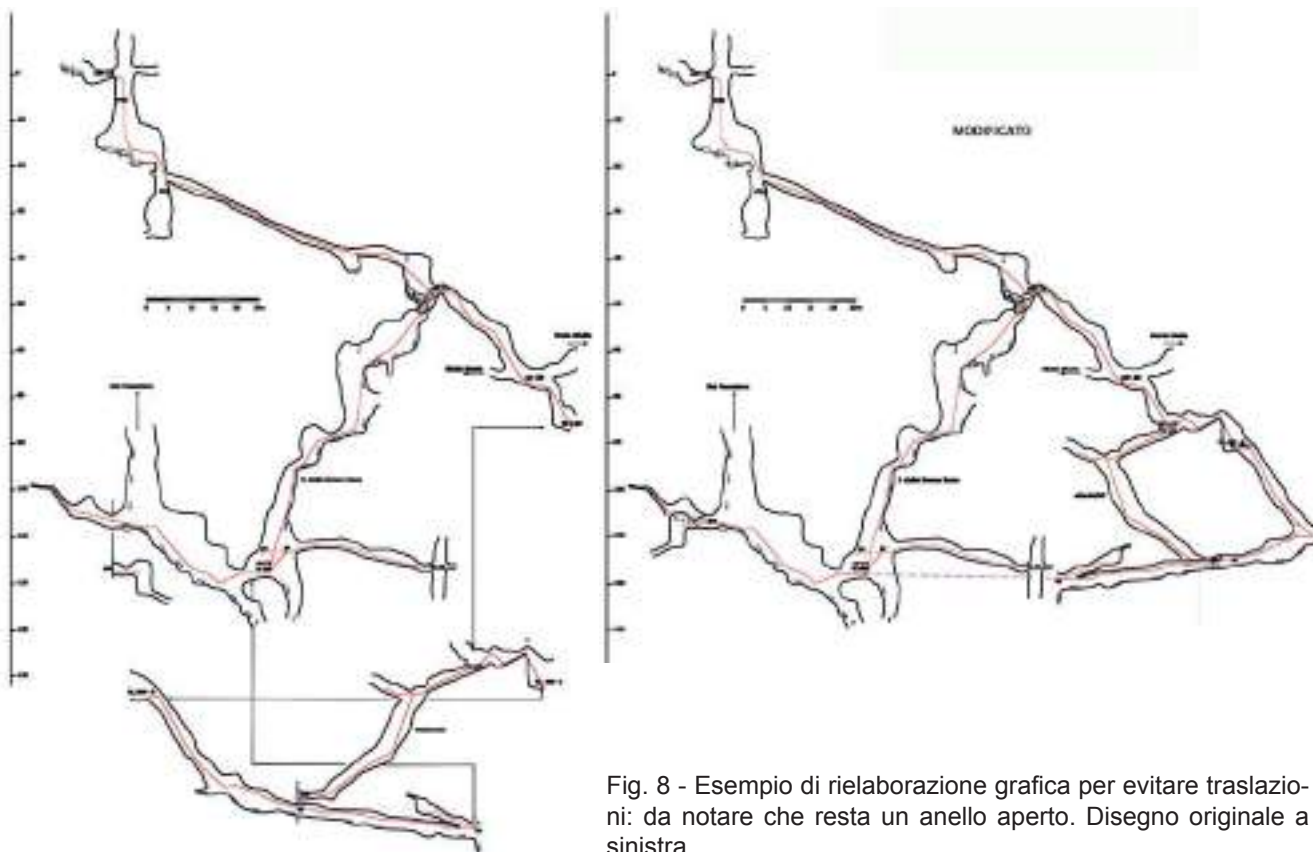


Fig. 8 - Esempio di rielaborazione grafica per evitare traslazioni: da notare che resta un anello aperto. Disegno originale a sinistra.

Qualcosa si impara sempre partecipando a gruppi di discussione (ormai sono pochi) o a incontri di topografia ipogea. Si possono seguire presentazioni online dedicate al rilievo, e rivedere registrazioni: oramai ce ne sono diverse raccolte su vari canali youtube. Gli argomenti sono svariati: dagli strumenti, alle procedure di acquisizione, dai programmi di gestione dei dati a quelli per il disegno delle restituzioni, dalla organizzazione dei progetti di rilievi di grotte complesse, ai catasti, dal DistoX (e dispositivi simili), agli strumenti innovativi per il rilievo 3D.

Infine, come detto, è utile anche leggere libri di cartografia, geografia, disegno artistico e tecnico. Non parlano di grotte, ma si trovano cognizioni che si possono riportare nella cartografia ipogea. In rete si trovano anche corsi (gratuiti) di cartografia e altri argomenti, che, anche se non riguardano espressamente le mappe di grotta, sono utili per migliorare le capacità di espressione grafica.

Per creare la mappa di grotte appena complesse è necessario farsi un'immagine mentale tridimensionale della grotta per decidere il modo migliore di rappresentare le viste. La visualizzazione 3D della poligonale, fatta con programmi di rilievo, aiuta a crearsi questa immagine ma la cosa più difficile per il cartografo di grotta è staccarsene. Vi è il rischio di guardare il rilievo che stiamo facendo, o abbiamo fatto, attraverso la lente di questa immagine e non rendersi conto delle difficoltà di lettura. L'immagine mentale tridimensionale deve essere ricavata dalla lettura del rilievo, non essere necessaria per leggere il rilievo.

Per questo è molto utile far vedere i propri rilievi, specialmente se ancora in bozza, ad altri speleologi con cui si è andati nella grotta, in esplorazione o per rilevarla, e chieder loro di criticarli. Chiedere se il rilievo è chiaro, comprensibile, se c'è indicato tutto ciò che serve, come potrebbe essere migliorato. Sono stati nella grotta, l'hanno esplorata, e possono dire se il nostro disegno riproduce la grotta come la conoscono. Infine, bisogna pubblicare i propri rilievi, inviarli al catasto speleologico regionale. Purtroppo, però, i catasti non hanno requisiti stringenti di leggibilità. Anche la pubblicazione su riviste, in particolare su *Speleologia*, dovrebbe richiedere una buona qualità del rilievo, oltre che coerenza e integrazione al testo. La redazione dovrebbe segnalare mancanze e problematiche tipografiche (per esempio tratto troppo fine, scritte illeggibili). Oltre a migliorare il proprio modo di fare i rilievi si impara anche a disegnarli tenendo in conto i vincoli imposti dalla pubblicazione.

Il disegno delle grotte, la loro rappresentazione grafica, è cambiata nel corso dei decenni, con differenze che riflettono anche diversità di storia e cultura speleologica nazionali. Non vi è un modo univoco e assoluto di rappresentare una grotta, ma molte soluzioni, tutte valide per documentare e comunicare il mondo ipogeo graficamente.

Non riusciremo mai a disegnare una mappa tecnicamente "perfetta" e artisticamente "sublime", una mappa di cui, rivista dopo anni, saremmo sempre soddisfatti e non troveremmo alcunché da eccepire. Tuttavia, arriveremo a fare buone mappe facilmente leggibili, usabili e comunicative, anche a distanza di decenni, proprio come le opere dei classici.

Bibliografia

- CALANDRI G., 2006 - *Topografia ipogea e catasto speleologico ligure*. Delegazione Speleologica Ligure, 64 pp.
- CAPPA G. & FERRARI G., 1999 - *La nuova simbologia internazionale per i rilievi di grotta*. *Speleologia*, 41, pp. 100-109.
- MARTINEZ I RUIA A., 1983 - *Topografia espeleologica*. Escola Catalana d'Espeleologia, 118 pp.
- FAUCHER M., MAUTREF A., 1991 - *Speleographie*. 332 pp.
- FAVERJON M., 2023 - *Disegnare, Modellizzare, Topografare*. Youcanprint ed., 207 pp. ISBN 979-1221454161.
- FAVERJON M., 2024 - *L'importanza del disegno nella topografia*. *Speleologia*, 89, pp. 64-66.
- GANTER J., 2000 - *A guide to cave mapping*. National Speleological Society, 11 pp.
- HAUSELMANN Ph., 2011 - *UIS mapping grades*. *International Journal of Speleology*, 40, IV-VI.

- LOZANO BRAVO H. et al., 2023 - *A methodology for cave floor basemap syntesis from point cloud data: a case study of SLAM-based LiDAR at Las Cuevas, Belize*. ISPRS Annals Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. X-M-1-2023, pp. 179-186.
- PICCINI L., 2020 - *Lo zen e il rilievo ipogeo*. Speleologia, 82, pp. 55-57.
- SIVELLI M., 2015 - *Contenitori senza contenuto*. Speleologia, 72, pp. 62-63.
- VARILD A., 2007 - *Vertical*. 192 pp.

Alberto Giorgi¹

Topografia ipogea e rilevamento geomorfologico in grotta. Una metodologia moderna

1) Commissione Grotte “E. Boegan” SAG-CAI, Trieste; FSR FVG

Abstract. The understanding of speleogenetic processes is often limited by the lack of detailed geomorphological data in topographic surveys of natural cavities. Standard surveys focus predominantly on development, depth and exploration-related information, neglecting key morphologies for evolutionary interpretation. This work presents a standardized methodology, based on open-source GIS (Geographic Information System) software (QGIS and QField), designed to enable non-geologist speleologists to collect geomorphological data systematically during normal exploratory activities, coupled with dedicated training activities and a practical manual designed and written ad hoc. This structured citizen science approach offers significant potential to enrich cadastral databases and support scientific research in the field of karstology.

Riassunto. La comprensione dei processi speleogenetici è spesso limitata dalla carenza di dati geomorfologici di dettaglio nei rilievi topografici delle cavità naturali. I rilievi standard si concentrano prevalentemente sullo sviluppo, la profondità e le informazioni esplorative, trascurando morfologie chiave per l'interpretazione evolutiva. Questo lavoro presenta una metodologia standardizzata, basata su software GIS (Geographic Information System) open-source (QGIS e QField), progettata per permettere a speleologi non geologi di raccogliere dati geomorfologici in modo sistematico durante le normali attività esplorative, naturalmente abbinata a un'attività formativa e a un manuale pratico progettato e scritto ad hoc. Questo approccio di citizen science strutturata offre un potenziale significativo per arricchire i database catastali e supportare la ricerca scientifica nel campo del carsismo.

Introduzione

La geomorfologia è la disciplina che analizza l'origine e l'evoluzione delle forme della superficie terrestre attraverso lo studio dei processi fisici, chimici e biologici che la modellano. In ambito ipogeo, la geomorfologia si occupa di ricostruire la genesi e l'evoluzione delle cavità naturali, correlando le forme e i depositi osservati con il contesto geologico, strutturale, idrogeologico, climatico e paleoclimatico (PALMER, 2007; FORD & WILLIAMS, 2007).

In questo quadro si collocano anche le attività degli speleologi: esplorare vuol dire aggiungere un pezzo di mondo finora sconosciuto a quello conosciuto e rilevare significa diventare cartografi del sottosuolo. Queste due attività, unite assieme, fanno dello speleologo un geografo del sottosuolo. Gli speleologi, quindi, hanno la possibilità di essere una componente di fondamentale importanza per lo studio delle grotte, impegnandosi a raccogliere dati geologici, compatibilmente con le loro conoscenze e possibilità.

Per rafforzare questo processo di miglioramento - sotto l'egida della Federazione Speleologica Regionale del Friuli Venezia Giulia e del Catasto Speleologico Regionale (CSR), istituito presso il Servizio geologico della “Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile” della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia all'inizio del 2024, l'autore ha progettato un corso intitolato *Topografia ipogea: il ruolo della geologia nel rilevamento delle cavità naturali*. Lo scopo di questo corso era di fornire agli speleologi non geologi una serie di conoscenze e di strumenti pratici (metodologia), per poter comprendere al meglio le grotte (acquisendo anche una notevole crescita di conoscenza personale), allo scopo di dare un contributo utile al progredire delle conoscenze scientifiche e del territorio su cui viviamo.

Il problema dei rilievi topografici

La proposta metodologica si basa su un principio semplice ma importante: integrare il tradizionale rilievo topografico ipogeo con informazioni geologiche e geomorfologiche osservabili anche da operatori non specialisti, purché adeguatamente formati. Questo approccio, accessibile e facilmente applicabile, permette di accrescere la qualità del dato catastale e di fornire una base utile per le esplorazioni, le indagini scientifiche, le pianificazioni territoriali, l'attività di tutela e valorizzazione del territorio carsico e soprattutto dei suoi acquiferi, che presentano un certo grado di vulnerabilità.

Purtroppo, è diventata pratica comune effettuare i rilievi delle cavità in maniera speditiva, fortemente orientati alla progressione e concentrandosi soltanto su tre parametri - lo sviluppo orizzontale, la profondità e la progressione in grotta - ignorando o tenendo in secondo piano due elementi fondamentali: le morfologie presenti in grotta e le sezioni trasversali dei vani.

Le forme

Ogni grotta racchiude una molteplicità di forme - incise, modellate, depositate o residuali - che costituiscono la traccia visibile dei processi speleogenetici (singenetici) e post-speleogenetici (paragenetici). Le geometrie dei condotti, le caratteristiche dei depositi, le discontinuità litologiche e le tracce idrodinamiche permettono di ricostruire le condizioni idrologiche, geografiche e ambientali del passato e del presente. In molti casi, tali evidenze risultano parzialmente sovrapposte, alterate od obliterate da eventi successivi, il che impone un'analisi temporale. L'interpretazione geomorfologica richiede quindi competenze trasversali e un approccio sistemico, che tenga conto delle relazioni tra morfologia, geologia, idrologia, biologia e climatologia.

Per ottenere risultati affidabili, è fondamentale che l'osservazione geomorfologica venga correttamente integrata nel rilievo topografico ipogeo, attraverso la documentazione grafica e testuale delle forme riconosciute, secondo criteri condivisi e codificati.

Le sezioni trasversali

La sezione longitudinale di un rilievo topografico ci informa prevalentemente sull'andamento della cavità in verticale e la pianta ci dà informazioni sul suo andamento orizzontale, ma come facciamo a sapere quale forma hanno le gallerie, le sale e i pozzi?

La risposta a questa domanda è il rilevamento della sezione trasversale dei passaggi.

Immaginiamo di percorrere una galleria, diciamo lunga 100 metri, e di fermarci ogni 20 metri ad osservare la sua forma tagliandola trasversalmente con un piano virtuale posto a 90° rispetto alla direzione di marcia: all'inizio la forma della sezione potrebbe essere perfettamente circolare, ma alla sosta successiva potrebbe assumere una forma ellittica, mentre alla terza sosta una delle sue pareti potrebbe diventare un piano inclinato; poi potrebbe abbassarsi per diventare un cunicolo e infine assumere le fattezze di un meandro a buco di serratura.

Ecco, quindi, che soltanto il rilevamento delle sezioni trasversali ci può restituire quella dimensione che completa le informazioni di pianta e sezione longitudinale, permettendoci di visualizzare la vera forma del vano esplorato.

Primo caso di studio

Facciamo un esempio molto particolare e ben conosciuto tra gli speleologi: l'operazione di recupero della scolaresca thailandese bloccata in grotta da una piena.

Tra tutte le enormi difficoltà che i team di soccorso hanno dovuto superare, un ruolo importante l'ha giocato anche la mappatura della cavità, non solo per quanto riguarda le direzioni da seguire durante la progressione degli speleosub, ma anche in relazione alla forma e alle dimensioni dei vani, che ovviamente sono determinanti quando si procede sott'acqua, in condizioni critiche di visibilità e trasportando materiali o persone. Nella figura 1 si può vedere la pianta della grotta e in grigio le sezioni trasversali delle gallerie.

Di seguito un estratto delle dichiarazioni di persone appartenenti al team di soccorso.

Il personale del Department of Mineral Resources (DMR) thailandese ha ottenuto i dati sulla grotta dall'Expedition Thai-Maros, una spedizione guidata da Francesi che ha registrato l'estensione e la sezione trasversale della grotta nel 1986 e 1987. All'epoca, il rilievo delle grotte veniva eseguito utilizzando lunghi nastri metrici metallici. Oggi, i telemetri laser facilitano il lavoro di mappatura, ma è ancora un compito difficile orientarsi e misurare sottoterra, poiché i segnali GPS non funzionano in quell'ambiente. Dettagli tratti dal libro di Martin Ellis *The Caves of Thailand Volume 2: Northern Thailand* sono stati tradotti e condivisi.

Un rilievo più recente, effettuato da esploratori britannici nel 2014 e 2015, ha aggiunto punti di riferimento, dati su distanze, direzioni e variazioni di quota tra le sezioni trasversali della grotta. Nel complesso, questi dati hanno fornito al team di mappatura tutto ciò di cui avevano bisogno per modellare e visualizzare la grotta in 3D. Le mappe 3D della grotta sono state distribuite e ampiamente utilizzate dal team britannico di rilievo, dai Navy SEAL thailandesi e dal personale del Dipartimento di Prevenzione e Mitigazione dei Disastri. *“I subacquei si sono trovati di fronte a grandi difficoltà durante le operazioni di ricerca, finché Martin Ellis non ci ha inviato la mappa dettagliata della grotta rilevata dai Francesi nel 1987”* ha dichiarato Songkorn Siangsuebchart, Senior Technical Consultant di GIS Company, Ltd. *“Abbiamo creato la mappa delle sezioni trasversali dei passaggi utilizzando tecniche di geo-referenziazione, per misurare e collegare le dimensioni di ogni passaggio e la distanza tra ogni sezione trasversale. Grazie a questa mappa, i subacquei hanno potuto pianificare e svolgere la loro missione in modo efficace”*.

Naturalmente, questa visione è applicabile a qualsivoglia operazione di soccorso in profondità e quindi assume un'importanza che potremmo definire “vitale”.

Secondo caso di studio

Per spiegare meglio la necessità scientifica del rilevamento geomorfologico in cavità, prendiamo come esempio un'apparentemente anonima grotta del monte Canin, la Grotta a N del Monte Ursic (numero catasto 5430), una cavità con 62 m di profondità e 76 m di sviluppo. Un'attenta osservazione rileva che in essa sono presenti depositi limosi e sabbiosi stratificati e cementati, posizionati su alcune pareti e sulla volta. Questi depositi sono di chiara origine fluviale e una loro analisi mineralogica (campioni prelevati dagli speleologi ed esaminati dall'Università di Trieste) ci indica che la provenienza di tali minerali è da rocce attualmente non presenti nell'area del Canin in quanto completamente demolite dall'erosione in epoche antiche (PARONUZZI et al., 2005).

In più, l'osservazione e la rilevazione delle sezioni trasversali della galleria presenta forme originate da flussi idrici quali solchi orizzontali a parete e scallops, come pure viene rilevata la presenza di faglie e/o fratture che ne hanno condizionato la forma.

Se si mettono a confronto i due rilievi della stessa grotta (Figg. 2 e 3) si nota che il primo (del 1983, fonte CRS), in assenza delle sezioni trasversali, non fornisce alcuna indicazione sulla forma dei pozzi e delle gallerie e quindi non permette alcuna ipotesi sull'evoluzione della cavità, mentre il secondo (tratto dalla pubblicazione scientifica sopra citata), grazie alla presenza delle sezioni

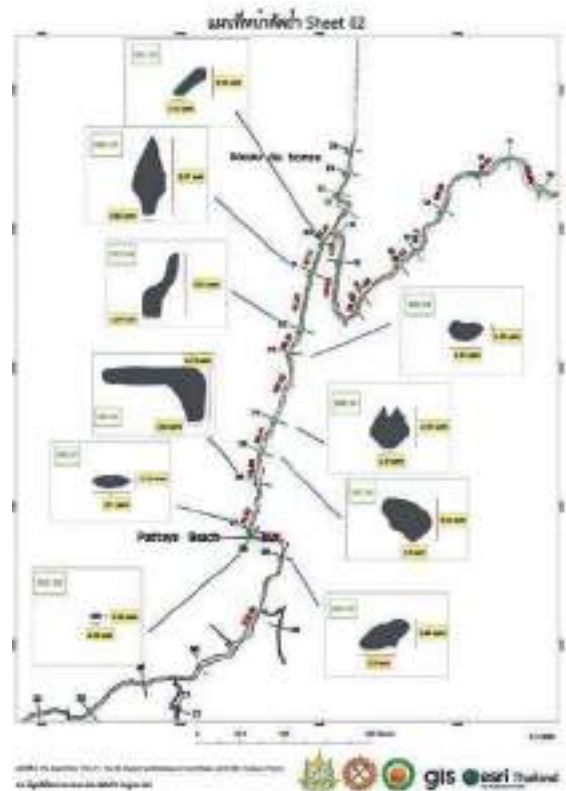


Fig. 1 - Rilievo della grotta thailandese (www.esri.com/about/newsroom/blog/technology-behind-thailand-cave-rescue/).

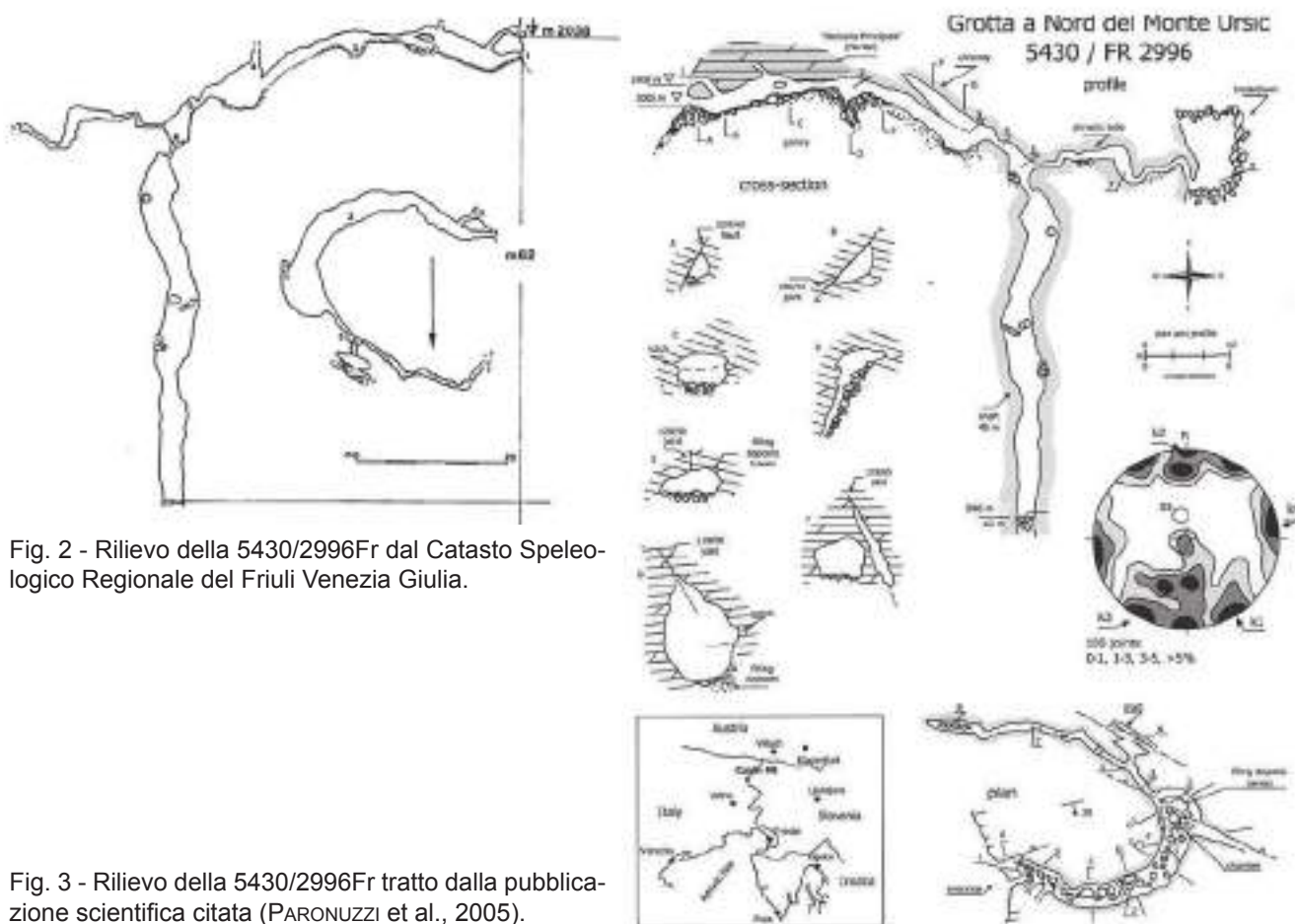


Fig. 2 - Rilievo della 5430/2996Fr dal Catasto Speleologico Regionale del Friuli Venezia Giulia.

Fig. 3 - Rilievo della 5430/2996Fr tratto dalla pubblicazione scientifica citata (PARONUZZI et al., 2005).

trasversali (e di fotografie presenti nell'articolo, altro elemento importante da non sottovalutare) permette al geologo di fare delle deduzioni che possono spingersi fino alla ricostruzione paleogeografica della zona del Canin.

Infatti, i depositi fluviali e le forme di origine idrica testimoniano la presenza di un flusso d'acqua antico, che poteva originarsi soltanto se l'area del Canin fosse stata molto diversa da quella attuale, con presenza di rocce soprastanti alla Dolomia Principale e al Calcarea del Dachstein, che ora sono state completamente demolite e rimosse.

Ne deriva, quindi, che le cavità di questo tipo sono il residuo di una rete idrogeologica antica sviluppatasi quando il massiccio era un altopiano con scorrimento superficiale d'acqua, inghiottitoi e quindi grotte attive da un punto di vista idrico.

Si capisce, quindi, che anche da una grotta poco interessante dal punto di vista esplorativo, grazie a un'osservazione consapevole, si possono ricavare dati importanti per i geologi e quindi aumentare la comprensione dell'evoluzione geologica e speleogenetica di una cavità o perfino aggiungere un tassello importante alla comprensione dell'evoluzione geologica di un'area geografica estesa.

Il manuale per la formazione

Per evitare la sovra-documentazione e quindi garantire la rilevanza dei dati, nonché evitare che gli speleologi impieghino troppo tempo per rilevare le forme ipogee, sono stati forniti dei criteri di selezione basati su rarità, dimensioni, estensione, significato morfogenetico (es. faglie, neotettonica, mensole residuali) e contesto geografico (es. sabbie e ciottoli sul Carso Classico vs. sedimenti fluviali nelle Prealpi). Tali criteri si possono reperire nel manuale scritto ad hoc per supportare tale metodologia e che può essere usato anche per corsi di aggiornamento per speleologi. Il manuale "Geomorfologia e rilevamento topografico delle cavità naturali" è scaricabile gratuitamente dal sito del Catasto Speleologico Regionale (CSR) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Va altresì evidenziato che nell'edizione attuale il manuale comprende forme, sedimenti e agenti che si

possono trovare nel Friuli Venezia Giulia, pertanto in questa versione sono escluse, per esempio, le grotte ipogeniche, quelle in marmo, gessi o quarzite.

Resta inteso, che gli speleologi possono formarsi anche su altri manuali e articoli scientifici reperibili in rete, nelle biblioteche o acquistabili, integrando quindi le informazioni a propria disposizione; a questo proposito si veda la bibliografia in fondo all'articolo.

Strumentazione e Software

Il sistema di rilevamento sul campo si basa esclusivamente su software gratuiti e open-source.

Il progetto di raccolta dati è stato creato con QGIS Desktop 3.x (disponibile per numero sistemi operativi), mentre l'acquisizione sul campo è affidata all'app QField, installabile su comuni smartphone o tablet Android o Apple. Per la fase sperimentale, è stato creato un semplice progetto QGIS contenente i seguenti layer:

Layer di base (raster): immagine del rilievo topografico della cavità. Non è necessaria alcuna impostazione del sistema di coordinate geografiche (NO CRS) in quanto in grotta non disponiamo di segnale GPS.

Layer vettoriali per la raccolta dati: si può usare un geopackage o più layer vettoriali indipendenti per registrare le informazioni referenziate a punti precisi sul rilievo della cavità.

Ciascun layer vettoriale è associato a una tabella attributi strutturata per guidare lo speleologo.

Di seguito un esempio di campi utilizzabili:

Tipo forma: menù a tendina pre-compilato con una lista di forme standard (es. "Faglia", "Scallop", "Deposito sabbioso", "Colonna", "Gour"...).

Descrizione: campo testuale per note aggiuntive.

Campi numerici per registrare la direzione/immersione per le discontinuità.

Link_Foto/Video/Vocale: campo per collegare una o più fotografie, video o registrazioni vocali effettuate in loco.

Naturalmente, questi attributi possono essere facilmente modificati e/o estesi in QGIS in caso di necessità particolari.

Sperimentazione in grotta

La Commissione Grotte "Eugenio Boegan" (CGEB) sta sperimentando sul campo questa metodologia di rilevamento geomorfologico, in quanto ritiene che la collaborazione tra speleologi e geologi rappresenti un passo fondamentale per approfondire le conoscenze sul territorio carsico e contribuire alla sua gestione sostenibile.

Nella figura 4 è possibile vedere la schermata di QField utilizzata per la sperimentazione della metodologia nella Grotta Davorjevo brezno (SLO), una cavità peraltro abbastanza complessa, anche per la costante presenza di torrenti e di intensa percolazione.

La figura 5 mostra una parte del progetto QGIS desktop con tre tipi di punti:

Stelle verdi: sistema di rilevazione 1

Stelle gialle: sistema di rilevazione 2

Punti rossi: possibili prosecuzioni da indagare.

I due sistemi di rilevazione (entrambi dei geopackage di QGIS) presentano una diversa organizzazione dei dati e sono contemporaneamente presenti per offrire agli speleologi la possibilità di testarli entrambi per comprendere quale sia il più versatile.

La tabella rappresenta i dati connessi alle stelle gialle.



Fig. 3 - Esempio di dati che è possibile raccogliere per ogni punto di controllo.

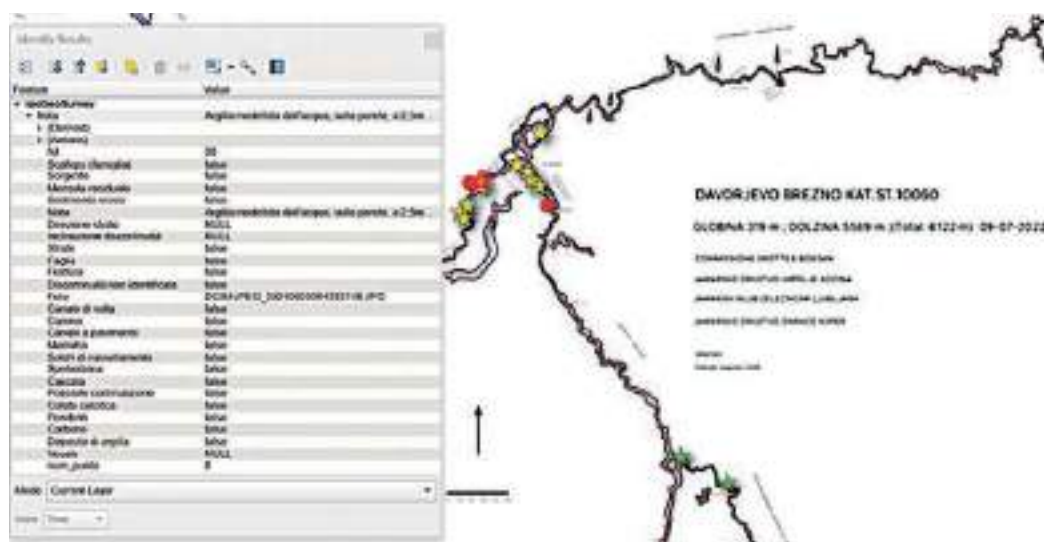


Fig. 5 - Estratto dal progetto QGIS per il Davorjevo brezno.

Naturalmente, è possibile, anzi auspicabile, che gli speleologi creino uno o più geopackage personalizzati con l'organizzazione dei dati a loro più congeniale; infatti, questo sistema è totalmente customizzabile attraverso QGIS.

Una volta creato, il geopackage può essere riutilizzato per altri progetti.

Conclusioni

La carenza di dati geomorfologici dettagliati rappresenta un limite significativo per la ricerca speleologica. Questo articolo presenta una metodologia basata sulla formazione specifica degli speleologi e sulle tecnologie GIS open-source (QGIS/QField), che permette la raccolta sistematica di tali dati da parte di speleologi non geologi.

L'applicazione della metodologia nel Davorjevo brezno ha dimostrato che il sistema consente di produrre mappe ad alto contenuto informativo, che trasformano il rilievo topografico da un semplice documento geometrico a strumento di analisi scientifica speleogenetica e paleogeografica, soprattutto in ambienti nei quali un geologo non sempre riesce ad arrivare.

Pur riconoscendo i limiti legati all'interpretazione da parte di speleologi non geologi, questo approccio di citizen science strutturata, se supportato da un'adeguata formazione, rappresenta uno strumento potente per valorizzare il potenziale e l'utilità della comunità speleologica e costruire database regionali che potranno rivoluzionare lo studio dei sistemi carsici.

Bibliografia

- AA. VV., 2009 - *Progetto Powerpoint*. Società Speleologica Italiana.
- AA. VV., s.d. - *Manuale utente di QGIS. Documentazione QGIS Documentation*. https://docs.qgis.org/3.40/it/docs/user_manual/index.html.
- CARRARO F., 2013 - *Geologia del Quaternario*. Dario Flaccovio Editore.
- CICCACCI S., 2010 - *Le forme del rilievo. Atlante illustrato di Geomorfologia*. Mondadori-Università.
- DIXON B., s.d. - *The Technology Behind the Thailand Cave Rescue*. <https://www.esri.com/about/newsroom/blog/technology-behind-thailand-cave-rescue>.
- FORD D.C.; Williams P., 1989 - *Karst Geomorphology and Hydrology* - Chapman & Hall, London.
- GUTIÉRREZ F. & DE WAELE J., 2022 - *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*. Wiley.
- KLIMCHOUK AL., FORD D., PALMER A. & WOLFGANG DR., 2000 - *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society.
- PALMER A.N., 2007 - *Cave Geology*. Cave Books.
- PARONUZZI P., LENAZ D. & SEMERARO R., 2005 - *Filling deposits of an ancient alluvial cave system in the alpine karst of Mt. Canin (Julian Alps, NE Italy)*. 14th International Congress of Speleology, Athens, Greece, pp. 197-202.

Autore corrispondente Alberto Giorgi: giorgi_alberto@outlook.it

Paolo Paganini¹, Carlo Cebula², Fiorella Bieker², Paolo Manca²,
Alessandro Pavan², Michele Potleca²

Rilievi laser scan e virtual tour fotografici per la valorizzazione del patrimonio speleologico

1) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste; 2) Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile - Servizio geologico, Trieste

Abstract. The enhancement of speleological heritage requires tools that combine conservation, accessibility, and communication. In this context, high-resolution laser scanning and photographic virtual tours have proven particularly effective. The experiments carried out by OGS and the Regional Geological Service made it possible to acquire detailed 3D models of caves, useful for geomorphological studies, digital representations, and risk assessments such as sinkhole phenomena. These models are already available in the Regional Speleological Cadastre, enriching the records of significant caves. At the same time, virtual tours offer an immersive and interactive exploration of underground environments, overcoming lighting challenges and also including aerial drone footage. Five examples were produced, including the Fontanon di Goriuda and the Grotta Pocala, which highlight hydrogeological and archaeological aspects. The integration of these technologies into the Cadastre has supported updates and provided new tools for research and dissemination.

Riassunto. La valorizzazione del patrimonio speleologico richiede strumenti che uniscano conservazione, accessibilità e comunicazione. In questo ambito, laser scan ad alta risoluzione e virtual tour fotografici si sono rivelati particolarmente efficaci. Le sperimentazioni condotte da OGS e dal Servizio geologico regionale hanno permesso di acquisire modelli 3D dettagliati delle cavità, utili per studi geomorfologici, rappresentazioni digitali e valutazioni di rischio, come i fenomeni di sinkhole. Tali modelli sono già disponibili nel Catasto speleologico regionale, arricchendo le schede di grotte significative. Parallelamente, i virtual tour offrono un'esplorazione immersiva e interattiva degli ambienti ipogei, superando le difficoltà legate all'illuminazione e includendo anche riprese aeree con droni. Sono stati realizzati cinque esempi, tra cui il Fontanon di Goriuda e la Caverna Pocala, che integrano aspetti idrogeologici e archeologici. L'integrazione di queste tecnologie nel Catasto ha favorito aggiornamenti e nuovi strumenti per la ricerca e la divulgazione.

Introduzione

La valorizzazione e la promozione del patrimonio speleologico rappresenta una sfida che coniuga conservazione, accessibilità e comunicazione, quest'ultima indirizzata peraltro a target ed obiettivi diversi. Il lavoro qui presentato individua alcuni strumenti ed alcune metodologie a supporto di tali finalità, quali i rilievi laser scan ad alta risoluzione ed i virtual tour fotografici.

Rilievi laser scan

L'applicazione di tecniche avanzate di documentazione virtuale degli ambienti sotterranei è stata sperimentata nell'ambito di un accordo di collaborazione tra l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) e il Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. L'obiettivo principale dell'attività era quello di testare soluzioni tecnologiche innovative e definire metodologie ottimali per l'acquisizione, l'elaborazione e la restituzione dei dati relativi alle cavità carsiche.

I rilievi tridimensionali realizzati tramite laser scanning hanno consentito di ricostruire geometrie complesse con elevata accuratezza, restituendo modelli digitali delle cavità carsiche con un

499 | GROTTA DEL BERSAGLIO MILITARE

Scheda semplice

Scheda completa

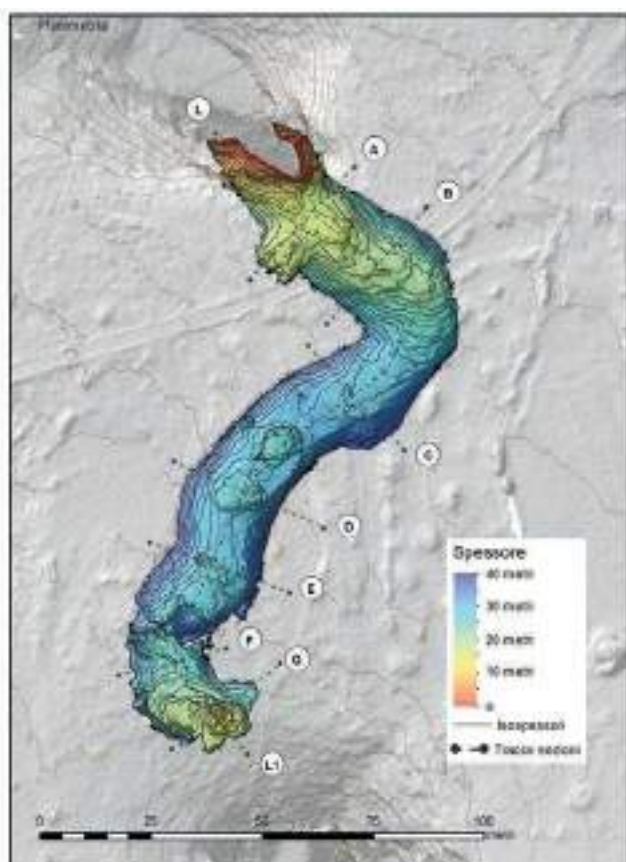


Fig. 1 - Visualizzazione della nuvola di punti ottenuta tramite rilievo laser scanning terrestre (TLS) della Grotta del Bersaglio Militare (499/1778VG), resa disponibile all'interno del Catasto Speleologico Regionale del Friuli Venezia Giulia nella sezione dedicata ai modelli 3D.



Fig. 2 - Grotta dell'Orso (33/7VG): integrazione dei dati da rilievo TLS e ALS e analisi in ambiente GIS per il calcolo dello spessore della copertura rocciosa, ottenuto dal differenziale tra la volta della cavità e la superficie esterna.

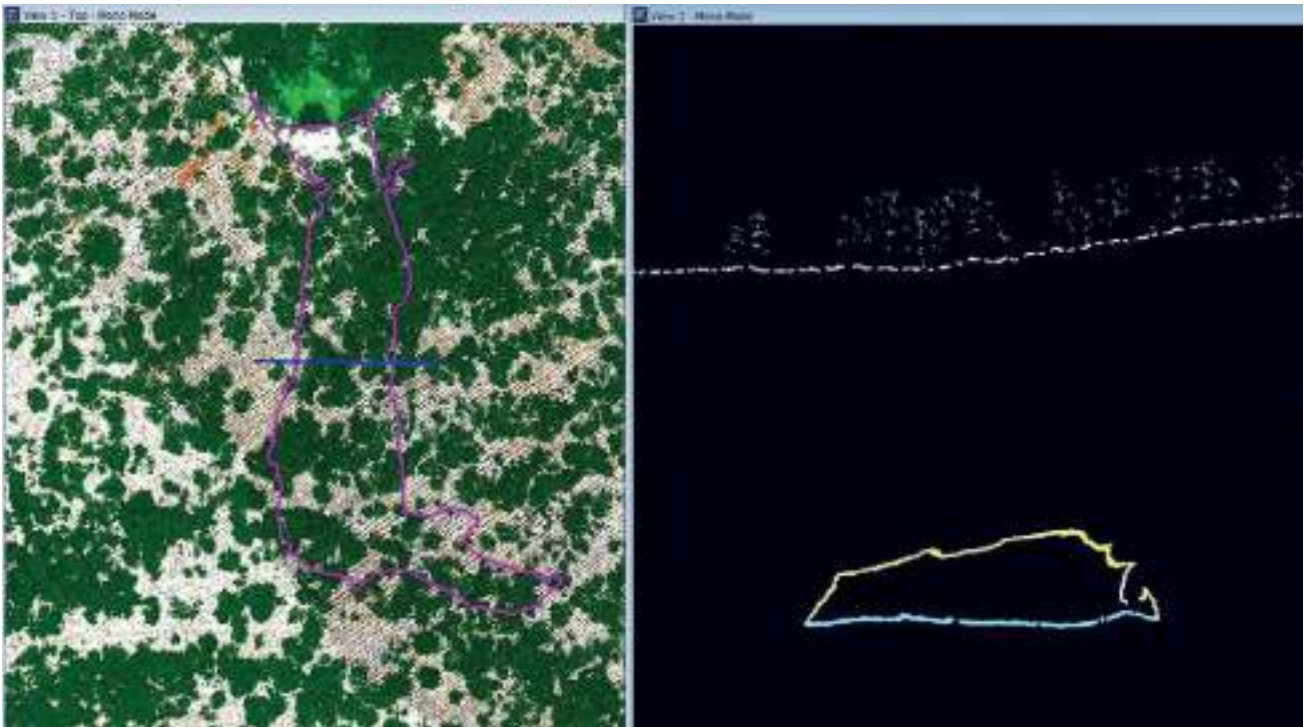


Fig. 3 - Grotta Azzurra (34/257VG): rappresentazione in pianta e sezione della nuvola di punti acquisita con rilievo laser, con evidenziazione delle diverse classi identificate in fase di classificazione.

livello di dettaglio estremamente elevato. Tali modelli risultano fondamentali non solo per la loro rappresentazione visuale, ma anche per analisi di carattere geomorfologico e strutturale (DE WA-ELE et al., 2018; GALLAY et al., 2015, 2016; VAN RENTERGEM et al., 2017). È stata rilevata oltre una decina di cavità utilizzando sia tecniche di Terrestrial Laser Scanning (TLS) sia approcci basati su Simultaneous Localization and Mapping (SLAM); i modelli così prodotti sono ora disponibili all'interno del Catasto Speleologico Regionale, nella sotto-sezione "Modello 3D" delle singole schede catastali.

La possibilità di integrare modelli tridimensionali ad altissima precisione dei vuoti sotterranei con rilievi laser aerei (ALS) apre prospettive significative in termini di pianificazione territoriale, gestione ambientale e tutela del patrimonio speleologico. Le informazioni derivate da tali dataset trovano applicazione non solo nella ricerca scientifica e nella valorizzazione culturale, ma anche come supporto ai procedimenti autorizzativi in ambito ambientale e ad altre attività istituzionali di competenza regionale.

Il workflow operativo seguito per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati si è articolato in diverse fasi tra loro consequenziali. La fase preliminare ha riguardato la preparazione del rilievo, con il posizionamento e la rilevazione di target riflettenti o naturali, necessari per allineare le scansioni. Successivamente si è proceduto all'allineamento delle nuvole di punti, suddiviso in una registrazione preliminare, basata sul confronto di feature geometriche, e in una registrazione di precisione mediante l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP). La georeferenziazione è stata realizzata attraverso punti di controllo acquisiti con tecniche GNSS e stazione totale, con successiva trasformazione delle nuvole di punti nel sistema RDN2008/UTM33N.

L'eventuale integrazione tra i dataset TLS e ALS è stata condotta utilizzando punti di controllo e caratteristiche comuni; a questo ha fatto seguito un filtraggio finalizzato alla riduzione del rumore e delle sovrapposizioni (Fig. 2). La fase di classificazione è stata svolta con software specifici per il trattamento dei dati laser, attraverso algoritmi automatici e procedure semi-automatiche o manuali, distinguendo le classi principali come terreno, vegetazione, manufatti, tetto e pavimento della cavità; tale fase si è rivelata particolarmente rilevante nei contesti ipogei più complessi (Fig. 3).

Virtual tour ipogei

Il virtual tour fotografico in grotta si basa sulla sequenza di immagini sferiche collegate tra loro, che consentono una navigazione interattiva e immersiva. Oltre a rappresentare un'esperienza coinvolgente per l'utente, tale metodologia costituisce una moderna forma di documentazione viva, immediata nella lettura e particolarmente efficace per la divulgazione e la valorizzazione del patrimonio speleologico (ARICÒ et al., 2024; HUGHES et al., 2022; O'CONNOR et al., 2019). L'interattività rende infatti possibile esplorare una cavità in maniera personalizzata, spostandosi da un punto di osservazione all'altro come se si fosse fisicamente presenti all'interno dell'ambiente ipogeo.

Sebbene il ricorso a tour virtuali sia ormai diffuso in ambito turistico e museale, la loro applicazione in contesti sotterranei non turistici, caratterizzati dall'assenza di illuminazione artificiale, risulta ancora limitata. In questo quadro, il progetto ha perseguito l'obiettivo di sviluppare soluzioni tecniche in grado di produrre immagini descrittive e di forte impatto visivo, testandole in siti pilota selezionati.

Alcuni dei virtual tour realizzati sono stati arricchiti con riprese aeree esterne, ottenute mediante l'impiego di droni, al fine di contestualizzare meglio le cavità sotterranee all'interno del paesaggio circostante. Complessivamente sono stati prodotti cinque tour virtuali, resi disponibili attraverso il Catasto Speleologico Regionale del Friuli Venezia Giulia (<https://catastogrotte.regione.fvg.it/pagina/29/Virtual-Tour-ipogei>). Tra questi, si segnalano il Fontanon di Goriuda, di particolare interesse per le sue peculiarità idrogeologiche, e la Caverna Pocala (Fig. 4), rilevante dal punto di vista archeologico.

Nel corso delle sperimentazioni sono state testate diverse soluzioni di acquisizione fotografica. Da un lato sono state impiegate fotocamere professionali reflex e mirrorless, equipaggiate con obiettivi grandangolari e fisheye e montate su testa panoramica per la realizzazione di scatti multipli da ricomporre successivamente in un'unica immagine sferica. Dall'altro, sono state valutate



Fig. 4 - Schermata del tour virtuale della Caverna Pocala (173/91VG) presente sul Catasto Speleologico Regionale. In alto a sinistra è visibile la mappa della cavità, a destra le miniature dei panorami e in basso i pulsanti di navigazione.

fotocamere dedicate alla fotografia a 360°, dotate di doppio obiettivo grandangolare contrapposto con campo visivo (FOV) di circa 200°, in grado di generare immagini immersive già pronte per l'elaborazione.

L'analisi comparativa ha evidenziato come la seconda soluzione risulti più vantaggiosa in ambiente ipogeo: le fotocamere a 360° richiedono infatti un numero nettamente inferiore di passaggi in fase di post-produzione e si dimostrano più agili da impiegare in contesti caratterizzati da spazi ristretti, condizioni di illuminazione difficili e tempi operativi limitati. Per tali motivi, la scelta finale si è orientata verso l'utilizzo di queste ultime, che offrono un compromesso ottimale tra qualità, rapidità di acquisizione e praticità d'uso nelle riprese fotografiche in grotta.

Un aspetto cruciale nella realizzazione di immagini in ambiente ipogeo riguarda la composizione fotografica, che richiede una pianificazione attenta della scena (CHIESI, 2003). Per migliorare la percezione spaziale e restituire un senso realistico delle dimensioni, risulta fondamentale l'inserimento di soggetti umani o di riferimento, in grado di fornire scala e profondità.

L'illuminazione costituisce l'elemento più critico, data la totale assenza di luce naturale all'interno delle grotte. Essa deve essere accuratamente progettata per garantire coerenza cromatica e tridimensionalità, evitando dominanti dovute a sorgenti con differente temperatura di colore (CHIESI, 2003). A tal fine, viene suggerito l'utilizzo combinato di più unità flash e luci diffuse, impiegate in modo coordinato da un team fotografico, così da ottenere un'illuminazione equilibrata e uniforme.

Un'ulteriore sfida riguarda la gestione delle forti differenze di luminosità, particolarmente evidenti nelle zone di ingresso. In questi casi si adotta la tecnica HDR (High Dynamic Range), che prevede la fusione di esposizioni multiple al fine di preservare i dettagli sia nelle ombre più profonde sia nelle aree più luminose. La fase di post-produzione, condotta preferibilmente a partire da file RAW, consente poi di effettuare correzioni mirate di esposizione, colore e nitidezza, oltre all'eliminazione di artefatti e alla fusione di scatti multipli tramite l'uso di maschere.

La realizzazione del virtual tour rappresenta l'ultima fase del processo. Mediante software dedicati, le immagini panoramiche vengono assemblate e integrate con elementi interattivi quali hotspot di navigazione, testi e figure esplicative, e mappe orientative con l'indicazione delle stazioni di ripresa. La sequenza lineare delle postazioni fotografiche rafforza la percezione del percorso reale, aumentando il senso di immersione. Un'interfaccia utente efficace deve includere strumenti di navigazione, zoom e visualizzazione, oltre a miniature panoramiche che consentano un accesso rapido e intuitivo alle diverse scene.



Fig. 5 - Grotta delle Porte di Ferro (504/3027VG): schermata del virtual tour con visualizzazione della mappa della cavità in alto a sinistra, miniature dei panorami a destra e pulsanti di navigazione nella parte inferiore.

L'approccio descritto dimostra come l'integrazione di metodologie fotografiche avanzate, illuminazione dedicata e tecniche di post-produzione, all'interno di un moderno catasto speleologico digitale e interattivo, permetta di restituire con elevato realismo e accessibilità la complessità morfologica e percettiva dei contesti speleologici.

Osservazioni conclusive

Le acquisizioni mediante laser scanning ad altissima definizione, sia con tecniche di Terrestrial Laser Scanning (TLS) sia con approcci basati su Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), unitamente alla realizzazione di virtual tour tramite fotocamere a 360°, rappresentano strumenti di nuova generazione che si stanno affermando come standard metodologici per la documentazione e la valorizzazione del patrimonio speleologico.

L'impiego integrato di queste tecnologie consente di ottenere dati tridimensionali di elevata precisione, capaci di restituire modelli geometrici complessi con una risoluzione tale da soddisfare esigenze sia di carattere scientifico che divulgativo. La loro implementazione ha inoltre favorito l'aggiornamento del Catasto Speleologico Regionale in una prospettiva moderna e digitale, ampliandone le potenzialità informative e rendendo i contenuti accessibili a un pubblico diversificato, dagli specialisti al grande pubblico.

Oltre alla funzione divulgativa ed educativa, i rilievi tridimensionali e i tour virtuali ipogei assumono una rilevanza strategica come strumenti di documentazione avanzata, contribuendo al consolidamento delle conoscenze geomorfologiche e strutturali, nonché supportando le attività di monitoraggio ambientale, di vigilanza istituzionale e di gestione delle cavità naturali.

I risultati emersi dalle sperimentazioni mostrano come l'integrazione di metodologie di rilievo avanzato con soluzioni di esplorazione virtuale rappresenti un significativo avanzamento nel campo della speleologia applicata, delineando un quadro metodologico che può essere esteso anche a contesti non turistici e a siti di rilevanza scientifica o culturale. Tali approcci, pur presentando ancora alcune criticità di carattere tecnico-operativo, si configurano come utili strumenti per la conservazione, la pianificazione e la valorizzazione sostenibile del patrimonio ipogeo.

Bibliografia

- ARICÒ M., DARDANELLI G., LA GUARDIA M., & LO BRUTTO, M., 2024 - *Three-Dimensional Documentation and Virtual Web Navigation System for the Indoor and Outdoor Exploration of a Complex Cultural Heritage Site*. Electronics, 13, 14, 2833.
- 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, 319, pp. 47-61.
- CHIESI M. & PANI G., 2003 - *Fotografare il Buio* - Quaderni didattici SSI, 13, Erga Edizioni.
- HUGHES D. & ALBRIGHT S., 2022 - *Interactive Virtual Tours for Conservation and Education: A Case Study of Cave Environments*. Environmental Education Research, 28, 4, pp. 687-703.
- GALLAY M., KAŇUK J., HOCHMUTH Z., MENEELY J., 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, 44, pp. 277-291. Doi:10.5038/1827-806x.44.3.6.
- GALLAY M., HOCHMUTH Z., KAŇUK J. & HOFIERKA J., 2016 - *Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3-D terrestrial laser scanning*. Hydrology and Earth System Sciences, 20, 5, pp. 1827-1849.
- O'CONNOR S. & JONES M., 2019 - *Applications of 360° Photography in Archaeology and Geosciences*. Journal of Archaeological Science, 27, 3, pp. 1124-1135.
- VANNINI P. et al., 2015 - *Virtual tour of underground heritage: A case study on the cave of Castellana*. Heritage Science, 3, 1, 12 pp.

Paolo Guglia¹

Rappresentazione georiferita 3D del “Complesso del Timavo”. Nuovi strumenti per un rilievo di precisione

1) Società Adriatica di Speleologia APS, Trieste

Abstract. This work describes the activities carried out in order to obtain a 3D georeferenced representation of the “Timavo Complex”. This activity was performed with a “re-survey” project of the available data, collected during the various expeditions that involved the complex of flooded tunnels located near San Giovanni di Duino.

Riassunto. Questo lavoro descrive le attività svolte per ottenere una rappresentazione georeferenziata tri-dimensionale del “Complesso del Timavo”. Tale attività è stata svolta attraverso un progetto di “re-survey” dei dati disponibili, raccolti durante le diverse spedizioni che hanno interessato il complesso di gallerie allagate situato presso San Giovanni di Duino.

Il “complesso del Timavo”

Anche di recente, speleosub francesi hanno chiaramente evidenziato la rilevanza del fiume Reka/Timavo per la speleologia internazionale, definendolo *“Il più affascinante mistero della speleosubacquea in Europa...”*⁽¹⁾. Questo corso d’acqua ipogeo può essere considerato, a buon diritto, il fiume carsico per eccellenza, un fenomeno sotterraneo che ha catalizzato la nascita della speleologia locale e non solo.

Fin dall’epoca romana si era compreso come le misteriose acque del Carso riemergessero in superficie presso i tre rami delle Risorgive di San Giovanni di Duino. Numerosi studiosi si sono interessati a questo intrigante fenomeno naturale, tra i quali è doveroso citare la figura di Eugenio Boegan (BOEGAN, 1938).

Le diverse attività di ricerca e di tracciamento delle acque, avviate dalla fine del XIX secolo, hanno progressivamente permesso di delineare un’immagine sempre più chiara, sebbene tutt’altro che completa, del percorso di questo fiume carsico.

Benché noto, è opportuno ricordare che il fiume nasce da sorgenti situate in territorio croato, prosegue in superficie per circa 40 km in Slovenia, fino a inabissarsi nelle Grotte di San Canziano/Škocjan. Dopo un ulteriore tragitto ipogeo di circa 40/50 km, il fiume ritorna alla luce a San Giovanni di Duino, per concludere il suo percorso raggiungendo il mare Adriatico. Tre sono i principali punti di risorgenza dell’acqua e diverse sono state le ipotesi formulate, nel tempo, per definire il tracciato delle gallerie sommerse sicuramente esistenti a monte di tali risorgive.

Nel presente lavoro si tralascieranno le ricerche riguardanti il percorso sotterraneo del fiume nel suo complesso e alle poche grotte finora intercettate, per concentrarsi specificatamente sull’ultimo tratto, quello che precede immediatamente il ritorno in superficie delle acque carsiche.

Le esplorazioni

La piena comprensione dei complessi passaggi allagati delle risorgive del Timavo è stata possibile solo con l’avanzamento tecnologico delle attrezzature subacquee, che ha reso finalmente disponibili strumenti idonei alle immersioni in grotta. Le prime esplorazioni speleosubacquee in quest’area ebbero inizio negli anni ’50 del secolo scorso. Fu in quel periodo che Walter Maucci e la sua squadra della Sezione Geo-speleologica della Società Adriatica di Scienze, durante alcune esercitazioni fina-

1) Cit. Cloude Touloumdjian durante il TSE 2013.

lizzate al superamento del sifone d'ingresso dell'Abisso di Trebiciano, penetrarono per oltre cinquanta metri all'interno della risorgiva del 3° ramo, realizzando un primo, seppur parziale, rilievo della galleria sommersa (Fig. 1). Con le esplorazioni di Maucci si può dunque affermare che ebbe inizio, a livello locale e non solo, la fase delle immersioni in grotta (MAUCCI, 1954).

Successivamente, si registrarono spedizioni di singoli subacquei, come quelle di G. Cobol (nel 1956/1957 e nel 1967) e G. Crevatin (nel 1979). Tuttavia, è con gli anni '80 del XX secolo che si assiste a un programma di esplorazione più organizzato, con immersioni di C. Touloumdjian (1980/1981), G. Crevatin (1985) e J.J. Bollanz (1988). Queste singole spedizioni trovarono poi il loro coordinamento nel progetto internazionale denominato "Timavo Project", organizzato dalla Società Alpina delle Giulie e dalla Società Adriatica di Speleologia tra il 1990 e il 1993. In quest'occasione, grazie all'intervento di speleosub cecoslovacchi, francesi, tedeschi e italiani, le tre risorgive, il Pozzo dei Colombi (1844/4583VG) e la Grotta del Timavo (1844/4583VG) furono congiunte in un unico complesso, raggiungendo quasi i due chilometri di sviluppo complessivo.

Seguì un periodo di quasi vent'anni in cui, a causa di diverse problematiche, le immersioni nelle risorgive furono molto difficili. Solo nel 2006, con un'immersione di G. Crevatin, furono aggiunti 60 metri di nuove gallerie, portando il Complesso del Timavo a superare di poco i due chilometri di sviluppo complessivo.

Negli ultimi anni, si è manifestato un rinnovato interesse per le Risorgive del Timavo nell'ambito del programma esplorativo internazionale "Timavo System Exploration", organizzato dalla Società Adriatica di Speleologia. In particolare, nelle edizioni dal 2013 al 2015, gli speleosub della National Cave Diving Committee della FFESSM si sono immersi nel Pozzo dei Colombi per scendere nuovamente nel Grande Collettore, raggiungendo 82 metri di profondità nel punto più a monte dell'intero complesso e proseguendo nella galleria da cui proviene la maggior parte dell'acqua.

I rilievi precedenti

Tutte le esplorazioni speleosubacquee hanno portato alla redazione di vari rilievi. Sebbene parziali e forse non sempre precisi, essi hanno rappresentato l'unico strumento per aumentare la conoscenza della morfologia delle gallerie sommerse.

Unendo la mappatura emersa dal "Progetto Timavo" ai vari materiali precedenti, è stato possibile redigere, nel 1993, una prima planimetria del Complesso del Timavo (Fig. 2). Si tratta di una vista planimetrica che riporta i vari rami e alcune indicazioni delle profondità raggiunte dagli speleosub nei punti considerati più importanti. Per quanto riguarda questo rilievo, lo sviluppo cal-

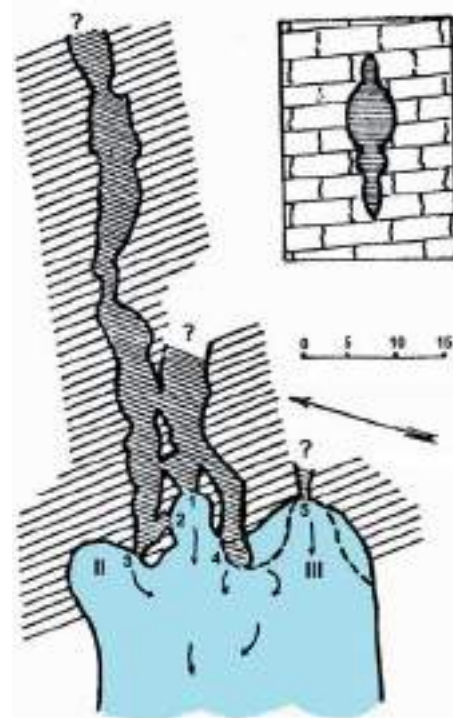


Fig. 1 - Rilievo della galleria allagata del Terzo Ramo delle Risorgive redatto da Walter Maucci (SAS) nel 1952.

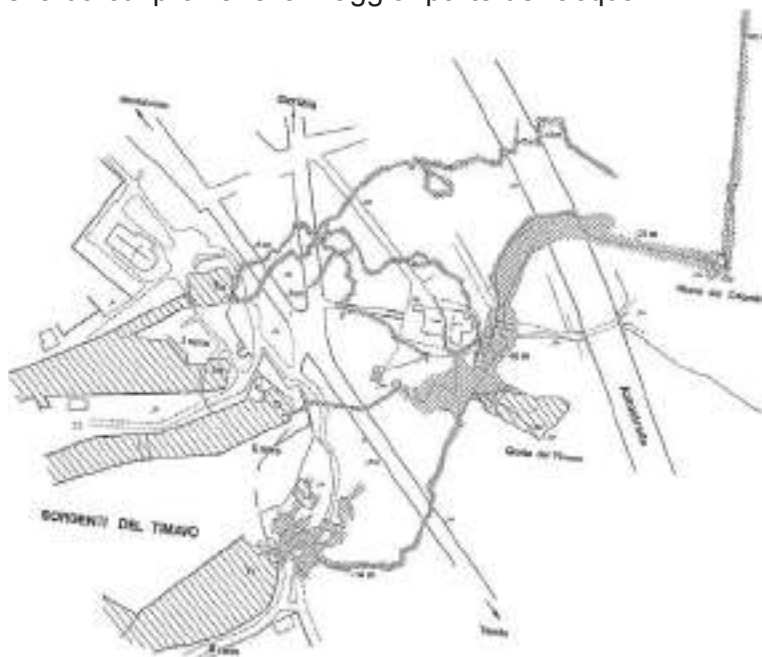
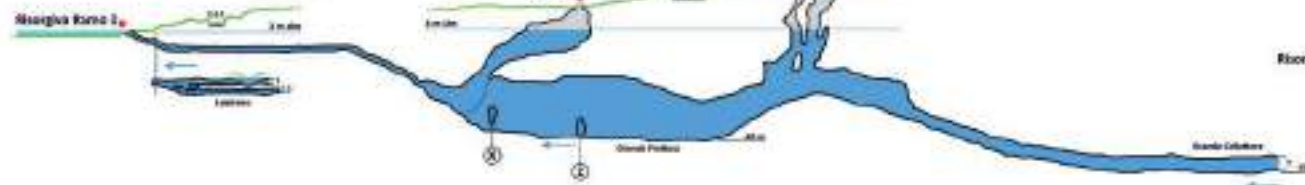
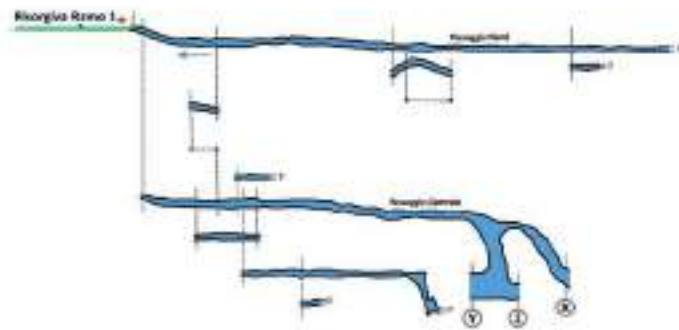


Fig. 2 - Rilievo del "Complesso delle Risorgive del Timavo" secondo le immersioni di vari speleosub durante il "Progetto Timavo" degli anni 1990/1993.

COMPLESSO DELLE RISORGIVE DEL TIMAVO

Formato da:
 Risorgiva 1° del Timavo
 Risorgiva 2° del Timavo
 Risorgiva 3° del Timavo (753-3919VG)
 Grotta del Timavo (1844-4583VG)
 Pozzo dei Colombi (215-227VG)

Dati dimensionali aggiornati al 2024:
 Sviluppo planimetrico: 2.008 m
 Sviluppo spaziale: 2.186 m
 Dislivello totale: 106 m
 Dislivello in aria: 24 m
 Dislivello in immersione: -82 m



Schema dei vari rami



- a - Passaggio Nord (North Way)
- b - 1° diramazione Passaggio Nord
- c - 2° diramazione Passaggio Nord
- d - Passaggio Centrale (Middle Way)
- e - Collegamento Passaggio Nord con Passaggio Centrale
- f - By-pass Passaggio Centrale
- g - 1° diramazione Passaggio Centrale
- h - Galleria Principale (Main Gallery)
- i - 1° diramazione Galleria Principale
- l - Ramo "del proteo"
- ii - 2° Ramo (Collegamento al 3° Ramo)
- o - 3° Ramo (Collegamento alla Grotta del Timavo)
- p - 1° diramazione 3° Ramo
- q - 2° diramazione 3° Ramo
- r - 3° diramazione 3° Ramo
- s - Grande Frattura
- t - Collegamento Grande Frattura al Pozzo dei Colombi
- 1 - Grande Collettore

Esplorazione e rilievo:
 Società Adriatica di Speleologia (1979, 1985)
 Progetto Timavo (1990-1993)
 Timavo System Exploration - FFESSM/SAS (2013-2024)

Elaborazione dati:
 Società Adriatica di Speleologia (2024)
 Grafica P. Guglia

TIMAVO SYSTEM EXPLORATION
 2013-2024



Fig. 3 - Primo rilievo che riporta le sezioni dei vari rami allagati delle Risorgive (2017).

colato ammonta a 1969 m, per una profondità complessiva di 106 m (di cui 24 in aria e 82 in immersione). In quest'occasione si è cercato di elaborare un disegno il più chiaro possibile che evidenziasse, forse in modo più grafico che attento alla precisione, l'andamento dei vari passaggi (GUGLIA, 1994).

In relazione alle poche immersioni seguenti, la planimetria è stata semplicemente aggiornata, aggiungendo le prosecuzioni esplorate nel frattempo (GUGLIA et al., 2016).

Mentre la pianta del complesso, che coinvolge i tre rami delle risorgive, la Grotta del Timavo e il Pozzo dei Colombi, aveva raggiunto un certo grado di attendibilità, mancava ancora, completamente, una vista in sezione dei vari passaggi.

Raccogliendo e rivedendo nuovamente il materiale disponibile, sono state estrapolate nel 2017 anche le sezioni longitudinali dei vari passaggi, definendo nuovi valori dimensionali per quanto riguarda l'estensione del complesso: sviluppo 2129 m e profondità sempre 106 m (GUGLIA, 2017).

Analizzando questo rilievo (Fig. 3) si è giunti, però, a un'altra constatazione: si trattava di un disegno eseguito in maniera grafica, dove il collegamento dei vari rami era stato fatto semplicemente disegnando le singole parti, stando attenti a una visione complessiva più legata alla leggibilità del risultato finale che all'attenzione agli aspetti prettamente tecnici. Si è deciso, quindi, di rivedere nuovamente tutto il materiale disponibile, cercando di puntare, questa volta, alla precisione del risultato finale, anche in vista della consegna dei dati al Catasto Speleologico Regionale.

Il nuovo rilievo

Per giungere a un rilievo chiaro e sicuramente più preciso è stato necessario affidarsi a un moderno software dedicato (cSurveyPC), avviando un'attività di "re-survey". In pratica, si è costruita una nuova poligonale derivando i vari segmenti dalle rappresentazioni grafiche raccolte nel passato.

Era chiaro che si trattava di lavorare su un rilievo i cui dati erano stati raccolti in un ambiente estremamente ostile, con strumenti di non elevata precisione e durante attività per il momento irripetibili. Bisognava quindi operare con gli elementi grafici disponibili, ma adottando tutte le soluzioni possibili per verificare l'esattezza del risultato ed eventualmente correggere l'andamento tridimensionale dei vari rami componenti il complesso.

Con questo intento, sono stati fissati alcuni punti fermi, da considerarsi nodi fondamentali ai quali riferirsi durante il processo elaborativo. Sono state definite come vincolanti le posizioni tridi-

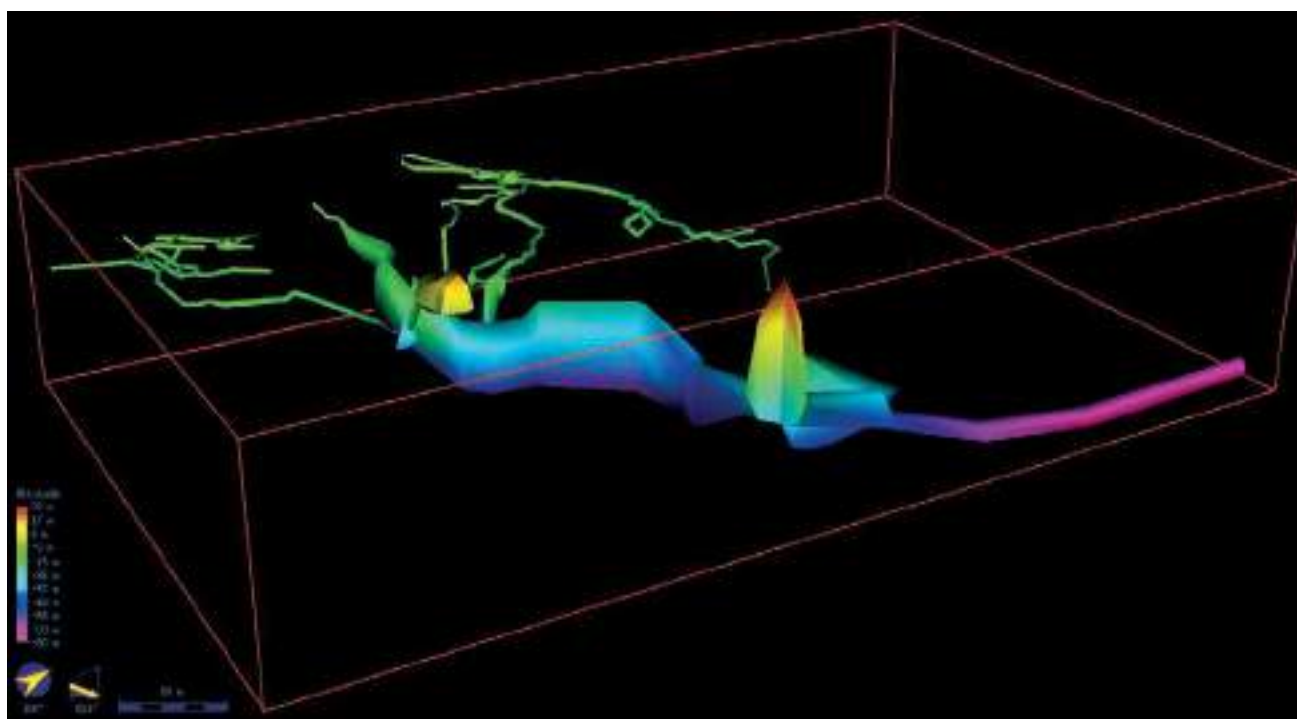


Fig. 4 - Poligonale tridimensionale georiferita del "Complesso delle Risorgive del Timavo" (2024).

mensionali (in pianta e in quota) dei cinque ingressi delle grotte conosciute, di cui erano note le coordinate geografiche. Per facilitare le verifiche sono state create anche alcune “battute virtuali” a collegamento dei cinque ingressi.

A completamento dei vincoli concettuali cui sarebbe stato sottoposto il rilievo, sono stati definiti anche altri punti obbligati, come l'intersezione dei singoli rami e le profondità massime raggiunte dagli speleosub. Con questi elementi si è costruita una specie di gabbia che doveva “contenere” la poligonale tridimensionale del rilievo.

Si è quindi passati alla fase vera e propria di “re-survey”. Si trattava di costruire una poligonale (in realtà più poligonali, una per ogni singolo ramo), definendo graficamente la lunghezza di ogni segmento compreso fra i vari capisaldi, nonché il suo orientamento rispetto al Nord e la sua inclinazione rispetto al piano orizzontale, il tutto estrapolando i dati dall'eterogeneo materiale fornito dagli speleosub nel corso dei vari anni.

Per quanto riguarda la lunghezza di ogni segmento, è stata inserita la planimetria “raster” in un software CAD (computer-aided design), creando graficamente i vari segmenti e ricavando direttamente dal programma la loro dimensione planimetrica e l'orientamento rispetto al Nord. Ovviamente adottando una scala univoca e fissando convenientemente il Nord per quanto riguardava la grafica vettoriale. Il problema seguente è stato quello di ricavare la tridimensionalità di questi segmenti. Per fare questo è stato creato un foglio Excel dove, con semplici formule trigonometriche e inserendo le profondità raggiunte dagli speleosub nei due capisaldi di partenza e di arrivo (non pendenze progressive, quindi, ma profondità assolute), si sono ricavate sia la lunghezza spaziale del segmento, sia l'inclinazione rispetto all'orizzonte.

Non si tratta di un procedimento complesso, ma da ripetere per ogni segmento formante la poligonale descrittiva di ogni ramo del complesso. A tale proposito, la cavità è stata suddivisa in quattro poligonali principali (quelle facenti capo al 1° e 2° ramo, quella che collega il 3° ramo alla Grande Frattura, al Pozzo dei Colombi e al Grande Collettore, e quella riguardante la Grotta del Timavo). Sono state poi definite dieci ramificazioni secondarie. La poligonale complessiva ha portato alla creazione di 241 “battute” di rilievo.

Completato questo lavoro preliminare, le quattro poligonali principali sono state sottoposte a verifica, accertando la loro precisione attraverso i punti di controllo. Per fare un esempio, la poligonale in entrata dal 1° ramo (ingresso dalle coordinate tridimensionali conosciute) doveva congiungersi alla poligonale del 1° ramo in un punto di verifica e quindi quest'ultima doveva ritornare in superficie esattamente all'ingresso dello stesso ramo (anch'esso fissato spazialmente). Il tutto rispettando sempre le profondità intermedie indicate dagli speleosub.

Come prevedibile, la prima versione grezza della poligonale ha rispettato solo parzialmente tali punti fissi predefiniti, ed è stato necessario agire sui vari segmenti per far coincidere lo sviluppo tridimensionale delle varie diramazioni ai capisaldi ritenuti tassativi. Anche questo un procedimento non difficile, ma lungo e noioso. Si è quindi completato il lavoro di aggiustamento e la poligonale è stata “regolata”, portando a termine la correzione di alcuni errori (che ammontavano comunque a un massimo di dieci metri nelle distanze e di quattro gradi nell'inclinazione e nell'orientamento). Al termine del lavoro è stato possibile non solo confermare la pianta e avere una visione migliore in sezione longitudinale, ma anche ottenere finalmente una poligonale georiferita 3D con dati volumetrici, che descrive al meglio questo interessante sistema di gallerie sommerse (Fig. 4).

Conclusioni

Ovviamente il rilievo è da considerarsi solo di grado di precisione “3”, in quanto la raccolta dati è stata eseguita in ambienti sommersi e in condizioni difficili (acqua sempre molto torbida), grado a cui è stato aggiunto il suffisso qualificativo “B”, cioè poligonali chiuse e “regolate”⁽²⁾.

2) Per i gradi di precisione del rilievo vedi la classificazione elaborata dall'UIS - Unione Internazionale di Speleologia.

Se la poligonale può quindi ritenersi oggi abbastanza affidabile, qualche dubbio potrebbe sorgere ancora sulle reali dimensioni delle gallerie (altezza e larghezza), poiché la scarsa visibilità non ha mai permesso facili misurazioni.

La precisione nel rilievo speleologico si ottiene utilizzando strumenti adeguati e ponendo particolare attenzione sia nella fase di raccolta che in quella di elaborazione dei dati. Ogni volta che è possibile (più ingressi o anelli) è necessario verificare la correttezza della poligonale complessa, controllando sempre la quota e la posizione dei punti in cui due o più poligoni s'incontrano.

La difficoltà maggiore nel creare la rappresentazione 3D del Complesso delle Risorgive è stata proprio quella di chiudere (ove possibile) tutte le poligoni, sia gli anelli reali sia quelli creati specificatamente con appositi punti definiti tridimensionalmente per verificare e ottenere la massima precisione possibile del rilievo stesso.

Bibliografia

- BOEGAN E., 1938 - *Il Timavo*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, serie Geol. e Geof., Mem. II, pp. 1-251.
- MAUCCI W., 1954 - *Ricerche in acque sotterranee mediante scafandri autonomi ad ossigeno*. Bollettino della Società Adriatica di Scienze Naturali, 47, pp. 62-81.
- GUGLIA P., 1994 - *Risultati esplorativi del Progetto Timavo 1990-1993*. Atti e Memorie CGEB SAG, 31, pp. 25-48.
- GUGLIA P., LUCHESI P. & RESTAINO M., 2016 - *Timavo System Exploration (TSE). Programma internazionale di esplorazioni speleo-subacquee rivolte al corso sotterraneo del fiume Timavo (Carso Triestino)*. Speleologia, SSI, a. XXXVII, 74, pp. 25-30.
- GUGLIA P., 2017 - *Complesso del Timavo: evoluzione di un rilievo*. Atti e Memorie CGEB SAG, 47, pp. 135-138.

Massimiliano Werk¹

LiDAR e CloudCompare. L'Innovazione nel Sistema di Rilievo delle Cavit  Ipogee

1) Società Adriatica di Speleologia APS, Trieste

Abstract. This paper introduces GROTTTE3D, a new methodology for surveying subsurface cavities using LiDAR technology and the open-source software CloudCompare. The system generates a precise Point Cloud, creating a faithful digital copy of the cave. A key innovation is the use of integrated LiDAR sensors in modern smartphones (e.g., iPhone Pro models), which democratizes high-precision data acquisition. CloudCompare processes the Point Cloud to easily extract accurate measurements, automatically generate cave plans, profiles, and detailed Cross-Sections. This methodology marks a definitive turning point in speleological documentation, offering to date unsurpassed precision (millimetric detail), total data completeness, and significant versatility. The 3D data substantially enriches the traditional 2D survey, providing a precise and comprehensive database ready for integration into cave registries.

Riassunto. Questo articolo presenta GROTTTE3D, una nuova metodologia per il rilievo di cavit  sotterranee che utilizza la tecnologia LiDAR e il software open source CloudCompare. Il sistema genera una nuvola di punti precisa, creando una copia digitale fedele della grotta. Un'innovazione fondamentale   l'utilizzo di sensori LiDAR integrati nei moderni smartphone (ad esempio, i modelli iPhone Pro), che democratizza l'acquisizione di dati ad alta precisione. CloudCompare elabora la nuvola di punti per estrarre facilmente misurazioni accurate e generare automaticamente planimetrie, profili e sezioni trasversali dettagliate. Questa metodologia segna una svolta definitiva nella documentazione speleologica, offrendo una precisione ad oggi insuperabile (dettaglio millimetrico), una completezza totale dei dati e una notevole versatilit . I dati 3D arricchiscono notevolmente il tradizionale rilievo 2D, fornendo un database preciso e completo pronto per l'integrazione nei registri delle grotte.

Introduzione

Il sistema GROTTTE3D   stato creato e perfezionato da Marcello Pellegrini (Gruppo Naturalistico Montelliano), Massimiliano Zago (Treviso Sotterranea) e Paolo Corradegini (3D Metrica) ed   stato oggetto di un corso tenuto dall'autore (Societ  Adriatica di Speleologia) nel marzo del 2025.

La metodologia si basa sul LiDAR (Light Detection and Ranging), che misura il tempo impiegato da impulsi laser emessi per ritornare al sensore, generando cos  una "Nuvola di Punti", che, nel nostro caso, permette di costruire una fedele copia digitale della grotta. Sfruttando l'accessibilit  dei sensori integrati negli smartphone e il software Open Source CloudCompare, il sistema trasforma il rilievo. Permette di estrarre facilmente misure precise di larghezze e altezze, generare automaticamente piante e profili, e creare sezioni trasversali dettagliate. In sintesi, rivoluziona il processo di documentazione speleologica, garantendo dati versatili e pronti per il catasto..

Descrizione dei dati

Il sistema di rilievo delle cavit  ipogee si fonda, quindi, sulla tecnologia LiDAR e sull'utilizzo del software CloudCompare. Il punto di partenza del processo   la creazione della nuvola di punti: immaginate di fotografare la grotta con milioni di punti minuscoli, ognuno dei quali registra la propria posizione esatta in uno spazio tridimensionale. Questa nuvola  , di fatto, una copia digitale fedelissima della realt .

I punti/dati che compongono la nuvola si raccolgono con il LiDAR (laser scanner), tecnologia noto da diversi decenni ma divenuta di uso comune solo da una ventina d'anni. Una delle maggiori innovazioni   che oggi non sono necessarie attrezzature costose per l'acquisizione. Si utilizza con



Fig. 1 - Confronto fra i risultati ottenuti nel rilievo della Grotta delle Torri di Slivia (22/39VG) effettuato con GeoSlam e iPhone.

successo il LiDAR di smartphone recenti, come l'iPhone 12 Pro o 13 Pro, rendendo l'acquisizione accessibile a tutti.

L'affidabilità di questa acquisizione "democratizzata" è stata confermata anche per le cavità naturali: effettuati i rilievi nella Grotta delle Torri di Slivia (22/39VG; Fig. 2) abbiamo sovrapposto le scansioni effettuate dall'iPhone alle scansioni GeoSlam, uno strumento laser scan in movimento in grado di lavorare anche al buio e fra i più moderni ed utilizzati, e le misure combaciano in modo perfetto (Fig. 1). Questo test ha confermato che con un iPhone si possono raggiungere risultati fino a poco tempo fa riservati ad attrezzature professionali, e con uno strumento molto più economico, estremamente più piccolo e maneggevole, facilmente utilizzabile anche in spazi angusti.

Una volta ottenuta la nuvola di punti (Fig. 3), il software CloudCompare ne sblocca il pieno potenziale. Con la nuvola di punti, ogni dettaglio è misurabile. Possiamo ottenere le coordinate esatte di qualsiasi punto o misurare le distanze precise tra due punti. Questo permette di conoscere con esattezza larghezza, altezza o lunghezza di passaggi e sale, semplicemente a portata di click. Oltre la mappa tradizionale, CloudCompare crea la Pianta Automatica. Dalla nuvola di punti "sco-perchiata", il software genera una linea che ne definisce i limiti planimetrici, eliminando la necessità di tracciare manualmente la polilinea (Fig. 4).

Inoltre, possiamo generare le curve di livello o isoipse. Queste ci mostrano l'andamento del terreno, le salite, le discese e le morfologie, con dettagli che prima erano impensabili. L'analisi va nel cuore della grotta con sezioni trasversali automatiche. Possiamo definire un percorso e chiedere al software di generare automaticamente una serie di sezioni trasversali a intervalli regolari, ad esempio ogni 5 o 10 metri.

Una capacità straordinaria è la possibilità di creare sezioni, ovvero di "tagliare" la roccia come una torta. Il sistema mostra la sezione trasversale, rivelando la forma interna della cavità in quel dato punto. Tutta questa precisione supporta l'integrazione perfetta nel Catasto Speleologico (Fig. 4).

Osservazioni conclusive

Il nuovo approccio al rilievo ipogeo basato sulla tecnologia LiDAR e sull'elaborazione con CloudCompare segna un punto di svolta definitivo nella documentazione speleologica. I risultati ottenuti confermano una precisione oggi insuperabile, con dettagli che raggiungono il livello millimetrico e una completezza totale della cavità.

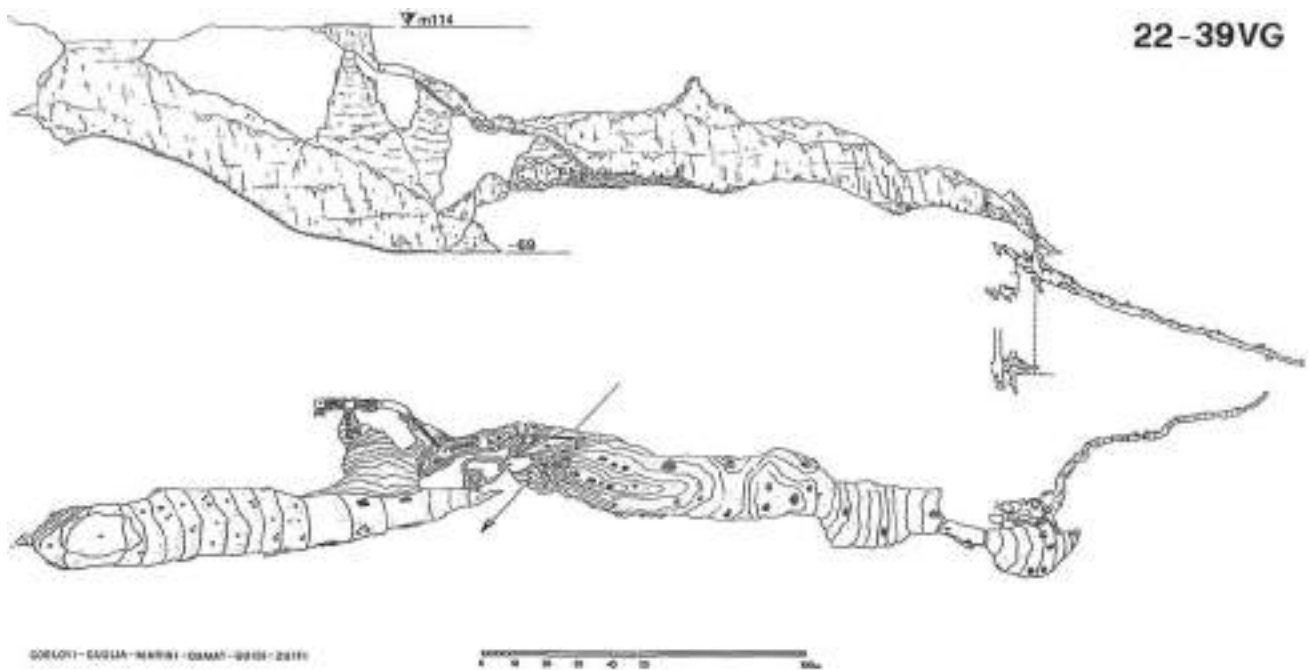


Fig. 2 - Sopra, il rilievo della Grotta delle Torri di Slivia (22/39VG).

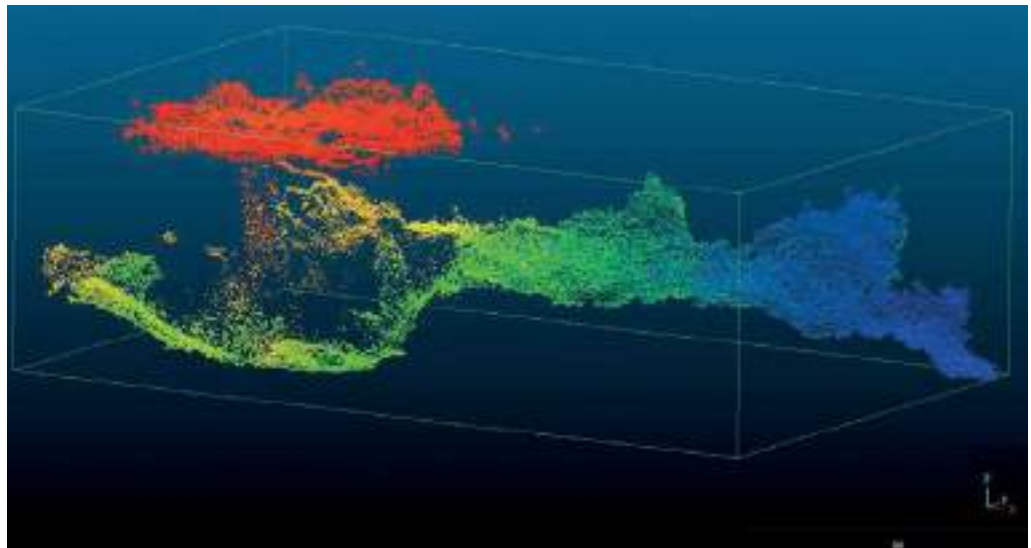


Fig. 3 - Grotta delle Torri di Slivia (22/39VG): la nuvola di punti ottenuta con GeoSlam.



Fig. 4 - Grotta delle Torri di Slivia (22/39VG): la sezione completa ottenuta con GeoSlam.

Questa metodologia garantisce una notevole versatilità, poiché la nuvola di punti può essere riutilizzata per generare molteplici output (piante, sezioni, profili, calcoli di volumi) da un'unica acquisizione. L'utilizzo di strumenti Open Source e la validata efficacia dei sensori LiDAR da smartphone rendono la tecnologia accessibile a tutti, democratizzando l'innovazione.

Cruciale è il ruolo del 3D: esso non sostituisce il 2D tradizionale (Fig. 2), ma lo arricchisce in modo sostanziale, fornendo una base di dati più precisa e completa per le esigenze di catasto.

Come detto, il test di sovrapposizione delle scansioni (Fig. 1) ha validato che risultati professionali sono ora alla portata di strumenti diffusi.

La possibilità con qualsiasi supporto, dallo smartphone al tablet al pc, di osservare la grotta da qualsiasi punto di vista, ruotarla o sezionarla, permette a esploratori e studiosi di disporre di una mole di dati impensabile fino a pochi anni fa.

In conclusione, appare evidente come il 3D sia il futuro, e l'impegno è volto a sviluppare continuamente nuove soluzioni partendo dalle esigenze concrete del campo

Gianni Benedetti¹

L'Abisso III di Gropada: un mistero lungo 100 anni... e oltre?

1) Gruppo Triestino Speleologi APS, Trieste

Abstract. The Abisso III di Gropada was explored and mapped in 1924 by the AXXXO. In the post-war period, generations of speleologists from Trieste searched for it without success. Perhaps due to a blocked entrance, an incorrect location, or because it was a fictional cave, various legends arose around it. In 2024, a cavity located in Slovenian territory, explored in the 80s by the JOSPDT, was re-examined to verify its relationship to the long-sought abyss. Several indications suggest that it is indeed the Abisso III di Gropada.

Riassunto. L'Abisso III di Gropada è stato esplorato e rilevato nel 1924 dall'Associazione XXX Ottobre di Trieste. Dal dopoguerra generazioni di speleologi triestini lo hanno cercato, ma senza successo. Forse a causa dell'ingresso ostruito, della posizione errata o perché si trattava di una grotta inventata, nacquero diverse leggende attorno ad esso. Nel 2024, una cavità situata in territorio sloveno, esplorata negli anni '80 dallo JOSPDT, è stata riesaminata per verificarne la relazione con l'abisso a lungo cercato. Diversi indizi suggeriscono che si tratti proprio dell'Abisso III di Gropada.

Introduzione

Viene esposta la storia di un fantomatico abisso del Carso triestino (Trieste, Italia) che dopo la prima esplorazione risultava letteralmente "scomparso". Infatti, nonostante le intense e accurate indagini sul terreno, condotte da centinaia di speleologi triestini per oltre 50 anni, dell'abisso non c'era alcuna traccia.

La prima esplorazione

L'Abisso III di Gropada - 2287VG è stato esplorato nel 1924 dall'Associazione XXX Ottobre di Trieste e il rilievo è stato pubblicato su *Il Timavo* nel 1938, a pagina 168 (Fig. 1).



Fig. 1 - Copertina de *Il Timavo* e rilievo con dati catastali e descrizione dell'Abisso III di Gropada.

Posizionato 1100 metri a SE+10° E da Gropada era costituito da una successione di quattro pozzi e si arrestava a 93 m di profondità, dinanzi una stretta fessura fortemente soffiante, sotto la quale la grotta continuava con un pozzo profondo dai 60 agli 80 metri.

L'ingresso ricadeva quindi, secondo la posizione indicata, nella zona del Monte Gaia a SE del paese di Gropada, in territorio italiano. Unica fonte bibliografica è quindi *Il Timavo*. Esistono poi altri documenti storici (Fig. 2), depositati presso il "Catasto Storico della Venezia Giulia" della Commissione Grotte "E. Boegan", che si rifanno però sempre ai dati originali.

Dopo la prima esplorazione non si hanno notizie di altre visite e l'abisso "scompare".

Il dopoguerra

Considerata l'interessante prospettiva di trovare importanti prosecuzioni, se non addirittura di arrivare sul fiume Timavo, iniziò una affannosa ricerca dell'abisso.

A partire dagli anni '50 generazioni di speleologi triestini hanno cercato l'ingresso, con accurate e minuziose ispezioni sul terreno, ma sempre con esito negativo; per questo motivo si era anche ipotizzato che la cavità fosse frutto di fantasia. Nell'ambiente speleologico cittadino non si contava-

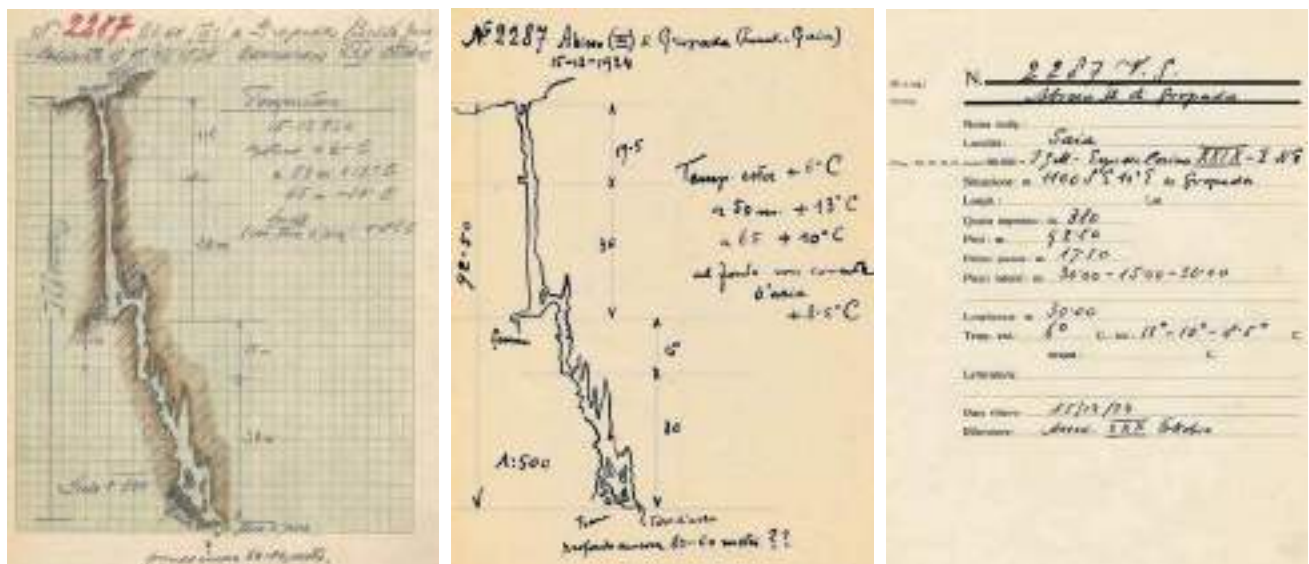
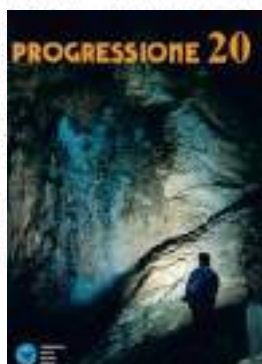


Fig. 2 - Documenti inerenti l'Abisso III di Gropada depositati presso il "Catasto Storico della Venezia Giulia" della Commissione Grotte "E. Boegan".



L'ABISSO III DI GROPADÀ

Dopo il 1945, quando finalmente ripartiva l'attività speleologica su quella sponda di Carso rinviata al di qua del confine, ma estesa anche quella caccia alle grotte che si aprono insieme collegata con il Timavo sottoromano. Variata corsa di molti lavori e relazioni (tra i quali il volume di E. Boegan, pubblicato nel 1948, e una sua guida, *Abisso III di Gropada*, N° 2287 VG, che nel titolo e nella relazione indica che si scende fino a 93 metri, c'era una caverna che mandava fuori uno grande quantità d'aria e che il passo sottostante, sempre aperto, sembra come una profondità di 60-80 metri. La grotta che era stata esplorata nel dicembre 1924 dagli speleologi dell'Associazione XXX Ottobre e diretta dal Vecz, si trovava ai piedi del M. Gaia in direzione di Boegan.

Negli anni '50 si ha una vera e propria caccia da parte di tutti i gruppi per le ricerche per trovare la posizione di questa caverna. Ma sul luogo indicata non c'era traccia di abisso.

Foto: Fort

verano. Errore di posizionamento topografico? Non lo si è mai saputo. Eppure una grotta profonda 93 metri non poteva essere scoperta, anche indicazione doveva pur esserci. I termini della presente posizione furono letteralmente rettificati dagli speleologi, con risultato nella, la grotta era in Bosnia e si aspetta sempre che fosse oltre il confine. Si pensò allora alla mancanza delle memorie degli inventori originali, che nel 1924 si trovarono in Italia e finì. Quel punto di riferimento nella natura - del rilievo che malgrado fosse fatto superiore - la posizione di una lunga strada tra i paesi di territorio di un abisso, c'è di Gropada, meno da quelle parti la circoscrizione romana. Dalla lunga storia l'ombra della di un modo di pensare - sono numerose tracce di lui e di scapellato per la distanza oltre della lunga storia. Come nel romanzo d'avventura si diceva che l'abisso doveva trovarsi a tanti metri in una certa direzione, ma anche questa indicazione si dimostrò falsa. Allora il caso di "Isoli di Murio". Si trattava di un abisso che si trovava su ciò si attendeva delle storie false, una guida aveva un, un altro di loro (spiegato) si trovava fuori con una specie di pianta di margherite. Si diceva che sui abissi fossero stati fatti dal Marig, uno speleologo di quei tempi, per abitudine di tempi di anni del tempo che stava esplorando l'abisso, tutti nei pressi Ma... nulla di tutto, fanno sempre altre grotte che non avevano parole che si trovava in un altro.

Molti racconti, ma non se ne è fatto che fossero fatte anche della ricerca specific per farsi indicare la posizione da quella la caverna indicata l'Abisso III di Gropada nel 1924 e che nel frattempo erano morti. Non si può dire che non fossero a tutti i tempi naturali e topografici, il risultato però è ancora oggi lo stesso. La grotta N° 2287 VG, chiamata anche Abisso III di Gropada, sembra che sia morta nel nulla. Che sia, come fu scritto, si trovava la caverna del Catasto. Tutto così la ricerca si cercò di essere conosciuta, questa nell'ambiente speleologico rimase e si vide che l'abisso di così lontana dal territorio.

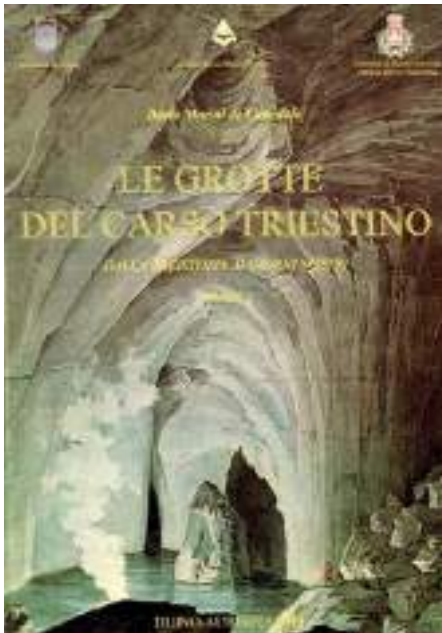
Fig. 3 - L'articolo di Fabio Forti pubblicato su *Progressione 20*.

no le leggende sull'abisso: alcuni articoli degli anni recenti trattano del problema della scomparsa, ma sono soprattutto i racconti orali a tenere banco.

Ad esempio, l'articolo di Fabio FORTI (1988) su *Progressione 20*, in cui accenna anche alle presunte sedute spiritiche oltre che alle varie leggende attorno all'abisso (Fig. 3). Altre notizie si possono trovare sempre sulla rivista *Progressione* (nn. 49 e 51) e riguardano le accanite ricerche in tempi più recenti per rintracciare l'ingresso, che hanno invece portato alla scoperta di un'altra profonda e interessante cavità, denominata "Abisso IV di Gropada".

Nel volume *Le grotte del Carso triestino* del 2010, Dario MARINI - probabilmente il maggior conoscitore del Carso triestino - ritorna sull'irreperibilità della grotta e fornisce anche alcune spiegazioni riguardo le leggende (la targa dedicata a Vittorio Lazzara, e le incisioni sulla roccia dette "i fiori di Mornig" che avrebbero dovuto essere situate nei pressi dell'ingresso); tutte queste leggende risultano essere non veritiere (Fig. 4).

Infine, nel 2021 esce il volume *Gropada. Il territorio, la storia e le sue grotte* del Club Alpinistico Triestino - CAT (Fig. 5). Gli autori dedicano ampio spazio all'abisso, sia nel capitolo inerente alle leggende che in quello riguardante le grotte; forniscono anche alcune ipotesi sulla sua possibile posizione.



N.° 2287 VG Abisso III di Gropada

Grotta fantomatica che a detta del suo rilevatore continuava con un pozzo di 80 m, ma dopo l'esplorazione del 15/12/1924 essa è risultata irreperibile, malgrado le minuziose ricerche in cui s'impegarono nel dopoguerra tutti i gruppi grotte di Trieste. Il suo scopritore, messo alle strette, dichiarò di non ricordare dove si trovava né chi era stato con lui in quel giorno, mentre dal libro di attività del suo sodalizio non risultava questa uscita. Tutto ciò ha fatto dubitare dell'esistenza dell'abisso, che infatti non figurò più negli elenchi del Catasto informativo. Chi lo cercava è stato fuorviato da indizi fasulli, come ad esempio alcune incisioni su un banco di roccia che si diceva fossero state fatte dallo speleologo Giovanni Mornig di guardia all'esterno della grotta; in realtà si tratta di un lavoro fatto dai pastorelli ed ormai quasi indecifrabile, nel quale si vedeva una testa sommontata da una specie di cimiero ed un vaso con una pianta, da cui il nome di "Fiori di Mornig" date alle incisioni, che comprendono vari monogrammi ed una data del 1926, di per se bastate a chiarire la situazione. Un altro riferimento infondato era quello di un incidente che si presumeva fosse avvenuto nel giorno dell'esplorazione, in realtà accaduto quattro anni dopo e precisamente l'11/12/1928. Quel giorno una squadra dell'ANXXO era discesa in una grotta della zona, probabilmente la n.° 1720 VG, ed all'esterno era rimasto di guardia il giovane Vittorio Lazzara; al ritorno in superficie i compagni lo trovarono esanime e crivellato da numerose schegge, una delle quali gli aveva reciso l'arteria giugulare. In un tuffetto apparso su il PICCOLO l'incidente venne attribuito allo scoppio di un residuo bellico incautamente maneggiato dalla vittima, ma dall'esame necroscopico risultò che i frammenti metallici provenivano da una bomba fissa in casa. L'ipotesi più attendibile è che Lazzara fu ucciso dai membri del THOR, l'organizzazione terroristica slava che proprio in quegli anni compiva attentati a Trieste e sul Carso per opporsi al regime fascista. Quattro elementi di questo gruppo vennero processati e condannati a morte dal Tribunale Speciale, sentenza eseguita nel 1930 presso il poligono militare di Basovizza. Allo sventurato Lazzara l'amico Emilio Camici - forse presente quel giorno - dedicò una torre situata nell'alta Spragna (Alpi Giulie) e sul luogo del fatto venne collocata una lapide fissata su un masso, asportata già l'anno dopo da mani ignote. Un semplice riscontro di date avrebbe provato che il masso con l'inciso non aveva nulla a che fare con l'irreperibile Abisso III di Gropada.

Fig. 4 - L'articolo pubblicato nel 2010 da Dario Marini.



Fig. 6 - Il rilievo e una foto dell'ingresso della GR14, tratti dal Catasto Grotte Sloveno.

Fig. 5 - Copertina del libro *Gropada*.

La grotta GR14

Alla fine degli anni '80 Bratos, Sancin e Zobec (Jamarski Odsek Slovenskega Planinskega Društva Trst - JOSPDT) nel loro peregrinare oltre confine alla ricerca di nuove grotte, tra le molte cavità scoperte, scendono anche un profondo pozzo ed eseguono un veloce rilievo (Fig. 6). Si arrestano alla profondità di circa 64 m ed esplorano anche un nuovo pozzo parallelo.

Esso viene accatastato nel 2008 con il nome GR14 Gropada e con il numero 9495 del catasto sloveno. Già all'epoca Stojan Sancin ipotizzava che si potesse trattare del fantomatico Abisso III di Gropada. Ma la cosa finì lì.

La riesplorazione per la verifica

Nella primavera 2024, su iniziativa di Claudio Bratos, si ritorna nella grotta GR14 per una verifica (Figg. 7 e 8). Viene eseguita una poligonale fino al punto massimo esplorabile, a 64 metri di profondità, dove una occlusione di pietre impedisce il proseguimento.

Da un raffronto fra il rilievo del 1924 e la poligonale eseguita, e da un'analisi morfologica, appare evidente si tratti dell'abisso ricercato per oltre 70 anni.

Infatti, diversi sono i riscontri che confermano questa ipotesi, anche se alcuni particolari non sembrano collimare. Di seguito vengono elencati i pro e i contro.



Fig. 7 - All'ingresso della GR14 (foto C. Bratos).



Fig. 8 - All'imbocco del secondo pozzo (foto F. Pestotti).

Analisi. Pro e contro

I riscontri positivi accertati sono i seguenti:

- > posizione corretta a NE di Gropada, anziché SE (vedi capitolo “La posizione errata”)
- > dislivello primo pozzo (fino al terrazzo)
- > conformazione dell'ingresso: ponte naturale all'imbocco
- > stanzetta alla base del primo pozzo a -15 m circa
- > dislivello del secondo pozzo
- > finestra alla base del pozzo d'ingresso
- > camino oltre la finestra
- > corrente d'aria uscente
- > fessura orizzontale sul fondo attuale.

Le incongruenze – comprensibili considerato il lungo lasso di tempo intercorso tra la prima esplorazione e i giorni odierni – si riducono in pratica alla morfologia della base del pozzo d'ingresso a -45 circa, inclinato dalla parte opposta con una fessura impraticabile.

Gli speleologi dello JOSPDT ricordano inoltre che nella giornata in cui avevano esplorato la grotta GR14 in essa o – più probabile in una adiacente – era stata trovata una scritta in minio rosso della AXXXO oltre che una sigla del Club Touristi Triestini (CTT).

Grotte introvabili

Soprattutto sul Carso triestino, dove le esplorazioni speleologiche e i rilevamenti sono iniziati quasi 150 anni orsono e dove l'antropizzazione è molto elevata, tre sono le possibilità riguardo la «sparizione» di molte grotte come nel caso dell'Abisso III di Gropada:

- > ostruzione (moltissimi casi)
- > invenzione (rarissimi casi, ma possibile)
- > posizione errata (centinaia di casi)

E qui entra in gioco la figura di Cesare Prez.



Fig. 9 - Cesare Prez (Archivio storico CGEB).

La figura di Cesare Prez

Cesare Prez (Fig. 9), figura di spicco della speleologia italiana di inizio '900, è stato un valente speleologo, oltre che capogruppo del gruppo grotte della Associazione XXX Ottobre CAI di Trieste. Centinaia sono i suoi rilievi e gli abissi esplorati, anche di notevole difficoltà e profondità.

Purtroppo, il suo nome è legato anche a numerose cavità e abissi del Carso (triestino e sloveno) che risultano scomparsi, se non addirittura inventati. Nel libro *Gropada. Il territorio, la storia e le sue grotte* (Fig. 10)



Fig. 10 - Stralcio dal libro *Gropada. Il territorio, la storia e le sue grotte*, pubblicato dal CAT.

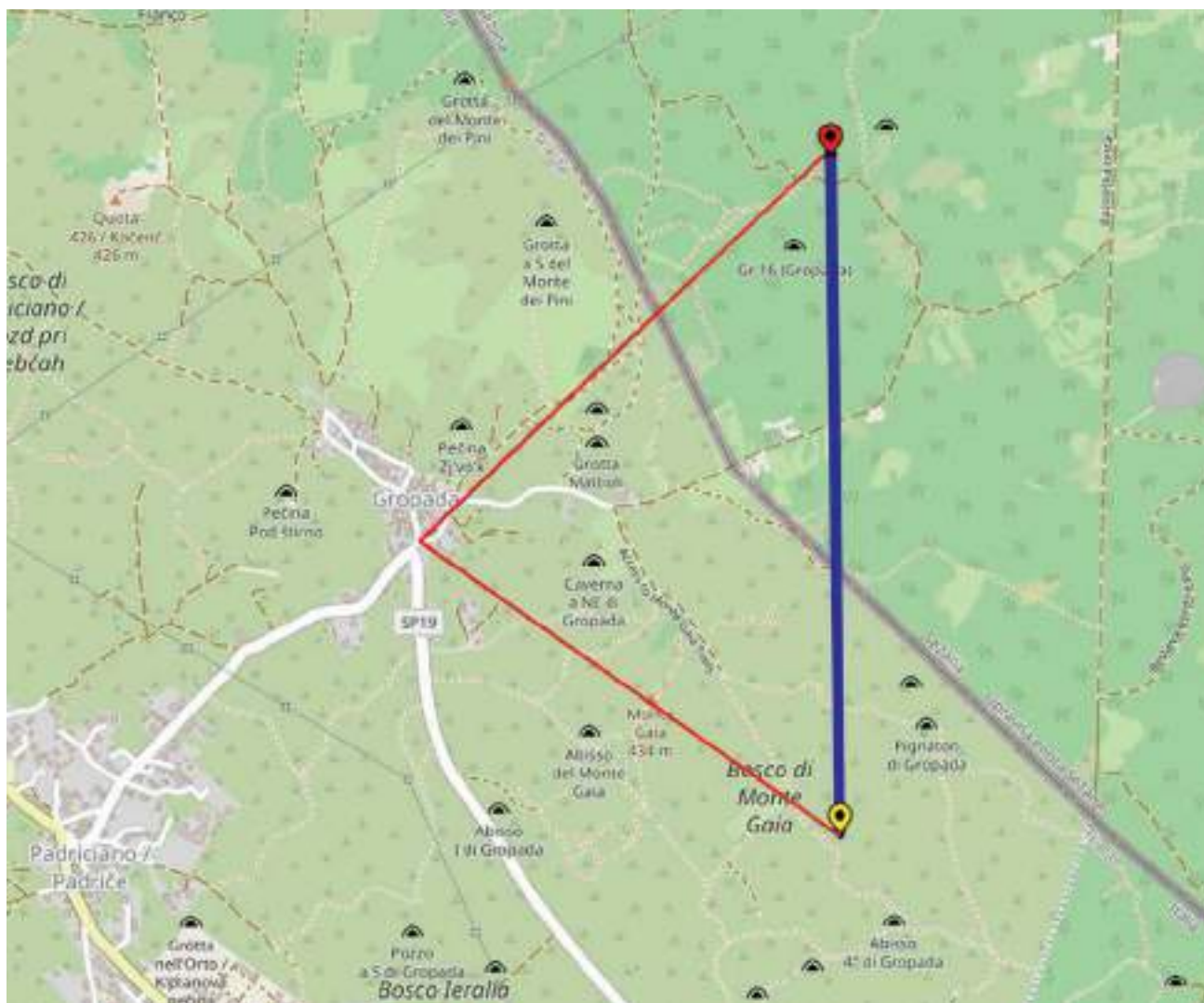


Fig. 11 - Le due posizioni dell'Abisso III di Gropada. In rosso la posizione della GR14; in giallo l'ipotetica posizione indicata da Prez.

viene descritto come “alcolizzato”, ovvero affetto da dipsomania (impulso incontenibile a bere grandi quantità di bevande, specialmente alcoliche). Era ed è usanza nell'ambiente speleologico, soprattutto triestino, il fermarsi dopo un'esplorazione speleologica in osteria, osmiča o agriturismo.

All'epoca del Prez, inoltre, spesso si usava anche riportare rilievi e posizioni alla sera in osteria...

La posizione errata

Ipotizziamo, quindi, che Prez, anziché inventarsi l'abisso di sana pianta, abbia riportato sulla carta (magari all'osteria dopo un po' di bicchieri di vino) in maniera errata la posizione. Se avesse scritto 1100 metri **NE**+10°E da Gropada, anziché **SE**, ecco che la posizione dell'abisso tanto cercato ricadrebbe esattamente nella zona ove si trova la grotta GR14, esattamente 1,5 km più a Nord, in territorio ora sloveno (Fig. 11).

Tutto da un'altra parte dove generazioni di speleologi lo stavano cercando.

Altri due casi a riguardo di Cesare Prez

Nell'ambiente speleologico triestino Prez era ritenuto – fino a tempi recenti – uno speleologo poco affidabile, considerata la sua predisposizione a sbagliare le posizioni o addirittura inventarsi le grotte (o anche delle diramazioni, come il famoso ramo ascendente alla Kačna jama/Abisso dei Serpenti); nomea derivante dal già citato problema con l'alcool.

Ci sono però, a suo discapito due esempi che possono interessare:

- > Grotta di Gabrovizza - 2332VG. Questa cavità era stata esplorata e rilevata da Prez nel dicembre 1924 e pubblicata su il Timavo. Sulla scheda catastale si poteva leggere che *la grotta risulta introvabile nonostante le numerose battute di zona compiute dai gruppi speleologici triestini per rintracciarla*. Ancora una grotta di Prez irreperibile, quindi, perché ostruita, o per errata posizione oppure inventata. Dal sito internet del Gruppo Grotta Continua (www.grottacontinua.org) si apprende che la grotta è stata ritrovata, seppure in modo fortuito in quanto l'ingresso originario era totalmente ostruito.
- > Grotta fra Gropada e Orle - 59VG. Esplorata e rilevata da Prez sempre nel dicembre 1924, dopo l'Abisso III di Gropada, era situata alcune centinaia di metri a NW dell'Abisso III di Gropada, ma non risultava riesplorata o conosciuta anche se si è accertato in seguito che la posizione risultava abbastanza corretta.

Discussione e conclusione

Quindi, ricapitolando abbiamo questa sequenza cronologica dell'attività di Cesare Prez per il mese di dicembre 1924:

- > Il giorno 2 rileva la Grotta di Gabrovizza, 2332VG, data per dispersa o inventata. Ritrovata nel 2011.
- > Il giorno 15 rileva l'Abisso III di Gropada, 2287VG, dato per disperso o inventato. Corrisponde alla grotta GR14 in Slovenia.
- > Il giorno 24 rileva la Grotta fra Gropada e Orle, 59VG. Ritrovata nel 2009 e accatastata dallo Jamarsko društvo Sežana alla fine degli anni 2000 come Brezno pod Golim vrhom 2, n. catasto 9793.

Appare quindi alquanto improbabile che Prez si sia inventato l'Abisso III di Gropada, dopo che le altre due cavità, rilevate nello stesso periodo, sono state ritrovate.

Fra considerare questo abisso frutto della fantasia - e quindi inesistente - o reale e situato in territorio sloveno, optiamo per questa seconda ipotesi.

A questo punto non resta che riaprire il passaggio, ora ostruito, alla profondità di 64 metri per scendere e controllare la parte finale dell'abisso. Per ora rimane ancora un minimo alone di mistero e la leggenda continua...

Ringraziamenti

Un grosso ringraziamento va a Pino Guidi, decano della speleologia triestina. Grazie anche a Claudio Bratos e a Dean Zobec per i ricordi delle esplorazioni degli anni '80 e ad Alex Giordano e Giorgia Del Bianco per la revisione del lavoro.

Bibliografia

- BERNARDIS R., RADACICH M., VIANELLO S., 2021 - *Gropada. Il territorio, la storia e le sue grotte*, pp. 55, 59, 82.
- BOEGAN E., 1930 - *Catasto delle Grotte Italiane. Fascicolo I: Grotte della Venezia Giulia*. Istituto Italiano di Speleologia, p. 129.
- BOEGAN E., 1938 - *Il Timavo*, p. 168.
- CORAZZI R., 1998 - *Ottant'anni di esplorazioni speleologiche e ricerche scientifiche per lo sviluppo della speleologia italiana*. Annali del Gruppo Grotte della Associazione XXX Ottobre, X, pp. 12-13.
- CORAZZI R., 2003 - *Abisso IV di Gropada*. Progressione 49, XXVI, 2, p. 75.
- CORAZZI R., 2004 - *Una stagione a Gropada, ed un ospite inatteso ma gradito...* Progressione 51, XXVII, n. 2, pp. 23-24.
- DEPONTE F., 2004 - *Cercando il III, trovando il IV*. Progressione 51, XXVII, 2, pp. 20-23.
- FORTI F., 1988 - *L'Abisso III di Gropada*. Progressione 20, XI, 2, pp. 32-33.
- GARIBOLDI I., 1926 - *Catalogo delle cavità carsiche della Venezia Giulia*. Istituto Geografico Militare, Ministero della Guerra - Commissione Confini Italo-S.H.S., pp. XCII.

GRUPPO GROTTA ASSOCIAZIONE XXX OTTOBRE CAI, 2018 - *Cent'anni di Gruppo Grotte Trenta Ottobre*, p. 17.
MARINI DE CANEDOLO D., 2010 - *Le grotte del Carso Triestino. Dalla preistoria ai giorni nostri*, I, p.135.

Gianni Benedetti¹, Francesco Serafin²

Il Complesso del Monte Croce (Friuli Venezia Giulia)

1) Gruppo Triestino Speleologi APS, Trieste; 2) Società di Studi Carsici "A.F. Lindner" APS, Ronchi dei Legionari (Go)

Abstract. Monte Croce hosts a cave system formed by the union of two caves: 4582/2583Fr and 2090/829Fr. Explorations began in the 70s and culminated in 2005 with the discovery of a connection, but a complete survey was missing. We present the updated survey of Complesso del Monte Croce, completed in autumn 2023. In December 2023 a landslide obliterated the access to the cave, precluding further explorations.

Riassunto. Il Monte Croce ospita un sistema formato dall'unione di due cavità: la 4582/2583Fr e la 2090/829Fr. Le esplorazioni iniziarono negli anni '70 e culminarono nel 2005 con la scoperta di un collegamento tra le due grotte, mancava però un rilievo completo. Viene qui presentato il rilievo aggiornato del Complesso del Monte Croce completato nell'autunno 2023. Purtroppo, nel dicembre 2023 una frana ha bloccato l'accesso alla grotta, precludendo ulteriori esplorazioni.

Premessa

Il Complesso del Monte Croce si sviluppa all'interno del Monte Croce, una elevazione del massiccio del Pal Piccolo sulle Alpi Carniche al confine con l'Austria in Comune di Paluzza, Udine (Fig. 1).

Il Complesso del Monte Croce è formato da due cavità (Fig. 2): la Grotta di Monte Croce Carnico (4582/2583Fr) e la Caverna sulla Mulattiera del Pal Piccolo (2090/829Fr), conosciuta anche con i nomi di "Freezer" e "Palpiccola", che sono state collegate nel 2005 dopo lavori di scavo.



Fig. 1 - Localizzazione del Complesso del Monte Croce.



Fig. 2 - A destra l'ingresso della 2090/829Fr, a sinistra l'ingresso della 4582/2583Fr (foto G. Benedetti).

Nel 2021, su iniziativa del Gruppo Speleologico Carnico, prende avvio il Progetto “Complesso Monte Croce”, cui aderiscono anche il Gruppo Triestino Speleologi e la Società di Studi Carsici “A.F. Lindner”. Il progetto prevede il rifacimento completo del rilievo delle due cavità.

Nel dicembre 2023 una enorme frana ha interrotto la strada per raggiungere la grotta, impedendo la conclusione dei lavori.

Storia delle esplorazioni

La Grotta Palpiccola (Fig. 3) è stata la prima a essere esplorata da speleologi (la parte iniziale era già conosciuta dall'Esercito Italiano che adattò la caverna iniziale durante la Prima Guerra Mondiale).

Il Circolo Speleologico Idrologico Friulano esplora e rileva una parte della cavità nel corso delle campagne esplorative di inizio anni '70 del secolo scorso sui massicci del Monte Coglians e Pal Piccolo. Un rilievo in pianta e una breve descrizione sono pubblicati su *Mondo Sotterraneo* 1971 (Fig. 4). Successivamente il Club Alpinistico Triestino scopre importanti diramazioni, portando lo sviluppo a oltre 400 m (Fig. 5). Un articolo con il rilievo aggiornato trova spazio sul bollettino *La nostra speleologia*, numero unico 1987-1988.



Fig. 3 - Uno dei due ingressi della Grotta Palpiccola (foto M. Buttazzoni).

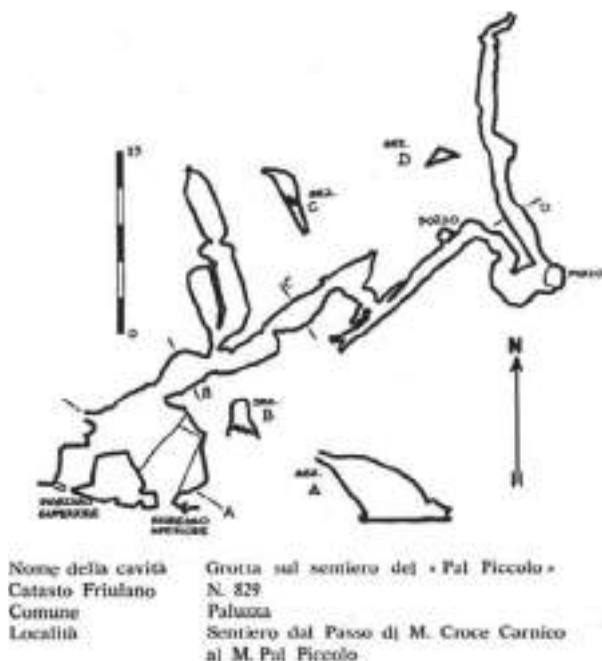


Fig. 4 - Rilievo del CSIF, anno 1971.

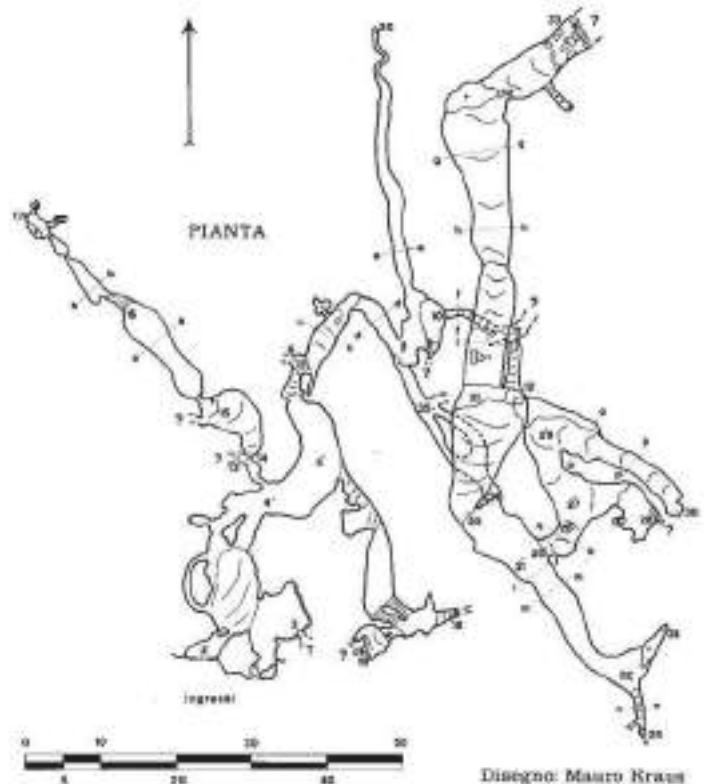


Fig. 5 - Rilievo del CAT, anni 1987-1988.

La Grotta di Monte Croce Carnico (Fig. 6) viene scoperta dal Gruppo Triestino Speleologi nel 1987 a una quota inferiore, lungo la stessa parete in cui si apre la 2090.

Questa cavità è stata trovata in modo casuale: un socio del GTS che assisteva alle gare di “Arrampicarnia” avvertì una forte corrente d’aria proprio su un tornante del sentiero, dove si era seduto per assistere alla competizione. Ritornati in forze sul luogo, con lavoro di scavo e in breve tempo, veniva aperto un passaggio in frana proprio alla base della parete rocciosa dando così la possibilità di iniziare le esplorazioni che si completarono l’anno successivo. La storia della scoperta e un articolo con la descrizione e il rilievo sono stati pubblicati sul *Bollettino del Gruppo Triestino Speleologi*, vol. VIII anno 1988 e vol. IX anno 1989.

Scavi per il collegamento. Anni 2002-2005

Con le esplorazioni di fine anni '80 del secolo scorso i fronti esplorativi si avvicinano notevolmente e in alcune parti si sovrappongono. Individuato il possibile punto di collegamento tramite fumogeni, in diverse uscite dal 2002 al 2005 si è proceduto a lavori di scavo per aprire un passaggio e nel 2005 viene effettuato fisicamente il collegamento, portando il sistema a essere la più importante cavità delle Alpi Carniche al di fuori dell’area carsica del Monte Cavallo di Pontebba.

A seguito del collegamento e della scoperta di nuove diramazioni, le due grotte necessitavano di un lavoro di revisione topografica globale aggiornata.

Progetto “Complesso Monte Croce”. I nuovi rilevamenti

Nel 2021, su iniziativa del Gruppo Speleologico Carnico, e in particolare di Antonino Torre, prende avvio il Progetto “Complesso Monte Croce”, cui aderiscono anche il Gruppo Triestino Speleologi e la Società di Studi Carsici “A.F. Lindner”.

Il progetto prevedeva il rifacimento completo del rilievo delle due cavità con tecniche moderne in 3D e la ricerca di eventuali prosecuzioni. Diverse diramazioni scoperte negli anni più recenti non risultavano ancora a catasto e non si aveva un’idea precisa dello sviluppo totale del complesso.

Nelle attività di rilievo si è potuto contare sulla presenza variabile tra 3 e 9 speleologi per uscita, organizzati in piccoli gruppi. Alcuni speleologi si sono dedicati alla sostituzione di vecchi armi ormai non sicuri, nonché all’armo e alla messa in sicurezza dei settori non rilevati in passato. Alla fine di ogni uscita le misure, i disegni speditivi e le osservazioni sono stati trasmessi da ciascuna squadra al rilevatore incaricato dell’analisi complessiva.

Avendo adottato un codice comune nella presa dei dati, nessuna informazione è andata persa e non sono mai sorti dubbi su come si dovessero unire i numerosi rami. Le note registrate dai rilevatori sono state fondamentali nella restituzione grafica finale, avvenuta dopo la conclusione delle operazioni. Questo conferma quanto sia importante registrare il massimo di informazioni durante la progressione in grotta per poter ottenere un rilievo accurato e dettagliato.

Nell’arco dei tre anni le uscite dedicate al Progetto “Complesso Monte Croce” sono state una decina e hanno coinvolto quasi una ventina di speleologi (Fig. 7):

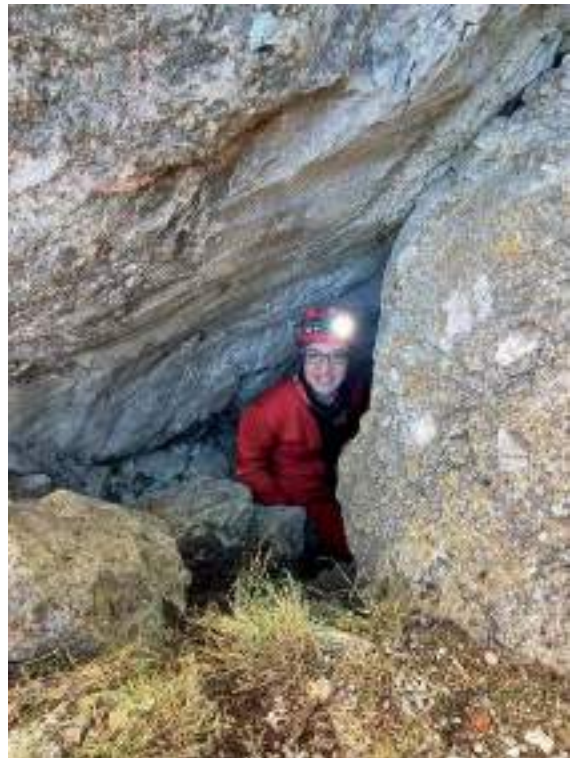


Fig. 6 - L’ingresso della Grotta di Monte Croce Carnico (foto A. Pintus).



Fig. 7 - Alcuni dei partecipanti al Progetto “Complesso Monte Croce” (foto L. Modugno).



Fig. 8 - Gli effetti della frana sulla strada per il Passo di Monte Croce Carnico (dal sito cjargne.online).



Fig. 9 - Lo specchio di faglia nella Grotta di Monte Croce Carnico (foto S-Team).

per il Gruppo Speleologico Carnico “M. Gortani” CAI Tolmezzo: Antonino Torre;

per il Gruppo Triestino Speleologi APS: Gianni Benedetti, Marco Buttazzoni, Libero Modugno, Marco Sbisà, Rajan Trobec;

per la Società di Studi Carsici “A.F. Lindner” APS: Giulia Cecchetto, Alice Folladore, Matteo Frandoli, Lorenzo Lastrucci, Enrico Magrin, Davide Menin, Veronika Paulina, Veronica Pinatti, Alessandro Pintus, Francesco Serafin, Elena Serino.

I lavori si sono conclusi nell’autunno 2023, anche se rimarrebbe da controllare la parte inferiore della 4582 dove ci potrebbero essere delle possibilità di prosecuzione. Purtroppo, l’enorme frana del dicembre 2023 (Fig. 8), abbattutasi a breve distanza dagli ingressi, ha impedito la conclusione delle ricerche.

I nuovi rilievi

Le due grotte costituenti il complesso presentano una ricca varietà di morfologie e di ambienti. Da un lato, la Grotta Palpiccola è una rete labirintica di gallerie variamente inclinate che si intersecano in diversi punti. Dall’altro, la Grotta di Monte Croce Carnico si può dividere in quattro tipologie morfologiche ben distinte e separate spazialmente tra loro: una galleria a sezione ellissoidale, una zona di crollo contenente un vasto specchio di faglia (Fig. 9), una zona di antichi arrivi e meandri dalla struttura irregolare e, infine, un lungo meandro che collega lo specchio di faglia alle zone più profonde.

un triangolo, facilitandone il riconoscimento durante le misure. Per la numerazione si è scelta una struttura gerarchica: ogni stazione è stata contrassegnata dal codice *Gr#.#* dove *G* indica la grotta (MC per la 4582 e PP per la 2090), *r* indica una lettera che identifica il ramo, *#* indica il numero progressivo della stazione, e *.#* indica la stazione di un'eventuale diramazione laterale cieca. Per esempio, la stazione *PPe2.4* si trova nella grotta Palpiccola, nel ramo e, in una diramazione cieca che parte dalla stazione 2.

Tutti i dati sono stati misurati con due DistoX2, calibrati all'ingresso prima di ogni sessione di rilievo. Si è proceduto a scaricare i dati in tempo reale sulla memoria di due smartphone grazie all'ottima applicazione TopoDroid. Particolarmente utile si è rivelata la funzionalità che permette di salvare delle note scritte riferite a ciascuna misura. Per esempio si è assegnato il codice *S1==S2* per indicare la coincidenza tra le due stazioni *S1* e *S2* afferenti ai rispettivi rami o sotto-rami. La complessa topologia delle due grotte si traduce in numerosi circuiti chiusi nella poligonale, 8 nel caso della grotta Palpiccola. Essi sono utilissimi per stimare ed eventualmente ricalibrare l'errore di chiusura.

Gli errori relativi sono tipicamente inferiori al 7% e in un solo caso arrivano al 10% (con un errore assoluto di 2 metri in un piccolo circuito cieco).

Nell'elaborazione finale, si sono uniti 26 tratti di poligonale usando il software Therion. Successivamente, si sono estratte la sezione (Fig. 10), la pianta (Fig. 11) e un modello tridimensionale (Fig. 12) che restituisce un quadro d'insieme del complesso.

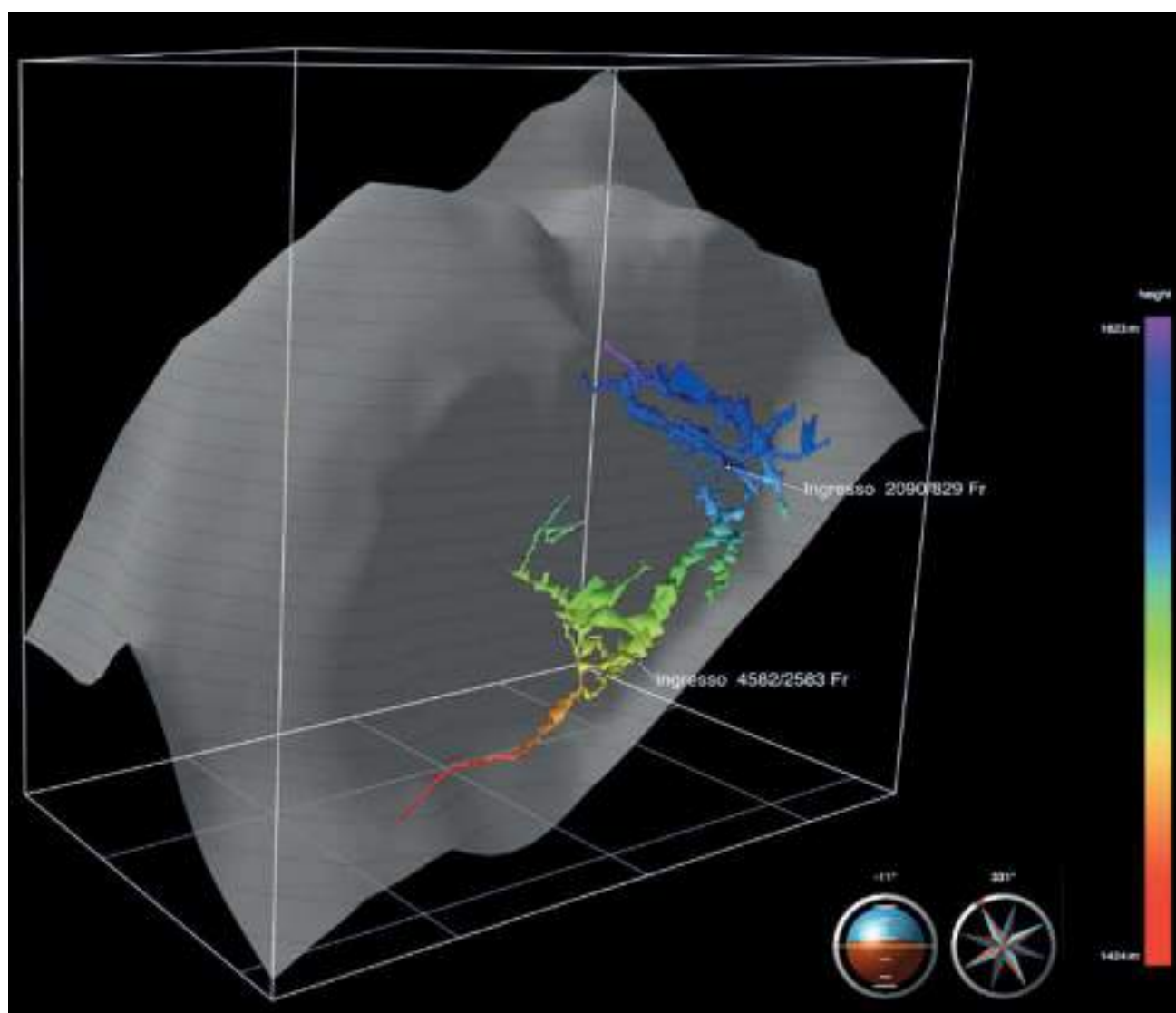


Fig. 12 - Modello 3D del Complesso del Monte Croce.



Fig. 13 - I segni di movimenti recenti nella Grotta Palpiccola (foto A. Torre).

Fig. 14 - L'ingresso delle due grotte rispetto alla frana (dal sito friulioggi.it).



Fig. 15 - Andamento planimetrico del Complesso del Monte Croce rispetto alla parete franata (cerchio rosso).

Grazie alla rappresentazione tridimensionale, risulta evidente che le morfologie sono condizionate anche da movimenti recenti (Fig. 13). Le gallerie sono interamente contenute in due piani di faglia ortogonali inequivocabilmente riconoscibili. In totale si sono prese 3046 misure, numero che comprende sia le stazioni che le misure laterali.

La frana

Nel dicembre 2023, quando mancava da rivedere solamente la parte finale del meandro verso il fondo della Grotta di Monte Croce Carnico, si è verificato un enorme crollo della parete rocciosa subito a Ovest del complesso, impedendo di fatto il raggiungimento della cavità (Fig. 14).

I rilevamenti effettuati nel corso del Progetto "Complesso Monte Croce", conclusi nel novembre 2023, si sono rivelati di estrema utilità per la progettazione dei lavori di ripristino del versante. Infatti, i tecnici, gli ingegneri e i geologi incaricati dei lavori non erano a conoscenza dei vuoti all'interno della montagna (Fig. 15) e hanno potuto attingere alle informazioni necessarie dai dati e dai rilievi appena inseriti nel Catasto Speleologico Regionale.

Dati catastali

Nome: Complesso del Monte Croce

2090/829Fr - Caverna sulla Mulattiera del Pal Piccolo (o Grotta Freezer, Grotta Palpiccola).

4582/2583Fr - Grotta di Monte Croce Carnico

Sviluppo spaziale: 1735 m - Sviluppo planimetrico: 1435 m

Dislivello totale: 197 m

Rilievi: GSC - GTS - SSCL anni 2021, 2022, 2023

Bibliografia

- [MORO R.], 1971 - *Campagna speleologica 1971 in alta Carnia*. Mondo Sotterraneo, n. u. 1971, pp. 9-18.
- BENEDETTI G., 1989 - *La Grotta di Monte Croce Carnico*. Bollettino del Gruppo Triestino Speleologi, IX, pp. 21-29.
- BENEDETTI G., MORO M., 1988 - *Una nuova cavità nei pressi del Passo di Monte Croce Carnico (Alpi Carniche - Friuli)*. Bollettino del Gruppo Triestino Speleologi, VIII, pp. 20-23.
- KRAUS M., 1988 - *Investigazione su un fenomeno carsico che «Pal Piccolo e invece è grande»*. La nostra speleologia, n. u. 1987-1988, pp. 46-52.

Alexander Debenjak¹, Giacomo Canciani¹, Luca Tringali¹, Tecla Tripari¹

Le nuove tecnologie per il rilievo di pozzi non accessibili: il caso dei pozzi artificiali sopra la galleria ferroviaria del Lokavac

1) G.S.Talpe del Carso - J.K. Kraski Krti, San Michele del Carso/Vrh (Go)

Abstract. In this short paper we describe how our team used modern surveying technology to study an artificial pit, without endangering cavers and the infrastructure as well. We also explain how we managed to use the LiDAR cartography from Regione Friuli Venezia Giulia to build a complete model of two artificial caves and the external terrain, to get a better understanding of the system and produce a short 3D animation for the general public without expensive tools.

Riassunto. In questo articolo descriviamo come il nostro team ha utilizzato moderne tecnologie di rilevamento per studiare un pozzo artificiale, senza mettere a repentaglio né gli speleologi né l'infrastruttura. Spieghiamo, inoltre, come utilizzare la cartografia LiDAR della Regione Friuli Venezia Giulia per costruire un modello completo di due grotte artificiali e del terreno esterno, per comprendere meglio il sistema e produrre una breve animazione 3D per il grande pubblico senza l'impiego di strumenti costosi.

Introduzione

Le moderne tecniche di rilievo possono essere utilizzate non soltanto per produrre rilievi graficamente più appetibili di cavità già note e ampiamente documentate, ma anche per rilevare automaticamente ambienti non sicuri per la progressione da parte di speleologi. È il caso dei camini, prevalentemente artificiali, della galleria ferroviaria del Lokavac presso San Giovanni di Duino. I rilievi tridimensionali così ottenuti possono poi essere uniti al rilievo del terreno, per ottenere un modello virtuale navigabile di un intero sistema di grotte e del terreno che lo ospita. Questo può essere utile in fase di esplorazione, per comprendere meglio la morfologia degli ambienti, ma anche per la divulgazione. È infatti possibile produrre delle animazioni didattiche o dei modelli stampabili in 3D, utilizzando software gratuiti.

Inquadramento storico

La galleria del Lokavac fu costruita nel 1856 dall'Imperial Regia Privilegiata Società delle Ferrovie Meridionali (Kaiserlich Königliche Privilegierte Südbahn-Gesellschaft) lungo la linea che collegava Vienna con Trieste. Come da abitudine dell'epoca, la galleria presentava due camini vicini alle uscite, in modo da generare sufficiente ricircolo d'aria per evitare l'accumulo dei fumi prodotti dalla combustione del carbone. Già agli inizi delle offensive sull'Isonzo, fu riadattata dal Genio austriaco per le esigenze belliche.

Gli Austriaci persero il controllo della zona poco prima della presa di Gorizia, nell'agosto 1916, e a quel punto gli Italiani utilizzarono la galleria come deposito di materiali e riparo per i soldati. Tuttavia, poco meno di un anno dopo, tra maggio e giugno 1917, la Quinta Armata Austro-Ungarica decise di provare a riconquistare il Monte Flondar e iniziò bombardamenti massicci. Tra giugno e agosto lo Stato Maggiore italiano fu costretto a sostituire le brigate ormai decimate, schierando dal Dosso Giulio al basso Lokavac il 65° Reggimento della Brigata Valtellina (fino ad allora in sosta a Vermeigliano).

La scoperta del primo camino

Durante una camminata nella linea di trincee sul Lokavac, due soci del Gruppo Speleologico Talpe del Carso notano un piccolo bunker in cemento, con uno scivolo interno la cui parte finale

non è visibile. Il bunker si trova non lontano dall'ingresso occidentale della galleria ferroviaria del Lokavac, leggermente spostato verso Sud rispetto all'allineamento dei binari. Il catasto delle cavità artificiali, però, non segnala alcun ambiente ipogeo nella zona, il che porterebbe a pensare che non ve ne siano di degni di nota. Durante l'esplorazione dello scivolo, tramite progressione su corda, diventa invece immediatamente evidente che esso conduca a un pozzo profondo una decina di metri, che sembra terminare su un cumulo di detriti, a loro volta appoggiati su un pavimento in cemento il quale, però, pare avere una forma a botte, come se fosse il soffitto di una galleria.

Il passaggio di un treno, visibile da un foro nel cemento, durante l'esplorazione conferma che il pavimento del pozzo è in realtà il soffitto della galleria ferroviaria. A un certo punto diventa possibile camminare nell'interstizio tra la moderna copertura in cemento e l'originale galleria scavata nella pietra. Il problema che si è presentato durante l'esplorazione è che, data la posizione e l'orientamento dell'ingresso del pozzo, non sembrava possibile che il pozzo terminasse nella galleria ferroviaria. Si tratta di una situazione comune nella speleologia: inusuali forme ipogee che costringono gli esploratori a ruotare su se stessi più volte possono disorientare e dare un'errata percezione delle direzioni.

Il rilievo 3D del bunker e del terreno esterno

Per riuscire a comprendere meglio l'esatta morfologia di questa cavità artificiale è necessario produrre un rilievo tridimensionale. Per fare questo, il nostro team ha utilizzato lo scanner Charlotte (Tringali et al., 2024), realizzando un modello 3D in formato DXF. Poi è necessario anche un modello 3D del terreno: per fortuna è possibile utilizzare i rilievi LiDAR (DTM Protezione Civile FVG passo 1 m) pubblicati dalla Regione Friuli Venezia Giulia (<https://irdat.regione.fvg.it/CTR/ricerca-cartografia/>), trasformandoli in un modello tridimensionale utilizzando QGIS. Una volta scaricata la porzione cartografica (sezione 109044_NO), la si può caricare in un nuovo progetto QGIS tramite il menù *Layer/Aggiungi layer/Aggiungi raster*, selezionando il file in formato *asc* e utilizzando il sistema di riferimento *EPSG:3004*. Cliccando con il tasto destro sul livello appena importato e scegliendo la voce *Proprietà* si accede alla scheda *Stile* (oppure *Simbologia* in alcune versioni) ed è possibile indicare il tipo di visualizzazione come *Ombreggiatura*, *l'altitudine a 45°* e *l'azimuth a 315°*. Questo offre una visualizzazione più facilmente comprensibile.

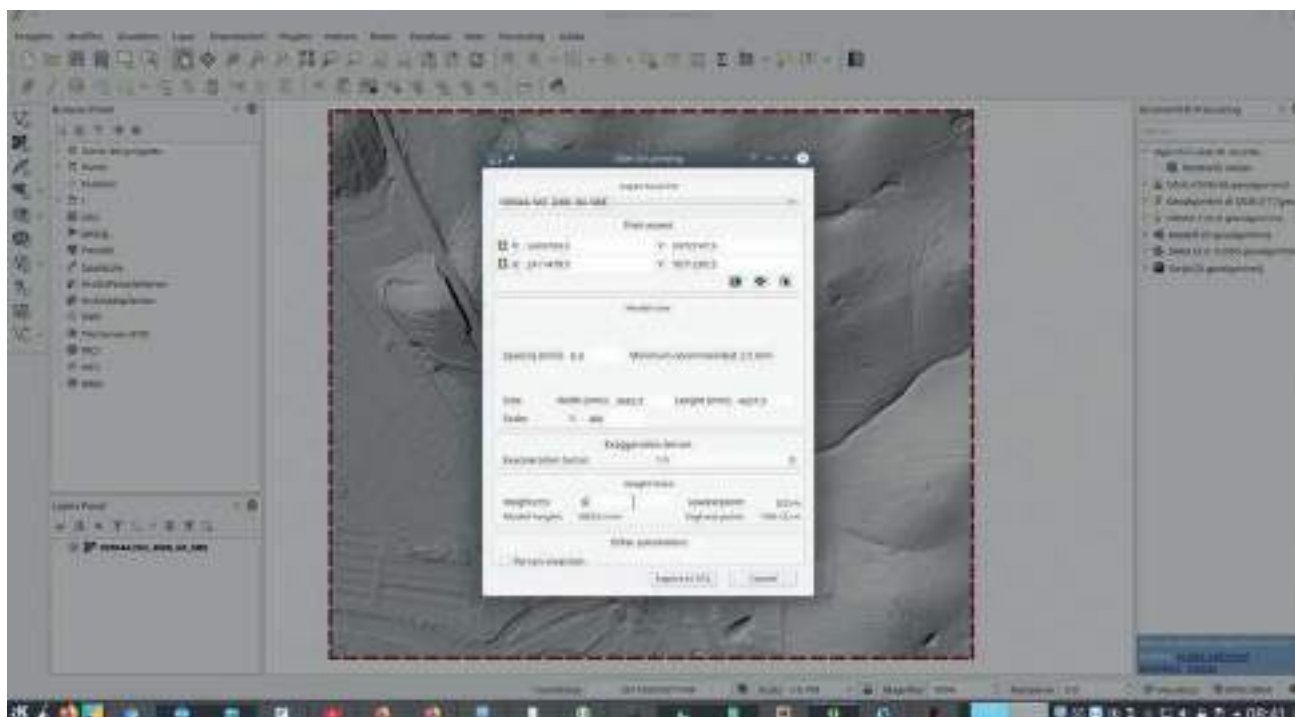


Fig. 1 - Con DEM to 3D si può esportare il modello 3D del terreno dal file .asc della cartografia regionale,

A questo punto è possibile caricare la pianta del rilievo ottenuto da Charlotte in formato KML (dal menù *Layer/Aggiungi layer/Aggiungi vettore*, selezionando il poligono e il sistema di riferimento *EPSG:4326*). Questo aiuterà ad avere un riferimento visivo per posizionare il modello 3D del pozzo su quello del terreno in Blender, quando entrambi i modelli saranno pronti. Per trasformare il livello del terreno in un file 3D vero e proprio serve un plugin chiamato *DEMto3D*, che può essere ottenuto tramite il menù *Plugins/Gestisci e installa plugin*. Una volta installato, nel menù *Raster* appare la voce *DEMto3d/DEM 3d printing* (Fig. 1). Si seleziona il livello raster che è stato importato dal file asc (un solo livello alla volta) e lo *spacing* tra i punti (circa 0,5-0,3mm per avere una buona definizione), oltre al *fattore di scala* (per esempio 1:400). Il rapporto tra fattore di scala e spacing porterà a un modello più o meno dettagliato: se si esagera si rischia di avere un modello troppo grande che consuma tutte le risorse del computer per essere caricato, ma se la risoluzione è troppo bassa si appiattiscono le depressioni meno marcate del terreno. Altro parametro da impostare è l'altezza di base (*height base*), che conviene sempre mantenere a 0 m. Cliccando su *Export to STL* si ottiene un modello 3D in formato STL, pronto da caricare in Blender.

Il file STL potrebbe anche già essere inviato a un servizio professionale di stampa in 3D, ma probabilmente conviene semplificare un po' il modello, riducendo il numero di triangoli che lo compongono per ridurre il costo. Per farlo in Blender si importa il file STL del terreno tramite il menù *File/Importa/Importa STL*. Selezionato l'oggetto relativo al terreno, si può andare nella scheda *Modifiers* e aggiungere un modificatore di tipo *Decimate* (Fig. 2): la modalità ideale è *Collapse* e si può iniziare con una *Ratio* di 0,1. In basso viene indicato il *face count* stimato, si possono modificare le impostazioni per cercare di ottenere un numero più basso.

È poi possibile caricare in Blender il modello 3D del pozzo prodotto da Charlotte (nel formato AutoCad DXF). Blender è in grado di utilizzare file DXF, ma l'opzione è nascosta di default. Per abilitarla è necessario andare nel menù *Edit/Preferences*, nella sezione *Get extensions*, e cercare dxf, installando il plugin per l'import dei DXF. Caricato il modello, lo si ritroverà centrato sull'origine, cioè il punto 0,0,0 in Blender.

Per allineare correttamente il pozzo e il terreno in Blender, ci si può aiutare con la posizione dell'ingresso del pozzo, visibile su QGIS (grazie al file KML della pianta). In QGIS è infatti possibile utilizzare lo strumento *Righello* (misura linea) per misurare la distanza dell'ingresso del pozzo dal

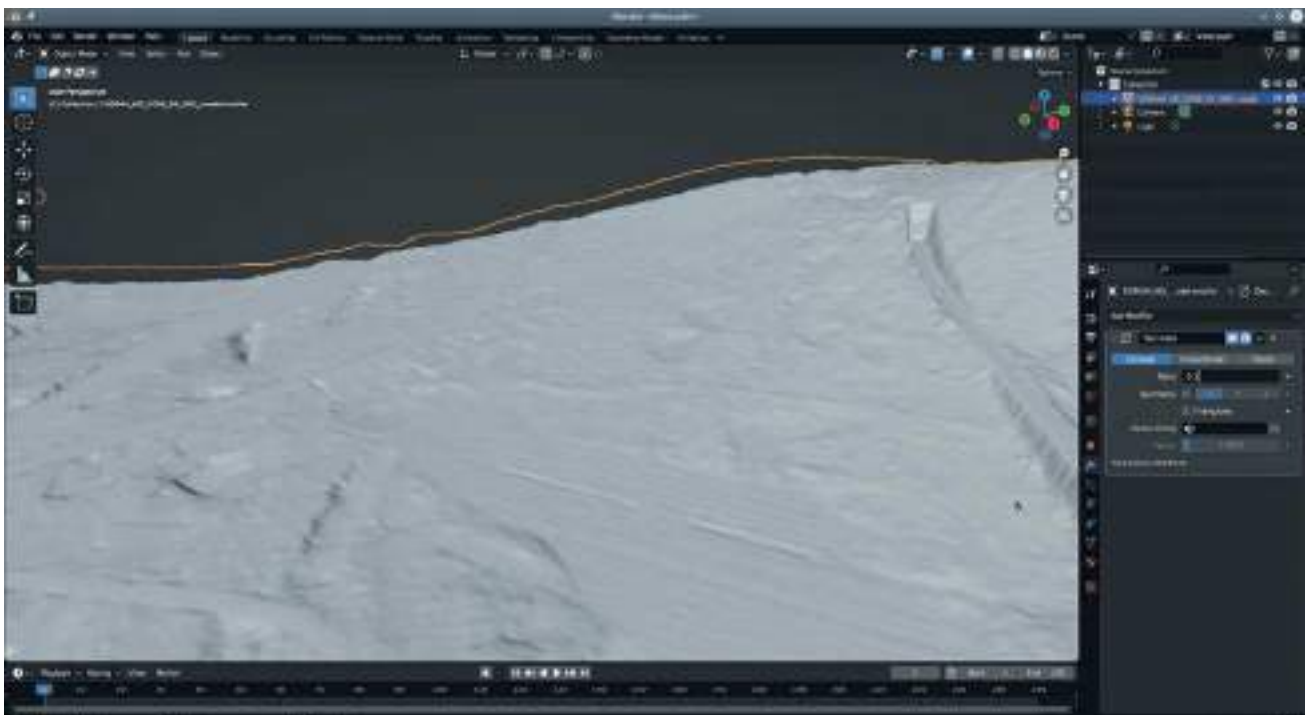


Fig. 2 - Caricamento del modello STL del terreno in Blender.

bordo sinistro e dal bordo inferiore del terreno. Si possono poi usare queste due coordinate per applicare una traslazione sul piano XY al modello del pozzo, in modo che il suo ingresso coincida con il punto corretto in base al fattore di scala. Per esempio, se secondo la scheda *Proprietà/Informazioni* del livello del terreno su QGIS la larghezza è di 1683 metri e in Blender il lato largo del terreno risulta misurare 674 metri, significa che il *fattore di scala* è 2,5. Il modello del pozzo importato dal file DXF è in scala 1:1, quindi bisogna applicare ad esso anche la trasformazione di scala, moltiplicando per 0,4 (1/2,5). L'angolo in basso a sinistra del terreno dovrebbe già coincidere con l'origine (il punto 0,0,0 in Blender), quindi basta applicare una traslazione al modello del pozzo tenendo in considerazione il fattore di scala. Se, per esempio, su QGIS l'ingresso del pozzo risulta essere a 1067 metri da sotto e 922 metri da sinistra e il modello del terreno è stato esportato in scala 1:400, il modello del pozzo dovrà essere traslato a 426 metri sull'asse Y e 368 metri sull'asse X (bisogna dividere per 2,5). È anche differente l'orientamento dei due modelli: il pozzo deve essere ruotato di 90° attorno all'asse Z.

Se poi l'obiettivo è stampare in 3D il modello del pozzo, è possibile utilizzare Blender per dare al modello un aspetto meno accurato ma più realistico, evitando i bordi squadrati. Questo è utile a maggior ragione se si sta utilizzando un rilievo prodotto con il DistoX e cSurvey che, diversamente da Charlotte, non registra le sezioni e offre un risultato ancora più squadrato. Nel progetto Blender è necessario aggiungere un oggetto di tipo *Volume*, dal menù *Add/Volume/Empty*. A questo oggetto si deve aggiungere il modificatore *Mesh to volume*, selezionando come oggetto di riferimento il modello del pozzo, aumentando il *Voxel amount* almeno a 1024 per avere maggiore definizione. Serve poi un altro modificatore, di tipo *Volume displace*, aggiungendo una nuova texture che deve essere di tipo *Clouds*. Ora è possibile aggiungere alla scena un oggetto di tipo *Cube* (un cubo) tramite il menù *Add/Mesh/Cube*, che va ridimensionato in modo che sia abbastanza grande da poter contenere il *Volume*. A questo cubo si aggiunge un modificatore di tipo *Volume to Mesh*, selezionando come oggetto di riferimento il *Volume* che era stato creato. Se si vuole stampare in 3D, il modello così ottenuto va prima pulito, per esempio entrando in *Edit mode* e scegliendo *Mesh/Separate/By Loose Parts*, per eliminare le parti non necessarie e procedere a decimare la mesh con il modificatore *Decimate* per rendere la stampa più efficiente.

Oltre che per la stampa in 3D di un modellino in scala, il progetto può essere animato direttamente in Blender per produrre un video divulgativo e raccontare meglio le proprie scoperte e attività speleologiche. È esattamente quanto il nostro team ha deciso di realizzare e presentare al convegno Speleo2025, pubblicando in seguito il video su YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=TGvJHfaifq0>). Per visualizzare il video è possibile inquadrare il QR code (Fig. 3) con un qualsiasi QR code reader direttamente con il proprio smartphone. Naturalmente, lo scopo primario è consentire agli speleologi di comprendere meglio come le cavità si sviluppino nel terreno circostante.

Con il modello 3D del pozzo e del terreno così ottenuto, è subito chiaro che il pozzo prende una direzione che lo porta perfettamente sopra la linea ferroviaria. Oggi la galleria ferroviaria del Lokavac è ancora in funzione sulla linea Monfalcone-Trieste, quindi non è possibile entrare e rilevarla. Tuttavia, grazie al modello 3D del terreno, è facile ipotizzare il tragitto, unendo con un arco le due estremità della galleria, perfettamente visibili. In seguito a una ricerca presso l'Archivio di Stato di Trieste è stato possibile scoprire la planimetria originale della galleria (Fig. 4), conservata nel fondo delle ferrovie austriache. Sono stati necessari alcuni anni perché l'archivio completasse il restauro del documento, ma l'attesa è stata ripagata dal fatto che la planimetria conferma la curvatura che si può intuire dal modello 3D e toglie ogni dubbio.



Fig. 3 - Il video realizzato con Blender per raccontare l'esplorazione di questi pozzi è caricato su YouTube.

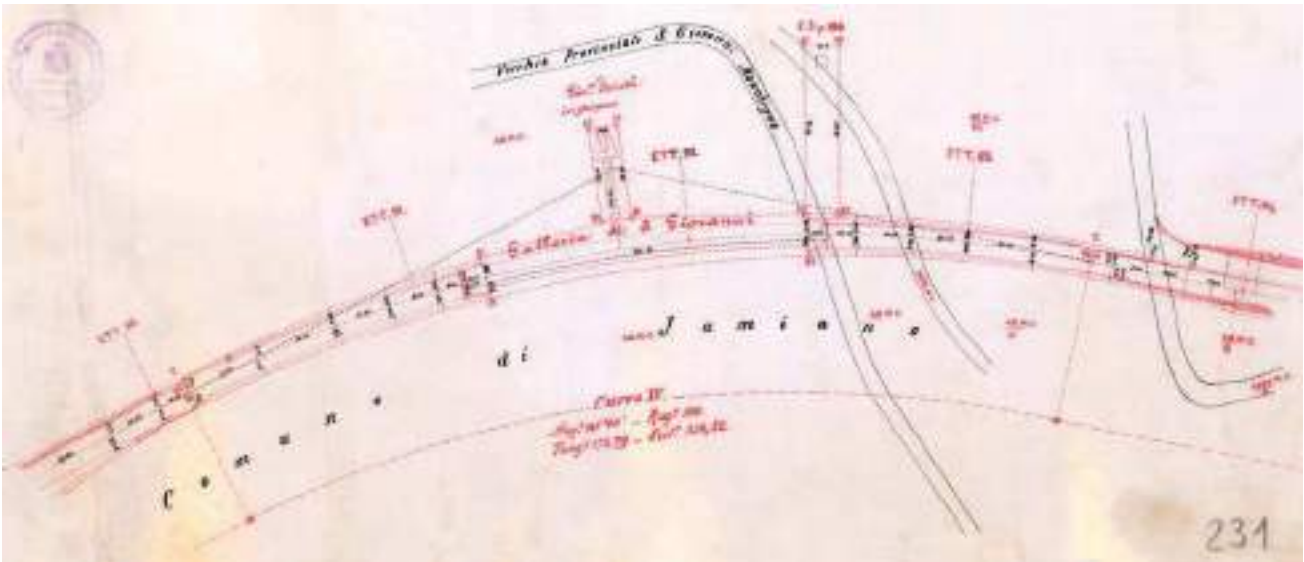


Fig. 4 - L'Archivio di Stato di Trieste conserva una bozza originale della planimetria della galleria ferroviaria.

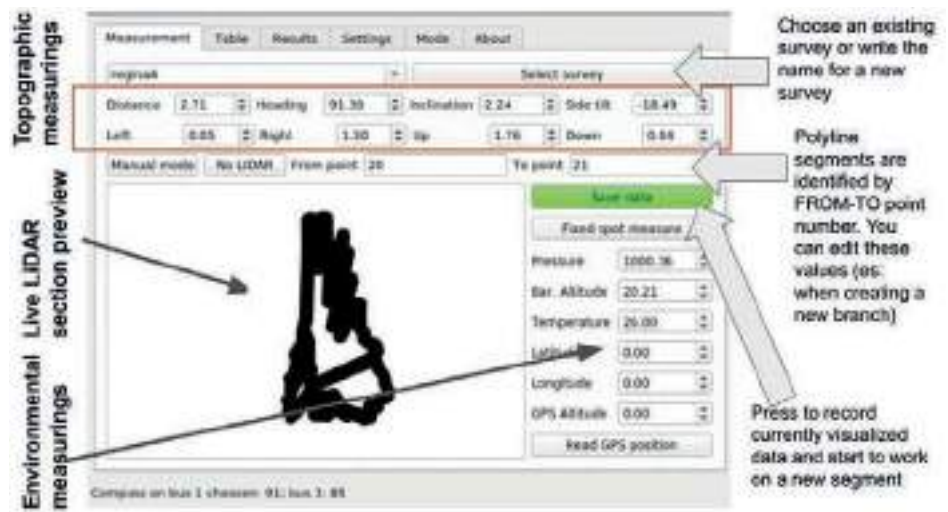


Fig. 5 - La modalità *Fixed spot measure* si attiva semplicemente cliccando il pulsante sullo schermo di Charlotte.

Il secondo cammino

Avendo stabilito che il pozzo nel bunker è in realtà un cammino della galleria ferroviaria, il dubbio che rimane è se vi siano altri ambienti simili all'altra imboccatura della galleria. Sul lato orientale del tunnel non è presente nessun bunker, ma una lastra di cemento che a un certo punto si sostituisce inaspettatamente alla roccia carsica. Su questa lastra, un'apertura fornisce l'accesso a un pozzo che sembra avere una profondità e una direzione tali da terminare sopra i binari, esattamente come l'altro. Il problema che si è immediatamente presentato alla scoperta di questo secondo pozzo è la sua inagibilità: la lastra in cemento non è in buone condizioni, soprattutto proprio nei pressi della finestra che dà sul pozzo, e c'è un grave rischio che possano crollare dei pezzi se qualcuno provasse a calarsi in corda al suo interno. Ne consegue che l'esplorazione è impossibile. Per poter stabilire con sicurezza che anche questo sia un cammino della galleria, però, è necessario rilevarlo. Il nostro team ha quindi intuito la possibilità di sfruttare proprio lo scanner Charlotte per eseguire un rilievo senza la necessità di entrare nel pozzo (in un certo senso, un rilievo "da remoto").

La modalità *fixed spot*, cioè "misurazione punto fisso", si può attivare in Charlotte con l'apposito pulsante sullo schermo (Fig. 5). Quando è attiva, Charlotte si aspetta di procedere in linea retta, per esempio venendo calato dall'alto con una corda. In questa modalità Charlotte misura un primo punto, memorizzando la sua distanza dal fondo del pozzo. Questa distanza iniziale viene considerata la profondità totale del pozzo: da quel momento, ogni 5 secondi viene registrato un nuovo punto, e la sua distanza viene sottratta da quella iniziale. Questa differenza è la distanza tra i primi due punti. Se, infatti, la distanza dal fondo misurata nel primo punto è di 10 metri e quella del secondo

punto è di 8 metri, è evidente che la distanza tra i due punti è di 2 metri. Lo stesso meccanismo viene utilizzato per tutti i punti successivi, fino a che lo scanner viene recuperato e la modalità operativa torna a essere quella normale. Questo permette a Charlotte di produrre la tabella dei punti come per ogni altro rilievo: ogni punto, infatti, ha l'orientamento rispetto al Nord magnetico, l'inclinazione, la pendenza, la sezione completa e, grazie a questo calcolo, anche la distanza rispetto al punto successivo. Il risultato è un rilievo perfettamente identico a un qualsiasi altro rilievo prodotto in modo convenzionale.

Grazie a questa innovazione, il nostro team è riuscito a rilevare dettagliatamente il secondo pozzo sopra la galleria del Lokavac, semplicemente calando Charlotte dall'alto, con l'ausilio di due corde (per evitare l'eccessivo dondolamento che sarebbe stato prodotto dall'uso di una corda singola). Dopo avere inserito il modello 3D di questo pozzo nello stesso progetto Blender, seguendo gli stessi passaggi illustrati in precedenza, è diventato evidente che anch'esso termina perfettamente sopra i binari, ed è quindi un secondo camino della galleria ferroviaria.

L'importanza storica dell'ambiente ipogeo

Il modello 3D completo del terreno, dei due pozzi e della galleria ipotizzata permette di avere una visione concreta della struttura reale di questo ambiente ipogeo artificiale (Fig. 6) e capire come venne utilizzato in passato. È infatti subito chiaro che originariamente i due camini dovevano servire a garantire il ricircolo d'aria nella galleria, in un periodo di treni a carbone, per evitare l'accumulo di monossido di carbonio. Dato il volume dei pozzi, è evidente che il passaggio d'aria che producevano doveva essere importante. È anche chiaro come in seguito, durante la Prima guerra mondiale, sia stato utilizzato per dare rifugio ai militari: i pozzi erano allestiti con delle impalcature in legno e la galleria poteva ospitare migliaia di persone.

Il fatto che sopra il bunker che sovrasta il pozzo occidentale vi sia un cippo commemorativo, seppure in stato di abbandono, conferma l'importanza di questo luogo per le vicende belliche. Un approfondimento sulle fonti storiche ufficiali, tuttavia, aggiunge un'informazione insospettabile: il cippo non è soltanto un semplice tributo al valore della brigata Valtellina, ma una lapide collettiva per ricordare le migliaia di soldati che hanno perso la vita in poche ore, una delle più gravi e meno note stragi della Grande Guerra sul fronte italiano.

All'alba del 3 settembre 1917, intorno alle 4:50, gli Austriaci interrompono un pesante bombardamento che coinvolge anche la zona della galleria ferroviaria del Lokavac. Ufficiali e soldati italiani sono ancora rifugiati dentro la galleria, al riparo dalle bombe. La fine del bombardamento significa che l'Esercito Austriaco sta per attaccare, quindi, gli Italiani dovrebbero organizzare la

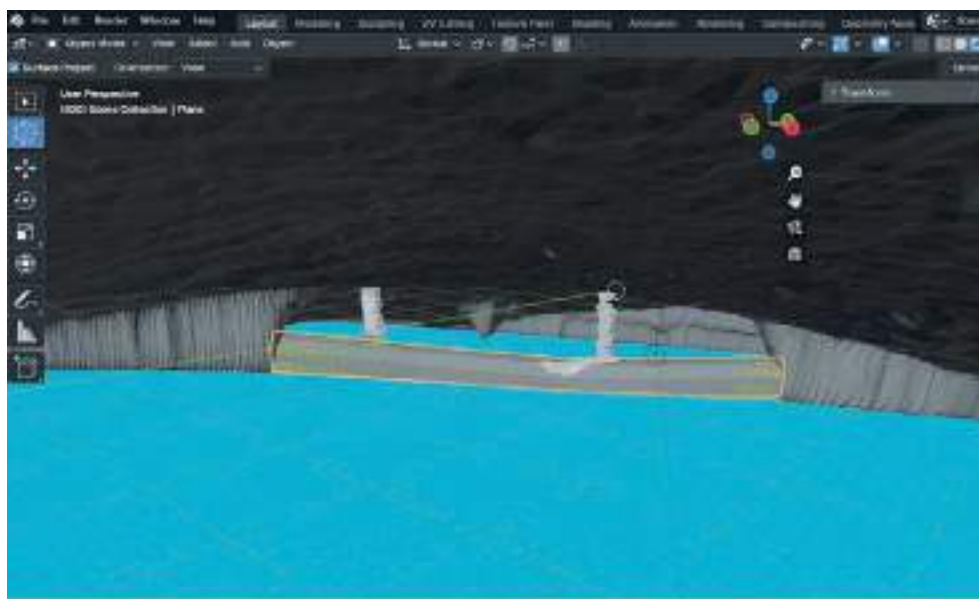


Fig. 6 - Vista sotterranea dei due modelli 3D dei pozzi ottenuti con Charlotte (bianco), assieme al modello 3D del terreno ottenuto dai dati LiDAR della Protezione Civile FVG (grigio) e al tracciato della galleria ferroviaria ipotizzato sulla base della bozza di progetto (delimitato in giallo). Sfondo colorato di azzurro, con griglia prospettica.

difesa: dalle testimonianze, tuttavia, sembra che l'ordine tardò ad arrivare. La brigata Valtellina inizia a uscire dalla galleria appena alle 5:45, ma è evidentemente troppo tardi: un reparto austriaco è già riuscito ad avvicinarsi abbastanza all'ingresso della galleria per lanciare delle bombe a mano al suo interno. Quello che i militari austriaci non possono immaginare è che proprio nei primi metri della galleria siano state lasciate delle casse di munizioni e del carburante. Una bomba a mano colpisce le casse di munizioni ed esplose innescando un enorme incendio. Secondo le testimonianze, sono sufficienti pochi secondi perché l'incendio raggiunga l'altra estremità della galleria ferroviaria e risalga anche i camini, rendendo impossibile persino la fuga verso l'alto. Migliaia di persone rimangono intrappolate in un ambiente completamente incendiato. Ora che è possibile visualizzare in 3D la struttura originale della galleria con i pozzi, è facile capire come la corrente d'aria abbia potuto alimentare tutto il materiale infiammabile al suo interno, lasciandolo bruciare per quasi due giorni.

Secondo l'Archivio dell'Ufficio Storico dello Stato Maggiore dell'Esercito, le vittime furono 2400 fra la truppa e 80 fra gli ufficiali (tra loro si conta persino il colonnello Piovano). Dai diari ufficiali della brigata le perdite ammonterebbero a 2900 persone. Una strage paragonabile, per numero di vittime, al più tristemente noto attacco con il gas del 29 giugno 1916 sul Monte San Michele. Ma con un'importante differenza: in questo caso la battaglia, di fatto, non era nemmeno iniziata, e i soldati hanno perso la vita a causa dell'eccessiva attesa prima di uscire dalla galleria e dell'errore nel posizionamento di materiale infiammabile, proprio dove poteva facilmente essere colpito. Forse anche per l'impossibilità di assegnare la responsabilità della tragedia al nemico, questo evento ha ottenuto pochissima notorietà. Per il nostro team è stato possibile riscoprirlo soltanto grazie alla fortuita scoperta di un pozzo difficile da rilevare con i metodi tradizionali.

Conclusioni

La moderna tecnologia ci ha quindi consentito di riportare alla luce e inviare al catasto delle cavità artificiali dei manufatti ipogei che, fino a questo momento, non erano documentati. Oltre all'interesse prettamente speleologico, questi metodi di sviluppo di modelli 3D si sono dimostrati validi anche per la produzione di contenuti multimediali dedicati alla divulgazione. Il risultato è naturalmente molto meno dettagliato rispetto a quello che si può ottenere con strumenti professionali per le scansioni 3D. Tuttavia, la nostra soluzione si basa su hardware e software open source con un costo bassissimo: se le soluzioni professionali costano mediamente intorno ai 50.000€, assemblare Charlotte costa circa 350 € (TRINGALI et al., 2024). Inoltre, i modelli 3D professionali sono molto grandi e richiedono notevole potenza computazionale ed esperienza nella grafica tridimensionale. Il nostro team è invece composto da persone prive di esperienza professionale nella grafica e sia il modelling che l'animazione sono stati eseguiti su un singolo laptop del 2014 con processore Intel i3 e 8GB di RAM, dotato di Kubuntu Linux e software gratuiti (QGIS e Blender).

Se è quindi ovvio che per le grandi produzioni sia comunque consigliabile ricorrere ai servizi di una azienda specializzata in questo tipo di rilievi e nella manipolazione di grafica 3D, riteniamo che la tecnologia che abbiamo presentato possa aiutare le associazioni speleologiche a produrre contenuti divulgativi che, altrimenti, non potrebbero vedere la luce a causa della mancanza di fondi.

Bibliografia

AA, sd - *Fondo Ferrovie*. Archivio di Stato di Trieste. Numero pezzo: 232, p. 190.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, SERVIZIO SISTEMI INFORMATIVI, DIGITALIZZAZIONE ED E-GOVERNMENT - *DTM Protezione Civile FVG passo 1 m, anni 2006-2010*. Trieste. <https://irdat.regione.fvg.it/CTRN/ricerca-cartografia/>.

MINISTERO DELLA GUERRA, COMANDO DEL CORPO DI STATO MAGGIORE - UFFICIO STORICO, 1939 - *L'esercito nella grande guerra (1915-1918)*. Volume IV. *Le operazioni del 1917*. Tomo I° bis. *L'ampliamento*

dell'esercito nell'anno 1917. Gli avvenimenti dal gennaio al maggio. Archivio Ufficio Storico Stato Maggiore dell'Esercito. Istituto poligrafico dello Stato, Roma.

MINISTERO DELLA DIFESA, STATO MAGGIORE ESERCITO - UFFICIO STORICO, 1954 - *L'esercito nella grande guerra (1915-1918). Volume IV. Le operazioni del 1917. Tomo 2°. Gli avvenimenti dal giugno al settembre*. Archivio Ufficio Storico Stato Maggiore dell'Esercito, Istituto poligrafico dello Stato, Roma.

MINISTERO DELLA GUERRA, COMANDO DEL CORPO DI STATO MAGGIORE - UFFICIO STORICO, sd - *Diario ufficiale della brigata Valtellina*, Archivio Ufficio Storico Stato Maggiore dell'Esercito, Istituto poligrafico dello Stato, Roma.

TRINGALI L., CANCIANI G., DEBENJAK A. & TRIPARI T., 2024 - *Charlotte: a modern tool for cave surveying*. International Journal of Speleology, 53 (3): ijs2496. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.53.3.2496>.

Gianni Benedetti¹, Giorgia Del Bianco¹

La misteriosa tavoletta della Grotta del Frassino

1) Gruppo Triestino Speleologi APS, Trieste

Abstract. In 1949, a clay tablet with inscriptions in an unknown language was found in the Grotta del Frassino cave in the Trieste Karst. At first, it was considered a fake. Recent studies and research suggest that the tablet is actually authentic and may originate from the eastern Mediterranean. However, doubts remain about how the discovery was made, particularly involving the speleologist Mario Iurza, an enigmatic and controversial figure discussed here.

Riassunto. Nella Grotta del Frassino, nel Carso triestino, nel 1949 è stata rinvenuta una tavoletta di argilla con iscrizioni appartenenti a una lingua sconosciuta, considerata in prima battuta, un falso. Recenti studi e ricerche suggeriscono che la tavoletta sia in realtà autentica e che possa provenire dal Mediterraneo orientale. Tuttavia, permangono dubbi su come sia stato effettuato il ritrovamento, in cui è particolarmente coinvolto lo speleologo Mario Iurza, figura enigmatica e controversa di cui si parla qui.

Introduzione

La storia della tavoletta ritrovata alla Grotta del Frassino è legata a un interessante personaggio della realtà speleologica triestina di cui si sono perse le tracce e che ha lasciato diverse questioni aperte, sia a proposito della sua persona, che della tavoletta.

La grotta

La Grotta del Frassino, in cui la tavoletta è stata ritrovata, si trova poco a Nord-Est di Opicina, sul Carso triestino, vicino al confine con la Slovenia. La figura 1 illustra il rilievo storico dell'anno del ritrovamento, mentre in figura 2 vediamo un rilievo più recente, del 2023, che è quasi del tutto sovrapponibile al primo.

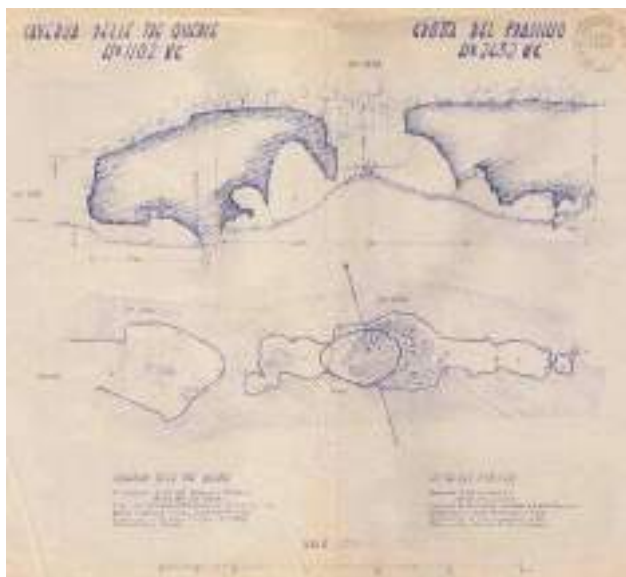


Fig. 1 - Il rilievo storico del GTS eseguito nel 1949.



Fig. 2 - A destra, il rilievo eseguito nel 2023 dal GTS e dalla Società di Studi Carsici A.F. Lindner.



Fig. 3 - La tavoletta, di dimensioni 10x5,5 cm, rinvenuta nella Grotta del Frassino (Foto Archivio storico GTS).



Fig. 4 - Le foto degli scavi tratte dall'Archivio storico del GTS.

La tavoletta

La storia della tavoletta (Fig. 3) comincia indirettamente nel 1927, anno in cui ne *Le Grotte d'Italia* si accenna alla possibilità che ci siano resti di popoli antichi in alcune grotte della zona della Grotta del Frassino. Dal 1949, anno del ritrovamento, a oggi si trovano tracce della tavoletta in diverse pubblicazioni e conferenze, nel seguito vedremo i dettagli.

Nella relazione dell'uscita del 20 novembre 1949 del Gruppo Triestino Speleologi è descritto il ritrovamento della tavoletta, a opera di Mario Iurza, quando l'uscita in grotta stava per concludersi. A testimonianza dell'evento erano anche state scattate alcune foto (Fig. 4). Dalle testimonianze riportate da diversi speleologi, in quell'occasione Iurza cerca di convincere i compagni d'uscita che la tavoletta è un falso, creato da lui, per tenerla. Li sfida a romperla dicendo che dentro troveranno una spilla da balia che lui stesso ha inserito durante la fabbricazione.

Gli altri soci, non convinti, tengono la tavoletta intatta nella sede del GTS. Successivamente, una radiografia a raggi X rivelò l'assenza di materiale estraneo e determinò la *sicura antichità del*

reperto (GNESOTTO, 1973; Fig. 5). Non viene attribuita un'età alla tavoletta, ma viene suggerito che *Uno studio approfondito, comprendente lo studio del terreno circostante (analisi dei radionuclidi e radioattività), potrebbero rendere possibile un'ottima determinazione dell'età del campione.*

Fino al 1977 la tavoletta è stata in possesso del GTS, passando poi alla Soprintendenza, che ne è ancora in possesso ai giorni nostri. Sarebbe interessante farla analizzare con tecniche moderne.

Nel 1997, GARBINI ipotizza che il Mediterraneo sia stato frequentato da "genti asiatiche" già più di un migliaio di anni avanti Cristo.

La tavoletta viene citata ancora nel 2009, da FACCHETTI in *Scrittura e falsità*. Nel 2021, GNESOTTO, sulla base di quanto ipotizzato da Garbini, riprende l'ipotesi dell'origine fenicia della tavoletta e riporta testimonianze di Dante Cannarella, secondo le quali sono stati trovati altri reperti, forse fenici, nella zona della Grotta del Frassino.

In alcune pubblicazioni si parla della tavoletta come di un falso, ma senza alcuna prova a supporto di tale ipotesi (GHERLIZZA & HALUPCA, 1988) o in base a delle voci secondo le quali la tavoletta era un falso, messo lì da un burlone per *prendere in giro chi l'avesse rinvenuta* (MARINI DE CANEDOLO, 2010).

Sulla tavoletta sono visibili dei simboli, non ancora decifrati, che hanno dei tratti in comune con quelli ritrovati su altri reperti micenei-minoici (Fig. 6). In un primo momento questa scrittura sembrava essere del tipo "lineare", mentre ipotesi più recenti rilevano tratti in comune con gli "pseudogeroglifici" di Biblo (ZUCCA, 2012).

Mario Iurza, la vita

Per comprendere meglio il contesto del ritrovamento della tavoletta, analizziamo ora un personaggio che ha avuto un ruolo importante nella vicenda.



Fig. 5 - La copertina della rivista *Kadmos*.



Fig. 6 - A sinistra una tavoletta presente in un sito archeologico della città di Chania a Creta (foto G. Benedetti); al centro una tavoletta con scrittura lineare A di Creta (da internet artei.altervista.org); a destra una tavoletta rinvenuta nell'isola di Creta (da internet doi.org/10.5169/seals-320410).

Si firma, ed è citato, in vari modi: Mario Jurca, Mario Jurza, Mario Iurca, Mario P. Jurca. Ufficialmente è Mario IURZA, e così ci riferiremo a lui in questo lavoro.

Fabio FORTI (2012), stimato carsologo triestino, in *Progressione 59*, lo descrive come “un personaggio particolare, discusso ma molto interessante”.

Ripercorriamo velocemente la sua vita. Sappiamo con certezza che nasce nel 1924, si sposa nel 1952, l'anno dopo nasce il figlio Roberto e nel 1963 emigra a Roma. Abbiamo poche tracce ancora per qualche anno, poi scompare.

Mario Iurza, lo speleologo

La sua storia speleologica è molto ricca di avvenimenti che si susseguono a un ritmo molto serrato. Nel 1940, a 16 anni, è socio della Commissione Grotte “E. Boegan” di Trieste per la prima volta. Nel 1949, da maggio a dicembre, è socio del GTS e molto attivo sia dal punto di vista delle esplorazioni che della partecipazione a eventi speleologici.

Infatti, il 4 agosto, come risulta dal libro delle relazioni del GTS, è in esplorazione alla Grotta Jablenza sul Carso triestino... e sempre dal 4 al 7 agosto è delegato dal GTS a presentare una relazione sull'attività del gruppo (dopo neanche 3 mesi di adesione!) al III Congresso Nazionale di Chieti, in Abruzzo, a circa 650 chilometri da Trieste. Non sono state trovate tracce di come e quando si sia spostato da Trieste a Chieti.

Sempre in agosto, un paio di settimane dopo, si trova in Trentino, nella squadra di punta nell'Abisso di Lamar (Fig. 7).

Partecipa a tutte le uscite di scavo alla Grotta del Frassino. Probabilmente è lui che ha indirizzato gli altri soci a scavare proprio lì. Il 20 novembre 1949 avviene il ritrovamento della Tavoletta e sei giorni dopo chiede di essere esonerato dal GTS per 90 giorni. Segue un veloce scambio epistolare tra il Consiglio Direttivo del gruppo e Mario Iurza, che porta alla sua espulsione dal GTS in data 13 dicembre 1949.

Nel 1950 fonda la sezione speleologica della «Columbus Association», un'organizzazione che durerà circa un anno, appoggiata dagli Americani che occupano Trieste in quegli Anni. Organizza degli scavi alla Grotta Pocala, dove rinviene diversi scheletri di *Ursus spelaeus*. Si dice, ma non ne abbiamo le prove, che poi vendesse i crani e le ossa agli Americani. Si ha testimonianza che questo gruppo sia molto ben organizzato e con tante persone al seguito.



Fig. 7 - A sinistra Mario Iurza; a destra la squadra di punta del GTS all'Abisso di Lamar. Iurza è il primo a destra in piedi (Foto Archivio storico GTS).

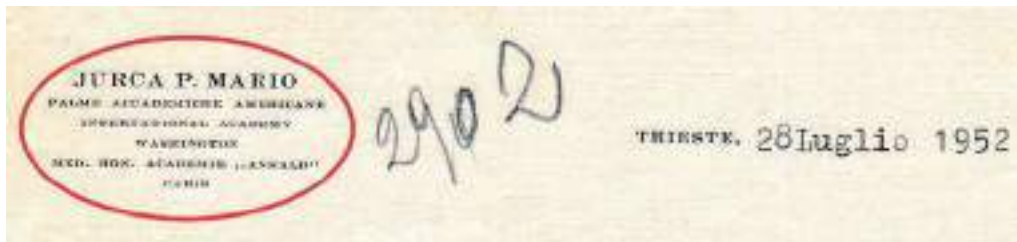


Fig. 8 - L'intestazione di una lettera indirizzata alla Commissione Grotte "E. Boegan" (Archivio storico CGEB).

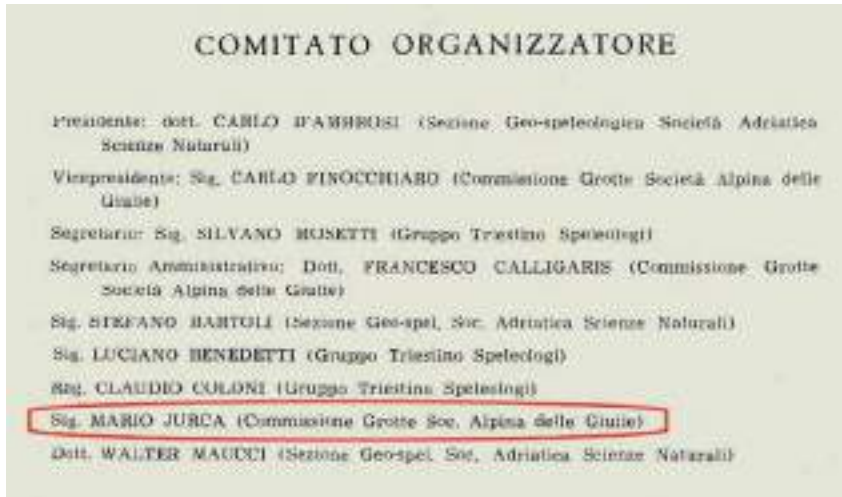


Fig. 9 - VI Congresso Nazionale di Speleologia, Trieste 1954, dove Jurca compare come Mario Jurca.

Nel 1952 è socio per la seconda volta della Commissione Grotte "E. Boegan". È ancora molto attivo, propone diverse attività, tra cui la realizzazione di un film sul "Mondo sotterraneo", che realizza nello stesso anno. Nei titoli compare come "Mario P. Jurca della Società Alpina delle Giulie, Accademico di Francia e d'America per meriti Speleologici". Non ci sono tracce di quando sia stato insignito di queste cariche.

In un altro documento dello stesso anno, è titolato come "Jurca P. Mario, Palme Accademiche Americane, International Academy, Washington, Med. Hon. Academie 'Ansaldo' Paris" (Fig. 8). L'Ordine delle Palme accademiche esiste, ma neanche in questo caso abbiamo trovato traccia che Jurca ne sia stato insignito. L'anno dopo, nel 1953, è iscritto al I Congresso Internazionale di Speleologia a Parigi, affiliato alla Società Alpina delle Giulie.

Nello stesso anno presenta anche un lavoro su scavi archeologici in grotta (JURCA & LEGNANI, 1953). Nel 1954 è nel Comitato Organizzatore del VI Congresso Nazionale di Speleologia svoltosi a Trieste (Fig. 9). Successivamente si dimette dalla Commissione Grotte: non abbiamo trovato tracce del motivo. Poi perdiamo le sue tracce per un paio di anni.

Ricordiamo che nel 1954 gli Americani lasciano Trieste.

Nel 1956 viene citato sul quotidiano triestino *Il Piccolo*, in qualità di Ispettore onorario della Sovrintendenza ai monumenti e alle antichità in appoggio allo speleosub Giorgio Cobol impegnato nella risorgiva del Timavo. Nel 1957, sempre *Il Piccolo* lo cita antepponendo il titolo di "dottore" per gli scavi archeologici sul Monte San Leonardo.

Dal 1957 si perdono nuovamente le sue tracce, questa volta per una decina di anni quando, nel 1967 viene citato come collaboratore di un famoso professore americano in un lavoro di archeologia in Basilicata.

Analisi finali e conclusioni

Riassumendo, sappiamo che la tavoletta è autentica e che il suo luogo di origine non è il Carso. Restano ancora senza risposta alcune domande: da dove proviene? quando e come è arrivata nella Grotta del Frassino?

Infine, di che scrittura si tratta? e cosa c'è scritto?

Riguardo alla scrittura e al luogo d'origine, ci sono ancora studi in corso e siamo certi che con le tecnologie di indagine disponibili ai giorni nostri, verrà fornita qualche altra informazione utile a trovare una risposta.

A proposito del momento in cui sia arrivata sul Carso triestino, ci sono due ipotesi.

La prima, e meno probabile, è che sia stata portata in Carso da popoli antichi, tra la fine del secondo e l'inizio del primo millennio A.C.

La seconda è che sia stata portata in Carso in epoche recenti, simulando un ritrovamento fortuito. Questa risulta l'ipotesi più probabile alla luce della testimonianza ritrovata nel volume *Flashpoint Trieste* (JENNINGS, 2020), in cui si parla di manufatti veneziani e fenici ritrovati ad opera di militari americani nel 1945 nei magazzini tedeschi di opere d'arte rubate a privati e musei negli anni precedenti.

La faccenda si fa più interessante cercando la risposta al come sia stata ritrovata nella Grotta del Frassino. Rivediamo i momenti salienti: viene ritrovata da Mario Iurza mentre scavava da solo; Iurza dice trattarsi di un falso fatto da lui e chiede di tenerla; Iurza già prima del ritrovamento aveva contatti con gli Americani, forse proprio con alcuni di quelli che nell'estate del 1945 hanno il compito di ritrovare reperti storici rubati dai Tedeschi...

Concludendo, al momento l'ipotesi più probabile del ritrovamento è che Iurza ottiene la tavoletta dagli Americani e la posiziona nella Grotta del Frassino il giorno stesso del ritrovamento e cerca di convincere gli altri partecipanti che sia un falso nella speranza di tenercela. Ma qualcosa non è andato come aveva previsto...

Ringraziamenti

A vario titolo e per diversi motivi si ringraziano Pino Guidi, Paolo Paronuzzi, Mila Bottegal, Alex Giordano, Alberto Carli. Inoltre, Gigliola Antonazzi e Sergio Kocevar del Gruppo Castellieri di Facebook.

Bibliografia

- AA. VV., 1956 - *Atti del VI Congresso Nazionale di Speleologia*. Trieste 30 agosto - 2 Settembre 1954.
- BATTAGLIA R., 1927 - *Caverne neolitiche del Carso*. Le grotte d'Italia, a. I, 3, ottobre-dicembre, pp. 1-16.
- CUCCHI F., MONTAGNARI KOKELJ M., MUSCIO G., VISINTINI P. & ZINI L., 2023 - *Grotte preistoriche del Friuli Venezia Giulia*. Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia, p. 43.
- FACCHETTI G.M., 2009 - *Scrittura e falsità*. Giorgio Bretschneider Editore, pp. 107-112.
- FORTI F., 2012 - *Speleologia carsica dell'altro secolo*. Progressione, 59, pp. 105-106.
- GARBINI G., 1997 - *I Filistei. Gli antagonisti di Israele*. Rusconi ed., pp.104-105.
- GHERLIZZA F. & HALUPCA E., 1988 - VG 2432 - *Grotta del Frassino*. Spelaeus, Club Alpinistico Triestino, Gruppo Grotte, pp. 139-141.
- GNESOTTO F., 1973 - *Una tavoletta con segni grafici ignoti dal Carso Triestino*. In: Kadmos, XII, 83-91, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- GNESOTTO F., 2021 - *Una testimonianza del Mediterraneo orientale rinvenuta nel Carso Triestino? A proposito delle rotte tardomicenee nell'Alto Adriatico*. Dall'Adriatico all'Egeo, pp. 311-318.
- GRUPPO TRIESTINO SPELEOLOGI - Archivio storico delle relazioni delle uscite.
- JENNINGS C., 2020 - *Flashpoint Trieste*. Le Guerre, p. 175.
- JURCA M.P. & LEGNANI F., 1953 - *La grotta dell'Orso di Gabrovizza N. 7 VG nel Carso Triestino*. Alpi Giulie, 52, pp. 12-21.
- MARINI DE CANEDOLO D., 2010 - *Le grotte del Carso triestino. Dalla Preistoria ai giorni nostri*. Gruppo Speleologico Flondar, Vol. I, 136 pp.
- ZUCCA R., 2012 - *Storiografia del problema della 'scrittura nuragica'*. Bollettino di Studi Sardi, 5/2012, p. 44.

Maurizio Tavagnutti¹

Osservazioni sulle particolari forme carsiche nell'area del bacino idrico del Rio Bodrin a SE di Montefosca

1) Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer", Gorizia

Abstract. This study presents the results of an extensive campaign of speleological and geological investigations conducted by the "C. Seppenhofer" Karst Research Center of Gorizia in the Montefosca area (Pulfero, Udine, NE Italy), located in the upper Natisone Valley. The area under investigation is characterized by a significant presence of karst phenomena, both surface and underground, and by its high exploratory potential. The aim of this work is to contribute to the characterization of karst features in the Upper Cividale region through an integrated analysis of geological and speleological data collected within the Rio Bodrin watershed. In particular, the study presents observations concerning the area's geolithology, surface karst morphology, and natural cavities identified along the mountain ridges that define the head of the basin, with special attention given to cavities intersected by active or fossil watercourses.

Riassunto. Questo studio presenta i risultati di un'ampia campagna di indagini speleologiche e geologiche condotta dal Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer" di Gorizia nell'area di Montefosca (Pulfero, Udine), situata nell'alta Valle del Natisone. L'area oggetto di studio è caratterizzata da una significativa presenza di fenomeni carsici, sia superficiali che sotterranei, e da un elevato potenziale esplorativo. Lo scopo di questo lavoro è contribuire alla definizione delle caratteristiche carsiche nella regione dell'Alto Cividalese attraverso un'analisi integrata dei dati geologici e speleologici raccolti nel bacino idrografico del Rio Bodrin. In particolare, lo studio illustra osservazioni relative alla geolitologia dell'area, alla morfologia carsica superficiale e alle cavità naturali individuate lungo le aree montuose che definiscono la testa del bacino, con particolare attenzione alle cavità interessate da corsi d'acqua attivi o fossili.

Scopo del Lavoro

Il presente studio riporta i risultati di una estesa campagna di indagini speleologiche e geologiche condotta dal Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer" di Gorizia nell'area di Montefosca, frazione montana remota e scarsamente antropizzata del Comune di Pulfero (Ud), situata nell'alta Val Natisone, a monte e a Nord-Ovest dell'abitato principale.

L'area di indagine si distingue per la significativa presenza di fenomeni carsici, sia epigei che ipogei, e per l'elevato potenziale esplorativo che ne deriva. Obiettivo del lavoro è contribuire alla caratterizzazione del carsismo nell'Alto Cividalese, attraverso l'analisi integrata dei dati geologici e speleologici raccolti nel bacino idrografico del Rio Bodrin.

In particolare, vengono presentate osservazioni relative alla geolitologia dell'area, alla morfologia carsica superficiale e alle cavità naturali individuate lungo le dorsali montuose che delimitano la testata del bacino, con particolare attenzione alle cavità attraversate da corsi d'acqua attivi o fossili.

Inquadramento Topografico

L'area oggetto di studio è localizzata nell'area carsica circostante il paese di Montefosca (Comune di Pulfero - Ud), e precisamente in corrispondenza della testata del bacino idrografico del Rio Bodrin. L'intera zona ricade nel foglio della Carta Tecnica Regionale (CTR) 1:5000 - 067024 - Montefosca. L'indagine ha interessato il territorio compreso tra le creste montuose che delimitano la testata del bacino del Rio Bodrin, immediatamente a valle del paese di Montefosca (Fig. 1). Più precisamente tale bacino è delimitato da alcuni rilievi che includono, da Est verso Ovest, le cime dei monti Vogu (1124 m), Uadizza (800 m), Tricesa (898 m), Joànaz (1167 m), Brieca (857 m) e Cladie (832 m).



Fig. 1 - Vista panoramica (ripresa dalla cima del Monte Joànaz) del bacino del Rio Bodrin con sullo sfondo il paese di Montefosca ai piedi del Monte Vogu.

Caratteristiche Geologiche

Settore Settentrionale

La porzione settentrionale dell'area di studio è compresa all'interno dell'ellissoide strutturale del Natisone, descritto da Feruglio (FERUGLIO, 1925), il cui nucleo è costituito dai rilievi dei monti Lubja, Mja e Matajur. Questo settore presenta una successione stratigrafica articolata che documenta una lunga evoluzione sedimentaria, estesa dal Triassico superiore al Cretacico (Fig. 2).

Alla base della serie affiorano le dolomie e i calcari dolomitici del ciclo del Dachstein, ben esposti nella Forra del Pradolino e nei pressi di Stupizza. Queste litologie sono indicative di ambienti deposizionali di piattaforma carbonatica soggetta a condizioni di evaporazione e salinità elevata, con cicli regressivi e frequenti emersioni. La tessitura cristallina e la presenza di strutture stromatolitiche suggeriscono una sedimentazione in ambienti lagunari poco profondi.

La successione prosegue con i livelli giurassici, rappresentati da calcari biancastri e da facies variegata con tonalità rosse e verdognole, osservabili nella Bocca di Pradolino e sui versanti dei monti Mja e Lubja. Questi sedimenti, spesso ricchi in fossili bentonici e pelagici, testimoniano una transizione verso ambienti marini più profondi e instabili, con variazioni di ossigenazione e apporti terrigeni intermittenti. Le strutture sedimentarie osservate indicano una dinamica deposizionale influenzata da oscillazioni del livello marino e da processi di subsidenza.

Il passaggio al Cretacico è segnato da una maggiore diversificazione litologica e paleontologica. Si osservano calcari grigio scuri e Camacee, seguiti da calcari grigio-brunastri con intercalazioni selciose, che riflettono fasi di sedimentazione in bacini profondi, con ridotta produzione carbonatica e maggiore apporto siliceo. Le facies fossilifere con Diceratidi, Nerinee e Rudiste, unitamente ai calcari brecciati con matrice marnosa giallastra o rossastra, suggeriscono episodi di instabilità tettonica e rimaneggiamento, probabilmente legati a eventi di emersione parziale, frane sottomarine o attività sin-sedimentaria. Tali caratteristiche indicano una forte influenza tettonica nella distribuzione e deformazione delle unità litologiche, con implicazioni dirette sullo sviluppo dei fenomeni carsici.

Settore Meridionale

La parte meridionale dell'area è dominata da una successione di sedimenti marnoso-arenacei e calcari eocenici, che testimoniano una fase deposizionale più recente, legata all'evoluzione del margine continentale durante il Cenozoico. L'intera serie stratigrafica si presenta concordante, con un passaggio graduale tra le diverse litologie, attraverso facies di transizione quali calcari arenacei e arenarie calcaree finemente laminate.

Queste ultime si dispongono in strati centimetrici, alternati a bancate più spesse (1-1,5 m) di brecce calcaree, costituite da clasti angolosi di dimensioni variabili (10-20 cm), immersi in una matrice calcarea o marnosa. La presenza di queste brecce suggerisce episodi di trasporto gravitativo e sedimentazione torbida, probabilmente legati a instabilità tettonica o a variazioni del livello marino. Le strutture sedimentarie osservate, come laminazioni parallele, stratificazioni incrociate e clasti orientati, indicano ambienti di transizione tra piattaforma esterna e scarpata continentale.

Gli strati esaminati mostrano una immersione verso S-SW, con inclinazioni variabili tra 10° e 50°, evidenziando una deformazione post-deposizionale attribuibile a movimenti tettonici regionali. Tale inclinazione, associata alla presenza di pieghe, faglie e fratture, contribuisce alla complessità geologica dell'area e condiziona fortemente la circolazione idrica sotterranea, favorendo lo sviluppo di sistemi carsici profondi e articolati.

Morfologia del bacino del Rio Bodrin

Il bacino idrografico del Rio Bodrin si sviluppa in corrispondenza dell'abitato di Montefosca, nel Comune di Pulfero (Provincia di Udine), all'interno di un contesto geologico dominato da rilievi carbonatici di età mesozoica. L'area rappresenta un sito di elevato interesse geomorfologico e speleologico, grazie alla combinazione di fattori litologici, strutturali e idrodinamici che ne hanno modellato l'evoluzione nel tempo.

Il Rio Bodrin è un corso d'acqua a carattere torrentizio, con portate variabili in funzione della stagionalità e degli eventi meteorici. Il suo tracciato si incunea in una valle incisa nei calcari, con un gradiente altimetrico che va dai 300-600 m del fondovalle fino ai 1167 m del Monte Joànaz, che costituisce il punto culminante del bacino. Questo dislivello accentuato favorisce processi erosivi intensi e contribuisce alla formazione di morfologie fluviali e carsiche ben sviluppate.

Dal punto di vista planimetrico, il bacino presenta una configurazione chiusa e simmetrica, con versanti moderatamente inclinati e profili dolci. Tali caratteristiche sono attribuibili alla natura litologica prevalente, composta da calcari massivi e stratificati, e all'azione prolungata dei processi di modellamento carsico superficiale. L'incisione del Rio Bodrin si manifesta attraverso un canale ben definito, con pareti subverticali in alcuni tratti, che testimoniano una dinamica erosiva attiva e una significativa evoluzione morfogenetica.

L'analisi dei profili morfologici, sia longitudinali che trasversali, evidenzia una notevole regolarità e simmetria della valle, con forme che favoriscono la conservazione di elementi erosivi e deposizionali. I versanti mostrano una pendenza contenuta, con tratti di accumulo detritico e superfici modellate da processi gravitativi e fluviali. La presenza di terrazzi fluviali, con livelli di incisione differenziati, suggerisce una storia geomorfologica complessa, influenzata da variazioni climatiche e tettoniche.

Il carsismo superficiale è particolarmente sviluppato nell'area di Montefosca, dove si osservano forme epigee quali doline, campi solcati e inghiottitoi, oltre a un reticolo ipogeo articolato, che rende il territorio un laboratorio naturale per studi speleologici. Le cavità sotterranee, spesso collegate al

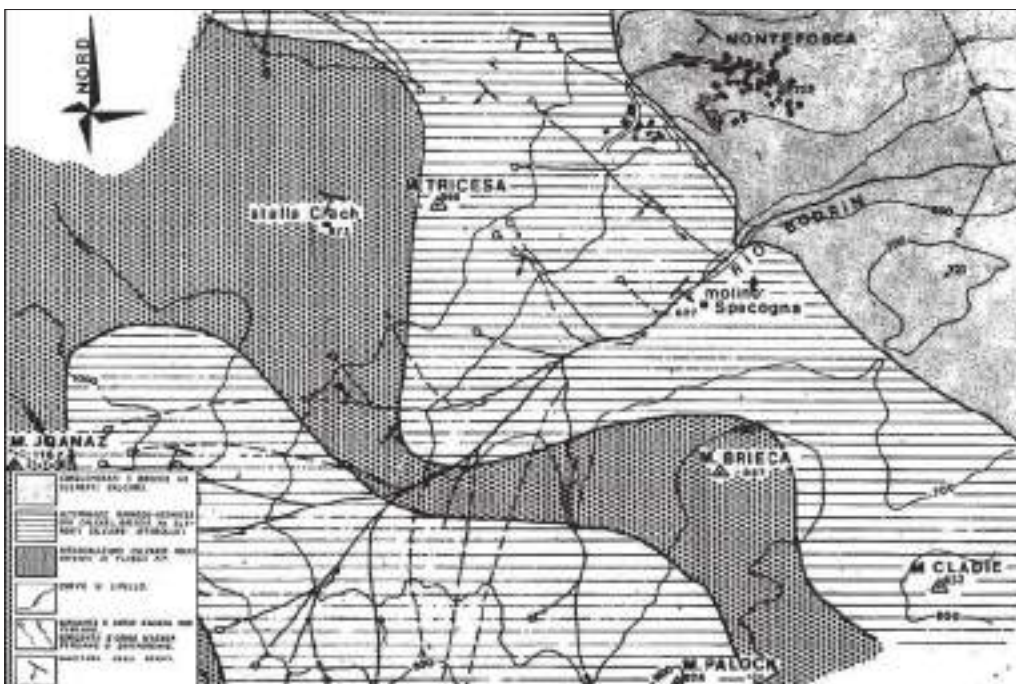


Fig. 2 - Schema geolitologico del bacino del Rio Bodrin (zona di Montefosca - Pulfero; da COMAR & TAVAGNUTTI, 1983).

reticolo idrografico superficiale, testimoniano l'intensa attività di dissoluzione chimica dei calcari e la presenza di circolazione idrica sotterranea.

La morfogenesi del bacino del Rio Bodrin è il risultato di una complessa interazione tra fattori geologici (litologia, struttura, tettonica), climatici (regime pluviometrico, escursioni termiche) e idrologici (portata, energia del flusso), che nel tempo hanno modellato un paesaggio di elevato valore scientifico, ambientale e didattico. L'area si presta a studi multidisciplinari che spaziano dalla geomorfologia alla idrogeologia, dalla speleologia alla geografia fisica.

Il fenomeno carsico nell'area di Montefosca

Il carsismo nell'area di Montefosca, situata nel bacino del Rio Bodrin (Comune di Pulfero - UD), presenta caratteristiche peculiari, fortemente condizionate dalla complessa articolazione litologica e dalla stratificazione del substrato roccioso. L'analisi geomorfologica preliminare consente di distinguere due unità litologiche principali, ciascuna associata a un'evoluzione carsica differenziata.

1. Zona marnoso-arenacea e calcarea mista (testata superiore del bacino)

Questa porzione, che comprende i versanti dei Monti Uadizza, Joànaz, Clabuch e Brieca, è costituita da una successione di alternanze marnoso-arenacee, calcari marnosi, calcari arenacei, calcareniti e calcari brecciati. La natura eterogenea e la presenza di litotipi scarsamente solubili determinano una limitata espressione del carsismo superficiale. Le forme epigee sono rare e poco sviluppate; si osservano solo microforme carsiche, come i Rillenkarren, localizzate nei livelli calcarei intercalati al flysch.

Tuttavia, il carsismo ipogeo risulta ben rappresentato. Sono presenti cavità suborizzontali di notevole estensione (fino a 210 metri), con morfologia tipica d'interstrato. Queste grotte si sviluppano lungo superfici di contatto tra strati impermeabili (arenarie e marne), fungendo spesso da condotti di risorgenza. La genesi di tali cavità è attribuibile alla circolazione idrica confinata e alla dissoluzione selettiva dei livelli carbonatici interstratificati.

2. Zona calcarea e calcarenitica (versante Sud del Monte Vogu)

La seconda unità litologica è costituita esclusivamente da calcari e calcareniti massive, che affiorano in modo continuo lungo il versante meridionale del Monte Vogu e nella porzione inferiore del bacino. In questa zona, le condizioni litologiche e strutturali favoriscono un'evoluzione carsica più marcata, con lo sviluppo di forme epigee e ipogee più articolate. Il carsismo superficiale è più evidente, con la presenza di doline, solchi di corrosione e potenziali ingressi di cavità sotterranee.

Il versante meridionale del Monte Vogu, dunque, presenta un carsismo superficiale ben sviluppato, favorito dalla scarsa copertura vegetale. Qui si osservano forme epigee articolate, tra cui campi carreggiati, solchi di corrosione profondi e numerosi Rillenkarren, oltre a vaschette di dissoluzione ben conservate e Lochkarren. Sono inoltre presenti accumuli di detriti calcarei di varie dimensioni, intensamente corrosi, riconducibili al tipo Grize, che testimoniano processi di alterazione avanzata.

Il carsismo ipogeo in quest'area è poco rappresentato. Le uniche cavità note si localizzano lungo il versante orografico sinistro del Rio Bodrin. Da segnalare, in corrispondenza di una parete verticale di probabile origine tettonica, una cavità, la Holopwa Jama, che si configura come una risorgiva fossile, priva di attività idrica attuale, ma indicatrice di una precedente fase di circolazione sotterranea.

3. Zone di contatto litologico

Le morfologie carsiche che si sviluppano in corrispondenza del contatto tra le due principali unità litologiche del bacino del Rio Bodrin rappresentano un ambito di particolare rilevanza speleogenetica e idrogeologica. In queste aree di transizione, le cavità tendono a originarsi all'interno dei

calcari e proseguono fino a intercettare il flysch, generando strutture ipogee complesse, spesso condizionate dalla stratificazione e dalla permeabilità differenziale dei litotipi coinvolti.

Un esempio emblematico è costituito dalla Grotta sotto la chiesa di S. Andrea (3670/2013Fr), localizzata alle pendici occidentali del Monte Cladie. Questa cavità, che si apre lungo una serie di fratture e discontinuità strutturali, agisce come inghiottitoio diretto e temporaneo e presenta uno sviluppo significativo. La sua morfologia d'interstrato e la posizione al contatto tra calcari e flysch la rendono uno dei fenomeni carsici ipogei più rilevanti dell'intera area di Montefosca, e oggetto di doverosi futuri approfondimenti speleologici e idrogeologici.

Nel settore calcareo propriamente detto, le forme carsiche epigee risultano più diffuse. Nella porzione meridionale, in prossimità dell'ex Mulino Specogna, si nota un paesaggio assimilabile a un carso coperto, con presenza sporadica di doline circolari e imbutiformi molto pronunciate. Queste depressioni mostrano affioramenti rocciosi sul fondo, parzialmente coperti da depositi terrigeni e vegetali in decomposizione, suggerendo la possibile esistenza di cavità ostruite piuttosto che doline evolute.

Alle falde nord-occidentali del Monte Cladie, dove il substrato carbonatico affiora in modo più netto, si rinvencono numerosi affioramenti calcarei con carreggiature anche molto profonde, accompagnate da scanalature arrotondate del tipo Rundkarren, la cui genesi probabilmente è influenzata dalla intensa copertura vegetale che ne determina lo sviluppo morfologico. Le microfor-

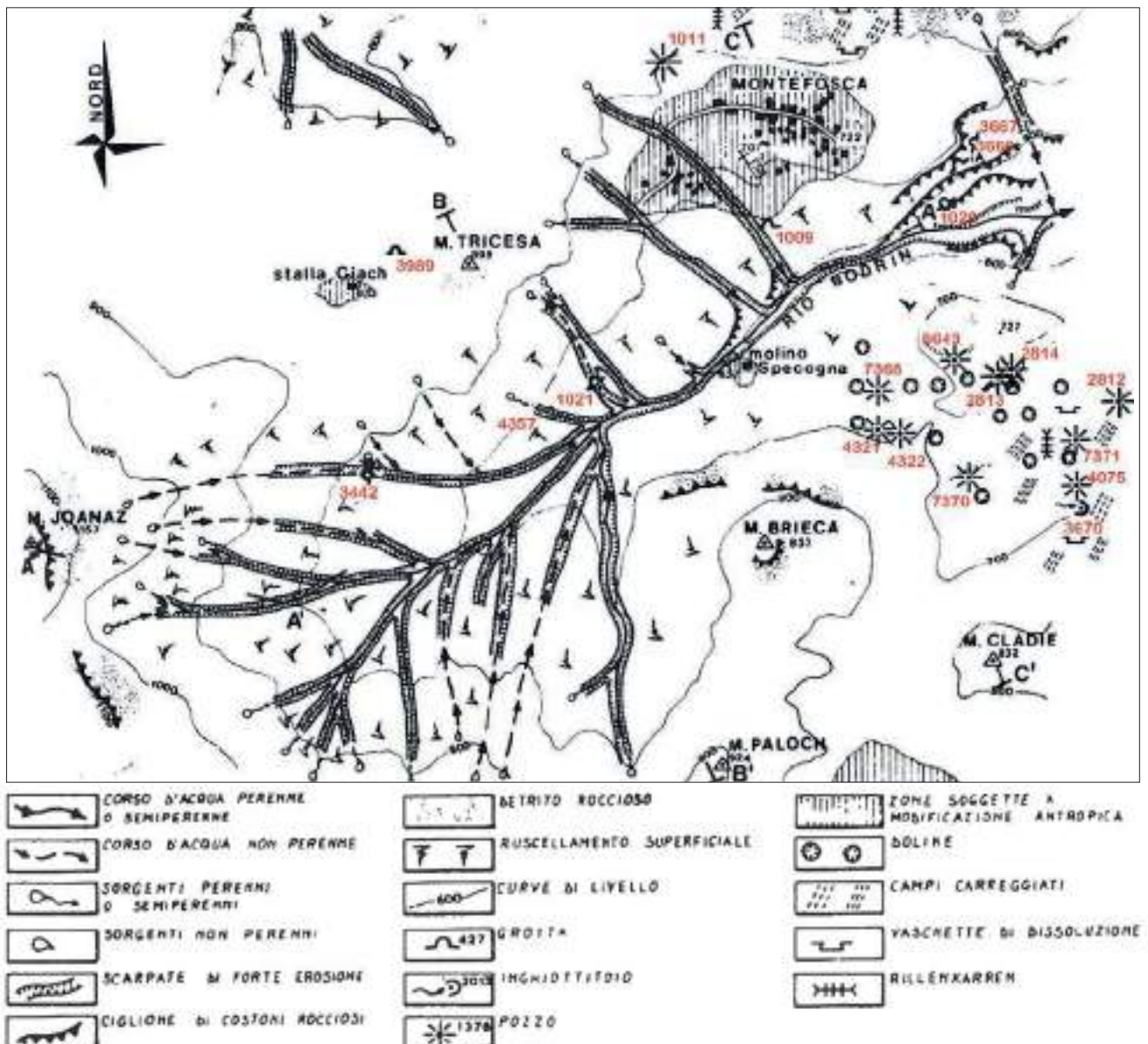


Fig. 3 - Schema morfologico del bacino del Rio Bodrin (zona di Montefosca - Pulfero, da COMAR & TAVAGNUTTI, 1983).

me carsiche superficiali, come vaschette di corrosione e solchi minori tipo Rillenkarren, risultano estremamente rare in questa zona.

Le cavità carsiche nel bacino del Rio Bodrin

Il bacino idrografico del Rio Bodrin ospita numerose cavità carsiche, variabili per dimensioni, morfologia e genesi. In questa sede si riportano esclusivamente le cavità di maggiore rilevanza, selezionate in base alla loro connessione diretta o indiretta con il reticolo idrografico locale e alla loro significatività geomorfologica. L'analisi speleologica ha permesso di distinguere tre settori principali all'interno del bacino:

Settore superiore (testata del bacino): caratterizzato da cavità con morfologia tipica di risorgiva.

Queste strutture ipogee si sviluppano prevalentemente lungo superfici di contatto litologico e fratture, e sono associate a fenomeni di drenaggio sotterraneo attivo o fossile.

Zona calcarea e calcarenitica (versante Sud del Monte Vogu): costituita esclusivamente da calcari e calcareniti massive, che affiorano in modo continuo lungo il versante meridionale del Monte Vogu e nella porzione inferiore del bacino.

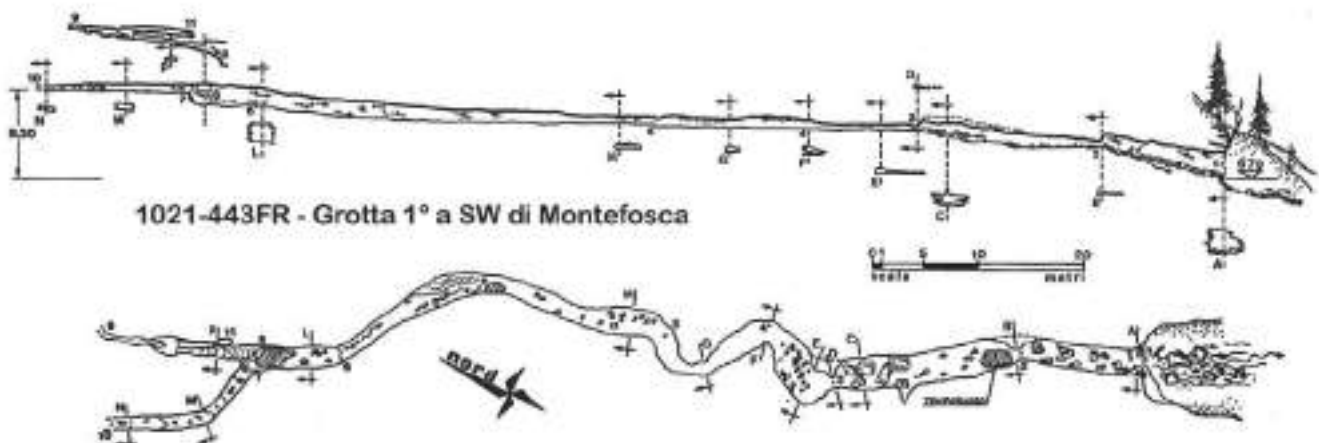
Settore mediano e meridionale, zone di contatto litologico: in questa porzione del bacino le cavità presentano caratteristiche morfologiche riconducibili agli inghiottitoi. Si tratta di ingressi carsici che intercettano temporaneamente le acque superficiali, spesso localizzati in corrispondenza di depressioni morfologiche o fratture strutturali.

Per ciascuna cavità selezionata vengono di seguito riportati i dati topografici essenziali, una descrizione morfologica sintetica e il relativo rilievo speleologico, al fine di documentarne l'estensione, la struttura interna e il contesto geomorfologico.



Fig. 4 - Ingresso della Grotta 1° a SW di Montefosca, tipica cavità d'interstrato: si può notare come gli spessi banchi calcarenitici siano sovrapposti agli strati flyschoidi sottostanti.

Fig. 5 - Rilievo della Grotta 1° a SW di Montefosca: si può notare come lo sviluppo della grotta segua l'andamento della stratificazione locale del flysch.



1. Settore superiore o testata del bacino (Zona marnoso-arenacea e calcarea mista)

In quest'area ci sono tre risorgive:

1021/443Fr - Grotta 1° a SW di Montefosca; 3442/1830Fr - Grotta ad E del Monte Ioanaz;
4357/2437Fr - Grotta 2 a S del Monte Tricesa

Di cui due sono importanti per sviluppo e caratteristiche:

1021/443Fr - Grotta 1° a SW di Montefosca

Altri nomi: Grotta a S di Montefosca

Comune: Pulfero - Prov.: Udine - CTR 1:5000 - Montefosca - 067024 - Pos. ing.: Lat.: 46°11'29,2" Long.: 13°26'02,1" - Quota ing.: m 684 - Disl.: m +9 - Svil.: m 131 - Primo rilievo: Moro R., Pajero P. - 28/03/1959 - C.S.I.F. - 1° Aggiornamento rilievo: Tavagnutti M., Nadaia P. - 27/06/1982 - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - Esecuzione posizione: 01/01/2012 - Tavagnutti M. - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - Presenza targhetta: Sì. Breve descrizione del percorso d'accesso: dalla strada asfaltata che porta a Montefosca, circa 1Km prima di entrare in paese, si scende sulla destra, lungo un ripido versante, in corrispondenza di due profondi canaloni paralleli (molto evidenti anche sulla carta topografica al 25.000 del I.G.M.). Ad una trentina di metri dal fondo valle, nel mezzo del primo canalone, si apre l'ingresso della grotta.

Descrizione dei vani interni della cavità: è una cavità d'interstrato molto interessante. Dall'ingresso piuttosto ampio la grotta prosegue restringendosi gradatamente; a circa 12 m si incontra una prima strettoia che in caso di forti piogge viene occupata da un laghetto temporaneo. A 30 m dall'ingresso, superata una seconda strettoia, si prosegue strisciando per altri 10m circa e quindi la cavità inizia ad allargarsi e nella sua parte centrale infatti è possibile camminare comodamente in piedi. Sul fondo la cavità si biforca lasciando intravedere possibili prosecuzioni. La grotta è percorsa in tutta la sua lunghezza da un modesto corso d'acqua che però durante periodi intensamente piovosi si ingrossa, diventando quindi molto pericoloso.

4357/2437Fr - Grotta 2° a S del Monte Tricesa

Comune: Pulfero - Prov.: Udine - CTR 1:5000 - Montefosca - 067024 - Pos. ing.: Lat.: 46°11'27,3" Long.: 13°25'56,9" - Quota ing.: m 705 - Disl.: m +24 - Svil.: m 210,7 - Primo rilievo: Tavagnutti M., Gagliardi F. - 27/07/1986 - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - 1° Aggiornamento rilievo: Zidarich O. - 29/07/2018 - G. S. "S. Giusto" - Esecuzione posizione: 01/01/2012 - Tavagnutti M. - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - Presenza targhetta: Sì.

Breve descrizione del percorso d'accesso: la cavità si trova a valle della strada che porta a Montefosca, in prossimità della testata del Rio Bodrin e non lontano da una vecchia costruzione adibita a fienile. L'ingresso è posto alla base di una paretina rocciosa situata nel mezzo di un canalone.

Descrizione dei vani interni della cavità: si tratta di una cavità d'interstrato molto ampia e bassa inizialmente che, ben presto, si restringe. Nella parte terminale presenta uno stretto cunicolo

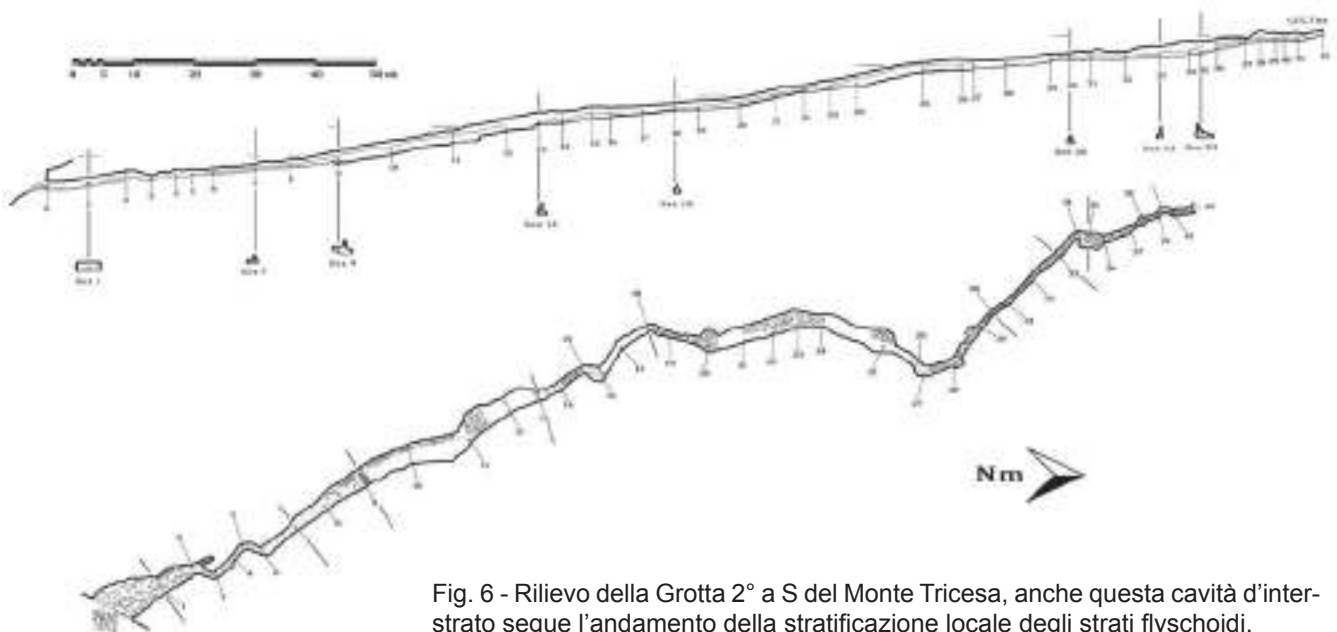


Fig. 6 - Rilievo della Grotta 2° a S del Monte Tricesa, anche questa cavità d'interstrato segue l'andamento della stratificazione locale degli strati flyschoidi.

da cui fuoriesce una notevole quantità d'aria. Attualmente il cunicolo è stato allargato artificialmente e l'esplorazione è proseguita per una quindicina di metri i quali non sono stati rilevati essendo la cavità ancora in fase di esplorazione.

Aggiornamento 2018: su segnalazione di uno degli esploratori degli anni '80, nel corso del 2018 il Gruppo Speleologico San Giusto di Trieste ha ripreso le esplorazioni nella cavità, ferme ormai da oltre trent'anni. Riscontrando sempre il notevole flusso d'aria in uscita già segnalato, nell'arco di sei uscite sono stati intrapresi dei lavori di allargamento in numerosi punti per permettere il passaggio degli esploratori. La grotta è un classico esempio di bassa e larga cavità d'interstrato dal momento che si sviluppa in costante e leggera salita interamente nel contatto tra la sottostante banconata di flysch e quella soprastante di calcarenite. Soltanto nella parte finale la galleria tende ad abbandonare il flysch prolungandosi all'interno dei carbonati con uno stretto meandrino, al momento chiuso da un'impegnativa strettoia a oltre 200 metri di distanza dalla caverna d'ingresso. Da questo punto proviene il flusso d'acqua che interessa la risorgiva, con una portata di solito decisamente scarsa, ma che in occasioni particolari può arrivare a riempire completamente la cavità. Battute di zona effettuate sui versanti del soprastante Monte Tricesa non hanno al momento permesso di individuare eventuali secondi ingressi tali da giustificare il flusso d'aria che percorre la cavità che effettivamente d'estate si comporta da entrata bassa. La grotta è ancora in fase di esplorazione.

2. Zona calcarea e calcarenitica (versante Sud del Monte Vogu)

In quest'area ci sono diverse grotte di medie dimensioni, solo una potrebbe essere determinata da una genesi conseguente ad attività idrica:

1009/426Fr - Grotticella sotto Montefosca; 102/427Fr - Holopwa Jama; 3666/2009Fr - Grotta a NE della Holopwa Jama; 3667/2010Fr - Grotticella a NE della Holopwa Jama; 6535/3800Fr - Grotta delle Concrezioni palpitanti; 7355/4420Fr - Riparo 1 del Torrente Nabrodino

Senza altro la Holopwa Jama ha delle caratteristiche legate ad una morfogenesi fluviale.

1020/427Fr - Holopwa Jama

Comune: Pulfero - Prov.: Udine - CTR 1:5000 - Montefosca - 067024 - Pos. ing.: Lat.: 46°11'52,4" Long.: 13°26'57,0" - Quota ing.: m 570 - Disl.: m +12 - Svil.: m 49 - Primo rilievo: Moro R., Moro F. - 27/03/1959 - C.S.I.F. - 1° Aggiornamento rilievo: Comar M., Tofoletti P., Zuccolo C., Balutto M. - 16/03/1986 - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - Presenza targhetta: No.

Breve descrizione del percorso d'accesso: la grotta si apre nel fianco roccioso (costituito da uno specchio di faglia con andamento verticale e direzione NE-SW) della stretta gola incisa dalle acque del Rio Bodrin, in prossimità del paese di Montefosca.

Descrizione dei vani interni della cavità: la grotta è costituita da un'unica galleria in leggera salita con una pendenza fino a 20°, la quale dopo una lieve strozzatura termina in due camini ascendenti e contigui. È una cavità di interstrato, con morfologia a condotta forzata modificata da depositi di riempimento alluvionale e da crolli presso l'ingresso. I sedimenti sono stati reinciati

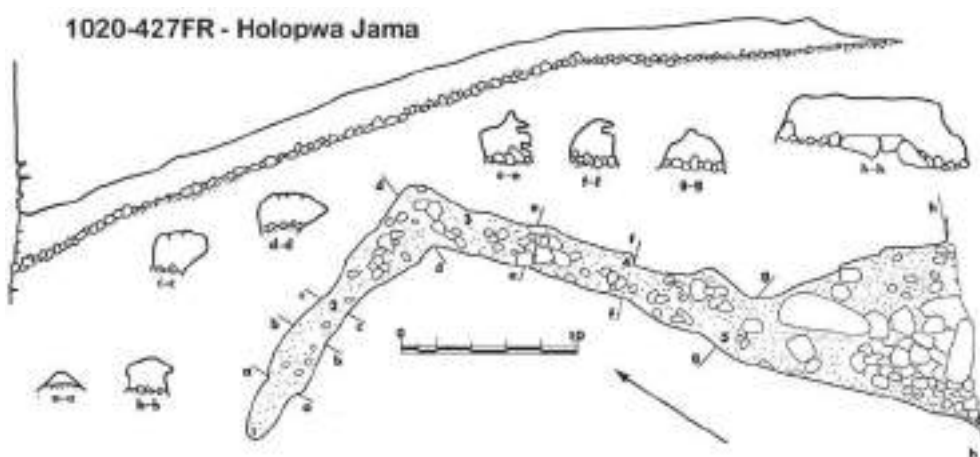


Fig. 7 - Rilievo della Holopwa Jama, il cui ingresso si apre in piena parete verticale.

da un corso d'acqua in epoca non troppo lontana, il che ci fa supporre che la grotta sia ancora occasionalmente attiva.

3. Zone di contatto litologico

In quest'area ci sono molte cavità perlopiù ad andamento verticale, solo due di queste hanno caratteristiche assorbenti e riescono a raggiungere i banchi flyschoidi sottostanti a causa della forte, anche se saltuaria, attività idrica:

2812/1374Fr - Pozzo a SE di Montefosca; 2813/1375Fr - Pozzetto a SE di Montefosca; 2814/1376Fr - Grotta a SE di Montefosca; 3670/2013Fr - Grotta sotto la Chiesa di S. Andrea; 4321/2401Fr - Pozzo 1 presso l'Ex Molino Specogna; 4322/2402Fr - Pozzo 2° presso l'Ex Molino Specogna; 4075/2297Fr - Buco presso la Grotta sotto la Chiesa di S. Andrea; 7368/4431Fr - Pozzo sulla Strada; 7370/4432Fr - Grotta in Località Duric; 7371/4433Fr - Pozzo in Località Duric; 8643/5349Fr - Grotta delle Perseidi

Queste sono le due cavità più interessanti e interessate da una circolazione idrica.

3670/2013Fr - Grotta sotto la Chiesa di S. Andrea

Comune: Pulfero - Prov.: Udine - CTR 1:5000 - Montefosca - 067024 - Pos. ing.: Lat.: 46°11'30,30" Long.: 13°27'09,5" - Quota ing.: m 665 - Prof.: m 74,3 - Svil.: m 388 - Pozzo ing.: m 24,2 - Pozzi int.: m 5 ; 4,8 - Primo rilievo: Tavagnutti M., Prodan A. - 26/09/1982 - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - 1° Aggiornamento rilievo: Tavagnutti M., Stocker U., Mirifico A. - 31/06/1983 - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - Esecuzione posizione: 01/01/2012 - Tavagnutti M. - C. R. Carsiche "C. Seppenhofer" - Presenza targhetta: Sì.

Breve descrizione del percorso d'accesso: la cavità s'apre ai limiti di un campo carreggiato di piccole dimensioni e parzialmente coperto da una densa vegetazione. L'ingresso si trova a 10 m sul lato destro del sentiero che parte dal paese di Montefosca e arriva a Goregnevas, in corrispondenza di un tratto pianeggiante del sentiero subito dopo i ruderi di un vecchio fienile, a N della Chiesa di S. Andrea.

Descrizione dei vani interni della cavità: la grotta si apre, come detto, al passaggio tra le due formazioni rocciose principali e funge da inghiottitoio delle acque che scorrono sulla superficie della formazione flyschoida impermeabile che forma le alture circostanti, tramite un diffuso ruscellamento. L'imboccatura del pozzo si apre nella parte più depressa del microbacino in esame. Il litotipo prevalente affiorante sul fondo del microbacino è dato da calcare conglomeratico per cui la morfologia superficiale è influenzata da un diffuso carsismo con presenza di diverse microforme carsiche superficiali. La cavità si apre con un pozzo di 23 m tramite una fessura larga mediamente circa 50 cm per una lunghezza di 1 m, fra strati conglomeratici subverticali con tipica fisionomia di fessura d'interstrato allargata per dissoluzione. La medesima si allarga gradatamente sul fondo;



Fig. 8 - L'ingresso della Grotta sotto la Chiesa di S. Andrea con la traccia del percorso dell'acqua in caso di forti piogge.

qui la lunghezza raggiunta è di circa 8-9 m con la presenza di detriti rocciosi anche grossolani, evidentemente staccatisi dalle pareti, quindi continua per altri 15 m circa tramite una condotta alta poco più di un metro con sezione a losanga che si approfondisce per erosione gravitativa.

Sul fondo è presente dell'acqua dovuta ad infiltrazione esterna. Poi si passa immediatamente ad un assetto suborizzontale della grotta, sempre con morfologia d'interstrato con la stratificazione che pende debolmente verso S-SW secondo la tendenza generale della stratificazione di tutta la zona di Montefosca. Qui la grotta si divide in due rami:

- uno superiore, ormai fossile, con rare concrezioni e, verso il fondo, con detriti fangosi; sono presenti anche blocchi calcarei sparsi nella parte mediana. Questo ramo attraversa strati prevalentemente formati da calcare conglomeratico ed è instaurato su un sistema di fratture verticali ad andamento NE-SW. Verso la parte terminale si ha una serie di curve ad angolo retto dovute all'incontro di una famiglia di fratture normali a quelle che influenzano l'andamento generale del primo ramo;
- uno inferiore, più vasto, instaurato su più piani e più rami separati da pozzetti profondi dai 5 ai 6 m a tipica morfologia d'interstrato con sezione subrettangolare dovuta all'erosione di strati marnosi più erodibili alternati a strati di calcare conglomeratico di potenza metrica. Sui conglomerati si notano numerose fratture verticali ad andamento grosso modo N-S, allargate per dissoluzione. Particolarmente interessante è la morfologia del ramo inferiore; infatti l'erosione preferenziale degli strati marnosi rispetto agli strati calcareo-conglomeratici ha formato delle sezioni subrettangolari con al tetto e al letto gli strati conglomeratici e ai lati quelli marnosi grigio-verdastri finemente stratificati in fase di erosione con piano d'erosione normale alla stratificazione.

Nella parte centro-meridionale si hanno, ai lati, gradini di dimensioni metriche dovuti alla protezione dall'erosione di marne sottostanti agli strati calcareo-conglomeratici massicci. Verso la parte

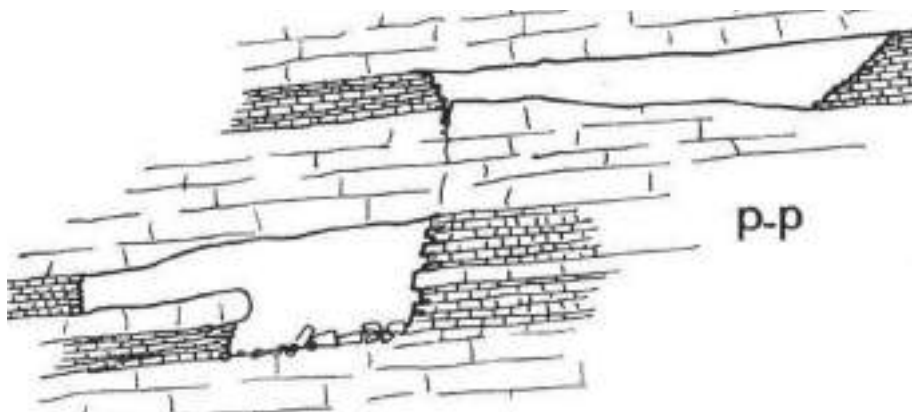


Fig. 9 - Sezione tipica delle due gallerie sovrapposte presenti nella Grotta sotto la Chiesa di S. Andrea.



Fig. 10 - Le due gallerie sovrapposte sono collegate tra loro da una frattura verticale che spesso risulta ostruita da materiale detritico di trasporto fluviale fortemente cementato.

meridionale sono presenti sul letto parecchi massi di crollo dovuti a conglomerati calcarei fratturati a cui è mancato il sottostante sostegno delle marne asportate per erosione; questo provoca anche un aumento dell'altezza della galleria principale.

Verso la metà di questo ramo sono presenti pozze d'acqua formate in piccole depressioni sui rari sedimenti fangosi. In certe zone si nota un passaggio brusco del colore delle marne, dal grigio-verdastro al rossonero, con lenti di conglomerato calcareo e cemento marnoso rossastro (si osserva notevolmente bene alla base del secondo pozzetto, punto 39 del rilievo); la parte più meridionale si strozza fino ad un esile cunicolo non praticabile per riempimento di detriti rocciosi e fangosi (prevalenti), profondamente incisi dall'erosione delle acque scorrenti nella grotta durante le piene. Infatti, al contatto con la volta che forma il cunicolo suddetto, si ha un notevole materasso di fango con detriti rocciosi di varie dimensioni mescolati caoticamente; questo deposito è inciso profondamente da un canale con le pareti perfettamente verticali, incisione dovuta probabilmente all'energia libera delle acque in fase di piena calante. Detriti rocciosi debolmente cementati si riscontrano saltuariamente in tasche in varie parti della grotta, residuo di riempimenti durante le fasi iniziali della cavità.

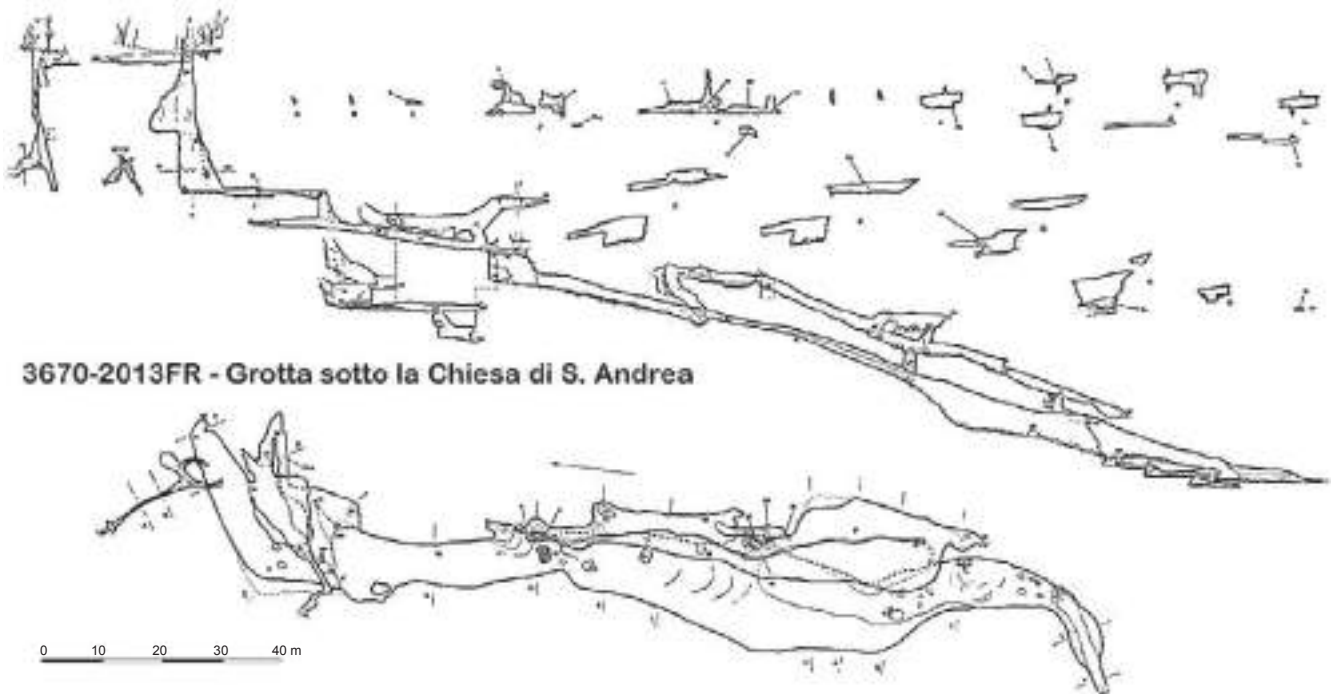


Fig. 11 - Nel rilievo della Grotta sotto la Chiesa di S. Andrea si può vedere chiaramente la disposizione delle due gallerie sovrapposte.

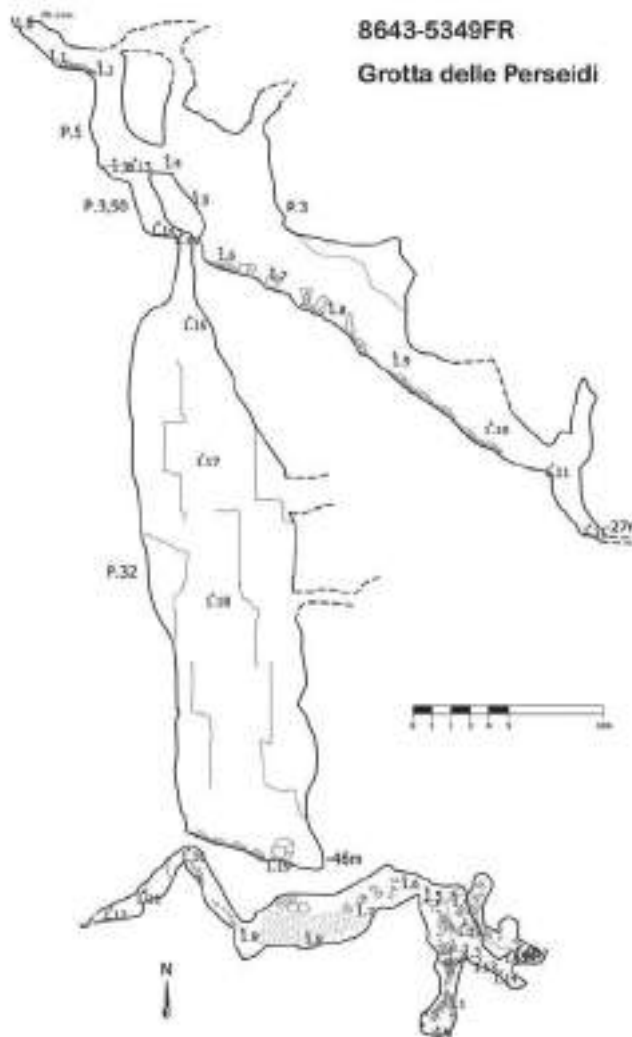


Fig. 12 - Il tipico andamento meandriforme del ramo superiore della grotta.



Fig. 13 - Il grande pozzo terminale a sezione circolare, tipico di una genesi dovuta allo scorrere dell'acqua (8643/5349Fr).

Fig. 14 - Il rilievo della grotta: si nota la presenza di un ramo meandriforme superiore, il pozzo potrebbe essere stato generato dallo sfondamento della base del meandro.



8643/5349Fr - Grotta delle Perseidi

Comune: Pulfero - Prov.: Udine - CTR 1:5000 - Montefosca - 067024 - Pos. ing.: Lat.: 46°11' 36,0" Long.: 13°26'51,4" - Quota ing.: m 701 - Prof.: m 46 - Svil.: m 39 - Pozzo ing.: m 3 - Pozzi int.: m 3,5; 32 - Primo rilievo: Marini L., Pascolo D. - 24/11/2024 - C. Ric. Carsiche "C. Seppenhofer" - Presenza targhetta: No.

Breve descrizione del percorso d'accesso: per raggiungere l'ingresso della grotta bisogna percorrere la strada che da Montefosca, scende, passa davanti alla chiesa del paese. Si incontra un bivio e si prosegue lungo una strada forestale sulla sinistra prima di una curva. Proseguendo sempre in discesa fino a passare il ponticello che attraversa il Rug Bodrin dove la strada asfaltata si interrompe si incrocia con una strada sterrata. Si prosegue sulla strada sterrata a sinistra (verso valle) e dopo un tratto in salita si supera la località Mulino Specogna; proseguendo si supera un tornante sul cui vertice, alla base di una paretina rocciosa a sinistra si apre la cavità 7368 (Pozzo sulla Strada) si prosegue in salita e dopo un'ampia curva si trova sulla sinistra un sentiero che porta al Monte Glava. Si abbandona la strada principale e si prosegue lungo questo sentiero (attenzione non molto ben evidenziato) per una cinquantina di metri e quindi, in corrispondenza di un avvallamento trasversale, si scende a sinistra e dopo un po' rimanendo in quota si raggiunge l'ingresso della grotta.

Descrizione dei vani interni della cavità: l'ingresso della grotta si apre con un cunicolo in discesa che porta ad un terrazzino posto sopra ad un pozzo di pochi metri, al fondo del quale la grotta si sviluppa con un meandro inizialmente ampio e alto, con pareti costituite prevalentemente da una breccia dalla matrice molto compatta. La cavità, in questa parte, continua in discesa, mantenendo la caratteristica forma a meandro, con un andamento sinuoso tipico dei meandri creati dallo scorrere dell'acqua. Il fondo è in forte discesa ed è ricco di clasti e sedimenti di trasporto che riflette l'azione erosiva dell'acqua. Tuttavia, il percorso termina in una strettoia che non lascia intravedere prosecuzioni evidenti e non presenta flussi d'aria.

In questa prima parte della grotta, la matrice del conglomerato che costituisce le pareti, è caratterizzata, in alcuni punti, da tonalità cromatiche particolarmente interessanti: si osservano sfumature rossastre e verdastre, che suggeriscono la presenza di mineralizzazioni locali, un fenomeno



Fig. 15 - Dal fondo del pozzo si può distinguere chiaramente, in alto, l'andamento meandri-forme della galleria superiore (8643/5349Fr).

questo già osservato anche nella vicina Grotta sotto la chiesa di S. Andrea. Inoltre, in questo primo tratto della grotta si può osservare la presenza di alcuni gruppi di concrezioni e particolari forme concrezionali parietali molto interessanti. Su alcuni massi di crollo e clasti di medie dimensioni sono stati rinvenuti anche fossili di gasteropodi quaternari in una matrice argillosa con vari stadi di ossidazione. La roccia delle pareti circostanti, invece, è ricca di frammenti di fossili tipici degli strati calcarenitici del cividalese, derivanti dal disfacimento di antiche scogliere cretacee a rudiste.

Ritornando al pozzo posto vicino all'ingresso, la grotta prosegue con una strettoia che, dopo pochi metri in salita, prosegue con un terrazzino che si affaccia su un pozzo verticale di grandi dimensioni. Il pozzo, inizialmente stretto per i primi 4-5 metri, si allarga improvvisamente, sviluppandosi in profondità per ulteriori 32 metri. Le caratteristiche morfologiche del pozzo sono interessanti, la sezione circolare e le pareti lisce suggeriscono una genesi per percolamento, dove l'acqua che si infiltrava dalla superficie ha modellato progressivamente la roccia. Il tratto iniziale, più stretto, conserva l'andamento sinuoso tipico del meandro osservato nei rami superiori, mentre il resto del pozzo assume una morfologia completamente diversa, probabilmente influenzata da una discontinuità di strato che ha modellato anche il ramo superiore. Sul fondo del pozzo, si trovano accumuli di materiale di crollo e un deposito di argilla, segni della continua azione erosiva e di trasporto esercitata dall'acqua nel corso del tempo. Sulle pareti di questa grotta, inoltre, abbiamo osservato la presenza diffusa di latte di monte. Questa particolare concrezione bianca, composta da cristalli di calcite, è stata osservata sia nei rami superiori, vicino all'ingresso, sia nelle sezioni più profonde, in particolare lungo le pareti del pozzo principale. Il pozzo si chiude completamente al fondo, senza offrire ulteriori aperture evidenti. Tuttavia, lungo la sua parete si aprono due meandri, posizionati a differenti altezze, che rappresentano nuove possibilità di esplorazione.

Il meandro più basso, in particolare, è estremamente stretto e mantiene il consueto andamento sinuoso già osservato nei rami superiori, caratterizzato da frequenti cambi di direzione. Nonostante ciò, la sua pendenza in discesa e la presenza di un flusso d'aria evidente indicano che potrebbe condurre a ulteriori prosecuzioni. La strettezza del passaggio ha però reso impossibile avanzare senza nuovi lavori di scavo: al momento, gli scavi nel meandro inferiore sono ancora in corso.

Bibliografia

- [---], 1982 - *Cavità di notevoli dimensioni a Pulfero localizzata dagli speleologi goriziani*. Messaggero Veneto 26.11.1982, Udine.
- BAGLIANI F. & NUSSDORFER G., 1984 - *Aggiornamenti al Catasto delle grotte del Friuli (dalla 1901 alla 2100)*. Suppl. n. 16 di Atti e Memorie della Comm. Grotte "E. Boegan", pp. 1-52.
- CHIAPPA, B., 1963 - *Holopwa Jama*. In Alto, 52, pp. 45-47.

- CHIAPPA B., 1987 - *La vita nelle nostre grotte*. In: Grotte e Abissi del Friuli, Prov. di Udine ed., pp.17-22.
- COMAR M. & TAVAGNUTTI M., 1983 - *Studio geomorfologico della zona carsica di Montefosca (Pulfero - Prealpi Giulie)*. Atti II Conv. Triveneto di Speleol., Monfalcone 1982, pp. 34-52.
- COMAR M. & TAVAGNUTTI M., 1984 - *La grotta presso la chiesa di S. Andrea (2013 Fr) presso Montefosca. (Pulfero - Prealpi Giulie) Descrizione morfologica*. Atti VI Conv. Reg. Speleol. Friuli Venezia Giulia, Udine 1983, Mondo Sott., n.s., 7, 2, pp. 149-158.
- COMAR M., 1986 - *Speleogenesi nei sedimenti arenaceo-marnosi del cividalese*. Sopra e Sotto il Carso, III, 3, pp. 21-34.
- CUCCHI F. & MARTINUZZI S., 1996 - *Catasto delle grotte del Friuli-Venezia Giulia. Elenco delle cavità per le quali si è proposto interventi di tutela*. In: La Legge regionale sulla speleologia ha trent'anni: i risultati, le proposte per il futuro, num. spec. Quaderni del Catasto Reg. Grotte Friuli-Venezia Giulia, pp. 73-114.
- ETONTI G. & ETONTI M., 1983 - *La coleotterofauna della Grotta di Montefosca*. Speleologia Isontina, notiz. della Federazione Speleologica Isontina, I, 1.
- FERUGLIO E., 1925 - *Le Prealpi fra l'Isonzo e l'Arzino*. Boll. Assoc. Agraria Friulana.
- GASPARO F. & GUIDI P., 1977 - *Dati catastali delle prime mille grotte del Friuli*. Suppl. al n. 16 Atti e Memorie della Comm. Grotte "E. Boegan", pp. 1-116.
- GEI F. & PIVA M., 1997 - *La zona carsica di Montefosca*. In: MUSCIO G. (a cura di), *Il fenomeno carsico delle Valli del Natisone (Prealpi Giulie - Friuli)*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, 9, pp. 147-150.
- GHERBAZ F., 1994 - *Nuove grotte del Friuli. Anni 1986-1988 (dal 4321/2401 Fr al 4599/2600 Fr)*. Quaderni del Catasto Reg. Grotte Friuli-Venezia Giulia, 4, pp. 1-72.
- MUSCIO G., 1987 - *Il Cividalese e le valli del Natisone*. In: Grotte e Abissi del Friuli, Prov. di Udine ed., Premariacco, pp. 47-64.
- MUSCIO G., 1997 - *Elenco catastale delle cavità delle Valli del Natisone*. In: MUSCIO G. (a cura di), *Il fenomeno carsico delle Valli del Natisone (Prealpi Giulie - Friuli)*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, 9, pp. 101-114.
- NICOLI F., 1991 - *Appunti in margine ad alcune ricerche della fauna ipogea delle Prealpi Giulie*. Sopra e sotto il Carso, Notiz. del CRC "C. Seppenhofer", II, 1, pp. 4-12.
- SILVESTRI U., 1975 - *Cinque anni di attività speleologica nell'alto Cividalese (1970-1974)*. Atti del II Convegno di Speleologia del Friuli Venezia Giulia, pp. 35-49.
- SILVESTRI U., 1980 - *Attività nelle valli del Natisone*. Il Carso, Notiziario del Gruppo Speleologico "L.V. Bertarelli", pp. 35-49.
- TAVAGNUTTI M., 1981 - *Contributo alla conoscenza del fenomeno carsico nell'area del Cividalese*. Sopra e sotto il Carso, Notiz. del CRC "C. Seppenhofer", I, n.1, pp. 38-55.
- TAVAGNUTTI M., 1982 - *Il fenomeno carsico esistente nella zona di Montefosca (Pulfero-Prealpi Giulie)*. Atti del V Convegno Regionale di Speleologia del Friuli Venezia Giulia, Trieste 1981, pp. 229-242.
- TAVAGNUTTI M., 1983 - *La zona carsica nei dintorni di Drenchia*. Atti del Convegno Regionale di Speleologia del Friuli Venezia Giulia, Pordenone 9-10 novembre 1979, pp. 141-151.
- TAVAGNUTTI M., 1998 - *Il fenomeno carsico nei terreni flyschoidi della zona di Montefosca (Pulfero - Prealpi Giulie)*. Atti del Convegno "Il Carsismo nel Flysch". Sopra e sotto il Carso, n. 4, 1998, pp. 47-60.
- TAVAGNUTTI M., 2024 - *Tra i boschi di Montefosca alla ricerca dell'abisso inviolato*. Sopra e sotto il Carso, rivista online del C.R.C. "C. Seppenhofer", XIII, 5, pp. 14-16.
- TUNIS G., 1997 - *La geologia delle Valli del Natisone*. In: MUSCIO G. (a cura di), *Il fenomeno carsico delle Valli del Natisone (Prealpi Giulie - Friuli)*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, 9, pp. 35-48.

Maurizio Comar¹

Geomorfologia della zona del Lago Sablici (Carso Goriziano - settore Monfalconese)

1) Centro Ricerche Carsiche "C. Seppenhofer", Gorizia

Abstract. This study examines, from a geomorphological point of view, the area of the Sablici plain, located in the southern sector of the Gorizia Karst. It is a plain, elongated in a NW-SE direction for a kilometer and a half, and on average 200-250 meters wide. It is remodeled by a heavy anthropic intervention, located in the middle of a whole series of limestone hills, whose shapes highlight a decidedly complicated tectonics, of the southern Monfalconese zone.

Riassunto. In questo studio si prende in esame, dal punto di vista geomorfologico, la zona della piana Sablici, situata nel settore meridionale del Carso Goriziano. È una piana, allungata in senso NW-SE per un chilometro e mezzo, e larga mediamente 200-250 metri, in parte paludosa e boscosa e, in minima parte, coltivata. È rimaneggiata da un pesante intervento antropico, situata in mezzo a tutta una serie di rilievi collinari calcarei, le cui forme evidenziano una tettonica decisamente complicata del Carso Monfalconese meridionale, come la Cima Grande, il Montuoso e la Cima Sablici. Sono state prese in esame le cavità presenti nella zona, a cui si è applicato uno studio tramite lo sviluppo di diagrammi in cui si evidenzia lo sviluppo morfologico.

Introduzione

La zona del Lago Sablici (o palude Sablici, come viene più comunemente denominata oggi-giorno) è una piana, allungata in senso NW-SE per un chilometro e mezzo, e larga mediamente 200-250 metri, in parte paludosa e boscosa e, in minima parte, coltivata, compresa fra una serie di rilievi calcarei a morfologia tormentata (vedi elaborazione digitale di figura 1 e 2) del Carso Monfalconese meridionale come la Cima Grande, il Montuoso e la Cima Sablici.

Presenta due soglie, una a Nord-Ovest da cui entra il collettore principale, che la mette in comunicazione con il lago di Pietrarossa, e la soglia a Sud-Est, che la mette in comunicazione con la zona delle Moschenizze, nei pressi del casello autostradale del Lisert. Il Lago Sablici è ridotto ormai ad un canale principale (in gran parte artificiale), in cui si immettono, da Nord, dei canali minori

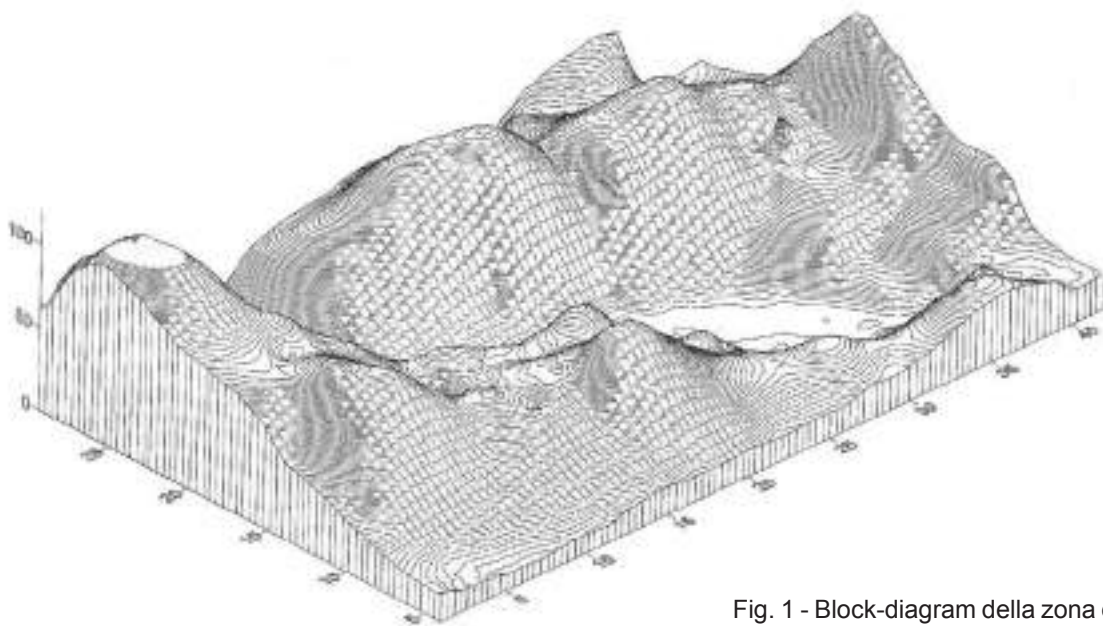


Fig. 1 - Block-diagram della zona di Sablici.



Fig. 2 - DEM della zona in esame con inserita la base CTR 1:5000.



Fig. 3 - Una delle sorgenti dell'area di Sablici.

alimentati da tutta una serie di sorgenti; e a Sud si dipartono altri canali minori, nella cui parte terminale fungono da inghiottitoi. In questi inghiottitoi, impercorribili (si tratta di depressioni nel fondo fangoso, a forma di imbuto, in cui si intravede, nella parte più depressa, blocchi di roccia calcarea di varie dimensioni: in esse si sente sensibilmente la corrente di risucchio - comunicazione verbale dello speleosub Flavio Bacchia di Trieste, anno 1999), vengono assorbite parte delle acque della piana di Sablici. Queste acque sgorgano poi da sorgenti poste a Nord della piana del Lisert (da analisi dei traccianti naturali di queste acque).

Topograficamente l'area ha un'altezza, sul livello marino, che varia da 1.3 a 1.6-1.7 m s.l.m., a parte l'unica superficie coltivata verso SE (nei pressi del casello autostradale del Lisert), posta a 2-3 m s.l.m. È composta principalmente da materiali limoso-argillosi, frammisti e coperti con abbondante materiale torboso, derivato dal disfaccimento dell'abbondante vegetazione palustre e boscosa che cresce rigogliosa lungo le sponde delle canalizzazioni e nella piana stessa. Nella parte coltivata si osserva anche della terra rossa, in parte di probabile riporto.

Infatti, tutta la piana ha subito profondi cambiamenti per fattori antropici. Prima con lo scavo artificiale dei canali d'ingresso e di uscita della zona, a scopo di bonifica. Poi la costruzione dell'autostrada ha dato il colpo finale, stravolgendo completamente la sua morfologia originaria.

Da documenti storici si osserva che la zona di Sablici ha sempre avuto uno sviluppo prettamente paludoso, con varie canalizzazioni naturali e solo saltuariamente era allagato completamente. Nel corso delle abbondanti precipitazioni dell'autunno-inverno 2000/2001 l'intera zona è stata interamente allagata più volte (solo la zona coltivata veniva appena lambita dall'acqua), con l'innescò di altre sorgenti normalmente inattive. Il periodo di smaltimento è piuttosto lungo,



Fig. 4 - A sinistra, carta geologica del Carso Classico; a destra, carta tecnico-geologica a scala 1:5000 della Regione Friuli Venezia Giulia.

al contrario dell'allagamento. Durante un'escursione per studio idrologico, il livello idrico cresceva a vista d'occhio in poco tempo, il che indica basse velocità di scorrimento ipogeo verso Sud e, soprattutto, Sud-Est, contro la maggior velocità di alimentazione da Nord, dovuta a probabile intasamento da detriti vari degli inghiottitoi posti a Sud e di qualche condotto ipogeo localizzati sempre nelle stesse direzioni.

Concludendo, si ha un collettore principale che collega la zona in esame con il Lago di Pietra-rossa a NW e le Moschenizze a SE; nella parte a Nord di questo collettore si immette tutta una serie di canali di varie dimensioni (in gran parte rettificati artificialmente) alimentati da sorgenti anche di discrete portate. Solo alcune sorgenti, durante i periodi di forte siccità, accusavano delle fasi di stagnazione relativa; solo due hanno sempre avuto una discreta portata con la presenza una forte corrente idrica costante nel tempo.

Nella parte terminale, posta a Sud, si ha un altro reticolo di canali, anch'essi in gran parte rettificati artificialmente, in cui vengono inghiottite le acque (vecchia zona degli inghiottitoi; BOEGAN, 1938).

Inquadramento geologico

In base alla carta geologica del Carso Classico, la zona di Sablici si sviluppa nei Calcari di Monrupino del Cenomaniano medio-superiore (Fig. 4 sin). Dalla carta litostratigrafica-strutturale della Carta Tecnica-Geologica della Regione Friuli Venezia Giulia abbiamo in verde i calcari, ocra le alternanze di calcari e dolomie. I sedimenti sciolti (ocra chiaro) sono formati da limi e argille (Fig. 4 dx). Si osservano le numerose dislocazioni e le giaciture tutte poste verso SSW.

Rapporti tra la morfologia epigea/ipogea rispetto i dati tettonici misurati

Una prima analisi è stata fatta sul terreno e, soprattutto, nelle cavità dove sono state eseguite diverse misure su faglie e fratturazioni. Un'ulteriore analisi è stata eseguita direttamente sulla CTR 1:5000 competente, osservando le lineazioni morfologiche identificabili dall'andamento delle isoipse (Fig. 5).

Da questo è stato elaborato un rose-diagram di figura 7 sx, dove si osserva un trend massimo orientato NNE-SSW e trend minimi orientati E-W, NW-SE, NE-SW, WNW-ESE. Un'ulteriore analisi è stata eseguita mediante visione ad uno stereoscopio di foto aeree della zona. Da questo si è elaborata un'altra mappa delle lineazioni da foto aerea di figura 6. Come si deduce dal confronto delle due mappe delle figure 5 e 6, diverse lineazioni sono coincidenti (le lineazioni da foto aerea sono comprese in un'area più ampia). Anche da quest'ultima analisi è stato elaborato un rose-diagram che individua due trend massimi circa N-S e E-W, trend subordinati NW-SE, NNE-SSW, NE-NW, WNW-ESE e uno minimo ENE-WSW (Fig. 7 dx). Come si può osservare tutti i trend coincidono anche se con criteri diversi. Mentre dalle osservazioni sul terreno e sulla



Fig. 5 - Lineazioni morfologiche identificabili dall'andamento delle isoipse (in rosso, su base CTR 1:5000).

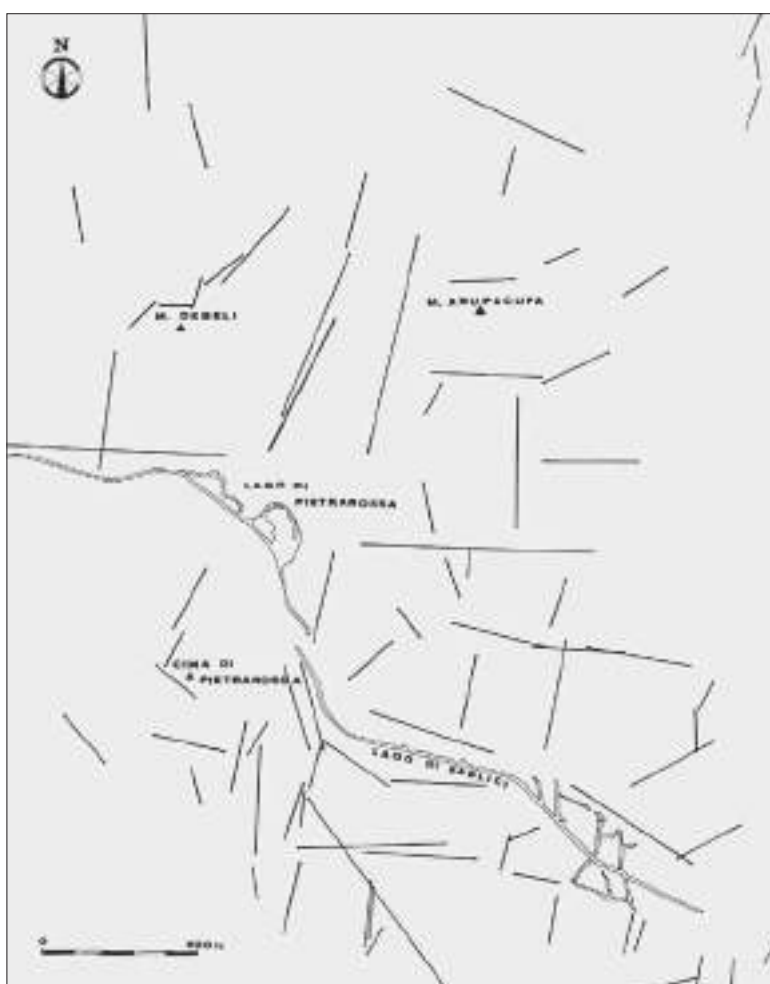


Fig. 6 - Lineazioni osservate da fotointerpretazione di foto aerea.

CTR emergono direzioni preferenziali NNE-SSW (massima percentuale), E-W, NW-SE, dalle foto aeree emergono direzioni preferenziali E-W e N-S (massima percentuale), NW-SE, NNE-SSW (percentuali minori). Queste differenze ubbidiscono a criteri ben particolari, mentre dalle foto aeree si osservano le direzioni tettoniche principali che influenzano la morfologia a grande scala, dall'analisi sul terreno si riscontra invece l'influenza di direzioni tettoniche minori che agisce con meccanismi diversi a piccola scala.

Fig. 7 - A sinistra, diagramma a rosa delle lineazioni interpretate su CTR; a destra, diagramma a rosa delle lineazioni da analisi della foto aerea con stereoscopio.

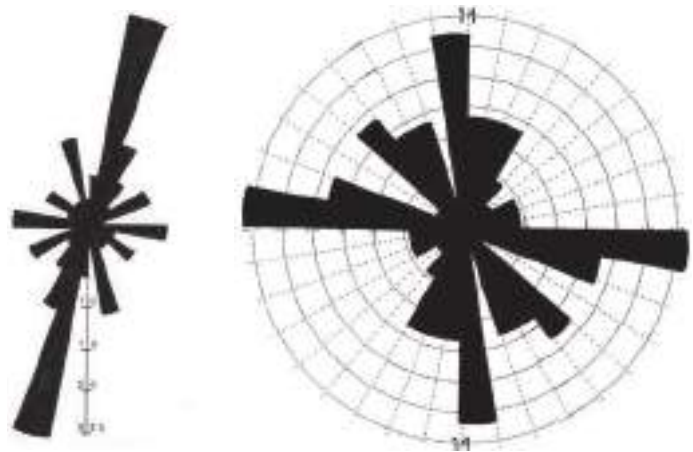
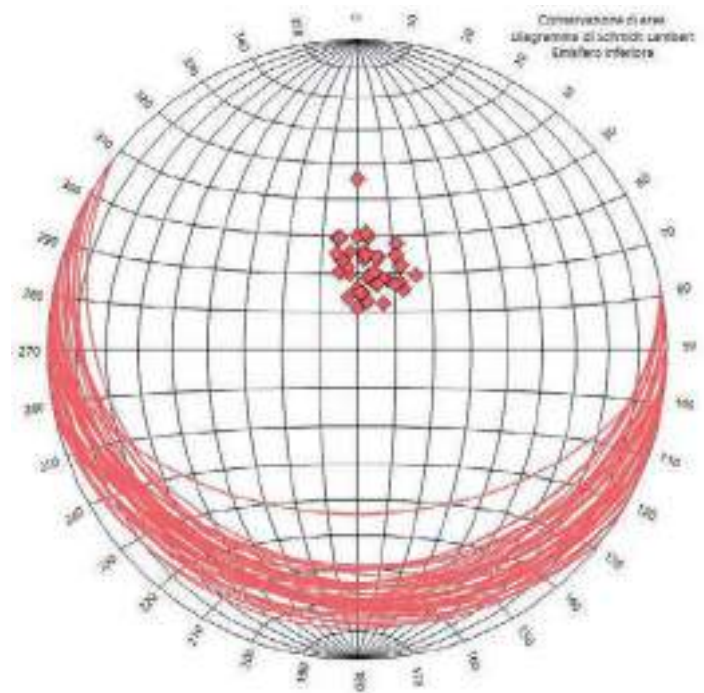


Fig. 8 - Ciclografiche della giacitura della stratificazione su diagramma di Schmidt-Lambert (emisfero inferiore) di 42 giaciture della zona in esame.



Si sono elaborate delle ciclografiche delle giaciture della stratificazione su diagramma di Schmidt-Lambert (emisfero inferiore) di 42 giaciture della zona di studio in figura 8. Da questo si osserva una direzione media orientata NNE-SSW e N-S, immergente verso SSW.

La zona è circondata da tutta una serie di rilievi creando un aspetto ondulato a tutto il territorio, mostrando una morfologia varia e complicata. Questo si osserva dalle elaborazioni tridimensionali create analizzando i dati cartografici della CTR, inerenti gli elementi interessati, di figure 1 e 2.

Idrografia

La zona, come già accennato, è, attualmente, una piana paludosa e boscosa, percorsa da un canale principale, di origine artificiale, con vari canali secondari che si diramano, con varie angolazioni, da e per il canale principale. Purtroppo, tutta l'idrografia principale ha subito un intervento antropico notevole, primo fra tutti la costruzione del tratto autostradale A4, Venezia-Trieste, posto nel bordo superiore della piana. L'idrografia superficiale sui rilievi è completamente assente, a parte il ruscellamento superficiale durante eventi piovosi, soprattutto di una certa rilevanza, e l'innescio temporaneo di piccoli torrenti in impluvi generati dal controllo tettonico.

Solo nella piana palustre si ha una notevole attività idrica con l'affioramento di numerose sorgenti poste nella parte a Nord dell'area. Si tratta di sorgenti e inghiottitoi influenzati dalla situazione tettonica dell'area (Fig. 9). Da analisi dei traccianti naturali (cfr CANCIAN, 1987) la piana di Sablici

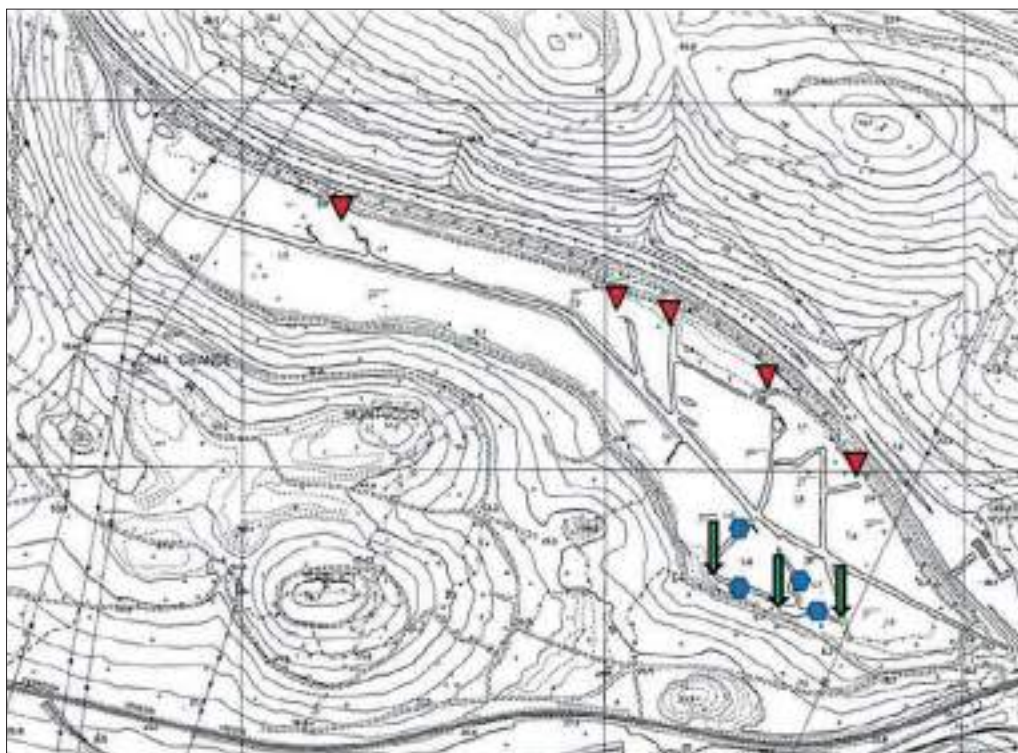


Fig. 9 - Carta con la posizione delle sorgenti principali (triangoli rossi), inghiottitoi principali (frecche verdi) e punti di assorbimento osservati da speleosub (esagoni azzurri).

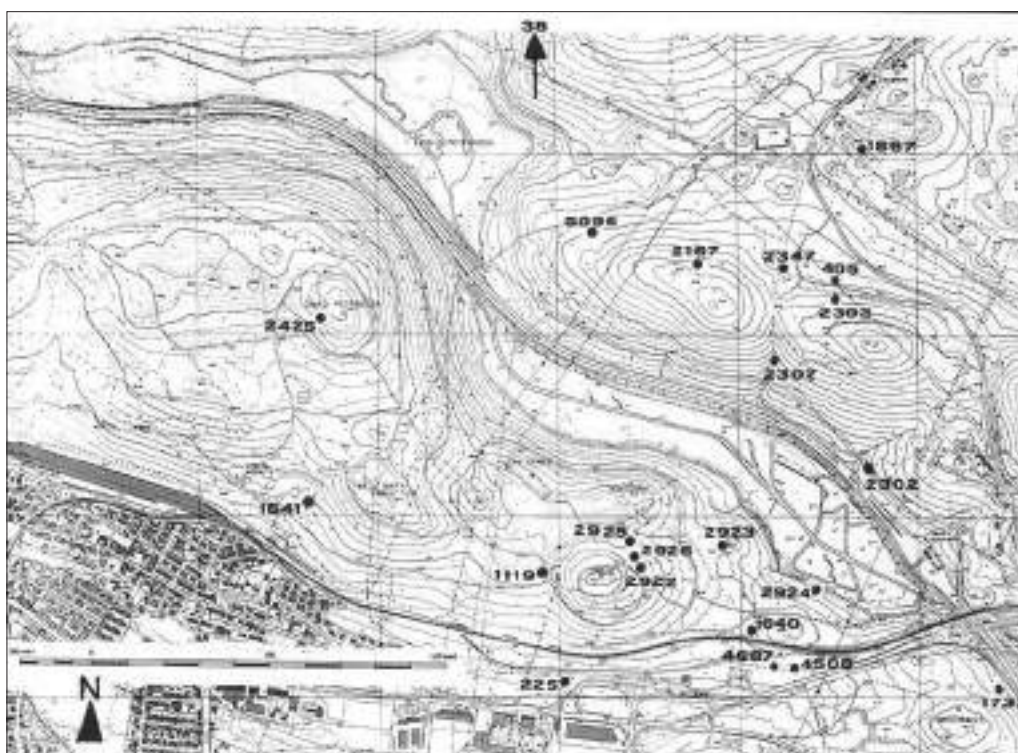


Fig. 10 - Cavità prese in considerazione per l'analisi tramite diagramma di progressione e sviluppo (le grotte sono indicate con il numero regionale).

drena acque provenienti in massima parte dai laghi di Doberdò e Pietrarossa, che proseguono, tramite gli inghiottitoi posti a Sud, ed emergono nella piana del Lisert.

Carsismo ipogeo

La zona presenta un certo numero di cavità (come si osserva in figura 10), di dimensioni contenute, in massima parte verticali di debole profondità, a causa della litologia che, a zone, presenta scarsa carsificabilità (CANCIAN, 1976).

Nel 1988 è venuta alla luce, durante alcuni lavori di sbancamento per la realizzazione del raccordo ferroviario Monfalcone - zona industriale del Lisert, una grotta (Grotta presso la 4512VG) che ha portato alla scoperta di un sistema subacqueo di canalizzazioni attive che è uno dei più estesi di

tutto il Carso Goriziano (MARCHI et al., 1992). Questa cavità drena parte delle acque che da Sablici vanno alla piana del Lisert.

Dall'elaborazione dei dati relativi a tutte queste cavità è stato elaborato un diagramma di progressione e sviluppo totale, nel quale si evidenzia un trend NE-SW (principale), NNE-SSW, NW-SE (Fig. 11).

Conclusioni

Dall'elaborazione di tutti i dati, sia tettonici che morfologici, si osserva che la morfologia e lo sviluppo delle cavità esaminate ubbidiscono ai vari trend tettonici individuati dai rilievi effettuati.

Con una buona analisi statistica dei dati raccolti si possono ben individuare le problematiche morfologiche di un territorio, oltre che determinare come si sviluppa il carsismo.

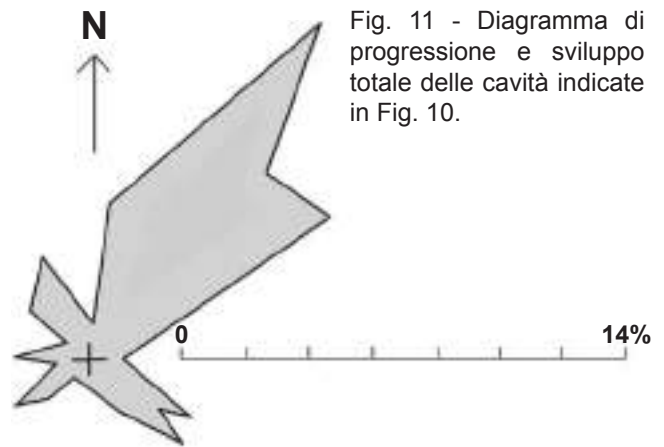


Fig. 11 - Diagramma di progressione e sviluppo totale delle cavità indicate in Fig. 10.

Bibliografia

- AA. VV., 1979 - *Il Carso di Monfalcone*. L'Offset snc, Mariano del Friuli, 140 pp.
- AA. VV., 1984 - *Il Carso Isontino*. Ed. Lint, Trieste.
- BERTARELLI L.V. & BOEGAN E., 1926 - *Duemila Grotte*. Touring Club Italiano, Milano.
- BOEGAN E., 1938 - *Il Timavo. Studio sull'idrografia carsica subaerea e sotterranea*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Serie Geol. e Geof., Mem. II, Trieste, 251 pp.
- CANCIAN G., 1976 - *Il Carso Monfalconese: litostratigrafia, tettonica, speleomorfologia e speleogenesi*. Le Grotte d'Italia, s. 4°, V (1974-75), pp. 5-30.
- CANCIAN G., 1974 - *La geomorfologia carsica epigea nel Monfalconese*. Escursionismo, XXV, 2.
- CANCIAN G., 1977 - *Analisi morfologica delle grotte del Carso Goriziano*. Atti I° Convegno sull'Ecologia dei Territori Carsici, Sagrado (GO).
- CANCIAN G., 1987 - *L'idrologia del Carso Goriziano-Triestino tra l'Isonzo e le risorgive del Timavo*. Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica, 64 pp.
- REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA - *Carta geologico-tecnica digitale 1:5000, Elemento 088152 Monfalcone - Stazione*.
- COMAR M., 1985 - *Controllo tettonico sullo sviluppo delle cavità del Carso Isontino*. La Speleologia nel Monfalconese, Monfalcone.
- COMAR M., MINIUSI D. & MIRIFICO A., 1994 - *Morfologia del Lago di Pietrarossa (Carso Isontino)*. Studi e Ricerche, numero unico 1994, Monfalcone, pp. 78-91.
- CUCCHI F., 1975 - *I diagrammi nello studio delle cavità*. Suppl. di Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan".
- CUCCHI F. & PIANO C. (a cura di), 2009 - *Carta Geologica del Carso Classico italiano*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.
- CUCCHI F., MARINETTI E., MASSARI G. & ZINI L., 2000 - *Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero carsico triestino e isontino*. Le Grotte d'Italia, s. V, 1, pp. 21-31.
- FORNASIR D., 1928 - *Progetto di prosciugamento dei laghi carsici di Doberdò, Pietrarossa, Sablici, e Mucille*. Consorzio per la Bonifica del Lisert - Monfalcone.
- GEMITI F. & LICCIARDELLO M., 1977 - *Indagini sui rapporti di alimentazione delle acque del Carso Triestino e Goriziano mediante l'utilizzo di alcuni traccianti naturali*. Annali del Gruppo Grotte Associazione XXX Ottobre, VI, pp. 43-61.
- MARCHI F., MANTOANI S. & SAURIN E., 1992 - *La Grotta dello Svincolo Ferroviario 5467 VG*. Studi e Ricerche, numero unico 1992, pp. 55-62.
- MARTINIS B., 1962 - *Ricerche geologiche e paleontologiche sulla regione compresa tra il T. Judrio ed il F. Timavo (Friuli orientale)*. Riv. It. di Paleont. e Strat., Mem. 8, pp. 1-200.
- PLACER L., 1981 - *Geologic structure of S.W. Slovenia*. Geologija, 24, 1, pp. 27-60.

TENTOR M., TUNIS G. & VENTURINI S., 1994 - *Schema stratigrafico e tettonico del Carso Isontino*. Natura Nascosta, 9, 32 pp.

VENZO G.A. & FUGANTI A., 1965 - *Analisi strutturale delle deformazioni tettoniche del Carso Goriziano (Gorizia)*. Studi Trentini di Scienze Naturali, sez. A, XLII, 2.

INDICE

Fabio Scoccimarro - <i>Presentazione</i>	pag. 3
Furio Finocchiaro - <i>Presentazione</i>	pag. 5
Franci Gabrovsek - <i>Osservazioni e analisi della propagazione delle inondazioni nel sistema carsico Reka-Timavo / Observations and Analysis of Flood Propagation in the Reka-Timavo Karst System</i> ...	pag. 11
Paolo Manca, Michele Potleca, Tullio Quaia, Luca Zini - <i>Censimento e caratterizzazione delle aree e acquiferi carsici del Friuli Venezia Giulia</i>	pag. 23
Riccardo Corazzi, Rino Semeraro, Louis Torelli - <i>Conclusioni delle ricerche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche 2009-2024 sul Davorjevo brezno (Kras/Carso, Slovenia). Nota informativa</i> ..	pag. 31
Giuseppe-Adriano Moro, Rosa Romanin, Loris Biasizzo, Adalberto D'Andrea, Furio Finocchiaro - <i>Note sull'idrologia della Sorgente carsica La Fontanate di Torlano (Nimis, Ud)</i>	pag. 35
Matteo Monfredo, Stefano Rejc, Rino Semeraro - <i>Nota informativa sulla conclusione delle ricerche sulle acque sotterranee del margine nord-occidentale del Carso isontino (Carso Classico)</i>	pag. 41
Rino Semeraro, Luca Zini, Alice Busetti, Franco Bressan, Chiara Calligaris, Matteo Cavanna, Maurizio Comar, Loretta Crestani, Sergio Dambrosi, Fabio Gemiti, Lorenzo Marini, Tullio Quaia, Marco Restaino - <i>Test di tracciamento delle perdite del Fiume Vipacco nell'acquifero del Carso Classico. Nota informativa</i>	pag. 45
Daniele Pascolo, Stefano Rejc, Rino Semeraro - <i>Conclusioni delle ricerche idrogeologiche nell'area del Campo di Bonis (Prealpi Giulie)</i>	pag. 49
Sergio Dambrosi, Roberto Faggian, Alberto Giorgi, Lorenzo Marini, Marco Mercadante, Matteo Monfredo, Daniele Pascolo, Stefano Rejc, Rino Semeraro - <i>Stato di avanzamento delle ricerche idrogeologiche nel "Progetto Acqua Negra" (Prealpi Carniche). Nota informativa</i>	pag. 53
Bartolomeo Vigna - <i>Perché studiare la circolazione dell'acqua e dell'aria nelle grotte</i>	pag. 57
Renato R. Colucci, Andrea Securo, Costanza Del Gobbo, Paolo Manca, Michele Potleca - <i>Cryo-Karst FVG: un Progetto dedicato alla Criosfera nei Territori Carsici del Friuli Venezia Giulia</i>	pag. 67
Andrea Bussani, Aldo Fedel, Igor Ardeti - <i>Aspetti teorici e osservazioni sperimentali inerenti agli effetti delle maree atmosferiche termiche sulla temperatura di cavità ipogee</i>	pag. 75
Francesco Serafin - <i>Studio quantitativo della dinamica dell'aria nel complesso Abisso dei Cristallini - Grotta dell'Alce</i>	pag. 79
Mario Fabretto, Graziano Cancian - <i>Analisi in spettrometria gamma ad alta risoluzione su alcuni campioni di suoli raccolti in grotte e superfici del settore italiano del Carso Classico</i>	pag. 85
Massimo Vascotto, Alberto Cherti, Carmelo Catania - <i>Trenta anni di misure di radon-222 nella Grotta Costantino Doria: una prima panoramica dei risultati</i>	pag. 91
Jure Tičar - <i>Hidden Waste: Investigating Cave Pollution in Slovenia's Bordering Karst Regions</i>	pag. 101
Franco Gherlizza - <i>Censimento delle grotte naturali della provincia di Trieste interessate da inquinamento, abbandono di rifiuti, ostruite o distrutte</i>	pag. 107
Gregor Aljančič, Magdalena Aljančič, Edgardo Mauri - <i>Contributi alla ricerca, alla conservazione, alla divulgazione culturale del proteo (Proteus anguinus) e del suo habitat vulnerabile: iniziative del Laboratorio della Grotta Tular e dello Speleovivarium / Contributions to Research, Conservation, and Cultural Dissemination of the olm and Its Vulnerable Habitat: Initiatives of the Tular Cave Laboratory and the Speleovivarium</i>	pag. 113
Azzurra Tommasi, Raffaele Bruschi, Marco Restaino, Renata Rozman, Samo Šturm, Borut Peric, Piero G. Giulianini, Alberto Pallavicini, Chiara Manfrin - <i>Grotte transfrontaliere a confronto: uso del DNA ambientale e studio della fauna ipogea, per indagare la continuità idrologica del Reka-Timavo sotterraneo</i>	pag. 121
Benedetta Rigo, Josef Vuch, Alberto Riva - <i>Censimento della presenza di "batteri oro e argento" nelle grotte del Friuli Venezia Giulia</i>	pag. 125
Raffaele Bruschi - <i>Studi ecotossicologici e microbiologici in due grotte carsiche inquinate da idrocarburi (Trieste, Italia) finalizzati allo sviluppo di un protocollo di biorisanamento</i>	pag. 129

Giacomo Canciani, Martina Colautti, Caterina Bearzotti - <i>La fauna cavernicola delle grotte nella Valle di Prentento (Prealpi Giulie meridionali). Nuovi dati</i>	pag. 135
Enrico Merlak - <i>Terre rare (rare earth elements - REE) nelle bauxiti carsiche del Nord Adriatico</i>	pag. 141
Marco Corvi - <i>Il rilievo tra arte e tecnica</i>	pag. 145
Alberto Giorgi - <i>Topografia ipogea e rilevamento geomorfologico in grotta. Una metodologia moderna</i>	pag. 155
Paolo Paganini, Carlo Cebula, Fiorella Bieker, Paolo Manca, Alessandro Pavan, Michele Potleca - <i>Rilievi laser scan e virtual tour fotografici per la valorizzazione del patrimonio speleologico</i>	pag. 161
Paolo Guglia - <i>Rappresentazione georiferita 3D del "Complesso del Timavo". Nuovi strumenti per un rilievo di precisione</i>	pag. 167
Massimiliano Werk - <i>LiDAR e CloudCompare. L'Innovazione nel Sistema di Rilievo delle Cavità Ipogee</i>	pag. 173
Gianni Benedetti - <i>L'Abisso III di Gropada: un mistero lungo 100 anni... e oltre?</i>	pag. 177
Gianni Benedetti, Francesco Serafin - <i>Il Complesso del Monte Croce (Friuli Venezia Giulia)</i>	pag. 185
Alexander Debenjak, Giacomo Canciani, Luca Tringali, Tecla Tripari - <i>Le nuove tecnologie per il rilievo di pozzi non accessibili: il caso dei pozzi artificiali sopra la galleria ferroviaria del Lokavac</i>	pag. 193
Gianni Benedetti, Giorgia Del Bianco - <i>La misteriosa tavoletta della Grotta del Frassino</i>	pag. 201
Maurizio Tavagnutti - <i>Osservazioni sulle particolari forme carsiche nell'area del bacino idrico del Rio Bodrin a SE di Montefosca</i>	pag. 207
Maurizio Comar - <i>Geomorfologia della zona del Lago Sablici (Carso Goriziano - settore Monfalconese)</i>	pag. 221

