

SOCIETÀ ALPINA DELLE GIULIE
SEZIONE DI TRIESTE DEL CLUB ALPINO ITALIANO

ATTI E MEMORIE

della

Commissione Grotte “Eugenio Boegan”

Volume LIV
(2025)

PUBBLICATO A CURA DELLA GROTTA GIGANTE

TRIESTE 2025
ISSN 0391 - 1764

SOCIETÀ ALPINA DELLE GIULIE
SEZIONE DI TRIESTE DEL CLUB ALPINO ITALIANO

ATTI E MEMORIE
della
Commissione Grotte “Eugenio Boegan”

Volume LIV
(2025)

PUBBLICATO A CURA DELLA GROTTA GIGANTE

TRIESTE 2025
ISSN 0391 - 1764

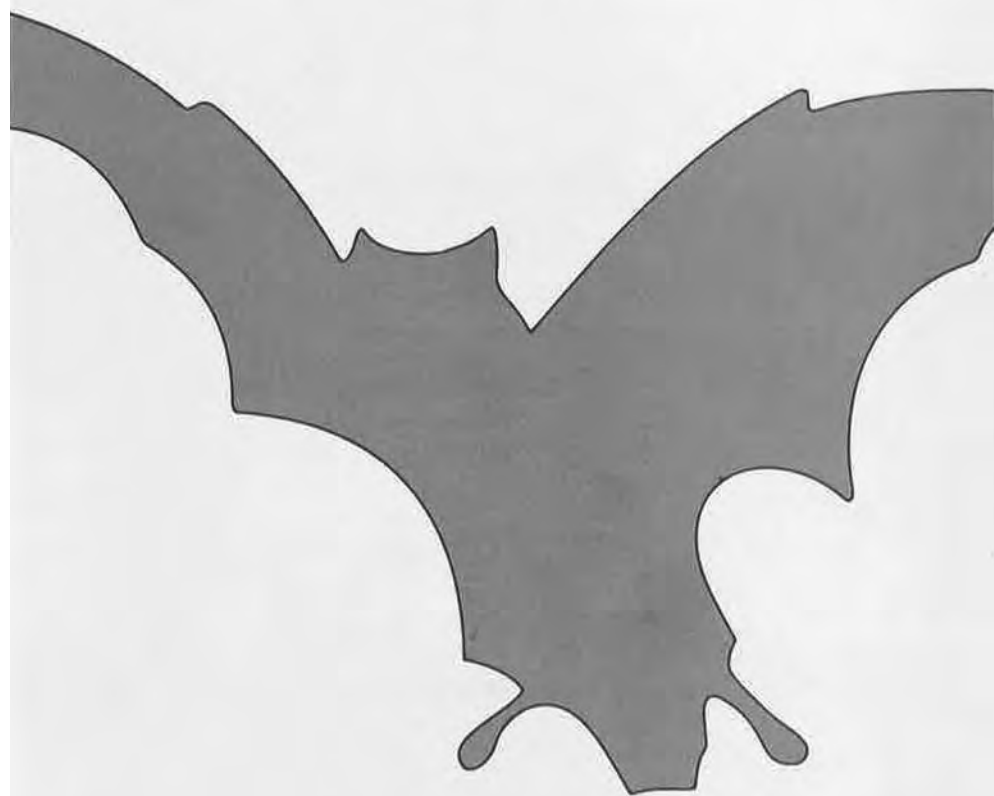


ISSN 0391 - 1764

TUTTI I DIRITTI RISERVATI

Direttore responsabile: Mario Privileggi
Editrice: Società Alpina delle Giulie - Trieste
Redazione: Commissione Grotte "E. Boegan", via di Donota, 2 - 340121 Trieste, Italia
e-mail: boegan@tin.it
Redazione: Enrico Merlak, Pino Guidi, Graziano Ferrari, Alberto Giorgi
Stampato presso Luglioprint - Trieste
Autorizzazione del Tribunale di Trieste n. 333 del 7-12-1966
Trieste 2024

A T T I



1883

Relazione dell'attività della Commissione Grotte "Eugenio Boegan" nell'anno 2024 (142°)

Approvata dai soci CGEB nel corso dell'Assemblea ordinaria del giorno 28 febbraio 2025

ATTIVITÀ

Nel 2024 abbiamo avuto 476 uscite, con un aumento del 42% rispetto al 2023. Nel dettaglio risultano effettuate 324 uscite sul Carso (68% del totale, delle quali 85 per scavo) e 46 nel resto della Regione (il 10% delle uscite totali) di cui 29 sul Canin. Abbiamo poi 24 uscite in altre regioni italiane, 76 nella vicina Slovenia (il 16% delle uscite totali), 4 in Croazia, 1 in Montenegro e 1 in Francia.

CARSO

Come ormai da molti anni gli scavi all'87 VG hanno rappresentato il maggior impegno sul Carso. Nel 2024, diciottesimo anno di lavori, si sono fatte 38 uscite tra scavi e messa in sicurezza della grotta: con allargamento di passaggi ostili e fastidiosi, svuotamento di muretti un po' instabili e pericolosi, cambio delle corde di sicurezza lungo i pozzi e fissaggio di scale in opera in po' instabili e posa di nuove.

Dalla quota di -258 circa, alla quale eravamo giunti alla fine del 2023, sono continuati gli scavi per una quindicina di metri in leggera discesa seguendo una frattura che a volte diventava quasi una condotta fino ad arrivare a -264 circa, da dove un susseguirsi di salti e pozzetti ci hanno portato, verso la fine dell'anno, a quota -290.

A questa profondità, si presentano due rami non troppo distanti, uno più attivo con una fortissima percolazione d'acqua ed uno notevolmente più infangato. In ambedue le parti, sono presenti degli importanti assorbimenti in materiale di deposito (ed argilla). La scelta dove impegnare lo scavo non è stata facile, ma si è optato per il ramo più fangoso ma forse più promettente, anche se leggermente più alto. Qui è presente una maggiore circolazione d'aria e, anche se conta poco, si sente un eco ed un forte rumore di aria o acqua riscontrato recentemente.

Ad oggi il lavoro è stato rallentato da una recente piena (defluita nei giorni successivi), che ha innalzato il livello dell'acqua di 40 metri da quello che dovrebbe essere il livello della falda. Il rilievo non è stato ancora aggiornato, ma contiamo di essere a circa 25 metri dal livello delle acque del Timavo.

La vecchia "Squadra Scavi", stanca ma non doma, ha lasciato il testimone, dopo 18 anni con oltre 700 sabati di presenze, a braccia più giovani ed entusiaste il compito di raggiungere il Timavo sul fondo della 87 VG; i "meno giovani" sono tornati a dedicarsi agli scavi in Carso, alla ricerca di nuove cavità o di prosecuzioni in grotte già note. Le giornate di scavo di questo gruppetto di vecchi soci, anche se non sono state all'altezza di quelle conteggiate negli anni '80 e '90 del secolo scorso, sono state numerose: a Gropada, quindi presso la Grotta del Cibic, ed a Opicina. Gli scavi più impegnativi sono stati a Santa Croce per una decina di uscite, anche se per il momento senza risultati degni di nota e a Prosecco, dove una dozzina di sabati di lavoro si sono conclusi con l'apertura ed il rilievo di una nuova grottina: il Cunicolo presso la Grotta della Mura. Le uscite di fine anno sono state dedicate agli scavi per l'apertura di un possibile secondo ingresso della Grotta dell'Eco, 3476 VG, scavi che proseguiranno anche nel 2025.

Un nuovo pozzo è stato trovato presso Repen (Grotta dei Gatti) che per il momento è profondo una ventina di metri, ma che continua sul fondo con una fessura da allargare. Ripresi gli scavi anche alla Grotta delle Vergini e alla Supernova, dove è stata trovata una prosecuzione delle gallerie superiori che ha rivelato un piccolo ambiente ricchissimo di formazioni calcitiche cristalline ed è stata riattrezzata la via del fondo. In fase di completamento il nuovo rilievo della cavità. Alla Grotta Impossibile è stata attrezzata una risalita che ha permesso il rilievo di una nuova galleria superiore e nella caverna Finocchiaro è in corso di realizzazione un lungo



L'altopiani carsico di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).

traverso in parete, per raggiungere e verificare delle nicchie che potrebbero dare accesso a nuove gallerie.

Per il miglioramento della sicurezza dei percorsi interni, sono continuati i lavori di riarmo e sostituzione ancoraggi in diverse grotte del Carso triestino, mediante la posa di fittoni “resinati” inox Raumer. Iniziativa utile per la fruizione delle cavità “più gettonate” soprattutto per scopi didattici, come corsi d'introduzione alla speleologia e accompagnamento di minori ai corsi di avvicinamento alla speleologia. Le grotte in oggetto, 33 per il momento, si possono identificare sul sito web del “Catasto storico della Comm grotte “E Boegan”, nella sezione NOTE – scheda d'armo disponibile.

Come sempre, sono state numerose le uscite di allenamento sul Carso nelle grotte più note come la Noé, la Plutone, l'Elmo, l'Impossibile, solo per citarne alcune visto che sono state ben 239. Diverse le uscite alla grotta Doria per il monitoraggio ambientale e da ultimo le uscite per il corso annuale di speleologia. Da segnalare l'attività di pulizia e manutenzione delle grotte in Val Rosandra gestite dalla nostra società.

In catasto sono state presentate otto nuove cavità: il Pozzo degli sfiati VG 6743, la Grotta Tasso zero VG 6736 (in collaborazione con Grotta Continua), il Pozzetto presso la Caverna dei vasi VG 6744, la Grottina in Debela Griza VG 6750, il Pozzo a SE del Monte Cocusso VG 6752, il Pozzetto del Monte Cocusso VG 6753, la Grotta della tuta VG 6760 e la Grotticella a S di Monrupino VG 6765.

Cinque gli aggiornamenti di vecchie cavità: il Pozzo 2 presso Basovizza VG 558, il Pozzo presso la stazione di Prosecco VG 4232, la Grotta v Rozicniku 2 VG 5645, la Grotta presso Sagrado VG, 5980 ed il Pozzetto degli sfiati VG 6402.

Continuata anche nel 2024 l'attività di targhetatura degli ingressi in seno al progetto convenzionato tra la Federazione Speleologica Regionale ed il Catasto Speleologico Regionale a cui partecipa anche la CGEB.

CANIN-FRIULI

Durante il mese di agosto sono state effettuate svariate uscite di disostruzione all' abisso Net 24 (abisso del Gamel) dove le esplorazioni del 1998 si erano fermate su un ramo parallelo a -50, che stringeva in un meandro aspirante un bel flusso d'aria. La grotta continua sem-



Davorjevo Brezno. Le indagini idrologiche: sonde, campionamenti e misurazioni (foto CGEB).

pre con pozzi tra i 10 e 20 metri intervallati da corti meandri che però hanno richiesto sempre lavori di disostruzione. Al momento siamo fermi a -120, sempre su un ennesimo meandro da allargare.

Sempre nella zona di Pala Celar, a quota 2200, si è iniziato ad allargare un meandro a -30 metri in una grotta trovata lo scorso anno, dove però la circolazione d'aria si comporta da polmone ed al momento si è preferito concentrare gli sforzi al Net 24. All'abisso del Pero sono stati recuperati

due sacchi di vecchie corde ed attacchi dalla Sala delle Meteore a -420. È stata fatta anche la rivisitazione dei vecchi buchi del Debeljak, D10 e D11, posti vicino al campo a quota 2000, facendoli attrezzare dalle nuove leve dell'ultimo corso. Si è tornati infine in Net 8 per riarmare e rilevare fino -120. I vecchi ricordi erano veritieri e bisognerà allargare vari passaggi visto le dimensioni dei meandri.

Da segnalare la disostruzione dell'ingresso del Pozzo 8 ad E di Sella Mogenza (5035 FR) con conseguente esplorazione e rilievo. Sempre a Cima Mogenza esplorazione di una cavità profonda 50 metri dove una possibile prosecuzione sul fondo potrebbe dar senso ad un tentativo di scavo in meandro.

Un campo a cima del Lago, ultima propaggine orientale del massiccio del Canin, non ha dato i risultati sperati. Viste molte cavità non siglate ma già scese in passato, che però hanno fatto perdere tempo e motivazione. Anche la più promettente, trovata l'anno precedente, non ha dato i risultati sperati. Un'altra cavità degna di nota cela un antico ghiacciaio, ma purtroppo la circolazione d'aria presente si perde tra ghiaccio e ghiaia.

Il campo interno all'Abisso Picciola, programmato per metà settembre, purtroppo a causa del maltempo è saltato. È stata fatta quindi un'unica uscita in giornata la settimana successiva per sostituire le corde sul p.200 ed esplorare una nuova via a meno 450. Anche in questo caso, purtroppo, abbiamo avuto poca soddisfazione visto che il nuovo ramo esplorato a meno 500 si ricollega alla via principale.

Una nuova grotta è stata trovata in prossimità della pista del Canin a Sella Nevea, nella stessa area dove si trova "Magicna Vrata", grotta trovata nel 2019 e che attualmente ha 270 metri di profondità per circa un chilometro di sviluppo. La nuova grotta, battezzata "Mir", è invece ferma a novembre 2024 a -50m circa su un restringimento in un altrimenti alto e fortemente ventoso meandro. Data la posizione è possibile ipotizzare un collegamento con la zona detta "Quimby" dell'abisso Gortani.

Concluso l'obiettivo di esplorare le cavità sul monte Coglians, è stato esplorato un nuovo abisso con ingresso posizionato una ventina di metri sopra il Marinelli e che tramite una finestra a meno 50 ed una sul fondo si collegano, approfondendo la grotta di altri 20 metri. Una terza cavità, anch'essa poco distante, è stata esplorata fin quota -135 dove la grotta termina con una fessura soffiante probabilmente anch'essa collegata al Marinelli. Praticamente si trat-

ta di un'unica grande frattura dove i tre abissi corrono paralleli. In tutti due i fondi un tappo di ghiaia preclude ogni prosecuzione.

Molte le uscite alla grotta in località Douh (Monteprato), ribattezzata Big-One o Bigone, che era stata scesa ed esplorata già negli anni 80. Incuriositi dalla notevole circolazione d'aria e dopo la scoperta in zona della grotta Sara, che ha dimostrato il grande potenziale della zona, ci si è dedicati a questa cavità. Molte le uscite per allargare il meandro dove i primi esploratori si erano fermati; la conformazione a meandro pressoché rettilineo in direzione nord-dest con tratti erosi alternati ad altri molto concrezionati. Son proprio questi a rendere certi punti impraticabili per uno strato di calcite spesso anche mezzo metro, che restringono il passaggio ad una decina di centimetri. Comunque lo sviluppo della cavità è quasi raddoppiato raggiungendo i 200 metri e con una profondità di 50.

Alcune uscite sono state fatte per la manutenzione del Bivacco DVP e per la manifestazione del Nevee Outdoor Festival al rifugio Gilberti dove è stata organizzata la parte dedicata alla speleologia.

Numerose le nuove cavità accatastate: il Cavernone a S del Monte Belepeit FR 5227, la Risorgiva sotto lo Stallo Livinaloz FR 5231, il Riparo sottoroccia a S del Monte Belepeit FR 5249, il Pozzetto nella conca a SE di Casera Val FR 5307, la Cavernetta 2° del Monte Cregnedul FR 5308, il Pozzo 12° a N di Punta Medon FR 5310, il Buco soffiante al Livinal delle Cialderie FR 5311, la Cavernetta 1° del Monte Cregnedul FR 5328, la Grotticella 3° a N di Punta Medon FR 5329, il Meandro 4° presso Pic Majot FR 5331, la Grotticella 1° a N di Punta Medon FR 5332, la Grotticella 2° a N di Punta Medon FR 5333, la Voraginetta a N di Punta Medon FR 5334, il Pozzo 48° a N del Col delle Erbe FR 5339, il Pozzo 49° a N del Col delle Erbe FR 5340, il Pozzo 50° a N del Col delle Erbe FR 5341, il Pozzo 51° a N del Col delle Erbe FR 5343, il Pozzo 52° a N del Col delle Erbe FR 5344, il Pozzo 53° a N del Col delle Erbe FR 5345, il Pozzo 54° a N del Col delle Erbe FR 5346, il Pozzo 55° a N del Col delle Erbe FR 5347, il Pozzo 58° a N del Col delle Erbe FR 5348, il Pozzo 56° a N del Col delle Erbe FR 5350 ed il Pozzo 59° a N del Col delle Erbe FR 5351.

Aggiornamenti portati in Catasto riguardano l'Abisso 2° di Mogenza Piccola FR 1922, dove si è sceso un nuovo pozzo di metri 30 e raggiunta la profondità di m 216, ed il Camino sotto Casera Val FR 2223.

CAVITÀ ARTIFICIALI

Sono state individuate e rilevate anche alcune cavità artificiali: il Sotterraneo di Moggio Udinese e la Galleria 1° e la Galleria 2° presso cima Plagnota (Sella Nevea).

ALTRE REGIONI ITALIANE

Sceso l'Abisso del Monte Cucco al fondo Miliani a -750mt e visitato il ramo dei Gessi dopo Sala Agnese; visitata la grotta Buco Bucone e la Voragine di Boccanera.

Fatta la traversata Fiume-Vento a Frasassi; sempre a Frasassi si è partecipato a una punta esplorativa in un nuovo ramo in risalita che punta all'esterno (dal rilievo mancano 50 metri) e fatta la traversata della Grotta del Mezzogiorno. Visita al ramo dei Rover al Buco Cattivo.

Diverse punte esplorative all'Abisso Farolfi facente parte del complesso del Monte Corchia, nelle Alpi Apuane, in collaborazione con altri gruppi. A novembre è stato scoperto un nuovo pozzo che è stato chiamato pozzo Trieste: *"In onore dei triestini Adriano Balzarelli e Veronika Paulina, primi esploratori del pozzo Trieste oggi festeggiamo la scoperta di un altro pezzo di vuoto dentro la montagna del Corchia"*.

SLOVENIA

Diverse le uscite in Davorjevo Brezno. Sono state fatte delle verifiche nel ramo dei carbonari e presso la base del by-pass alla base della grande caverna dove inizia il ramo finale Susy,

nei pressi della quale è stato sceso un pozzo di 10 metri che chiude; è stato inoltre tentato un passaggio nella grande frana che nasconde tra i suoi massi l'innesto/aggancio con l'ultimo affluente.

Sempre in zona by-pass, presso la volta sommitale è stata raggiunta una vasta nicchia preludio di una galleria fossile di grosse dimensioni, che però non ha dato il risultato sperato.

Invece nell'area intermedia di raccordo tra la risalita e discesa sempre in area By-pass è stato sceso un ultimo pozzo inesplorato che ha dato buoni risultati: il primo di raccordarsi con il lago sifone di uscita del sifone di -280m, il secondo di aprirsi a metà discesa in una condotta percorsa per diversi metri, che continua.

In totale sono stati documentati e/o percorsi circa 200 metri di nuova cavità. Hanno partecipato anche amici speleo di altri gruppi tra cui il Dimnice di Capodistria.

Numerose le nuove cavità trovate nella zona attorno a Golazzo/Golac e portate al catasto sloveno; Brezno 4 med Golacem in Obrovom, Brezno 5 med Golacem in Obrovom, Brezno 6 med Golacem in Obrovom, Razpoka 8 severno od Velike Plesivice, Malo brezno severno od Velike Plesivice, Mala jama 2 severno od Velike Plesivice, Pecina pod Ostriskem sedlu, Brezno Mrtve doline 1, Brezno Mrtve doline 2, Razpoka 9 severno od Plesivice, Razpoka 10 severno od Plesivice, Brezno 3 severno od Plesivic, Brezno 4 severno od Plesivice, Hr 55 (Hrusica), Hr 56 (Hrusica), Hr 57 (Hrusica), Razpoka 11 severno od Plesivice, tutti pozzi profondi mediamente tra i 10 e i 20 metri.

Grazie al freddo ed alla neve tre nuove grotte sono state individuate nella zona di Poljane (Matarsko Podolje), profonde rispettivamente 60, 32 e 20 metri. Nella prima, interessata da una forte corrente d'aria in uscita, una risalita dal fondo porta ad un pozzo stimato una ventina di metri ed il cui ingresso è da allargare, mentre nella seconda un meandro sempre da allargare promette ulteriori prosecuzioni. Tutte le cavità sono il frutto di numerose battute che hanno interessato una vasta parte della Ciceria slovena.

Diversi anche gli aggiornamenti del rilievo; Spodmol na Robu S 863, Jama 3 v Jamnah S 915, Sk 3 (Skadanščina) S 7201, Jama pri Belem gabru S 8848, Razpoka severno od Plešivice S 8168, Pečina pri Ivanjem Gradu S 7415, Jama 1 v Jamcah S 913, Mali Trški ledenik S 916, Jama Cebina S 6167.

MONTENEGRO

I risultati raggiunti durante i sei giorni di presenza sul territorio sono molto interessanti. Nonostante le difficoltà imposte da un terreno altamente accidentato, i sei membri della spedizione hanno attrezzato, esplorato e mappato ben 15 grotte, alcune delle quali di notevole interesse speleologico. Inoltre, sono state condotte numerose osservazioni e misurazioni geologiche coadiuvate da strumenti GIS portatili e focalizzate sulle caratteristiche strutturali e litologiche del territorio.



Grotta Gigante. Stazione Geodetica del Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste. Pendoli gravimetrici (foto CGEB).

Tra le nuove cavità esplorate, sono degne di nota l'Abisso Ledo (profondo 130 metri), la Grotta Prepìh (50m di profondità) e la Grotta Armada (34 metri di profondità e 100 metri di sviluppo). Il Ledo si apre in una profonda ed estesa faglia, chiaramente visibile per circa 150 metri, sul cui fondo, circa 20m sotto la superficie esterna, si apre un grande pozzo di oltre 100 metri di profondità le cui pareti sono in buona parte ricoperte di ghiaccio.

Sia l'Abisso Ledo che la Grotta Armada saranno oggetto di ulteriori indagini in una futura spedizione prevista nel 2025.

GROTTA GIGANTE

Già nel 2023 con il cessare dell'emergenza COVID-19 vi è stato un forte aumento del turismo, sia per la nostra città che soprattutto per la Grotta Gigante. Nel 2024 l'incremento è stato ancora maggiore e ci siamo avvicinati al record storico del 1986.

Tradotta in cifre, l'affluenza è stata di 110.494 visitatori, aumento determinato non solo dall'incremento dell'affluenza dei visitatori "comuni" ma anche da una significativa ripresa del "turismo scolastico", con la presenza di 26.276 studenti, il 24% dell'affluenza complessiva, la maggior parte dei quali hanno fruito anche dei laboratori didattici e/o della torre d'arrampicata.



Per quanto riguarda la provenienza dei visitatori, la maggioranza, circa il 70%, è italiana, seguiti prevalentemente da tutte le nazionalità europee ove padroneggiano i Tedeschi e gli Austriaci, seguiti poi da Cechi, Polacchi, e con numeri minori delle altre nazionalità.

Pur in assenza delle restrizioni dovute alla situazione pandemica ormai alle spalle, anche quest'anno si è cercato, per quanto possibile, di ridurre la consistenza dei gruppi e aumentando in caso di forte affluenza la frequenza degli ingressi in grotta, in modo da assicurare al pubblico un servizio migliore. Memori dell'esperienza acquisita nel periodo pandemico è stata data la precedenza alle visite su prenotazione che permettono una miglior gestione del flusso turistico anche alla biglietteria.

Come ormai consuetudine, l'offerta rivolta al pubblico è stata ampliata con iniziative varie, assodate che la creazione di eventi sporadici, anche se con ridotto numero di partecipanti, costituisce una valida occasione per far conoscere la grotta e creare un passaparola soprattutto attraverso i social media, il che sicuramente incrementa le visite "tradizionali". Difatti alcune manifestazioni, pur non comportando un significativo aumento di pubblico, costituiscono si-



Grotta Gigante. Stazione Geodetica del Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste. Pendoli gravimetrici (foto CGEB).

curamente un buon veicolo di pubblicità. Queste manifestazioni sono state distribuite durante tutto l'arco dell'anno, ma prevalentemente in bassa stagione, per incentivare l'attività della grotta in tali periodi:

- Il tradizionale appuntamento con la “Befana in Grotta Gigante” il 6 gennaio;
- La manifestazione “Babbo Natale e lo Schiaccianoci” con la collaborazione dell'Associazione Anathema teatro;
- La manifestazione “ItinerDante - Siamo Inferno”, con la collaborazione dell'Associazione Anathema teatro;
- L'evento “Drum Circle”, con la collaborazione dell'Associazione Esibirsi - Ritmo Centro”;
- Gli eventi “Meditazioni” (comprendenti “Bagno di Gong”, “Bagno di tamburi” e “Yoga & sound”), con la collaborazione dell'Associazione Il silenzio interiore;
- L'evento “Odissea”, con la collaborazione di “Associazione Anathema teatro”;
- Le degustazioni “Cave & Wine”, con la collaborazione del vicino ristorante Dom Bistrot;
- In base ad accordi di collaborazione con l'associazione Opera Viva, nell'ambito del progetto “Quattro passi sotto e sopra”, il 20 giugno abbiamo ospitato un concerto eseguito da un quintetto di ottoni del Conservatorio G. Tartini di Trieste;



- In occasione della “Barcolana 56”, l’8 ottobre, su proposta degli organizzatori della manifestazione, è stato ospitato gratuitamente un concerto di beneficenza del fisarmonicista Mark Hatlak;
- Il 10 novembre, organizzata dal gruppo Corsa in Montagna della SAG, si è tenuta la competizione podistica “Trail della Grotta Gigante”, un’evoluzione della tradizionale “Crono-traversata del Maestro”, il cui percorso, oltre a comprendere l’attraversamento della grotta, si è snodato per complessivi 16 chilometri con 600 metri di dislivello lungo carrarecce e sentieri all’interno della Riserva Naturale del Monte Lanaro; l’evento ha avuto il supporto logistico di diversi soci della CGEB e del personale della Grotta Gigante.

Attività didattica

La ripresa del “turismo scolastico” ha avuto una significativa incidenza sull’attività della struttura. Per ampliare e migliorare l’offerta didattica, grazie al grande spirito d’iniziativa del personale, nei periodi di bassa affluenza di pubblico, sono stati predisposti nuovi laboratori e perfezionati quelli esistenti.

Pubblicità - sponsorizzazioni - ufficio stampa

L’aumento dell’attività della struttura e la conseguente maggiore disponibilità economica ha consentito quest’anno di investire maggiormente nelle attività promozionali, che sono state:

- ristampa delle brochure in quattro lingue con testi e grafica realizzati dal nostro personale e distribuite sempre dagli stessi in diversi info point regionali;
- aggiunta di un’inserzione pubblicitaria a piena pagina su un numero della rivista “Turisti a Trieste”, periodico che prevede 4 uscite l’anno e viene distribuito gratuitamente presso varie strutture ricettive locali;
- proseguimento della pubblicità sugli autobus cittadini della Trieste Trasporti, consistente nell’applicazione di una gigantografia sulla fiancata di tre mezzi circolanti;
- distribuzione delle nostre brochure alle maggiori fiere del settore;
- mantenimento di diverse convenzioni con strutture ricettive del territorio, agenzie viaggi ed aziende varie di carattere turistico.

Non si è invece partecipato in via diretta ad alcuna manifestazione fieristica del settore, ma grazie alla convenzione con “Convention & Visitors Bureau Trieste” siamo stati degnamente rappresentati ai principali eventi.

L’attività promozionale è stata inoltre concentrata sul web e sui social network, con una continua ed opportunamente calibrata azione sugli strumenti, anche in concomitanza degli eventi organizzati; metodo che ha riscosso un tangibile successo, documentato dalle numerose recensioni positive e condivisioni su Facebook e dal sold-out di tutti gli eventi organizzati.

Ricerca

Sono continuate, a cura di nostri soci, diverse attività di ricerca che coinvolgono ormai da anni la Grotta Gigante:

- studio della consumazione delle rocce carbonatiche e dell’accrescimento delle stalagmiti anche in virtù della collaborazione tra CGEB e Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell’Università degli Studi di Trieste.
- gestione della Stazione di Osservazione Meteorologica del Carso in collaborazione tra SAG-CGEB, ARPA FVG, Protezione Civile FVG e CNR.
- collaborazione tra SAG e FESN per la registrazione di eventi sismici tramite la stazione FESN allestita nel seminterrato del Centro Visitatori della Grotta Gigante.
- collaborazione tra SAG e Dipartimento di Scienze Chimiche e Farmaceutiche dell’Università degli Studi di Trieste per lo studio del particolato sottile di origine vegetale nello spazio retrostante il Centro Visitatori della Grotta Gigante.

Interventi manutentivi

In autunno inoltrato, con il calo della stagione turistica, sono stati avviati i lavori di pavimentazione del piazzale adibito a parcheggio per i visitatori con uno speciale calcestruzzo drenante. Per quanto riguarda l'impianto elettrico, oltre alla consueta manutenzione ordinaria, si è proceduto con la sostituzione della maggior parte dei proiettori con apparati a led che oltre a ridurre i consumi energetici, consentirà, a sostituzione completata, di parzializzarne l'accensione (a zone) sia per creare effetti luminosi che per limitare il fenomeno della lampenflora; per combattere tale fenomeno è stato incrementato il numero di lampade germicide UVC.

Terminata la ristrutturazione dell'edificio ex-Milic, parte della sottostante cantina è stato adibito a magazzino dei materiali della scuola di speleologia "Carlo Finocchiaro"; la restante parte è stata adibita a deposito del materiale logistico destinato alle attività conviviali.

Museo scientifico speleologico

Grazie alla preziosa disponibilità del Gruppo Speleologico Lavis (S.A.T. di Trento), è proseguita l'esposizione delle preziose stampe su alluminio di lastre fotografiche digitalizzate ottenute in prestito; le immagini provengono dall'archivio del compianto socio Antonio Iviani – Ivancich, attivo nella prima metà del secolo scorso e valente fotografo nonché speleologo, botanico e naturalista. Le stampe, documentano l'attività della Commissione negli anni '30, le più importanti esplorazioni di quel periodo ed i lavori di costruzione dei percorsi turistici nelle Grotte di San Canziano.

Per commemorare i 40 anni dalla scomparsa di Carlo Finocchiaro, nel 2023, era stata realizzata, a cura di soci della CGEB, una piccola mostra composta da 11 pannelli illustranti una sintetica biografia del "Maestro", vista l'importanza dell'iniziativa, l'esposizione proseguirà sino a metà 2025.

STUDI E RICERCHE

Davorjevo brezno

Sono state recuperate le 3 sonde CTD-Divers, presso i stramazzi in Tihe Vode, meandro Veneziano e Susi i cui dati sono stati analizzati. Sono stati effettuati gli studi comparativi e complementari con l'acquisizione dei dati meteo delle stazioni di interesse attraverso i quali viene calcolata la piovosità, l'evapotraspirazione e l'infiltrazione efficace ed è stato effettuato il confronto per l'individuazione di eventuali correlazioni tra i principali parametri chimico/fisici delle acque sotterranee e superficiali. Nell'ambito del progetto, è stato redatto un articolo inviato ed accettato al prossimo congresso mondiale di speleologia che si terrà in Brasile nel 2025. Per motivi di spazio a disposizione, il lavoro, intitolato "Geology, geomorphology and hydrogeology of the Davorjevo brezno cave, Classical Karst", rappresenta solamente una sintesi delle ricerche effettuate ed è in corso la stesura di un articolo più approfondito, da parte dei medesimi autori.

Sono state effettuate numerose uscite nella cavità per il recupero di dati geomorfologici utili allo studio della morfologia ipogea della cavità e alle considerazioni speleogenetiche utilizzando una nuova tecnica di registrazione dei dati basata su dispositivo mobile con app QField, foto e video. È stata anche impostata una risalita in artificiale da portare a termine e la verifica della fattibilità dello sblocco del sifone al termine della galleria del ramo dei Carbonai.

Sono state effettuate numerose ricognizioni esterne per completare il quadro geologico, geomorfologico e idrogeologico della zona, anche con misure di portata dei torrenti (dati referenziati su GIS).

Stazione meteorologica della Grotta Gigante

Giornalmente vengono effettuate le letture di temperatura, umidità, piovosità ecc. presso la capannina climatologica posta presso l'ingresso della Grotta Gigante e subito inviati al

responsabile per la loro archiviazione, anche per poter monitorare in questa zona del Carso come il clima stia cambiando.

Dissoluzione dei calcari

L'attività di ricerca e studio è proseguita durante tutto il 2024. Sono continuate la misurazione della dissoluzione carsica ad opera degli atmosferici sia sui campioni della stazione presente presso la Grotta Gigante gestita dalla CGEB che sugli affioramenti rocciosi nell'area attorno alla grotta. I risultati sono stati di grande interesse in quanto, a causa della continua variabilità delle precipitazioni dovute ad un clima in continua mutazione, dove si passa da periodi di scarsa piovosità alternati a dei periodi più piovosi, questo comporta una continua variabilità dei valori di dissoluzione e quindi di abbassamento della superficie carsica che in alcuni periodi si sono più che dimezzati rispetto ai valori rilevati negli anni precedenti ed altri con valori in linea con gli anni precedenti.

Il lavoro di studio è continuato anche all'interno della Grotta Gigante, con la misurazione della crescita di 5 stalagmiti campione nonché sulla dissoluzione del calcare sulle pareti della caverna a causa ed effetto della condensazione dell'aria. Ed anche durante questa raccolta di dati si è osservato una netta diminuzione della velocità di crescita di tutte le stalagmiti in esame sempre a causa della continua variazione della piovosità. Solo su 2 stalagmiti, dove lo stillicidio ha continuato in maniera piuttosto abbondante in particolar modo nei periodi di maggior piovosità, è stata rilevata una crescita in 1 anno di ben 1 mm nella stalagmite S3, mentre sulla stalagmite siglata S4 è stata rilevata una crescita di ben 1,5 mm anno.

Misure sulla dissoluzione dei calcari sono state eseguite pure in Istria alla stazione posta presso la grotta di Baredine (Parenzo). La piovosità media in Istria è inferiore al quella della zona della Grotta Gigante ed anche in questo caso sui 4 punti di misura si è rilevata una dissoluzione nettamente inferiore rispetto agli anni precedenti.

Un grosso problema si sta presentando sui vari campioni dove vengo effettuate le periodiche misure per la crescita spontanea di licheni e muschi che vanno a coprire le superfici calcaree. Fenomeno questo probabilmente legato all'aumento del tasso di umidità medio ed all'aumento delle ore di sole. Questa spontanea copertura del calcare rende difficile la misurazione della dissoluzione ma attualmente si pensa di non intervenire nella pulitura delle superfici calcaree ma lasciare che il fenomeno evolva naturalmente per vedere in futuro quali cambiamenti potrà portare alle superfici stesse.

Altri progetti

Sono stati digitalizzati 3546 dati storici di temperatura dell'aria da pubblicazioni Atti e Memorie riguardanti la Grotta di Padriciano, l'Abisso dei Cristalli, la Grotta Costantino Doria e la Grotta Gigante. I dati sono stati pubblicati sul foglio monitoraggi del progetto Underground Climate Change.

Sono stati installate quattro termobarometri alla Grotta di Padriciano (12 VG) per l'osservazione delle Termoscillazioni di marea al fine di uno studio approfondito del fenomeno.

È stato avviato un nuovo progetto triennale di ricerca sulla circolazione dell'aria in cavità usando il Radon come tracciante naturale e sull'andamento della percentuale di CO₂ nell'aria al variare delle condizioni meteorologiche.

SPELEOBOTANICA

Le investigazioni e le analisi relative agli aspetti speleobotanici sono proseguite, con buona frequenza, anche nel corso del 2024. E, da consuetudine ormai comprovata, si sono preposte le indagini sulla flora e sulla vegetazione inerenti le cavità del Carso triestino. A tale scopo, sono stati rivisitati, in modo quanto più acritico possibile, alcuni fra i più classici ipogei dell'Altipiano, dalla configurazione baratroide, ad ampio pozzo od a voragine e, di norma, a copiosa e

fiorente vegetazione. Talvolta si sono attuate, a distanza d'anni, nuove indagini e ricerche sulle entità ivi presenti, commisurandole con quelle rilevate precedentemente, in modo da poter porre in evidenza eventuali difformità o discordanze nelle comparazioni. Così l'attenzione è stata particolarmente indirizzata ad alcune cavità presenti sia nelle zone di Ferneti, sempre prodighe dal punto di vista speleovegetazionale, che in quelle gravitanti le località di Basovizza, Gropada ("Pignatòn") e Trebiciano. Non trascurando comunque i territori di Gabrovizza (Noé, Ercole, Orso), Bristie (pozzi e particolari cavità baratroidi), Sales (Pozzo dei Colombi), Samatorza (grotta Azzurra ed altre in zona), Precenico, Ceroglie e Malchina. Inoltre, nell'ambito delle ricognizioni effettuate sul Carso più nascosto e precedentemente poco visitato, sono state localizzate ulteriori grotte, alcune delle quali piuttosto interessanti e promettenti sotto l'aspetto vegetazionale. Qualcuna ha svelato, soprattutto all'imboccatura o nei primi metri di profondità, la presenza di entità botaniche infrequenti, rappresentate per lo più da qualche inaspettata Pteridofita (ad esempio, *Polystichum setiferum*, *Asplenium onopteris*, *Polypodium australe*). Queste specie, del tutto assenti od estremamente rare sul Carso triestino sino a alcuni decenni addietro, si sono ultimamente via via insediate e, con buona probabilità, in seguito alla variazione climatica in atto. Tipiche attestazioni di tale cambiamento sono pure le progressive diffusioni di *Cystopteris fragilis*, *Polypodium vulgare* e di *Dryopteris filix-mas*, presenti ora sull'Altipiano ove s'è notata una maggior espansione degli ambienti boschivi.

In seguito alle indagini effettuate in quest'ultimi anni, s'è potuto inoltre riconfermare quanto già posto precedentemente in rilievo: vale a dire che anche le anguste e limitate imboccature d'ipogei, a prima vista trascurabili e quasi d'accantonare, sono in grado di rappresentare, per i microclimi che vi si possono mirabilmente insediare, degli interessanti ambienti per lo sviluppo e la protezione di specifiche entità che, di norma, si distinguono nell'ambito della flora cavernicola.

L'attuale situazione speleobotanica, relativa alle cavità carsiche triestine rivisitate, implementate ed aggiornate, è costantemente in fase di studio; essa appare peraltro in soddisfacente ed avanzato stato di conoscenza e potrà essere obiettivo di un prossimo contributo suppletivo per la disciplina in oggetto.

Sono pure proseguite, anche se a cadenza più ridotta, le ricerche sulla speleoflora di alcune tipiche cavità che s'aprono nel Carso monfalconese ed isontino, rilevando pure in esse qualche buona indicazione botanica. Alcune visite sono state altresì effettuate in ipogei presenti nella zona prealpina ed alpina regionale, soprattutto pedemontana; il tutto corredato da rilievi vegetazionali, dalla raccolta di reperti di studio e, com'è prassi, dall'assunzione di specifico materiale fotografico. In alcuni casi n'è emerso qualche inatteso e significativo ritrovamento botanico, atto ad implementare sia i prossimi aggiornamenti della "Flora del Friuli Venezia Giulia" di recente pubblicazione (2023) che indispensabile per la realizzazione del futuro Atlante Iconografico Regionale. Permane però frammentaria la situazione della speleoflora di tali ambienti, ancora da indagare ed analizzare, sperabilmente con maggior costanza e con uno studio più assiduo ed accurato.

Sono pure continuate, seppur in modo non proprio regolare, le visite a cavità slovene, presenti in territori situati preferibilmente a breve distanza dal confine di Stato. Ne sono state visionate alcune piuttosto algide, nel corso di tutto l'anno, e di particolare interesse speleobotanico, ubicate nei dintorni di Skadanščina, Obrov, Poljane, ed appartenenti alla Valsecca di Castelnuovo/Matarsko Podolje o, anche, nel territorio Postumiese e, in quello più vicino al Confine di Stato, di San Canziano. Alcune incursioni sono state mirate a grotte del ghiaccio aprentesi nella zona del Nanos e della Selva di Tarnova/Trnovški Gozd.

PUBBLICAZIONI

Mentre prosegue, ancorché saltuaria, la collaborazione di alcuni nostri soci con le riviste on-line Cronache ipogee e Sopra e sotto il Carso e con quelle nazionali speleologiche, quali

Speleologia, e alpinistiche Alpi Giulie, Rivista Mensile del CAI, Alpinismo Triestino, lo sforzo pubblicistico sociale maggiore è da sempre concentrato sulle due nostre pubblicazioni a stampa: Atti e Memorie e Progressione. Pubblicazioni che possono essere considerate il fiore all'occhiello non solo della nostra Commissione Grotte ma anche dell'Alpina.

Atti e Memorie

Atti e Memorie, che con il volume 53 ha ben superato i sessant'anni di vita, si presenta sostanziosa sia come dimensioni – 140 pagine – sia come contenuti: otto elaborati, di cui due in inglese, frutto del lavoro di una ventina di Autori che hanno affrontato temi quali l'idrologia, la geologia e ed il carsismo, l'archeologia, la climatologia e la biospeleologia. Dell'importanza che ha raggiunto nell'ambiente specialistico questa nostra rivista – che nella sua lunga vita ha visto avvicinarsi sulle sue pagine più generazioni di speleologi – fanno fede gli otto istituti scientifici e culturali cui si riferiscono i firmatari di questi lavori.

Progressione

Progressione, dopo il corposo numero dedicato alla memoria di Carlo Finocchiaro, per trent'anni esemplare nostro presidente nonché indimenticato Maestro di vita per quanti lo avevano conosciuto, il fascicolo numero 70 è stato nuovamente dedicato all'illustrazione della nostra attività. Illustrazione che ha coinvolto quasi due dozzine di Autori che hanno parlato del Carso, presente con cinque contributi, delle spedizioni all'estero, quattro contributi fra cui spiccano la trentina di pagine sulla missione in Paraguay, e quindi didattica, ricerca e tecnica, Grotta Gigante. Cui si aggiungono, oltre alle notizie sulle partecipazioni a Congressi e Convegni e sulle novità esplorative nella regione, anche il ritorno della Narrativa.

Chiudono le 142 pagine di questo corposo fascicolo la rubrica Bibliografia (presentate oltre due dozzine di stampati, fra periodici e monografie) e la – purtroppo – immane parte dedicata al mesto ricordo di quattro amici, sodali e non, che ci hanno recentemente lasciato.

Bibliografia

La bibliografia occupa uno spazio non secondario nell'ambito degli studi e delle ricerche speleologiche, come provano i vari repertori bibliografici internazionali come quello curati dall'Unione Internazionale di Speleologia, sia da singoli organismi nazionali e societari.

La Commissione Grotte, da sempre attenta a questo settore di nicchia (possiamo ricordare il primo compendio pubblicato nel 1897 su Alpi Giulie e quello ponderoso di Parona, Sacco e Battaglia del 1923 da cui E. Boegan aveva poi tratto un fascicolo contenente tutti i suoi scritti), ha già dall'era Finocchiaro pianificato la realizzazione di una bibliografia dedicata alle grotte ed al fenomeno carsico della Venezia Giulia. Questa ponderosa ricerca – durata vari decenni – ha avuto il suo primo esito con la pubblicazione nel 2020, sugli Atti e Memorie 49 del Saggio di bibliografia speleologica della Venezia Giulia. Parte prima: Inizi – 1915. La raccolta ed elaborazione dei dati per la seconda parte, 1916 – 1945, è finalmente giunta a termine ed il materiale (si tratta di oltre 1200 voci bibliografiche), opportunamente digitalizzato, è pronto per la consegna alla tipografia, per farlo uscire come supplemento di Atti e Memorie.

Il programma si è nel tempo sviluppato ed oggi prevede ulteriori tre parti: 1946-1973; 1974-2000 ed infine 2001-2025, per cui in questo campo le ricerche proseguono: ad oggi sono oltre 2500 le schede per le prime due nuove tratte, mentre sono già più di 3000 le voci raccolte per la quinta e ultima serie.

Un lavoro notevole che sta raccogliendo ottenendo apprezzamenti da studiosi e specialisti e che ci si augura possa essere completato così come pianificato.

CONVEGNI, CONGRESSI, ATTIVITÀ DIVULGATIVA

Quattro passi con lo sguardo all'inghì - 23/05/2024

In collaborazione con l'Associazione culturale Opera Viva sono state accompagnate quattro sezioni dell'Istituto Nautico di Trieste alla scoperta del territorio carsico di Monrupino, con particolare attenzione a morfologia, archeologia e leggende legate all'ambiente ipogeo.

Nevee Outdoor Festival – Rifugio Gilberti 21/23 luglio 2023

Anche quest'anno nostri soci hanno organizzato la parte speleologica della manifestazione che ha avuto, come gli anni precedenti, una consistente partecipazione di giovani interessati a conoscere il mondo delle grotte nella zona del Canin.

Da segnalare poi la partecipazione agli stage del progetto SpeleoDentro a Pordenone e sui Piani del Tivano e la Lezione di carsismo sempre per il progetto SpeleoDentro.

SITI WEB

Anche nel 2024 è continuata la pratica di trasformare in pagine WEB i principali articoli di Progressione, dove la spedizione in Paraguay del 2023 occupa in larga parte il volume numero 70. Dati questi utili non solo ai fini dei finanziamenti regionali ma anche quale riscontro delle numerose attività che compongono il bilancio sociale della SAG.

Nel 2024 sono stati pubblicati il numero 70 di Progressione e il numero 53 di Atti e Memorie liberamente scaricabili, 19 articoli WEB, di cui 8 come News delle attività della Boegan.

La prevista procedura di compilazione digitale del libro delle uscite da parte dei soci non ha dato molto riscontro e solo pochi sono i soci che la hanno utilizzata anche se in misura maggiore rispetto al lancio avvenuto nel 2023. Quest'anno 35 sono state le registrazioni fatte rispetto alle sole 3 del 2023 e ciò denota un certo interesse dei soci per questa procedura che però deve ancora andare a regime.

Su suggerimento di alcuni soci, la Home page è stata modificata grazie l'intervento del socio Giacomini per dare maggior risalto alle nostre riviste e favorire così l'accesso ai vari link soprattutto tramite l'interfaccia desktop.

Nel 2024 è continuata incessante la digitalizzazione di testi e volumi sulla storia e sulle ricerche speleologiche andando ad aumentare la ricca biblioteca virtuale con 31 nuovi documenti.

La videoteca agganciata a file pubblicati sul WEB – Youtube ora raccoglie 123 link che documentano le visite alle grotte ricercabili per nome o numero catastale.

Nel corso del 2024 il sito è stato visitato da 89.417 visitatori che hanno “sfogliato” ben 149.092 pagine, numeri in leggera crescita rispetto l'anno precedente. Il sottodominio del nostro archivio storico fotografico ha avuto 2.424 visitatori con 7.802 pagine viste. Relativamente a questa area del sito decisamente obsoleta, nel mese di dicembre 2024 un gruppo di lavoro ha prodotto una analisi tecnica dettagliata per la sua totale per un preventivo di costo ai fini della sua innovazione che verrà attuata nel corso del 2025.

La Boegan è presente, in linea con i numeri del 2023, anche sui social grazie ad alcuni soci e alla dipendente Vertovese che nel 2024 ha postato:

- Sul canale Twitter della SAG 8 post con 344 followers
- Sul canale Instagram 9 post con 1397 followers
- Sul canale Facebook 15 post con 5891 followers che hanno lasciato 503 like
- Sul sito SAG dove sono state pubblicate 12 pagine dedicate alla Boegan quali NEWS di attività

Il sito del *catasto storico delle grotte*, www.catastogrotte.it, e annessa emeroteca, nel corso del 2024 è stato oggetto di un importante aggiornamento dei dati grazie al



lavoro svolto da un volontario del Servizio Civile che ha operato incessantemente da maggio a tutto dicembre riuscendo a digitalizzare e caricare a sistema ben 1.292 cavità provenienti dall'archivio cartaceo ex VG (ora in Slovenia e Croazia) oltre a 191 revisioni di grotte già a sistema che sono state sistemate e/o implementate con i rilievi e le descrizioni storiche. Considerato che il volontario terminerà il suo incarico a maggio 2025 senza riuscire a completare la digitalizzazione dell'archivio grotte ex VG, visti gli ottimi risultati conseguito fino ad oggi, si valuterà l'opzione di continuare questa collaborazione anche dopo la scadenza del servizio civile con altre forme contrattuali di tipo privatistico da individuarsi nei tempi e modi opportuni al fine di completare il lavoro in via definitiva.



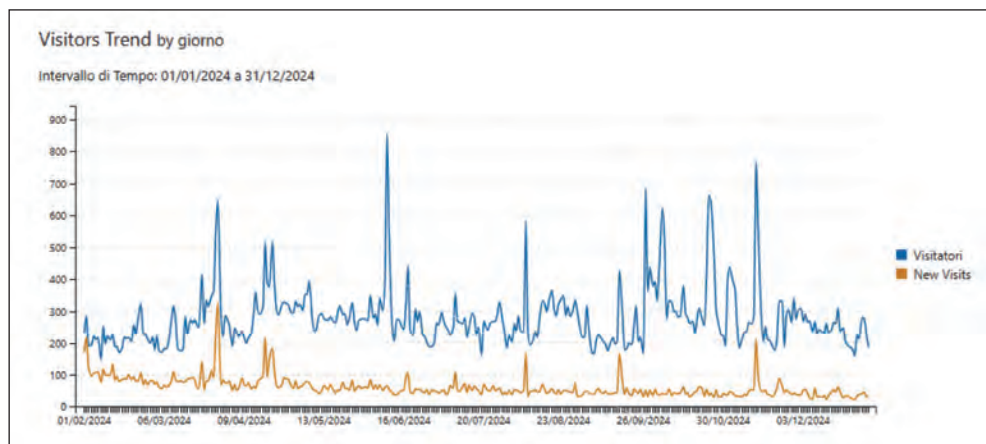
Il lavoro di allineamento con il catasto regionale non è stato invece eseguito in quanto le nuove grotte accatastate in quello regionale non sono state poi molte e tale lavoro viene quindi procrastinato al 2025 essendo alquanto laboriosa la formattazione dei dati regionali per renderli utilizzabili nel nostro dataBase. Ad oggi pertanto l'ultimo numero regionale presente nel nostro catasto storico risulta il n. 8459 mentre nel Catasto Regionale risulta il n. 8649, con un gap di 190 cavità.

Ad oggi il nostro database contiene 28.725 record di cui 20.385 accessibili al grande pubblico confermando il primato di essere uno delle più grandi fonti dati ipogee d'Italia.

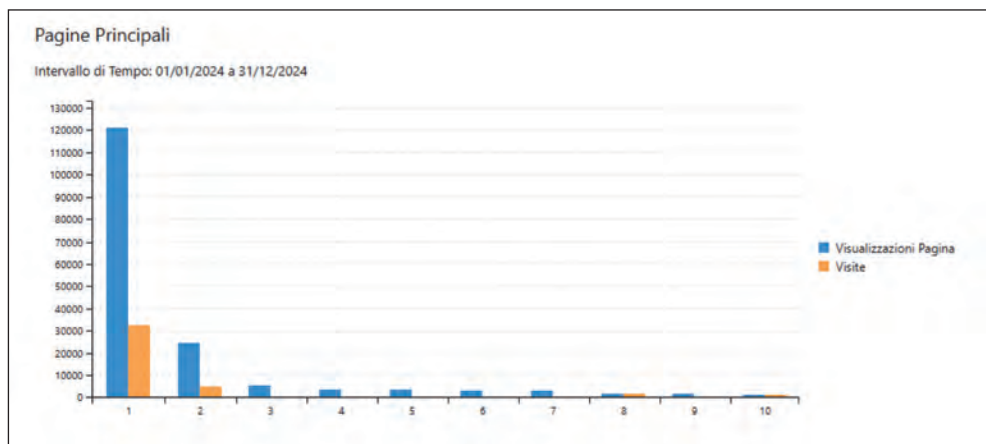
Relativamente all'emeroteca il lavoro di digitalizzazione e pubblicazione di nuovi articoli a metà dell'anno 2024 è ripreso grazie al coinvolgimento di un dipendente della SAG che nei ritagli di tempo ha preso in mano il lavoro sistemando gli articoli che continuano ad alimentare le cartelle dedicate oltre a caricare a sistema ulteriori 299 record ed immagini portando così l'attuale emeroteca a 5.942 record (5.741 al 31.12.2023). Il lavoro è ancora lungo e si stima che l'impegno del personale sarà necessario anche per tutto il 2025 onde catalogare la gran parte del materiale già a disposizione.

Per dare supporto al buon andamento del sito riportiamo alcune statistiche che l'Hosting Aruba mette a disposizione dell'utente.

Nel grafico sottostante vediamo come le visite si mantengono costanti tutto l'anno con 350-400 visitatori al giorno con una quota anche di nuovi accessi.



Nel seguente grafico invece sono analizzate le pagine visitate e la loro prevalenza che indica come i visitatori siano stati 32.245 e 120.853 le pagine viste.



SCUOLA DI SPELEOLOGIA “CARLO FINOCCHIARO”

Anche quest’anno la scuola di Speleologia “Carlo Finocchiaro” della Commissione Grotte “Eugenio Boegan” si è operata con i propri istruttori nella divulgazione e nella didattica, a livello locale nelle due sezioni del CAI di Trieste, e nazionale con la partecipazione a vari corsi di aggiornamento sia come allievi che come istruttori docenti.

In particolare, attiva è stata la partecipazione al corso propedeutico all’esame per istruttore nazionale e istruttore di Speleologia svoltosi sul Carso triestino nel mese di agosto, sia a livello logistico nell’organizzazione del corso che come istruttori docenti.

Nel mese di ottobre, a Malchina, si è tenuto il corso di “Idrologia carsica - sistemi di tracciamento”, ideale prosecuzione del corso già tenutosi nel 2023 presso la Grotta Gigante, e che ha visto la sinergia del Club Alpino Italiano con alcuni gruppi grotte locali della Società Speleologica Italiana (in quanto il corso era organizzato dalla Società Adriatica di Speleologia).

Nel periodo autunnale si è svolto il consueto corso di introduzione alla Speleologia con la partecipazione di 14 allievi, la cui età inferiore alla media degli ultimi anni fa ben sperare per la rinascita di un vivaio in seno al nostro gruppo speleologico.

Va segnalato che dopo qualche anno si è aggiunto un altro istruttore di speleologia a quelli del nostro sodalizio.

Il Relatore
Franco Besenghi

Il Presidente della CGEB
Aldo Fedel

**CONSIGLIO DIRETTIVO DELLA COMMISSIONE GROTTI
“E. BOEGAN” PER IL TRIENNIO 2023-2025
Eletto dall’Assemblea ordinaria del 09/03/2023**

Presidente Aldo FEDEL

Consiglieri Enzo CARUSO - Franco BESENGHI - Marco STICOTTI - Piero GHERBAZ
Fabio FERESIN - Antonella TIZIANEL

INCARICHI CONFERITI DAL CONSIGLIO DIRETTIVO IL 13 e 28/03/2023

Vice Presidente

Franco BESENGHI

Segretario

Antonella TIZIANEL

Magazzino speleo

Enzo CARUSO

Veronika PAULINA

Scuola di speleologia “Carlo Finocchiaro”

Marco Di Gaetano

Responsabile sito Internet

Antonio GIACOMIN

Ufficio Stampa e Pubbliche relazioni

Antonio GIACOMIN

Bibliotecario

Serena SENES

Responsabile Bivacco DVP

Spartaco SAVIO

ARCHIVI

Archivio fotografico

Giuliano ARDETTI - Igor ARDETTI

Archivio multimediale

Fabio PESTOTTI - Antonio GIACOMIN

Archivio storico

Pino GUIDI

CATASTO STORICO

Catasto Grotte del Friuli

Umberto MIKOLIC

Catasto Grotte della Venezia Giulia

Umberto MIKOLIC - Paolo TOFFANIN

GROTTA GIGANTE

Direttore

Aldo FEDEL

Assistente

Franco BESENGHI

Direttore Museo Scientifico e Speleologico

Fabio FERESIN

Cons. del Museo Scientifico e Speleologico

Alessandro DUIZ

Presidente del Comitato Scientifico

Adelchi CASALE

Coordinamento attività scientifica

Enrico MERLAK

Direttore Stazione Meteo G.G. e Bollettino

Renato COLUCCI

PUBBLICAZIONI

*Atti e Memorie: Direttore Responsabile
Redattori*

Mario PRIVILEGGI
Enrico MERLAK - Pino GUIDI

*Progressione: Direttore Responsabile
Direttore di Redazione
Redazione*

Mario PRIVILEGGI
Serena SENES
Piero GHERBAZ - Pino GUIDI -
Antonella TIZIANEL
Serena SENES

Magazzino Redazione

*Bollettino Stazione Meteo Grotta Gigante
Direttore di Redazione*

Renato COLUCCI

GROTTE CUSTODITE

Complesso Val Rosandra

Cristina MICIELLI

Grotta 12 VG

Giuliano ARDETTI

Grotta Impossibile 6300 VG

Lucio COMELLO

Grotta Doria 3875 VG

Paolo TOFFANIN

SOCI DELLA COMMISSIONE GROTTA “EUGENIO BOEGAN” (Dicembre 2025)

Zsolt ADAM	Aldo FEDEL	Paolo PEZZOLATO
Giuliano ARDETTI	Fabio FERESIN	Elio POLLI
Igor ARDETTI	Tullio FERLUGA	Roberto PRELLI
Marco ARMOCIDA	Franco FOGAR	Mario PRIVILEGGI
Adriano BALZARELLI	Luisa FONDA	Maurizio RAVALICO
Dario BASSI	Fulvio FORTI	Riccardo RAVALLI
Massimo BAXA	Silvia FOSCHIATTI	Rocco ROMANO
Marco BELLODI	Paolo GABBINO	Pierpaolo RUSSIAN
Andrea BENEDETTI	Mario GALLI	Luciano RUSSO
Laura BERTOLINI	Renato GERDOL	Stefano SALVADOR
Franco BESENGHI	Piero GHERBAZ	Glaucò SAVI
Mario BIANCHETTI	Antonio GIACOMIN	Spartaco SAVIO
Guglielmo BOLE	Carolina GIANDON	Giampietro SCRIGNA
Natale BONE	Alberto GIORGI	Serena SENES SIGUR
Stefano BORGHI	Giuliano GRIO	Roberta SOLDÀ
Alessio BUSLETTA	Giuseppe GUIDI	Guido SOLLAZZI
Andrea BUSSANI	Antonio KLINGENDRATH	Patrizia SQUASSINO
Luca BUSSANI	Domagoj KORAIŠ	Elisabetta STENNER
Francesco CALABRESE	Tom KRAVANJA	Marco STICOTTI CAVIA
Paolo CANDOTTI	Andrea LALOVICH	Adriano STOK
Furio CARINI	Adriano LAMACCHIA	Paolo SUSSAN
Vincenzo (Enzo) CARUSO	Rossana LITTERI	Antonella TIZIANEL
Adelchi CASEALE	Aurora LORENZI	Paolo TOFFANIN
Renato COLUCCI	Luciano LUISA	Umberto TOGNOLLI
Lucio COMELLO	Eugenia MATTIELLO	Alessandro TOLUSSO
Riccardo CORAZZI	Fabrizio MARCHESI	Roberto TOMÈ
Davide CREVATIN	Enrico MERLAK	Louis TORELLI
Tullio DAGNELLO	Daniela MICHELINI	Gianmaria VALERI
Paolo Bruno DE CURTIS	Cristina MICHIELI	Giampaolo VASCOTTO
Federico DEPONTE	Umberto MIKOLIC	Manuela VASSALLO
Marco DI GAETANO	Mauro NORBEDO	Edvino VATTA
Augusto DIQUAL	Elio PADOVAN	Angelo ZAGOLIN
Sergio DOLCE	Veronika PAULINA	Alessandro ZAMBON
Mario DORIGO	Giorgio PEROTTI	Angelo ZORN
Sergio DUDA	Giulia PEROTTI	Nico ZUFFI
Fulvio DURNIK	Fabio PESTOTTI	
Massimiliano FABI	Marco PETRI	

SOCI ONORARI

BRAITENBERG Carla	SEMERARO Rino	VERDE Giuseppe
MARINI Dario	SIEBERT Gerald	
MESAREC Davor	TREVOR Shaw	

M E M O R I E

Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”	Vol. 54 (2025)	pp. 3-24	Trieste 2025
--	----------------	----------	--------------

JOHANNES MATTES*

THE MAKING OF “CLASSICAL” KARST: SERBIAN GEOGRAPHER JOVAN CVIJIĆ, (INTER) NATIONALISM, AND THE EMERGENCE OF KARST SCIENCES, 1870–1914

This article examines the development of geomorphological and hydrological research on karst landscapes in Central and Southeast Europe in the period before 1914. It provides novel insights into the introduction of the term “karst,” originally the name of a cavernous limestone plateau east of the Adriatic city of Trieste, as a universal model for comparing and understanding dissolutional features in soluble rocks. Based on a critical reappraisal of the seminal work “The Karst Phenomenon” (1893) by the Serbian geoscientist Jovan Cvijić (1865–1928), submitted as a Ph.D. thesis at the University of Vienna, my essay argues for a reassessment of the beginnings of karst sciences. It gives more attention to research as a cooperative enterprise and to the interplay between the internationalization of geoscientific knowledge and the emerging national claims to the Balkan Peninsula and its inhabitants. Approaching the topic from a history of science perspective, I will analyze the epistemic, political, and social dimensions of early karst research at three different stages, namely, its emergence as an imperial undertaking in the Habsburg Monarchy, its synthesis and systematization through Cvijić’s “Karst Phenomenon,” and the final establishment of the Dinarides’ northwestern part as the “Classical” Karst.

INTRODUCTION

“The Karst is a living picture of desolation, transcending all imagination. An area of at least two by three [German] miles in extent, bordered by sheer naked karst rocks, contains nothing but a million stones left over from receding flood” (HERMANN, 1781: 48). There might be few comparable cases in which such a limited area, with its wealth of geomorphological features, has become representative of many global phenomena, and its study a distinct specialty, namely, karstology (karst sciences). According to FORD AND WILLIAMS (2007), karst terrains cover approximately 20% of the Earth’s dry ice-free surface and contribute up to 25% of the total drinking water supply of the world. Karst scientists consider them as a type of landscape with distinctive hydrology where the dissolution of soluble bedrocks, such as limestone, dolomite, marble, or gypsum, has created sinkholes, underground streams, caves, springs, and other features (KRANJC, 1997; KNEZ et al., 2020). The name originates from a barren plateau in the hinterland of the Bay of Trieste (Adriatic Sea), which in Slovenian is called “Kras”, in Italian “Carso”, and in German “Karst” (KRANJC, 1994). From the eighteenth century onward, naturalists and travelers, including the aforementioned BENEDICT

¹ Institute of Culture Studies, Austrian Academy of Sciences, 1010 Vienna, Austria.

* Corresponding author: E-mail: johannes.mattes@oeaw.ac.at

FRANZ HERMANN (1755–1815), traversing the area along ancient trade routes between Trieste and Vienna, compared its features with landscapes in Southeast Europe. This gradually extended the geographical scope of the toponym beyond the traditionally defined or “classical” karst area. Until 1918, this plateau formed part of the multinational Habsburg Monarchy, and the study of karst landforms and hydrology at the end of the nineteenth century was supported by the government because of large-scale public undertakings for water supply and reforestation.

The Serbian geoscientist JOVAN CVJIĆ (1865–1927; Fig. 1a) was the first to classify karst features and to propose a unified typology that is still widely in use to this day (GÈZE, 1983). His notable Ph.D. thesis “Das Karstphänomen” (The Karst Phenomenon, 1893; Fig. 1b), which he completed as a student of the world-renowned geographer ALBRECHT PENCK (1858–1945) and geologist EDUARD SUSS (1831–1914) at the University of Vienna, is considered the starting point of “proper karst studies in the Western world” (DE WAELE AND GUTIERREZ, 2022: 2). Cvjić’s thesis synthesized the international literature, discussed the variety of large- and small-scale features in sequence, and provided an overview of the worldwide distribution of karst terrains. Soon recognized as a standard reference, over time, his study significantly contributed to establishing the Dinaric Karst as the world reference site for dissolutional landforms and aquifers. The thesis also introduced Slavic terms, such as “polje” (karst plain), “doline” (enclosed depression), or “ponor” (swallow hole) to the international scientific community (STEVANOVIĆ AND MIJATOVIĆ, 2005). On the occasion of the 130th anniversary of the publication of Cvjić’s influential book, a critical review of its genesis, sources, and impact is timely.

The history of karstology has so far been researched mainly by eminent members of the specialty, often to mark anniversaries of founding figures or scientific societies. Particularly valuable are studies by GAMS (1973) and KRANJC (2011) on the origin of the term “karst,”

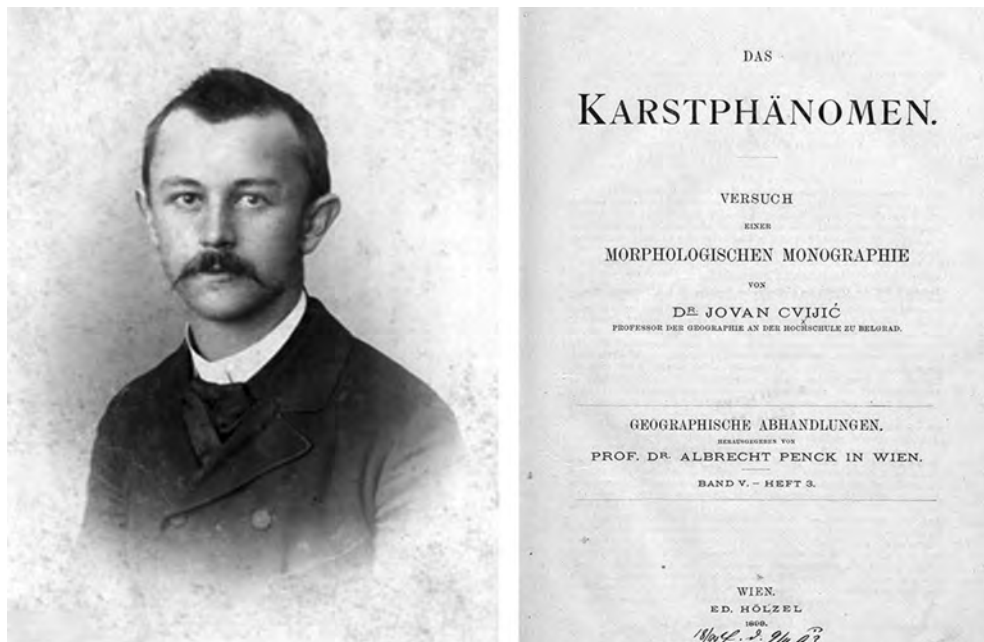


Figure 1a-b. (left) Jovan Cvjić as a doctoral student, c. 1893, photographer: Milan Jovanović (Belgrade); (right) Title page of Cvjić’s printed dissertation “The Karst Phenomenon” (1893).

FORD (2007) and STEVANOVIĆ (2013) on Cvijić's geomorphological and hydrological works, and SHAW (1992) and MATTES (2015) on early karst research and its overlap with speleology (cave and karst studies). JOVIĆ AND KOSTIĆ (2015) and JOVIĆ AND PETROVIĆ (2015), among others, published comprehensive surveys of Cvijić's life and scientific legacy. Historical geographers, in turn, dealt with his ethnographical studies and the political influence he gained in the aftermath of WWI as an advisor to the Paris Peace Conference and the border demarcations on the Balkan Peninsula (CRAMPTON, 2006; SEEGL, 2018; GÓRNY, 2019). Noteworthy are the contributions of GINSBURGER (2015; 2016) to transnational networks and conceptual exchanges between Serbian, French, and American geographers. FORD AND WILLIAMS (2007) and TRUDGILL (2008) situated Cvijić's work within the broader field of geomorphology, as did a comprehensive book on his mentor Penck and the "Viennese School" of physical geography by HENNIGES (2017a). However, with a few welcome exceptions, such as MAIS (1989), GAUCHON (1999), ČALIĆ (2007), and VOGEL (2019), we know much less about research activities before the "Karst Phenomenon," especially when it comes to independent researchers without university affiliations. More remarkably, although scholars, such as MISHKOVA (2018) and DEMETER AND BOTTLIK (2021), have examined Cvijić's ethnological studies and maps of the Balkans within the context of pre-WWI Serbian territorial claims and Yugoslav state-building, his geomorphological work, usually seen as "purely scientific," has rarely been analyzed from this perspective.

This article argues for a reappraisal of the "Karst Phenomenon" and thus of the beginnings of karst sciences as a specialty. My essay also seeks to shift the understanding of these early steps from an individual achievement of one or a few "professional" geoscientists to a collaborative endeavor by a range of local, regional, and (trans)national practitioners driven by public benefit and the hope of personal gain. I also argue for a better consideration of the political dimensions involved in making the "Classical" Karst a model for dissolutional phenomena, and for understanding this development as a power-related interaction process supported by a close (trans)national community of academic geographers. While KLIMCHOUK (2015), referring to the science theorist Thomas Kuhn, used the term "karst paradigm" (a set of thought models) to describe the shift from a "traditional understanding of karst" to current research trends, my article is inspired by LUDWIK FLECK'S (1935) concept of "thought collective" (Denkkollektiv) and "thought style" (Denkstil). By explaining what and how individuals within a collective (must) think at a given moment, this theory—similar to Kuhn's notion of paradigm—highlights the influence of communities on knowledge production. However, this theory goes further in recognizing that knowledge is the result of social interaction and that transformations in scientific thought are often not abrupt but involve divergent developments.

Based on a (re)evaluation of historical sources on early karst research in Central and Southeast Europe, I will ask: Under which changing conditions, goals, and profit expectations did different stakeholders engage in karst research, which resources did they tap, and which (collaborative) practices did they develop? To what extent did Cvijić's "Karst Phenomenon," through literature review and synthesis, influence the accreditation of existing knowledge, and what role did his fieldwork play? What does this mean for the establishment of the "Classical" Karst as a world reference site, and how did discipline formation in the geosciences and competing concepts affect this process? Therefore, I will not deal with the historical breadth of naturalists studying various phenomena in soluble rocks. Rather, I will analyze the emergence of a scientific community sharing the same theories, methods, and visions of karst at three key stages: the origin of karst research as a cooperative undertaking in the late Habsburg Monarchy, its synthesis and systematization in Cvijić's "Karst Phenomenon," and the final establishment of the "Classical" Karst as a type area.

“KARST KNOWLEDGE” IN THE MAKING: AN IMPERIAL ENTERPRISE?

In the late 1880s, as Cvijić was earning his spurs in field research by exploring the mountains and caves of Serbia, karst and its understanding as a phenomenon affecting many territories across Southeast Europe was already a hot topic in the Habsburg Monarchy. This concerned not only geological and hydrological issues but also paleontological and prehistoric findings made at karst sites, and especially the practical applicability of such knowledge. Railroads linking the capital Vienna with the Adriatic, the Alps, and the Balkans had brought karst environments within reach, and along with them, public and private interests in their exploitation to the fore: as tourist sites, as sources of drinking water, or as forestry and agricultural lands. However, “karst knowledge” relied not only on field studies by “experts” but also on indigenous knowledge of (subsurface) topography, hydrographical conditions, or cultivation practices, which was evaluated by them and then, in accredited form, compared with other karst regions. Given that karst landscapes, with their multilingual populations, were often borderlands or the focus of Habsburg’s expansive claims, knowledge about these areas also had geopolitical significance and was even used for military operations.

In the first half of the nineteenth century, traveling and resident scholars, accompanied by local guides, studied karst features as part of their natural, historical, and/or cultural interests in individual regions. Accounts of discoveries in Postojna Cave (Carniola), visited by the imperial family, and their development for touristic purposes shifted the attention of visitors from the barren surface of karst terrains to their subterranean beauty. An illustrated guidebook published to this end by the naturalist FRANZ VON HOHENWART (1830) already indicated the extent of the Karst southward to the Ionian Islands. Possibly the first to discuss the “type of karst formation” with sites outside the Dinarides was FRIEDRICH SIMONY (1813–1896), later the founding professor of geography at the University of Vienna. Based on his excursions on the Dachstein Mountains (Northern Alps), SIMONY (1847: 56–58) compared its “surface” and the “closely related cave formation” with similar features in the limestone area around Brno. According to him, the “shape of the terrain” with “basins, crater-like depressions, and deeply carved gorges” was the outcome of erosion-caused “collapses of cavities.” Although Simony soon turned his attention back to glacial phenomena, his paper, given before the Friends of Natural Sciences in Vienna, the capital’s first scientific society, stimulated the sharing of knowledge from other karst areas. This included, for example, an account of the spectacular attempt by Trieste engineers to solve the water shortage of the city by locating and tapping the Reka River, running 330 m below the surface (LINDNER, 1841; MORLOT, 1848).

After the political upheavals of 1848/49, the karst-related issues raised among the dissolved “Friends” were further researched by individual scholars, with an emphasis on describing, comparing, and classifying the diversity of topographical features. ADOLF SCHMIDL (1858), an official of the Imperial Academy of Sciences, toured the Monarchy’s main limestone areas and documented their peculiarities and similarities through his observations, measurements taken by technicians, and interviews with local naturalists and indigenous peoples. However, he still used “Karst” as a regional toponym and, in keeping with his primary interest in subterranean features, coined the term “Höhlenkunde” (cave study) (SCHMIDL, 1854). Travelers to the then Ottoman-ruled Bosnia, Montenegro, and Serbia, such as the German writer JOHANN KOHL (1851) and the French–Austrian geologist AMI BOUÉ (1856), related the landforms they encountered to those of Carniola but still switched between the toponymical and geomorphological meanings of the word “karst.” BOUÉ (1861) was also the author of the first systematic study of sinkholes (or dolines), attributing their formation in limestone, salt beds, gypsum, or sandstone to the action of surface and subsurface water. By noting that karst features also occur in Greece, Minor Asia, and Syria, Boué finally detached the term from its local reference.

Apart from the aforementioned individual ventures, the founding of empire-wide scientific

institutions in 1850s Vienna, especially the Geological Survey and the Geographical Society, made the karst areas of the Habsburg Monarchy the object of collaborative work. To increase the efficiency of governance and scholarship, this new type of research relied on the Habsburg central administration and its intellectual agenda to preserve the statehood of the empire in the face of internal and external crises (ASH AND SURMAN, 2012; COEN, 2018). Large-scale data-collecting undertakings, such as topographical, agricultural, or meteorological surveys, herbaria, and recordings of antiquaries, sought to determine and dismantle disparities within the Monarchy and legitimize its territorial framework as a natural and cultural unit. While some of these campaigns aimed to accumulate and accredit (geographical) knowledge of volunteering contributors across the empire (MATTES, 2024), others were planned and funded collaboratively but conducted by a few experts, such as the geological survey of all Habsburg territories (KLEMUN, 2012).

The latter venture resulted in a unifying map published in 1867 that, among others, indicated the type, age, and distribution of limestone formations based on measurements and samples taken in the field. In particular, the survey of Carniola in the course of the Ljubljana–Trieste railroad construction had led the geologists in charge to the generalizing hypothesis that the “internal and external character of karst” manifests itself “in various limestones” (STUR, 1858) and that their features are due to “chemical erosion” (LIPOLD, 1858). The sources and experiences gathered in these intra-imperial projects became a common reference for later state-run (military) geoscientific surveys extending beyond the Habsburg Monarchy, either at the invitation of the Ottoman Empire and independent Balkan states or as a follow-up to the occupation of Bosnia (1878) by Habsburg forces. Notably, EMIL TIETZE (1873) elaborated on the early understanding of karst as a geomorphological type and applied it to many of the landforms he studied as a fellow of the Geological Survey in Southeast Europe, Asia Minor, and Persia. Overall, the development of the term “karst” as a model of thought unifying different Habsburg territories contributed to the creation of a scientific framework for imperial identity. Subsequent mapping of karst areas throughout the Balkans and the Middle East was a precursor to the internationalization of the model (DIENER, 1886).



Figure 2. “Cultural-geographical map of the Liburnian (Croatian) coastal karst”, indicating the terrain, geognosy, natural and cultivated vegetation, author: Lorenz (1860, Tab. III).

With the ecological studies of the Rijeka teacher and naturalist, and later a senior official of the Ministry of Agriculture, Joseph Lorenz (1860), the notion of karst as an environment threatened by deforestation and water scarcity gained prominence. Noting that the lack of vegetation in the “Croatian coastal karst” is the result of historical overexploitation and that the “karst plateau” “descends toward the sea, becoming drier from top to bottom,” Lorenz developed a vision of karst terrains as a landscape type where hydrological, soil, and climatic conditions are interdependent (Fig. 2). Inspired by his work, the authorities of several crownlands, in partnership with Viennese ministries and forestry research institutions, engaged in the “reforestation and cultivation” of the Dinaric Karst. To this end, forestry officials first tested possible measures in limited areas and then, if successful, transferred them as a model to other territories at risk of “karstification” (*Verkarstung*), which, according to the influential forestry scientist JOSEPH WESSELY (1876: 88), could thus be raised to the “cultural level” of the Habsburg Monarchy. Behind these cross-regional efforts to transform entire landscapes from their “neglected state” to a “more humane” one were not only economic motives but also stereotypical images of the Balkan Peninsula as the “European Orient,” embodying Habsburg policymakers’ notion of the empire as a “cultural state” and its civilizing mission toward the “East.” According to the idea of “cultural work” (*Kulturarbeit*) – as it was adopted and further elaborated by Penck – Germans and other “civilized nations” were entitled to cultivate (karst) environments inhabited by indigenous Slavic-speaking populations and thereby acquire a territorial claim to these areas (JUREIT, 2012). The attribution of the term “karst” to areas beyond the Monarchy thus promoted the notion of their potential for “civilization” and integration and ultimately underpinned Habsburg’s expansive claims.

In the 1870s, with the opening of the Eastern Alps to tourism and the construction of pipelines to supply the cities of Vienna and Salzburg with water from karst aquifers, considerable public interest in the surface and subsurface of karst environments arose. The first Society for Cave Study (1879), established in the Habsburg capital, followed previous imperial efforts to pool data, sources, and specimens from all karst areas of the Monarchy and to centralize them in a register (*Kataster*). Relying on public engagement, non-expert observation, and knowledge based on expert-lay communication, research in this Society was a holistic and inclusive endeavor (FRUWIRTH, 1883/85). However, its contributors worked closely with the Vienna Natural History Museum and the Imperial Academy of Sciences, providing them with paleontological and prehistoric findings. Reports of periodic flooding in the poljes of Carniola led to the establishment of the Karst Committee (1881) as a private-public partnership, composed of Society members, ministry officials, and eminent geoscientists (HAUER, 1880). The purpose of the Karst Committee was to manage the monitoring and melioration (e.g., the opening of blocked sinkholes) of various karst areas initially by private individuals on behalf of the government and then by forestry officials (MATTES, 2012). Over the following years, karst research societies emerged in several crownlands, such as the Littoral, Moravia, and the Carpathians, often associated with Alpine clubs and separated according to nationality. Following the empire-wide Society for Cave Study, these societies created registers of karst features at the regional level; however, their activities focused more on exploration and recreational aspects, and some of them also engaged in the development of karst areas for touristic purposes.

This leads us to two preliminary conclusions: First, the making of “karst knowledge” hinged on the territoriality of Habsburg imperial rule and the way research was organized to serve both state and civil society interests. Originally a tool for scholars to compare topographical and geological features across regions, the term “karst” evolved into a versatile model of thought for systematizing and applying large bodies of earth (scientific) knowledge gathered through empire-wide ventures and public engagement. The potential applications of this knowledge, spanning tourism, environmental engineering, and geoscientific pursuits, are

exemplified by three interpretations of the term in the public discourse of the 1880s, namely, a local place name, a geographical landscape type, and a geologically determined “formation of the ground” (KARRER, 1884). Second, the idea of karst formation, similar to many other contemporary geographical or geological thoughts, was embedded in power-political contexts, implying stereotypical notions of center and periphery, culture and wasteland, and Europe and the “Orient.” Until the 1880s, the discussion on karst remained predominantly confined to the German-speaking (scientific) communities within and beyond the Monarchy. Building on a shared framework of concepts, practices, and values, scientific institutions in the Habsburg capital and their counterparts in the crownlands constituted a “thought collective” that, in response to socio-political challenges, advocated for the development of models and typologies to address natural and cultural diversity. While scientists investigated karst formations to enhance understanding and generalize processes related to earth and the environment, for the bureaucracy, it became a governance tool, facilitating the transfer of forestry, land, and water management projects tested in one karst area to others.

DRAFTING THE “KARST PHENOMENON”: LITERATURE SYNTHESIS AND FIELD OBSERVATIONS

Although the history of geology scholarship widely considers the “Karst Phenomenon” thesis as a forceful breakthrough that led to the establishment of a new field of research, Cvijić did not start his studies from scratch. It is difficult to imagine his success without mentors, the fieldwork experience gained as a student, and the sources of the aforementioned researchers, sometimes forgotten today, whose fundamental work served as a springboard for his career. Having graduated in natural sciences from the Velika Škola (Great School) in Belgrade and having worked as a teacher for a year, Cvijić moved to Vienna in 1889 on a scholarship from the Serbian Ministry and attended lectures at the University of Vienna for six semesters (MATTES, 2018). Back then, the capital of the Habsburg Monarchy was one of the geoscientific centers in Europe, attracting promising Ph.D. candidates from the southeast of the continent and beyond (COHEN, 2015; KLEMUN, 2018). The Leipzig-born geographer Albrecht Penck, just a few years older than Cvijić, was appointed professor at the University of Vienna in 1885. He introduced excursions and practical fieldwork to the regular curriculum and, at that time, was working on geomorphology and karst landforms (PENCK, 1894; HENNIGES, 2017a). Cvijić’s second mentor, the Viennese geologist Eduard Suess, a leading member of the Imperial Academy of Sciences, was already world-famous for his work “Das Antlitz der Erde” (The Face of the Earth, 1883–1909). In this multivolume book, he created a worldwide synthesis of the empirical work done over the previous decades (mostly on regional rock strata), thus “globalizing” his tectonic concepts originally based on fieldwork in the Alps (Westermann, 2010).

Cvijić (1893: 219) similarly aimed to synthesize all existing research on karst landforms in a “summarizing monograph” drawing on both “personal observations and literary sources.” Although this was not his initial intention upon arriving in Vienna, Cvijić’s (1887/88) earlier work in Belgrade, which focused on establishing precise geographical terms in Serbian for international standardization purposes, laid the groundwork for his subsequent endeavors. Participation in Penck’s excursions to the Dachstein Mountains and the Moravian Karst likely played a pivotal role in shaping the focus of his thesis. In the field, Penck’s students learned to “adopt a geographical gaze” and to identify, analyze, and reinterpret landscape features through joint observation and mapping exercises (HENNIGES, 2014). In addition, Cvijić undertook extensive self-guided trips throughout the Dinarides, not least to the “classical” karst areas of Carniola and Istria, where he applied and refined his visual expertise. In exploring the more remote mountain ranges of eastern Serbia and Montenegro, he benefited from his

language skills and the support of his former teacher, JOVAN ŽUJOVIĆ (1856–1936). The observations Cvijić made there led to his first publications (1889; 1891), including two essays on Prekonoška Cave and Kučaj Karst (Serbian Carpathians). Another source of inspiration for Cvijić's work was the wealth of papers on hydrology and cave formation presented in Viennese associations, such as the Geographical Society, the University Club of Geographers, and various Alpine clubs. Particularly noteworthy is an article published on behalf of the Habsburg General Staff, following the topographical survey of Bosnia by the Vienna Military Geographical Institute, as it already outlined a typology of karst phenomena, encompassing "poljes," "dolines," and "ponors," and delineated four intensity "levels of karstification" (L.B.B., 1889).

In developing his nomenclature of karst phenomena, Cvijić encountered methodological challenges similar to those confronted by Suess, particularly in validating, comparing, and generalizing research data gathered from literature studies and personal fieldwork. On the one hand, a significant portion of publications on karst features did not stem from university or survey-affiliated scientists, but rather from local and "non-professional" researchers with varying observation and interpretation methods. On the other hand, the results needed to be contextualized within the international research landscape – a dimension often overlooked in the intra-Habsburg discourse. However, the endeavor to link and globalize these diverse bodies of karst knowledge also raised epistemological issues, such as the accuracy and objectivity of research outcomes. This proved essential for the credibility of the geosciences as they became increasingly specialized and professionalized in the late nineteenth century (HENNIGES, 2017a). The need for credibility was particularly pronounced in the controversial field of geomorphology, which emerged as a new sub-discipline during the "geologization" of geography in the 1880s (BÖTTCHER, 1979). Under the influence of Penck, who focused on exogenous processes like weathering, erosion, and denudation, and the Berlin geographer FERDINAND VON RICHTHOFEN (1886), geomorphology gained prominence, especially within the German-speaking scholarship (WARDENGA, 1995). As such, geomorphology provided a new empirical basis for the diverse field of university geography, which was previously molded by a range of historical, statistical, and topographical approaches.

To successfully meet these challenges, Cvijić (1893: 220) adopted two strategies that added reliability to the "elaboration of all observational material from the literature" he examined in the library of the Vienna Natural History Museum: First, by restricting his scope to surface landforms, he set his research apart from the study of caves, a field that was increasingly seen as "amateurish" as other branches of the geosciences gained recognition as academic disciplines. Nevertheless, Cvijić eagerly made use of the rich sources provided by the speleological community. These sources included, for example, the expedition reports (*Grottenbücher*) of the Alpine Club in Trieste, whose representatives, following Penck's advice (1891: 202), had "entrusted to his student the scientific material ... probably worthy of publication in its entirety." Second, Cvijić accentuated the importance of his fieldwork, even though numerous arguments in his thesis were derived from the selection, analysis, and systematization of (published) observations made by other researchers. This emphasis served to highlight his practical skills and the empirical foundation of his findings. Furthermore, he portrayed himself as a geographer dedicated to on site research – a professional identity cultivated by Penck in his teaching, exemplified on excursions, and ultimately internalized by his students (HENNIGES, 2014). Later on, however, Cvijić applied many of the observational methods learned during these trips, such as identifying, documenting, and comparing visual patterns in landscape morphology (WARDENGA, 1995), to his literary analysis. For instance, by examining the topographical maps collected in the *Grottenbücher*, he was able to identify new types of depressions.

When organizing this knowledge into chapters with descriptions and examples of typical landforms (or groups of them), including "karren," "dolines," "karst rivers," "karst valleys,"

“poljes,” and “the Adriatic karst coast,” Cvijić drew inspiration from earlier studies of individual karst regions. Discussing these features from the smallest to the largest, he adhered to didactic conventions and considered the prevalent interest in, and extensive literature on, small and mid-sized structures. Accordingly, the “Karst Phenomenon” was not a balanced work. Karst rivers and coastal karst landforms occupied only six pages each, whereas the chapter on dolines alone, which included many vertical caves, took up nearly half of the 112 pages. For Cvijić (1893: 226), dolines were the “characteristic feature of karst formations” and indicative of other dissolutional phenomena (FORD, 2007). In the polarized discourse on doline formation, a debate unfolded between two senior fellows of the Vienna Geological Survey, EDMUND VON MOJSISOVICS (1880) and Penck’s rival, EMIL TIETZE (1880), Cvijić (1893: 272) unsurprisingly supported the former’s hypothesis. Similarly, he argued that “true dolines” result from “chemical erosion,” that is, dissolution initiated by “penetrating [rain]water” and its associated “carbon dioxide,” progressing downward from the surface. Nevertheless, out of respect for Tietze and numerous Habsburg speleologists (KRAUS, 1887; PUTICK, 1889), who held the opposite view that dolines are formed by mechanical collapse of an underlying cave, Cvijić did not question their field observations. Instead, he drew different conclusions from them and, in a few cases, acknowledged a collapse origin (today both hypotheses are accepted).

Particularly remarkable is Cvijić’s concluding chapter on the worldwide distribution of karst terrains. In this section, he aimed to systematically organize all of the knowledge on limestone landforms published in German, French, and English, categorizing it based on geological periods. Recent hydrographical studies conducted by the geologists JOSEPH FOURNET (1858) and GABRIEL DAUBRÉE (1887) in central southern France, as well as speleological explorations led by the lawyer ÉDOUARD-ALFRED MARTEL (1889), prompted Cvijić (1893: 218) to regard these karst areas as “a side piece to ... Carniola.” Extracting these and other international sources from Indiana (COX, 1874), South Australia (WOODS, 1862), and Syria (DIENER, 1886), he identified variations in karstification types and intensities attributed to the age, composition, and tectonics of different limestones. Another noteworthy contribution by Cvijić is his promotion of terms borrowed from South Slavic languages, such as “doline,” “polje,” or “ponor.” Although these terms had been introduced in earlier studies on regional karst areas, authors, such as REYER (1881), still employed them with varying meanings or alongside synonyms in other languages. To standardize their use, Cvijić provided names of typical landforms in other European languages or dialects, as well as uniform definitions based on morphological criteria, while considering geological and hydrological conditions. For instance, Cvijić distinguished poljes from sinkholes by their size, longitudinal extension, and flat bottom and from karst valleys by their wide trough shape and water drainage.

In presenting his findings, Cvijić adopted a more scholarly approach than many of Penck’s other Ph.D. students, which involved employing a sober, descriptive writing style, free of political or cultural judgments. In addition, he used content-related tools to gain the trust of his academic audience, including an extensive footnote apparatus and tables with detailed quantitative data on individual landforms, albeit, to some extent, extracted from maps and literature. In doing so, Cvijić not only demonstrated the richness and in-depth study of his material but also deliberately distanced himself from the perceived “amateurish” origins of some of the sources he interpreted. The few illustrations included in the thesis, particularly two of alluvial dolines (sinkholes in sedimentary deposits) taken during Cvijić’s travels in Serbia, reinforced his self-image as a skilled field researcher and conveyed a sense of authenticity (Fig. 3a). Although these two figures were not actively integrated into his argument, they depicted the characteristics of the corresponding landforms, aiding potential users in recognizing them in the field. A notable exception is Cvijić’s diagram illustrating a section of a doline exposed in a railway cut at Logatec train station in Carniola (Fig. 3b). Without evidence of a cavity beneath the depression, the diagram refuted the idea of doline formation by collapse and thus served

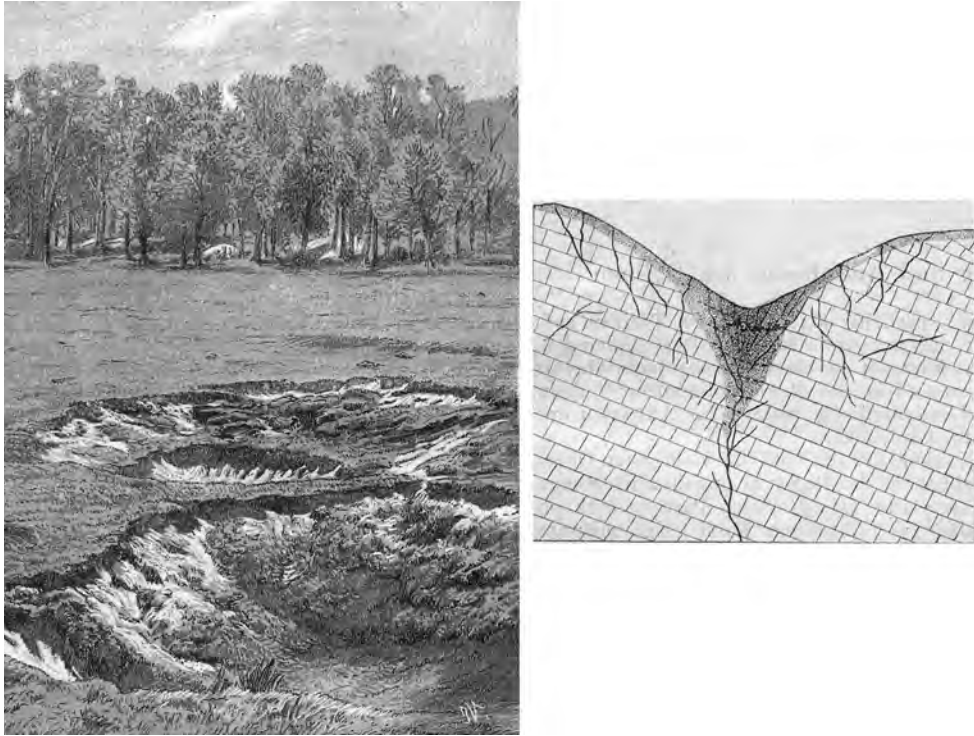


Figure 3a-b. (left) Depiction of an alluvial doline in the Kučaj mountains (eastern Serbia); (right) Cross-section of a 3 m deep dissolution doline at Dolenji Logatec (Slovenia), author: Cvijić (1893: 259).

Cvijić as an explanatory model for his hypothesis (FORD, 2007). In the subsequent years, the Logatec railway cut even became the holotype for dissolution dolines and was persistently reproduced in textbooks. However, recent research (ŠUŠTERŠIČ, 1994; STEPIŠNIK, 2015) re-examining the site has cast doubt on Cvijić's observations and disproved its dissolutional origin.

In summary, the "Karst Phenomenon" thesis relied on accumulating sources about landforms in soluble rocks to compare, (re)organize, and apply this empirical knowledge based on consistent morphogenetic criteria. In terms of concepts, terminology, and repositories, Cvijić largely built on earlier Habsburg undertakings and their popular scientific communities. However, the elevation of the comparative framework to an international level and the professionalization of research, marked by its delimitation as a specific occupational profile, posed novel challenges to the reliability and validation of the sources examined. This demand was particularly evident in the study of landforms and landform evolution, a burgeoning branch of physical geography grounded on uniform methods of observation. However, in the case of (subsurface) karst features, university scientists still relied heavily on the reports of "non-professional" researchers. The visual knowledge and practices gained in the field, including the (joint) description, drawing, or measurement of landforms, furnished the analytical tools with which academics later evaluated the observations of others in their offices. Nevertheless, in Cvijić's case, the emphasis on field expertise also proved to be a potent tool of persuasion, effectively addressing the epistemic uncertainties associated with the globalization of geoscientific concepts and communicating credibility to his professional audience.

MAKING THE KARST (INTER)NATIONAL: THE AFTERMATH OF THE “KARST PHENOMENON”

Shortly after Cvijić defended his thesis around the turn of 1892, the “Karst Phenomenon” was published together with other dissertations in Penck’s series “Geographische Abhandlungen” (Geographical Treatises) and distributed to fellow researchers abroad. By this time, Cvijić had already left Vienna for Belgrade, where the then 27-year-old had been appointed full professor at Velika Škola (from 1905 known as the University of Belgrade). There, Cvijić was surprised by the encouraging letters he received from eminent scholars, such as Archibald Geikie (1835–1924), director of the British Geological Survey, who shared a keen interest in valley erosion by flowing water. Decisive for the attention that the “Karst Phenomenon” attracted were the networks of Cvijić’s supervisor, the recognition of the geosciences then being taught at Vienna, and the significance of German as a language of science. Most reviewers agreed that the thesis was the first survey (though not a proper monograph) of karst landforms; however, the more detailed comments, especially from field geologists and local researchers, raised several concerns, not least about geomorphology per se: For Weigand (1894: 801–802), the use of “such primitive means of categorization” as the “external [morphological] form” impeded the understanding of formation processes and, in the case of Cvijić’s thesis, led to an “inappropriate terminology.” Meanwhile, Trampler (1894: 329) recommended a “more careful examination” of the sources, and Kraus (1894a: 21–22), whom Cvijić himself had attacked, scornfully countered that the thesis, rooted in “long-disproved schools of thought,” is only suitable as a repository for the “otherwise inaccessible Slavic literature.”

The reason for this criticism, apart from (personal) reservations about Penck and his teaching at the Vienna University, may lie in Cvijić’s firm rejection of the dolines’ collapse origin, which earned him opponents among its Habsburg supporters. The Serbian origins of Penck’s protégé may also have played a role, which, given the national tensions of the 1890s, must have caused resentment among colleagues with a German nationalist mindset. However, Cvijić did receive support from his teacher’s former Ph.D. students, who used their networks to place favorable reviews, and most importantly, from Penck himself. In his two-volume “Morphologie der Erdoberfläche” (MORPHOLOGY OF THE EARTH’S SURFACE, 1894), he dealt extensively with “karst landscapes” and, by adopting many of Cvijić’s findings, endorsed their relevance and reliability. By this time, karst phenomena had evolved into one of the most researched and debated landforms, and their study, conducted for decades by Habsburg scholars, became worldwide in scope. For the growing circle of Penck’s students, gaining a foothold in the promising but largely “amateurish” karst research was an opportunity to establish a reputation in the developing field of geomorphology. For their teacher, in turn, it was a chance to raise the profile of the Vienna chair of physical geography, especially in the French- and English-speaking world.

Simultaneously with the release of the “Karst Phenomenon,” speleological monographs gained attention. Despite originating in non-university contexts, these works underwent joint review with Cvijić’s thesis. Notable among them are Franz Kraus’ comprehensive “Höhlenkunde” (CAVE STUDY, 1894b) and Édouard-Alfred Martel’s “Les Abîmes” (THE ABYSSES, 1894), both lavishly illustrated with sketches, maps, and photographs. In the geographical journal “Petermanns Mittheilungen,” Martel’s 580-page book was even hailed as the “standard work on karst phenomena,” surpassing the “little piece” (Werkchen) of Penck’s student (SUPAN, 1894: 136). The self-taught researchers Kraus and Martel, with extensive experience in the exploration of pit caves, karst streams, and springs, were not simply willing to accept Cvijić’s arguments and paid more attention to hydrological processes (SCHUT AND DELALAN-DRE, 2015). Based on diagrams of exemplary features, they developed individual landform typologies, using German or French terms. For example, Kraus introduced an alternative no-

menclature for “surface erosion phenomena” (mainly dolines), whereas Martel argued against the internationalization of the “Austrian” term “karst” (GAUCHON, 1999). Referring to recent investigations in the south of France, comparable to that in the “classical land” of karst research, Martel proposed the more neutral term “limestone phenomena” (*phénomènes du calcaire*) to designate landscapes characterized by “subterranean water circulation”:

Locally, the name Karst seems to be limited to ... Istria and western Carniola; ... so arid in places that it has been nicknamed Austria's Arabia Petraea [Roman province in Arabia]. ... All that the Karst proper can claim is to have been the first ground, where subterranean hydrology was ... scientifically studied, and, to possess caves and underground rivers that, for beauty and power, rank first among their counterparts. (Martel, 1894: 432–33)

The reception of the “Karst Phenomenon” thus proved to be more controversial than its current status as the founding work of karst geomorphology suggests. The thesis divided not only geographers and geologists, academics, and “non-professionals”, but also scholarly communities that, driven by different concepts and methods, favored research based on global synthesis or local fieldwork. At the national level, Cvijić's thesis and its supporters had painfully exposed discrepancies within the “thought collective” once uniting the Monarchy's karst research. In its place, Penck's close-knit network of young and ambitious geographers took over the reins, no longer committed to shared bodies of knowledge and culture, such as a holistic approach, (trans)regional focus, and public engagement in science. At the international level, the discussion of Cvijić's thesis, despite competing proposals, stimulated the use of the term “karst” in English- and French-speaking academia. Although there was no translation of these languages, Cvijić had a revised version of his thesis published in Serbian Cyrillic under the title “Карст: географска монографија” (KARST: GEOGRAPHICAL MONOGRAPH, 1895). Thus, he contributed to the growth of an independent, language- and nation-oriented geoscientific community in Serbia, whose publications were embraced by colleagues, especially of the Orthodox denomination, throughout the Balkan Peninsula. However, for the vast majority of Viennese scholars, these works remained unreadable due to a language barrier. Furthermore, by introducing a terminology derived from South Slavic languages (while disregarding terms in Czech, Italian, or French), Cvijić unintentionally fueled nationalistic tendencies in karst research. The increasing use of the term “(Austrian) karst countries” (Karstländer) in the (school) literature of the Habsburg Monarchy, spurred by the growth of comparative regional geography (Länderkunde), was a response to these tensions (KREBS, 1907; SCHULTZ, 2012; KINDER, 2020). With subsequent authors proposing modifications or new terms in their (national) languages, inconsistencies flourished well into the twentieth century.

Beyond these scholarly debates, novel media such as postcards, photographs, and dioramas, with their compelling landscape images, brought karst areas to public attention. Whereas Cvijić's thesis referred more to the Dinaric Karst as a whole, popular representations highlighted the “Classical” Karst, both as a geographically unique region and as a landscape holo-type (SHAW AND ČUK, 2012). Moreover, the developing tourist infrastructure, especially in Carniola, familiarized a growing number of visitors with karst landforms (SHAW AND ČUK, 2015). The worldwide dissemination of this imagery was facilitated by a booming geographic book market and innovations in printing technology. Atlases and (school) wall maps, exhibited at international fairs and used in classrooms, influenced the “worldviews” of broad segments of society (HENNIGES, 2017b). Especially favored were representations of iconic landscape types like Alpine glaciers, the Pannonian Steppe, or the Dinaric Karst. These visually captivating images, distilled to a few “characteristic” landform elements (CHAVANNE, 1881), also became popular in bourgeois households due to their quality, exotic appeal, and affordability. The “Geographische Charakterbilder” (Geographical Character Pictures) reproduced in large numbers

by the Viennese publisher Hölzel, with depictions of Postojna Cave (Carniola) and the coastal karst of Kotor (Montenegro), are examples of this trend (JOVANOVIĆ-KRUSPEL, 2019). Artists often created sketches for these images on site, with scientists contributing to the initial motif selection and providing didactic texts for the accompanying materials (CHAVANNE et al., 1886). The representations in the 24-volume opus “Die österreichisch-ungarische Monarchie in Wort und Bild” (THE AUSTRO-HUNGARIAN MONARCHY IN WORDS AND PICTURES, 1886–1902) wielded significant influence. Initiated by Crown Prince Rudolph, this ambitious project aimed at compiling the natural-historical and cultural knowledge of all Habsburg territories. The widely circulated landscape images, including those “portraying” the “Classical” Karst (Fig. 4), had a high recognition value (KRAUS, 1891). Together with other images of landscape types representative of the Monarchy, they symbolized its unity in diversity and, eventually, underpinned the integrity of Habsburg imperial rule.



Figure 4. Depiction of a typical “karst landscape with dolines between Sessana [Sežana] and Lippitza [Lipica, Slovenia]” in the 24-volume encyclopedia “The Austro-Hungarian Monarchy in Words and Pictures” (Sonklar, 1886: 37), artist: Eduard von Lichtenfels (Vienna).

Apart from this popular discourse, the elevation of “The Karst Phenomenon” to a foundational work in karst geomorphology took place in the 1900s, propelled by the influential network centered around Penck. Scientists from across Southeast Europe, including Cvijić, commonly used Viennese communities to exchange knowledge, foster bilateral cooperation, and advance careers. This relationship, in turn, created a loyal educated class on the peripheries of the Habsburg Monarchy, facilitating the absorption of scientific concepts, methods, and literature alongside a shared political consensus affirming the empire’s integrity and cultural claim to supremacy. In Cvijić’s case, his loyalty bore fruit when WILLIAM MORRIS DAVIS (1850–1934), a prominent Harvard geographer, encountered the “Karst Phenomenon” during his trip to Europe in 1899. Joining Penck and his students on an excursion to Bosnia and Herzegovina to investigate karst phenomena (KREBS AND LEX, 1899; PENCK, 1900), DAVIS (1901)

later incorporated many of Cvijić's findings into his framework, notably within his prominent cycle of erosion theory. This model, reflecting contemporary evolutionary thinking, left a profound impact on fluvial geomorphologists, particularly within Anglo-American academia, enduring well into the 1940s (GINSBURGER, 2015). Inspired by Davis, CVJIĆ (1918) developed a similar theory for karst landform evolution, contextualizing three-dimensional typological representations of karst terrains within causal, time-related frameworks (Fig. 5). Moreover, Penck's continuous excursions to karst areas stimulated further research by his Ph.D. students and other Habsburg geoscientists, including Alfred Grund's "Karsthydrographie" (KARST HYDROGRAPHY, 1903) and Friedrich Katzer's "Karst und Karsthydrographie" (KARST AND KARST HYDROGRAPHY, 1909) (FORD, 2015). These efforts not only established Vienna as the international hub of karst research until WWI but also solidified Cvijić's thesis as a key reference in the burgeoning field of geomorphology (HILPERT, 1907; KREBS, 1910; BECKINSALE AND CHORLEY, 1991).

The acceptance of Cvijić's work by French scholars can be attributed to the geopolitical shifts following the Serbian coup d'état of 1903, notably the assassination of the pro-Habsburg King Alexander Obrenović. Initially ambivalent, Cvijić solidified his position by declining his appointment to the Prague chair of physical geography, later filled by Grund (STANKOVIĆ, 2015). While his academic training and shared scientific concepts initially bridged tensions with Vienna, Cvijić's convictions shifted with the growth of the Yugoslavist movement, Serbian nationalism, and his close friendship with Foreign Minister MILOVAN MILOVANOVIĆ (1863–1912). The latter advocated an alliance with Britain, Bulgaria, and France and even entrusted Cvijić with diplomatic missions abroad (GINSBURGER, 2016). Ironically, Cvijić, whose career had its origins in Vienna and who later served as rector of the University of Belgrade and president of the Serbian Academy of Sciences and Arts, went on to become one of the most prominent critics of Austria-Hungary after the annexation of Bosnia by Habsburg forces in 1908. The Serbian Geographical Society, founded by Cvijić two years later, shifted its focus from geoscientific features to ethnographical and national relations in the Balkans, aiming to collaborate with French and Anglo-American scholars. Cvijić, by then publishing in French, found a new, powerful mentor in Emmanuel de Martonne (1909: 468), who, in his "Traité de géographie physique" (Treatise on Physical Geography), adopted the term "karst" to denote the "entirety of limestone relief features" (GAUCHON, 1999; RENAULT, 1992). The study of karst geomorphology, once a common ground for scholars from Central and Southeast Europe, had finally lost its integrative power. Cvijić's advocacy for a South Slavic state under Serbian leadership, championed while serving as a visiting professor at Sorbonne University throughout the war, finally came true in 1918. As one of the key scientific advisors to the Paris Peace Conference (1919–20), he shared responsibility for border demarcations in Southeast Europe following the upheavals of WWI (GINSBURGER, 2010).

Overall, the impact of Cvijić's thesis can be summarized as follows: First, the establishment of the "Karst Phenomenon" as a standard reference occurred in the years surrounding WWI and depended on the (trans)formation of international thought collectives engaged in karst research. Shared political-cultural convictions, along with the adoption of evolutionary thinking prevalent in Anglo-American scholarship, fostered cohesion among geoscientists of the (future) Entente powers, who recognized Cvijić's thesis as the foundational piece of karst geomorphology. In turn, Habsburg researchers, such as Grund, who perished in the battles with Serbia, and Katzer, who continued his hydrological work at the Bosnian Geological Survey after WWI, were either overlooked or, in the case of their Viennese peers, sidelined from international scientific exchange for political reasons in the 1920s. Second, Cvijić's efforts in internationalizing and nationalizing karst knowledge were instrumental in shaping a more professionalized realm within karst research. Beyond local fieldwork, these new "professionals" relied on the comparison of data collected worldwide, incorporating sources from non-ac-

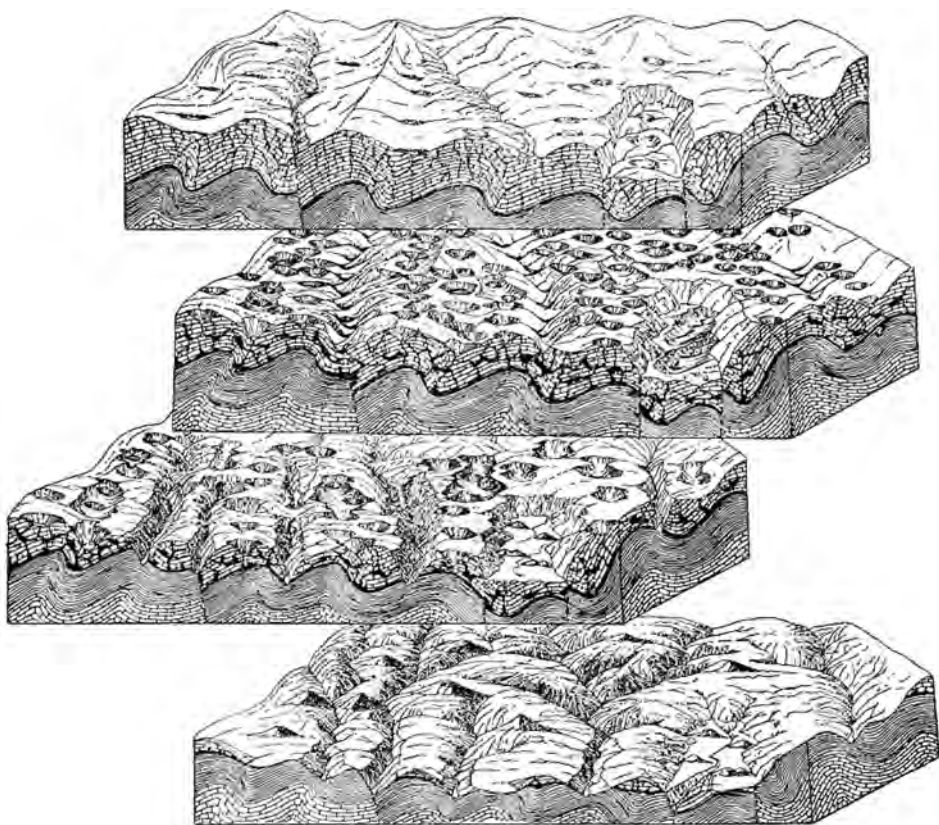


Figure 5. Morphological evolution of the karst terrain in four phases: 1. original karst terrain; 2. maximum level of karstification; 3. beginning of disappearance of karst relief; 4. disappearance of karst relief and hydrography, author: Cvijić (1918: 423).

ademic practitioners but gradually excluding the latter from interpretation. As nation-states (emerging from the Habsburg Monarchy) increasingly employed karst knowledge, novel concerns, such as the significance of karst areas as heritage sites and the ethnic composition or language(s) of their populations, gained prominence. Notably, the allocation of the “Classical” Karst to Italy in 1919 prompted Fascist initiatives to turn the caves around Postojna into a national park and to enforce cultural assimilation policies (BERTARELLI, 1919; KAVREČIĆ, 2020), including the prohibition of the Slovene language.

CONCLUSIONS

This article has examined the foundations of karst sciences as a scholarly community, evolving in the late nineteenth century around a cohesive framework of shared concepts, practices, and political-cultural convictions. While historians, often beginning with Cvijić’s thesis, have thus far studied major advances in geological thought, my article centers on the epistemic, political, and social dimensions involved in the “making” of the “Karst Phenomenon,” providing a more comprehensive understanding of the complex processes around the globalization of this scientific concept. Tracing the origins of karst research within the Habsburg

Monarchy has opened up avenues for investigating how knowledge is produced, mobilized, and exchanged within specific geographical and historical contexts, shedding light on thought styles, imperial agendas, and the interplay between science and society.

In exploring the epistemic dimensions, I have shown that the use of the term “karst” as a versatile model of thought for comparing and transferring knowledge across regions was reliant on (scientific) power dynamics and societal preconceptions that informed understandings of karst phenomena. Cvijić, in formulating his hypotheses, methodology, and terminology, drew upon the teachings of his mentors, prior research, and unpublished materials, systematizing and (inter)nationalizing the scale of his analysis. To address the uncertainties inherent in comparing globally sourced data and enhance credibility with his audience, Cvijić narrowed his thesis to surface landforms, employing a scholarly presentation style with diagrams and tables of (survey) data. New observational methods, hydrological research, and the adoption of evolutionary principles in geomorphology strengthened physical geography, setting it apart from the focus of geology on local phenomena (i.e., outcrops) and from the increasingly “amateurish” realm of speleology.

On the political front, I have demonstrated that the scientific study of karst phenomena emerged within an intra-imperial context, responding to the integrative imperatives and realities of Habsburg rule. This search for coherence across diverse regions was also driven by the practical utility of the gathered knowledge, especially in resource management. As foreign policy shifted to the southeast following the defeat by Prussia and the opening of the Suez Canal in the late 1860s, Habsburg scholars began extending the term “karst” to areas on the peripheries of the Monarchy, setting the stage for future internationalization endeavors. Early ecological thinking about karst environments, influenced by Orientalism, advocated for the cultural “elevation” of Slavic-inhabited areas, thereby indirectly supporting colonial-expansive ambitions. Cvijić’s (trans)national collaboration was also shaped by geopolitical agendas, either by prioritizing research autonomy in the Balkans or by adopting scientific concepts and practices from Vienna or Paris. By integrating the limestone mountains of eastern Serbia into the Dinaric Karst framework and enhancing his fieldwork with ethnographic mapping from the early 1900s onward, he indirectly strengthened arguments for South Slavic unity.

Delving into the social dimensions, I have highlighted the significance of unacknowledged stakeholders, including field researchers, local guides, and science popularizers, in addition to prominent figures, such as Cvijić. Through personal exploration or supporting others, these stakeholders were equally essential to the production, accumulation, and (inter)nationalization of karst knowledge. However, they gradually lost visibility with the professionalization of the geosciences. This was particularly evident for members of local and indigenous communities, whose expertise in topography or hydrological conditions, for instance, was eagerly exploited by “professional” researchers and incorporated into the scientific body of karst knowledge. Boundary work among early karst specialists, including earth scientists, naturalists, and bourgeois “autodidacts,” was influenced not only by differences in concepts, methods, and foci of interest but also, to some extent, by social backgrounds, academic status, and evolving disciplinary identities. Alongside scholarly discourse, popular media, such as landscape imagery, postcards, and wall maps, depicting representative features of the “Classical” Karst have had a lasting impact on public visions of karst areas.

Overall, the pooling of this broad topographical and practical knowledge within a new, scientifically accredited format and the global comparison of dissolutional landforms, distinct from phenomena of fluvial geomorphology, can be considered the essential merit of the “Karst Phenomenon”. This consolidation achieved by Cvijić not only facilitated cross-border exchanges in early geomorphological research but also paved the way for a deeper understanding of evolutionary and hydrological processes in karst landscapes and beyond. His extensive correspondence, field notes, and hand-drawn maps illuminate the development and impact of

Cvijić's and his contemporaries' (visual) knowledge on the observation and collective perception of landforms, offering promising avenues for future research (JOVIĆ AND STANIĆ, 2015; MILANOVIĆ PEŠIĆ et al., 2019). However, today's geomorphologists, such as Ford (2007), consider the Dinaric Karst less suitable for a more general study of the evolution of dissolutional landscapes because of its complex geological structure and the inherent variability among individual karst regions. Despite this limitation, the study of karst phenomena remains essential to unravel the intricate processes that shape both the natural and social fabrics of our world.

ACKNOWLEDGEMENTS

The idea for this article arose during a trip with Ernst Hamm (York University, Toronto) through the South Tyrolean Dolomites in June 2022. I would like to thank Jelena Čalić (Belgrade), Ernest Geyer (Admont), Norman Henniges (Berlin), Walter Klappacher (Salzburg), Sandra Klos, Rudolf Pavuza, Lukas Plan (Vienna), and Nadja Zupan-Hajna (Postojna) for reading and commenting on this essay and/or providing sources. I am also grateful for the constructive and enriching suggestions of the editors and two anonymous reviewers. Last but not least, I especially thank Associate Editor Kathleen Histon for her invitation to submit a manuscript on this topic and her unwavering support and patience throughout the writing process.

REFERENCES

- ASH, M.G., and SURMAN, J. (Eds.), 2012, *The Nationalization of Scientific Knowledge in the Habsburg Empire, 1848–1918*. Palgrave Macmillan, London, 258 p.
- BECKINSALE, R.P., and CHORLEY, R.J., 1991, *The History of the Study of Landforms or the Development of Geomorphology, vol. 3: Historical and Regional Geomorphology*. Routledge, New York, 524 p.
- BERTARELLI, L.V., 1919, *Per un parco nazionale sotterraneo italiano*. Le Vie d'Italia, v. 25(3), pp. 129–35.
- BÖTTCHER, H., 1979, *Zwischen Naturbeschreibung und Ideologie. Versuch einer Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte der deutschen Geomorphologie*. Gesellschaft zur Förderung regional-wissenschaftlicher Erkenntnisse, Oldenburg, 151 p.
- BOUÉ, A., 1856, *Beiträge zur Geographie Serbiens*. Sitzungsberichte, kaiserliche Akademie der Wissenschaften, math.-nat. Klasse, v. 20, pp. 549–573.
- BOUÉ, A., 1861, *Über die Karst- und Trichterplastik im Allgemeinen*. Sitzungsberichte, kaiserliche Akademie der Wissenschaften, math.-nat. Klasse, v. 43, pp. 283–293.
- ČALIĆ, J., 2007, *Karst Research in Serbia before the Time of Jovan Cvijić*. Acta Carsologica, v. 36(2), pp. 315–319.
- CHAVANNE, J., 1882, *Die geographischen Unterrichtsmittel*. Zeitschrift für Schul-Geographie, v. 3, pp. 1–11.
- CHAVANNE, J., HAARDT, V. V., PRAUSEK, V. et al., 1886, *Hölzel's Geographische Charakterbilder für Schule und Haus*. Textbeilage. Hölzel, Vienna, 226 p.
- COEN, D., 2018, *Climate in Motion: Science, Empire, and the Problem of Scale*. Chicago UP, Chicago, 464 p.
- COHEN, G.B., 2015, *Expansion and the Limits of Inclusion: The Students of the Vienna University, 1860–1914*. In: Ash, M.G., and Ehmer, J. (Eds.), *Universität - Politik – Gesellschaft. 650 Jahre Universität Wien, vol. 2*. V&R unipress, Vienna, pp. 505–528.
- COX, E.T., 1874, *Fifth annual report of the Geological Society of Indiana*. Sentinel Company, Indianapolis, 494 p.

- CRAMPTON, J.W., 2006, *The cartographic calculation of space. Race mapping and the Balkans at the Paris Peace Conference*. Social & Cultural Geography, v. 7, pp. 731–752.
- CVJIĆ, J., 1887/88, *Prilog geografskoj terminologiji našoj* [Contribution to our geographical terminology], 2 parts. Prosvedni glasnik, v. 8–9, pp. 903–916, 21–28.
- CVJIĆ, J., 1889, *Ka poznavanju krša Istočne Srbije* [Contribution to the study of karst in eastern Serbia]. Prosvedni glasnik, v. 10, pp. 1–14, 62–73, 131–139.
- CVJIĆ, J., 1891, *Prekonoška Pećina* [Prekonoška Cave]. Geološki anali Balkanskoga poluostrva, v. 3, pp. 272–299.
- CVJIĆ, J., 1893, *Das Karstphänomen: Versuch einer morphologischen Monographie*. Hölzel, Vienna, pp. 217–329.
- CVJIĆ, J., 1895, *Карст: географска монографија* [Karst: Geographical Monograph]. Štamarija Kraljevine, Belgrade, 176 p.
- CVJIĆ, J., 1918, *Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst*. Recueil des Travaux de l'Institute de Géographie Alpine, v. 6, pp. 375–426.
- DAUBRÉE, A., 1887, *Les eaux souterraines*. 2 vol., Dunod, Paris, 757 p.
- DAVIS, W.M., 1901, *An excursion in Bosnia, Hercegovina and Dalmatia*. Bulletin of the Geographical Society of Philadelphia, v. 3(2), pp. 47–50.
- DE WAELE, J., and GUTIÉRREZ, F., 2022, *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*. Wiley-Blackwell, Hoboken and Chichester, 912 p.
- DEMETER, G., and BOTLIK, Z., 2021, *Maps in the Service of the Nation. The Role of Ethnic Mapping in Nation-Building and Its Influence on Political Decision-Making Across the Balkan Peninsula*. Frank & Timme, Berlin, 310 p.
- DIENER, K., 1886, *Libanon. Grundlinien der physischen Geographie und Geologie von Mittel-Syrien*. Hölder, Vienna, 412 p.
- FLECK, L., 1935, *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache*. Schwabe, Basel, 150 p.
- FORD, D., 2007, *Jovan Cvijić and the founding of karst geomorphology*. Environmental Geology, v. 51, pp. 675–684.
- FORD, D., 2015, *The science of caves and karst: From the beginning of the Geological Society of America to ca. 1960*. In: Feinberg, J., Gao, Y., and Alexander, E.C. (Eds.), *Caves and Karst Across Time*. Geological Society of America, Boulder, pp. 1–17.
- FORD, D., and WILLIAMS, P., 2007, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. 2nd edition. Wiley, Chichester, 562 p.
- FOURNET, J., 1858, *Hydrographie souterraine. Mémoires de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon*, 2e série, v. 8, pp. 221–296.
- FRUWIRTH, C., 1883/85, *Ueber Höhlen*. Zeitschrift des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins, v. 14/16, pp. 1–37, 108–130.
- GAMS, I., 1973, *Razvoj slovenskih besed kras in dolina* [The evolution of the Slovene words “kras” and “dolina”]. In: Gams, I., Kunaver, J., and Radinja, D. (Eds.), *Slovenska kraska terminologija*. Univ. Press, Ljubljana, pp. 39–53.
- GAUCHON, C., 1999, *L'adoption du terme de « karst » en France*. Karstologia, v. 34(2), pp. 45–51.
- GÈZE, B., 1983, *Karstologie et spéléologie*. Karstologia, v. 1, pp. 2–4.
- GINSBURGER, N., 2010, *« La guerre, la plus terrible des érosions »*. Cultures de guerre et géographes universitaires Allemagne-France-États-Unis. PhD thesis, Université Paris-Nanterre, 1682 p.
- GINSBURGER, N., 2015, *Les Balkans avec ou sans Cvijić. Géographes et géologues universitaires austro-allemands, français et serbes dans un espace européen périphérique*. In: Clerc, P., and Robic, M.-C. (Eds.), *Des géographes hors-les-murs?*. L'Harmattan, Paris, pp. 323–354.
- GINSBURGER, N., 2016, *Réseaux académiques et circulations savantes entre guerres et paix*. Cybergeog, 784 (<http://journals.openedition.org/cybergeog/27690>).

- GÓRNY, M., 2019, *Vaterlandszeichner. Geografen und Grenzen im Zwischenkriegseuropa*. Fibre, Osnabrück, 304 p.
- GRUND, A., 1903, *Die Karsthydrographie: Studien aus Westbosnien*. Hölzel, Vienna, pp. 103–200.
- HAUER, F. V., 1883, *Berichte über die Wasserverhältnisse in den Kesselthälern von Krain*. Österreichische Touristen-Zeitung, v. 3(3–4), pp. 25–31, 37–41.
- HENNIGES, N., 2014, „Sehen lernen“: Die Exkursionen des Wiener Geographischen Instituts und die Formierung der Praxiskultur der geographischen (Feld-)Beobachtung. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft, v. 156, pp. 141–170.
- HENNIGES, N., 2017a, *Die Spur des Eises: eine praxeologische Studie über die wissenschaftlichen Anfänge des Geologen und Geographen Albrecht Penck*. Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig, 556 p.
- HENNIGES, N., 2017b, *The Rolled World. German school wall maps and their publishers*. IMCOS, v. 151, pp. 45–53.
- HERMANN, B.F., 1781, *Benedikt Franz Hermann's Reisen durch Oesterreich*, vol. 2. Wappler, Vienna, 143 p.
- HILPERT, H., 1907, *Die historische Entwicklung der Frage nach dem Wesen des Karstphänomens*. PhD thesis, Würzburg University, 126 p.
- HOHENWART, F., 1830, *Wegweiser für die Wanderer in der berühmten Adelsberger und Kronprinz Ferdinands-Grotte*, vol. 1. Sollinger, Vienna, 31 p.
- JOVANOVIĆ-KRUSPEL, S., 2019, *Bilder der Welt: Hölzels „Geographische Charakterbilder“*. In: Wiesinger, B. (Ed.), 175 Jahre Verlag Eduard Hölzel. Hölzel, Vienna, pp. 89–95.
- JOVIĆ, V., and KOSTIĆ, A. (Eds.), 2015, *Jovan Cvijić. Life, Work, Times*. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade, 286 p.
- JOVIĆ, V., and PETROVIĆ, A.M. (Eds.), 2015, *150th Anniversary of Jovan Cvijić's Birth*. 2 vol. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade, 820 p.
- JOVIĆ, V., and STANIĆ, M., 2015, *Jovan Cvijić's correspondence*. In: JOVIĆ, V., and KOSTIĆ, A. (Eds.), *Jovan Cvijić. Life, Work, Times*. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade, pp. 213–231.
- JUREIT, U., 2012, *Das Ordnen von Räumen: Territorium und Lebensraum*. Hamburger Edition, Hamburg, 445 p.
- KARRER, F., 1884, *Zur Geologie der Karst-Erscheinungen*. Wiener Allgemeine Zeitung, v. 1462 (March, 24), p. 4.
- KATZER, F., 1909, *Karst und Karsthydrographie. Zur Kunde der Balkanhalbinsel*. Kajon, Sarajevo, 94 p.
- KAVREČIĆ, P., 2020, *Tourism and Fascism. Tourism Development on the Eastern Italian Border*. Prispevki za novejšo zgodovino, v. 60(2), pp. 99–119.
- KINDER, S., 2020, *Die Entwicklung der Geographischen Länderkunde*. In: JOHLER, R., and WOLF, J. (Eds.), *Beschreiben und Vermessen. Raumwissen in der östlichen Habsburgermonarchie im 18. und 19. Jahrhundert*. Frank & Timme, Berlin, pp. 679–703.
- KLEMUN, M., 2012, *National 'Consensus' As Culture and Practice: The Geological Survey*. In: ASH, M.G., and SURMAN, J. (Eds.), *The Nationalization of Scientific Knowledge*. Palgrave Macmillan, London, pp. 83–101.
- KLEMUN, M., 2018, *Spaces and places: an historical overview of the development of geology in Austria*. Geological Society, London, Special Publications 442, pp. 263–270.
- KLIMCHOUK, A.B., 2015, *The Karst Paradigm: Changes, Trends and Perspectives*. Acta Carsologica, v. 44(3), pp. 289–313.
- KNEZ, M., OTONIČAR, B., PETRIČ, M., et al. (Eds.), 2020, *Karstology in the Classical Karst*. Springer, Cham, 236 p.
- KOHL, J.G., 1851, *Der Karst*. Deutsche Vierteljahrsschrift, v. 14(3), pp. 1–62.
- KRANJC, A. (Ed.), 1997, *Kras: Slovene Classical Karst*. ZRC SAZU, Ljubljana, 254 p.
- KRANJC, A., 1994, *About the name and the history of the region Kras*. Acta Carsologica, v. 23, pp. 81–90.

- KRANJC, A., 2011, *The Origin and evolution of the term "Karst"*. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 19, pp. 567–570.
- KRAUS, F., 1887, *Ueber Dolinen*. *Verhandlungen der Geologischen Reichsanstalt*, v. 10(2), pp. 54–62.
- KRAUS, F., 1891, *Der Karst*. In: RUDOLF VON HABSBURG (Ed.), *Die österreichisch-ungarische Monarchie in Wort und Bild*. vol. 8: *Kärnten und Krain*. Hof- und Staatsdruckerei, Vienna, pp. 285–304.
- KRAUS, F., 1894a, *Das Karstphänomen [book review]*. *Globus*, v. 65, pp. 21–22.
- KRAUS, F., 1894b, *Höhlenkunde*. Gerold, Vienna, 308 p.
- KREBS, N., and LEX, F., 1899, *Reisebericht*. *Jahrbuch, Verein der Geographen an der Universität Wien*, v. 25, pp. 81–122.
- KREBS, N., 1907, *Die Halbinsel Istrien: Landeskundliche Studie*. Teubner, Leipzig, 166 p.
- KREBS, N., 1910, *Offene Fragen der Karstkunde*. *Geographische Zeitschrift*, v. 16(3), pp. 134–142.
- L.B.B. [LANDESBESCHREIBUNGSBUREAU DES K.U.K. GENERALSTABS], 1889, *Der westliche Teil des Illyrischen Gebirgslandes*. *Mittheilungen der Geographischen Gesellschaft in Wien*, v. 32, pp. 416–430.
- LINDNER, A.F., 1841, *Corso sotterraneo del fiume Recca, suo ritrovamento presso Trieste e progetto di trarne un canale a beneficio della città*. *Giornale dell'I.R. Istituto Lombardo di Scienze Lettere ed Arti e Biblioteca Italiana*, v. 2(4), pp. 116–121.
- LIPOLD, M.V., 1858, *Bericht über die geologische Aufnahme in Unter-Krain*. *Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt*, v. 9, pp. 257–276.
- LORENZ, J.R., 1860, *Bericht über die Bedingungen der Aufforstung und Cultivierung des croatischen Karstgebirges*. *Mittheilungen der Geographischen Gesellschaft in Wien*, v. 4, pp. 97–140.
- MAIS, K., 1989, *Vom Karst zur Karstkunde: Zum Wandel einer lokalen Bezeichnung zum Fachausdruck*. *Die Höhle*, v. 40, pp. 78–84.
- MARTEL, É.-A., 1889, *Les Cévennes et la région des Causses*. Delagrave, Paris, 407 p.
- MARTEL, É.-A., 1894, *Les Abîmes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie*. Delagrave, Paris, 580 p.
- MARTONNE, E. DE, 1909, *Traité de géographie physique*. Armand Colin, Paris, 910 p.
- MATTES, J., 2012, *Die Eroberung der Tiefe: Mitglieder der k. k. Geologischen Reichsanstalt als Akteure und Förderer der Höhlenforschung*. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, v. 95, pp. 81–114.
- MATTES, J., 2015, *Reisen ins Unterirdische. Eine Kulturgeschichte der Höhlenforschung*. Böhlau, Vienna, 418 p.
- MATTES, J., 2018, *Coming from abroad. The discourse on scientific centralism and Jovan Cvijić's studies in Vienna*. In: JOVIĆ, V., and PETROVIĆ, A.M. (Eds.), *150th Anniversary of Jovan Cvijić's Birth*. vol. 1. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade, pp. 13–28.
- MATTES, J., 2024, *Collaborative Research in Imperial Vienna: Science Organization, Statehood, and Civil Society, 1848–1914*. *Austrian History Yearbook (Cambridge)*, v. 55, 1–28 (first view).
- MILANOVIĆ PEŠIĆ, A., ČALIĆ, J., PETROVIĆ, M.D., TERZIĆ, A., and VUKSANOVIĆ-MACURA, Z. (Eds.), 2019, *From the Notebooks of Jovan Cvijić. Selected Pages and Interpretations*. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade, 199 p.
- MISHKOVA, D., 2018, *Beyond Balkanism: the scholarly politics of region making*. Routledge, New York, 282 p.
- MOJSISOVICS, E. v., 1880, *Zur Geologie der Karst-Erscheinungen*. *Zeitschrift des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, v. 11, pp. 111–116.
- MORLOT, A., 1848, *Ueber die geologischen Verhältnisse von Istrien*. *Naturwissenschaftliche Abhandlungen (Vienna)*, v. 2, pp. 257–317.
- PENCK, A., 1891, *Das Grottenbuch der Section Küstenland d. D. u. Oe. A.-V.* *Mittheilungen des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, v. 17, p. 202.
- PENCK, A., 1894, *Morphologie der Erdoberfläche*. vol. 2. Engelhorn, Stuttgart, 696 p.

- PENCK, A., 1900, *Geomorphologische Studien aus der Herzegowina*. Zeitschrift des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins, v. 31, pp. 25–41.
- PUTICK, W., 1889, *Die unterirdischen Flussläufe von Inner-Krain [Part 3]*. Mittheilungen der Geographischen Gesellschaft in Wien, v. 32, pp. 57–79.
- RENAULT, P., 1992, *La Karstologie française de 1900 à 1992*. In: SALOMON, J.N., and MAIRE, R. (Eds.), *Karsts et évolutions climatiques*. Presses Universitaires, Bordeaux, pp. 17–30.
- REYER, E., 1881, *Studien über das Karstrelief*. Mittheilungen der Geographischen Gesellschaft in Wien, v. 24, pp. 76–87, 101–107.
- RICHTHOFEN, F.V., 1886, *Führer für Forschungsreisende*. Oppenheim, Berlin, 745 p.
- SCHMIDL, A., 1854, *Zur Höhlenkunde des Karstes*. Braumüller, Vienna, 316 p.
- SCHMIDL, A., 1858, *Die österreichischen Höhlen*. Eine geographische Skizze. Emich, Pest, 29 p.
- SCHULTZ, H.-D., 2012, *Völkerkarten im Geografieunterricht des 20. Jahrhunderts*. In: HASLINGER, P., and OSWALT, V. (Eds.), *Kampf der Karten. Propaganda und Geschichtskarten*. Herder-Institut, Marburg, pp. 13–61.
- SCHUT, P.-O., and DELALANDRE, M., 2015, *L'échec d'une discipline: Montée et déclin de la spéléologie en France (1888-1978)*. Revue d'histoire des sciences, v. 68, pp. 81–107.
- SEEGER, S., 2018, *Map Men. Transnational Lives and Deaths of Geographers in the Making of East Central Europe*. Chicago UP, Chicago, 320 p.
- SHAW, T.R., 1992, *History of Cave Science. 2nd edition*. Sydney Speleological Society, Sydney, 338 p.
- SHAW, T.R., and ČUK, A., 2012, *Slovene Caves and Karst Pictured*. ZRC SAZU, Ljubljana, 230 p.
- SHAW, T.R., and ČUK, A., 2015, *Slovene Caves and Karst in the Past*. ZRC SAZU, Ljubljana, 464 p.
- SIMONY, F., 1847, *Höhlen- und Karstbildung in den geschichteten Kalken*. Berichte über die Mittheilungen von Freunden der Naturwissenschaften in Wien, v. 1, pp. 55–59.
- SONKLAR, K. v., 1886, *Orographie und Hydrographie*. In: HABSBURG, R. v. (Ed.), *Österreich-Ungarn in Wort und Bild, vol. 2: Übersichtsband. Naturgeschichtliche Abteilung*. Hof- und Staatsdruckerei, Vienna, pp. 19–86.
- STANKOVIĆ, S., 2015, *Biography*. In: JOVIĆ, V., and KOSTIĆ, A. (Eds.), *Jovan Cvijić*. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade, pp. 11–77.
- STEPIŠNIK, U., 2015, *The Problem of Dissolution Doline Definition*. Dela, v. 43, pp. 29–40.
- STEVANOVIĆ, Z., 2013, *The History of Hydrogeology in Serbia*. In: HOWDEN, N., and MATHER, J. (Eds.), *History of Hydrogeology*. Taylor & Francis, Boca Raton, pp. 257–274.
- STEVANOVIĆ, Z., and MUJATOVIĆ, B. (Eds.), 2005, *Cvijić and Karst*. Serbian Academy of Sciences & Arts, Belgrade.
- STUR, D., 1858, *Das Isonzo-Thal*. Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt, v. 9, pp. 324–366.
- SUESS, E., 1883-1909, *Das Antlitz der Erde, 4 vol.* Tempsky, Freytag, Prague, 2778 p.
- SUPAN, A., 1894, *Das Karstphänomen. Les Abîmes [book review]*. Petermanns Mittheilungen, v. 40, pp. 136–137.
- ŠUŠTERŠIČ, F., 1994, *Classic dolines of classical site*. Acta Carsologica, v. 23, pp. 123–156.
- TIETZE, E., 1873, *Geologische Darstellung der Gegend zwischen Carlstadt in Croatien und dem nördlichen Theil des Canals der Morlacca*. Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt, v. 23, pp. 27–70.
- TIETZE, E., 1880, *Zur Geologie der Karsterscheinungen*. Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt, v. 30, pp. 729–756.
- TRAMPLER, R., 1894, *Das Karstphänomen [book review]*. Mittheilungen der Geographischen Gesellschaft in Wien, v. 37, pp. 324–329.
- TRUDGILL, S.T., 2008, *Limestone Landforms, 1890–1965*. In: BURT, T.P., CHORLEY, R.J., BRUNSDEN, D., et al. (Eds.), *The History of the Study of Landforms or the Development of Geomorphology, vol. 4: Quaternary and Recent Processes and Forms*. Geological Society, London, pp. 107–125.

- UMLAUFT, F., and HAARDT, V. v., 1887, *Hölzel's Geographische Characterbilder*. Hand-Ausgabe. Hölzel, Vienna, 70 p.
- VOGEL, S., 2019, *Der Karst-Erklärer Johann Georg Kohl*. Die Höhle, v. 70, pp. 102–111.
- WARDENGA, U., 1995, *Geographie als Chorologie. Zur Genese und Struktur von Alfred Hettners Konstrukt der Geographie*. Steiner, Wiesbaden, 255 p.
- WEIGAND, B., 1894, *Das Karstphänomen [book review]*. Göttingische Gelehrte Anzeigen, v. 156, pp. 800–805.
- WESSELY, J., 1876, *Das Karstgebiet Militär-Kroatiens und seine Rettung, dann die Karstfrage überhaupt*. Albrecht & Fiedler, Agram, 366 p.
- WESTERMANN, A., 2010, *Overcoming the Division of Labour in Global Tectonics: Eduard Suess' "The Face of the Earth"*. Workshop "Earth Science – Global Science", York Univ., Toronto.
- WOODS, J.E., 1862, *Geological Observations in South Australia*. Longman & Green, London, 404 p.



Johannes Mattes is a historian of science specializing in the natural sciences (e.g. earth sciences, geography, cartography, archaeology, zoology, nuclear medicine) from the eighteenth to the twentieth century. He is currently a Marie Curie Fellow at the University of Oslo (Norway) and a research project leader at the Austrian Academy of Sciences in Vienna. Mattes is Secretary General of the International Union of Speleology (UIS) and a board member of the International Commission on the History of the Geological Sciences (INHIGEO) and of the History of Earth Sciences Society (HESS). He was awarded the Bader Prize for the History of Natural Sciences in 2021 and the Young Scientist Award of the Geological Society of America Karst Division in 2017.

Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”	Vol. 54 (2025)	pp. 25-34	Trieste 2025
--	----------------	-----------	--------------

ANDREA BUSSANI¹, ALDO FEDEL¹

REVISITING ATMOSPHERIC THERMAL TIDES IN THE ‘COSTANTINO DORIA’ CAVE (N. 3875 V.G.), TRIESTE: INSIGHTS FROM OLD AND NEW DATA

RIASSUNTO

Dal 2 settembre 2023 al 27 giugno 2025, all'interno della grotta “Costantino Doria”, situata sul Carso triestino, sono state raccolte serie temporali di temperatura dell'aria e pressione atmosferica mediante uno strumento digitale programmabile, proseguendo le precedenti attività di ricerca. L'elevata frequenza di campionamento (intervallo di campionamento tra 2 e 20 secondi) ha permesso di osservare il comportamento delle grandezze indagate su scala minutale, evidenziando pattern ben definiti con periodicità variabili secondo la stagione. Per la prima volta dall'inizio del monitoraggio, è stato registrato nel segnale di temperatura il periodo di passaggio da un regime prevalentemente diurno (periodo invernale) a uno semidiurno (periodo estivo). È inoltre proposto un modello idraulico euristico per interpretare la dinamica degli scambi termici tra l'aria della cavità e le pareti rocciose, e spiegare l'anticipo di fase del segnale termico rispetto alla pressione. Infine, è stata condotta un'analisi retrospettiva dei dati di pressione atmosferica di fine estate 2020 registrati nella cavità, ipotizzando che le oscillazioni osservate siano riconducibili agli effetti di onde di Rossby.

ABSTRACT

Between September 2nd, 2023, and June 27th, 2025, time series of air temperature and atmospheric pressure were collected inside the “Costantino Doria” cave, located in the Trieste Karst, continuing previous research efforts. The high sampling frequency (sampling interval ranging from 2 to 20 seconds) enabled minute-scale observation of the measured variables, revealing well-defined patterns with seasonally dependent periodicities. For the first time since the beginning of the monitoring campaigns, the transitional phase between a predominantly diurnal regime (winter period) and a semidiurnal regime (summer period) was recorded in the air temperature signal. A hydraulic analogy is also proposed to interpret the dynamics of thermal exchanges between cave air and rock walls, offering an explanation for the observed phase lead of the thermal signal relative to pressure. Finally, a retrospective analysis of atmospheric pressure data from late summer 2020 was conducted, suggesting that the observed oscillations may be attributable to the effects of Rossby waves.

¹ Commissione Grotte “Eugenio Boegan”, Società Alpina delle Giulie, Trieste, Italy.
Corresponding author email: andrea.bussani@gmail.com.

INTRODUCTION

The study presented in this paper builds upon a long-standing tradition of meteorological investigations conducted in the “Costantino Doria” cave (N. 3875 V.G.), a karstic cavity near Trieste, Italy (Fig. 1). Specifically, this work represents a further step in understanding the effects of atmospheric thermal tides on the cave’s air temperature and the physical processes involved. Previous research campaigns have already identified extremely subtle thermal oscillations, presumably linked to atmospheric thermal tides (BUSSANI, 2005; BUSSANI, 2007; BUSSANI, 2022), but some questions remain open—particularly concerning the mechanisms

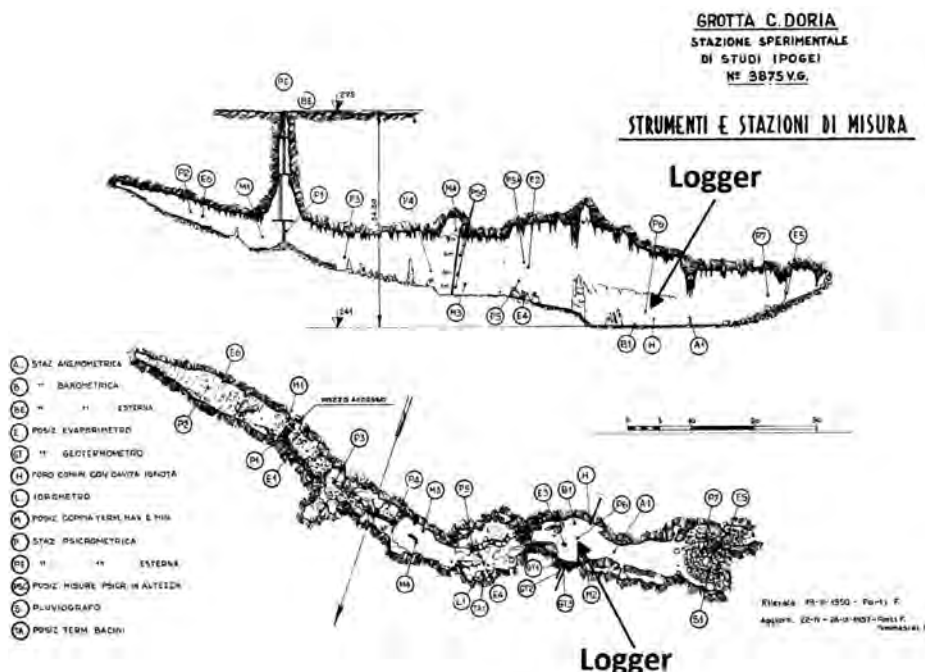


Figure 1 - Logger position in the cave (adapted from Polli, 1969).

underlying the observed phase lag between air temperature and atmospheric pressure signals. For a detailed overview of the site and its historical background, the reader is referred to the introductory section of the paper by BUSSANI (2022). Here, we focus on newly acquired data (from September 2023 through June 2025) that shed further light on the behaviour of thermal tides in the cave environment at different time scales (i.e., daily and seasonal). Moreover, a thermodynamic interpretation of heat exchanges is provided, based on a hydraulic analogy. Finally, a brief report about the possible detection of Rossby waves in previously recorded data (August-September 2020) is given.

INSTRUMENTATION, DATA COLLECTION AND STATISTICAL ANALYSIS

The data about air temperature and atmospheric pressure of “Costantino Doria” cave were collected by means of a Driesen und Kern Plog 520 programmable data logger (serial number: 521005522). The technical specifications of the instrument are given in Tab. 1 (Bussani, 2007).

Length	200 mm
Diameter	23 mm
Memory	500000 measurements
Pressure accuracy	20 Pa
Pressure resolution	15 Pa
Temperature accuracy	0.1 °C
Temperature resolution	0.003 °C

Table 1 - Technical specifications of the Driesen und Kern Plog 520 programmable data logger (from Bussani, 2007).

The recordings started on September 2nd, 2023, and ended on June 27th, 2025. The sampling interval ranged from 2 s up 20 s, though for most times it was set to 5 s (see Tab. 2).

Data segment	Data collection	Sampling interval (s)
1	s: 02/09/2023 19:03 e: 30/09/2023 17:52	5
2	s: 01/10/2023 04:41 e: 29/10/2023 09:13	5
3	s: 30/10/2023 00:00 e: 25/11/2023 13:33	5
4	s: 26/11/2023 00:00 e: 23/12/2023 10:41	5
5	s: 24/12/2023 00:00 e: 21/01/2024 01:31	5
6	s: 23/01/2024 00:00 e: 18/02/2024 12:35	5
7	s: 19/02/2024 00:00 e: 18/03/2024 02:48	5
8	s: 25/03/2024 00:00 e: 05/04/2024 00:25	2
9	s: 29/04/2024 00:00 e: 27/05/2024 02:00	5
10	s: 03/06/2024 04:00 e: 01/07/2024 07:29	5
11	s: 05/07/2024 05:00 e: 28/07/2024 09:52	5
12	s: 29/07/2024 00:00 e: 24/08/2024 15:27	5
13	s: 29/08/2024 00:00 e: 26/09/2024 08:07	5
14	s: 06/10/2024 00:00 e: 03/11/2024 02:37	5
15	s: 06/11/2024 00:00 e: 01/12/2024 13:18	5
16	s: 05/12/2024 13:01 e: 15/03/2025 14:43	20
17	s: 16/03/2025 18:01 e: 27/06/2025 08:46	20

Table 2 - Air temperature and atmospheric pressure data segments: “s” and “e” stand for measuring start time and end time, respectively; times are given in the dd/mm/yyyy hh:mm format; “sampling interval” is the time elapsed between two consecutive measurements in the raw data (i.e., before computing the minute-average).

The high sampling frequency was aimed at reducing statistical uncertainties associated with the low signal-to-noise ratio, given the thermal tide’s small amplitude (approximately 2–3 m°C). The logger was periodically retrieved to download the data (the dataset collected between two retrievals is referred to as a “data segment”); after the download procedure, the logger was again deployed in the same place. The whole procedure usually took one day up to ten days. In April 2024 a misconfiguration of the logger sampling time - mistakenly set to 2 seconds instead of 5 s - led to the memory saturation approximately three weeks earlier than expected, resulting in the failure to record measurements during those weeks. Each data segment underwent an initial cleaning based on visual inspection aimed at removing measurements taken when—following the deployment of the instrument—the temperature of the logger and/or the cave had not yet stabilized. Additionally, measurements recorded when occasional spelunkers entered the cave – clearly evident as a spike in the temperature signal – as well as those captured immediately after retrieval and before data download, were excluded. The cleaned data were then averaged over one-minute intervals.

To improve the clarity of the semidiurnal patterns plotted in Fig. 5, minute-averaged temperature measurements were grouped into 5-minute intervals. This temporal aggregation was performed to reduce sensor noise and highlight broader trends.

Moreover, to analyze the average daily cycle of temperature and pressure residuals inside “Costantino Doria” cave (Fig. 6), we extracted data recorded between May 1st and October 31st, 2024—corresponding to the period with the maximum vertical stability of the air column and, consequently, when changes in the air temperature are at their minimum (Busani, 2022). The minute-averaged measurements were first grouped into 5-minute intervals to reduce short-term noise. Then, an exponential moving average (EMA) filter with a smoothing parameter $\alpha = 0.01$ was applied to both temperature and pressure datasets to remove long-term variations. The EMA was computed recursively using the formula:

$$\text{EMA}_n = \alpha \cdot x_n + (1 - \alpha) \cdot \text{EMA}_{n-1}$$

where x_n is the current measurement and EMA_{n-1} is the previous filtered value. The first EMA value was initialized to the first 5-minute average to allow recursive filtering. The value $\alpha = 0.01$ was specifically chosen to ensure a very slow response of the filter, effectively capturing only long-term trends while preserving daily-scale fluctuations such as the diurnal cycle. Residuals, obtained by subtracting the EMA-filtered signals from the raw 5-minute averaged data, were then averaged according to the time of day to extract the mean diurnal cycle. Finally, a circular 10-minute smoothing window was applied to suppress residual high-frequency fluctuations and improve interpretability, while preserving the daily periodic pattern. Each smoothing step was introduced with a specific purpose: the minute and 5-minute averages helped reduce sensor noise and random spikes; the EMA removed long-term trends; and the 10-minute filter refined the residual signal without distorting its natural rhythm.

RESULTS

1. Air temperature and atmospheric pressure descriptive time series analysis

During the two-year monitoring period, temperature recordings inside the cave (Fig. 2) displayed a clear seasonal pattern. The warm season, extending roughly from April to October, was characterized by remarkable thermal stability of the cave air, with daily fluctuations limited to just a few hundredths of a degree. This period exhibited a progressive warming trend—initially rapid in spring, then gradually leveling off through summer and early autumn.

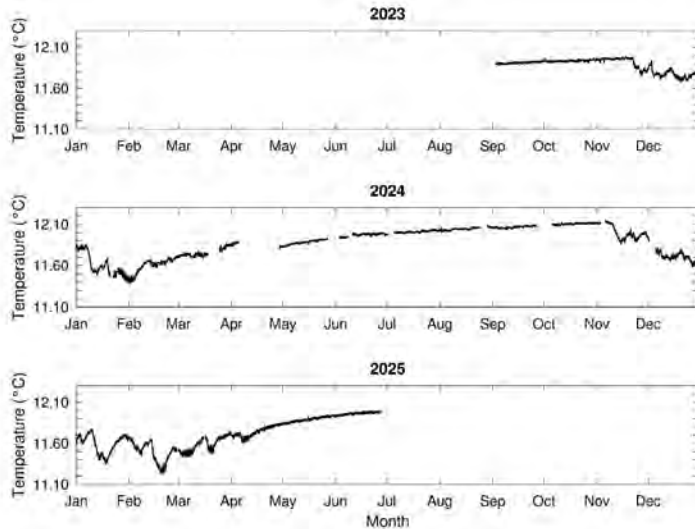


Figure 2 - Air temperature in the “Costantino Doria” Cave, September 2023 – June 2025.

The onset of the cold season was abrupt and typically occurred in November, marked by the intrusion of denser outside air and the subsequent breakdown of vertical thermal stratification. This transition introduced increased thermal variability, which manifested in two distinct phases: a pronounced cooling period from November to February, resulting in a temperature drop of approximately 0.6–1 °C; and a short transitional warming phase between February and April, still marked by significant fluctuations. With the return of spring, the air column progressively regained vertical stability, which then persisted through the following warm season. These observations are consistent with previous findings reported by BUSSANI (2022).

In addition to air temperature, atmospheric pressure was monitored as well (Fig. 3) in

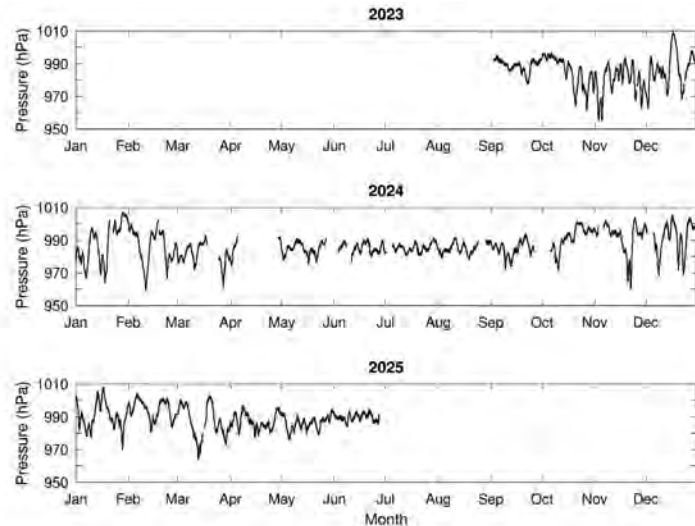


Figure 3 - Atmospheric pressure in the “Costantino Doria” Cave, September 2023 – June 2025.

order to assess the presence of seasonal trends or distinctive features. The pressure time series revealed a clear alternation between two regimes: from April to October, pressure variations inside the cave were markedly smaller whereas from November to March the signal exhibited pronounced and frequent fluctuations. This seasonal pattern mirrors the dynamics of external atmospheric pressure, suggesting a strong coupling between the cave interior and the outside meteorological conditions. Unlike temperature, however, no additional pressure-specific patterns were observed within the cave environment.

2. Daily cycle of air temperature in particular winter conditions

Fig. 4 illustrates the temporal evolution of cave air temperature across three distinct periods: late January to early February 2024, early March 2025, and April 2025. Within each panel, specific intervals stand out for the clarity of their thermal signal: namely, the final days of January and the beginning of February 2024, the first ten days of March 2025, and the first ten days of April 2025. These time intervals are characterized by a pronounced diurnal temperature cycle, with daily amplitudes ranging from approximately 0.05 °C to just under 0.1 °C. The signal is notably regular and well-defined, distinguishing itself from surrounding days where the thermal pattern appears less coherent.

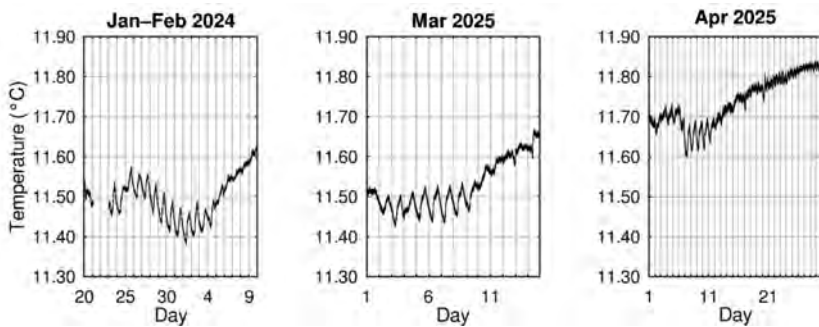


Figure 4 - Evidence of pronounced diurnal patterns in the air temperature signal from the “Costantino Doria” Cave, observed over consecutive days spanning three distinct time periods.

Meteorological data from OSMER (Osservatorio Meteorologico Regionale, station at Trieste – Molo Fratelli Bandiera) indicate that these well-defined diurnal cycles correspond to days with high solar irradiance, associated with clear or nearly cloudless skies. This correlation is further supported by the timing of the temperature extrema within the cave: minimum values typically occur near sunrise, while maximum values coincide roughly with sunset. Interestingly, these days did not exhibit significant increases in external air temperature, and wind conditions were generally weak to moderate, with the sole exception of April 6, 2025, which was marked by strong wind.

These observations suggest that the emergence of a distinct diurnal cycle within the cave is primarily driven by solar radiation under fair-weather conditions. While the mechanism appears consistent, further monitoring is required to better understand the processes governing the onset of such thermal response of the cave environment to external atmospheric forcing.

Additionally, Fig. 5 reveals a noteworthy transition, occurred in the last ten days of April 2025, from the diurnal cycle described in Fig. 4 to a semi-diurnal pattern in the temperature signal, associated with the establishment of a stable air column within the cave. Due

to experimental issues, this transition had not been previously observed. It is particularly interesting to note how rapidly this shift takes place, suggesting that the transition between these two regimes may be critically sensitive to minimal variations in air temperature.

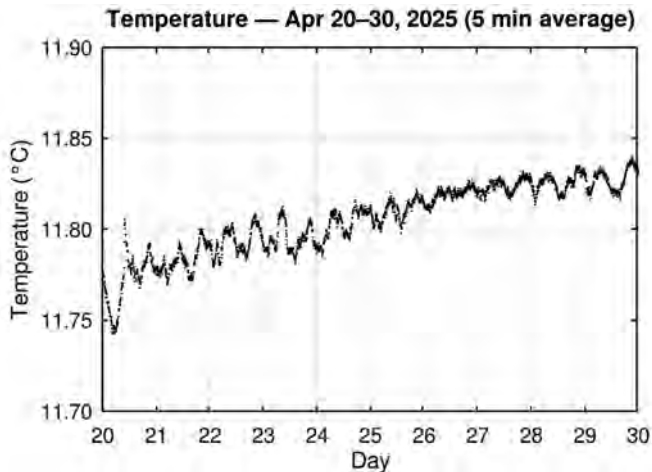


Figure 5 - Semidiurnal patterns in the air temperature signal from the “Costantino Doria” Cave, observed over consecutive days at the onset of the vertical stability of the air column.

3. Phase-lag between air temperature and atmospheric pressure in summer conditions

During the warm season—when the cave’s air column is vertically stratified and temperature fluctuations are minimal—a pronounced semidiurnal oscillation emerges in the smoothed temperature residuals, with an amplitude of approximately 2–3 m°C (Fig. 6).

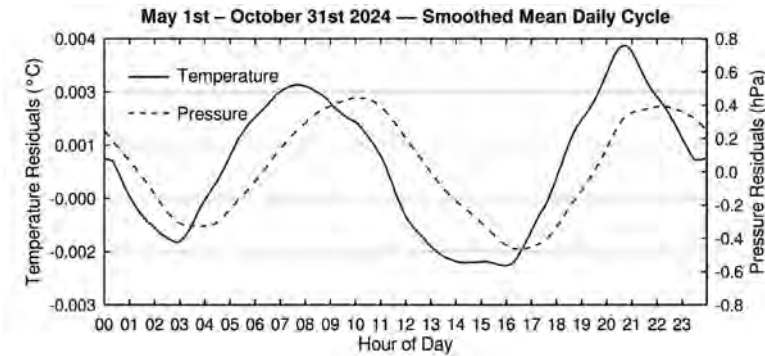


Figure 6 - Phase-lag between air temperature and atmospheric pressure (smoothed mean daily cycles) in the “Costantino Doria” cave when air column is vertically stable (warm season).

The second trough is noticeably broader and flatter, whereas the second peak attains a higher, more sharply defined maximum. The pressure residuals exhibit a parallel semidiurnal cycle of amplitude slightly under 1 hPa, reflecting alternations of compression and expansion in the cave air driven by atmospheric thermal tides. A clear phase lag is evident between the two series: pressure consistently lags temperature by about one hour in the

pre-dawn hours, increasing to approximately up to two hours later. These timing offsets corroborate the findings of BUSSANI (2022). A qualitative discussion of the mechanisms behind this phase delay is presented in Section 4 of the “Results” chapter. However, such mean diurnal cycle breaks down during the cold season, when the air column becomes unstable and temperature fluctuations become considerably larger. Under these conditions, the temperature signal can no longer resolve patterns on the order of one thousandth of a degree.

4. Hydraulic analogy to explain heat transfer processes between cave atmosphere and cave rock walls

In order to provide a qualitative, heuristic explanation for the phase lag observed between the semidiurnal temperature and pressure residuals (see section 3 of “Results” chapter), we introduce a simple hydraulic analogue. In this model, two communicating vessels represent the cave air and the surrounding rock walls, respectively. The water volume in each vessel corresponds to either the internal energy (i.e., heat content) of air or rock, or the work done by atmospheric tides, while the water level represents temperature in either system (air or rock). A narrow conduit connecting the vessels models thermal conductivity, allowing energy to flow back and forth depending on the temperature gradient.

A sinusoidal pump is attached to the air vessel to represent the time-varying power delivered to the cave atmosphere by thermal atmospheric tides, via periodic compression and expansion. The pump modulates the flow rate sinusoidally, mimicking the periodic energy exchange due to atmospheric pressure variations. The pump’s amplitude corresponds to the strength of the tidal forcing, and the conduit width reflects the thermal conductivity of the rock. The vessel volumes are proportional to the respective heat capacities of air and rock. As the pump approaches its lowest (but still positive) flow rate—meaning it is still adding fluid, but at a decreasing rate—the head difference between the two vessels causes the conductive flux into the rock to exceed the pump’s input. As a result, the water level (i.e., air temperature) in the air vessel begins to decline, even though the pump is still supplying fluid.

Translated back into thermodynamic terms, this moment corresponds to a phase in which the developing temperature gradient between cave air and rock walls drives conductive heat loss at a rate that temporarily exceeds the instantaneous power input from atmospheric tidal forcing. In other words, the rock absorbs heat more rapidly than the atmosphere can supply it. Consequently, the air temperature begins to fall before the pressure minimum is reached.

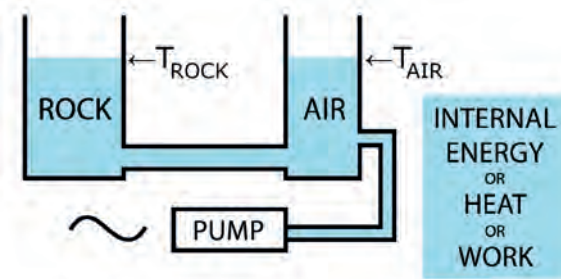


Figure 7 - Hydraulic analogy of heat exchanges between cave air and rock walls, based on the principle of communicating vessels.

This mechanism explains the observed phase lead of temperature relative to pressure. It reproduces the counterintuitive timing documented in the literature (CHEN, 2003; WU, 2003; BUSSANI, 2005; BUSSANI, 2007; BUSSANI, 2022) and in our latest measurements.

5. Possible observation of Rossby waves

To conclude the results section, we present a brief retrospective analysis of atmospheric pressure measurements collected during the previous research campaign (BUSSANI, 2022), which had not been thoroughly examined until now. Data recorded from late August through the end of September 2020 reveal a recurring pattern of fluctuations with a periodicity of approximately five days (Fig. 8). This regularity suggests the presence of a dynamic process influencing the local pressure field. Although such oscillations are not exclusive to cave environments and can also be observed in open-air measurements, their detection within the cave underscores the added value of continuous cave-based monitoring—not only for studying internal dynamics, but also for capturing broader atmospheric phenomena. The timing of these fluctuations closely matches the quasi-5-day Rossby mode (SALBY, 1981), offering a plausible meteorological explanation for the pressure variations recorded inside the cave, although more data and a more refined analysis will be necessary to confirm this interpretation.

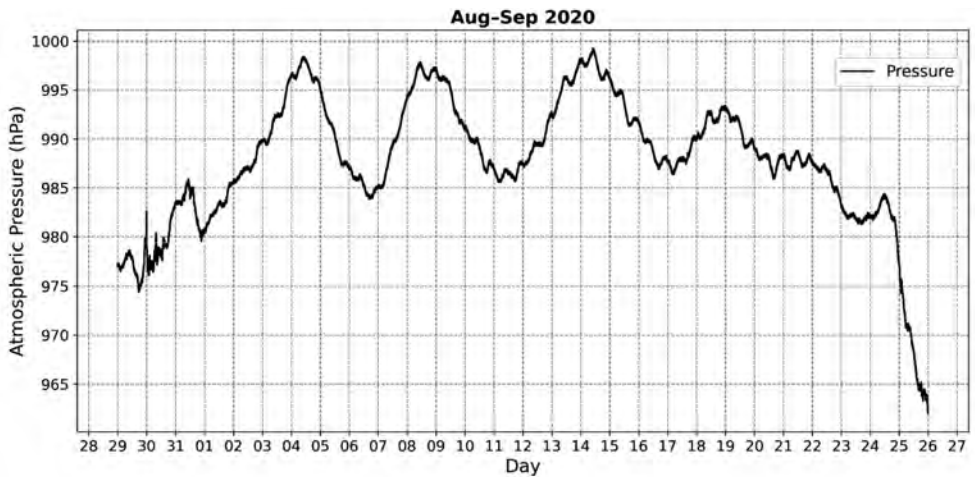


Figure 8 - Atmospheric pressure observed at the end of summer 2020 in the “Costantino Doria” cave.

CONCLUSION

The two-year monitoring campaign has revealed a complex interplay between cave air temperature, atmospheric pressure, and external meteorological conditions. Seasonal transitions govern the thermal stability of the cave, with distinct regimes emerging during warm and cold periods. Diurnal and semidiurnal cycles—driven respectively by solar irradiance and atmospheric tides—manifest under specific conditions, with clear phase relationships and amplitude modulations. A hydraulic analogy offers a plausible explanation for the observed phase lag between temperature and pressure. Moreover, the detection of low-frequency pressure oscillations suggests that cave environments might serve as a sensitive observatory for

broader atmospheric dynamics, including Rossby waves. These findings underscore the value of high-resolution cave monitoring for both microclimatic and atmospheric research. Further investigations will be essential to refine the mechanisms and expand the interpretative framework.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Diadora Bussani for the help with the data collection, the Regional Weather Observatory of Friuli Venezia Giulia (Osmer - Osservatorio Meteorologico Regionale FVG) for making available the meteorological data of Trieste Molo Fratelli Bandiera weather station, the Società Alpina delle Giulie - Commissione Grotte “Eugenio Boegan” for letting us access the “Costantino Doria” cave to perform this research, Igor Ardeti and Livio Stefanuto for valuable comments about some aspects of the research, Massimo Borelli for critically reading the manuscript and for the useful suggestions, the “Atmospheric Tide Hunters” group for their ongoing support and insightful input in the critical interpretation of the findings, Pino Guidi for pushing us to write the present paper.

REFERENCES

- 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: 125-131.
- BUSSANI A., 2007 - “*Atmospheric tide effects in a Trieste Karst cave: preliminary results*”, Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”, 41: 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: 41-59.
- 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*”, Measurement Science and Technology, 14 (5): 619-624.
- POLLI S., 1969 - “*Meteorologia ipogea nella grotta ‘C. Doria’ del Carso di Trieste. Quinquennio 1963-67*”. Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”, 9: 87-98.
- SALBY M.L., 1981 - “*Rosby normal modes in nonuniform background winds*”, Journal of the Atmospheric Sciences, 38 (9): 1803–1826.
- 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: 2192-2194.

Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”	Vol. 54 (2025)	pp. 35-80	Trieste 2025
--	----------------	-----------	--------------

ALBERTO GIORGI¹

KUČKE PLANINE (MONTENEGRO): NUOVE CAVITÀ, PROCESSI GLACIOCARSICI E SPELEOGENESI NELLE ALPI DINARICHE MERIDIONALI

ABSTRACT

This research integrates traditional speleological methodologies with modern technologies, utilizing drones and GIS for the optimization of exploratory strategies, representing a significant methodological advancement in speleological research in high-altitude areas with complex morphologies. During the campaigns, 41 caves were explored and surveyed, enabling the identification of two distinct morphogenetic types: epigeal degradation caves of Quaternary age and pre-Quaternary.

Type 1 caves manifest dominant structural control with shafts developed along vertical discontinuities, limited depths (5-30 meters), and morphologies attributable to weathering processes and epigeal karst of Quaternary age. Type 2 caves instead present articulated architectures with sequences of shafts and connected chambers, greater depths (up to 140 meters), evidence of ancient water flow and vestigial speleothems, indicative of pre-Quaternary speleogenesis under phreatic/epiphreatic regime.

Geological analysis revealed the presence of extensive Triassic, Jurassic, and Cretaceous carbonate formations characterized by intense fracturing due to tectonic activity and glacio-karstic processes. The climatic framework of the area, characterized by alpine conditions with marked seasonal variations, prolonged snow regime (4-6 months), and abundant precipitation (1800-2500 mm annually), exerts fundamental control on karstification processes.

Paleogeographic reconstruction suggests that Type 2 caves formed during the Upper Miocene-Pliocene under geomorphological, hydrographic, and climatic conditions profoundly different from present ones, while Type 1 caves document the predominance of recent morphogenetic processes. The presence of persistent glacial deposits in numerous caves testifies to the interaction between karstic and glaciokarstic processes, with significant paleoclimatic implications for understanding the Quaternary evolution of the Dinaric area.

RIASSUNTO

La presente ricerca ha integrato metodologie speleologiche tradizionali con tecnologie moderne, utilizzando droni e GIS per l'ottimizzazione delle strategie esplorative, rappresentando un significativo avanzamento metodologico nella ricerca speleologica in aree di alta quota e morfologie complesse. Durante le campagne sono state esplorate e topografate 41 cavità, permettendo l'identificazione di due tipologie morfogenetiche distinte: cavità di degradazione epigea quaternaria e cavità pre-quaternarie.

Le grotte di Tipo 1 manifestano controllo strutturale dominante con pozzi impostati su discontinuità verticali, profondità limitate (5-30 metri) e morfologie riconducibili a processi di weathering e carsismo epigeo di epoca quaternaria. Le cavità di Tipo 2 presentano invece architetture articolate con sequenze di

¹ Commissione Grotte “Eugenio Boegan”.

pozzi e vani collegati, profondità superiori (fino a 140 metri), evidenze di flusso idrico antico e speleotemi vestigiali, indicative di speleogenesi pre-quadernaria in regime freatico/epifreatico.

L'analisi geologica ha evidenziato la presenza di estese formazioni carbonatiche triassiche, giurassiche e cretache caratterizzate da intensa fratturazione dovuta all'attività tettonica e ai processi glacio-carsici. Il quadro climatico dell'area, caratterizzato da condizioni alpine con marcate variazioni stagionali, regime nivale prolungato (4-6 mesi) e precipitazioni abbondanti (1800-2500 mm annui), esercita un controllo fondamentale sui processi di carsificazione.

La ricostruzione paleogeografica suggerisce che le cavità di Tipo 2 si siano formate durante il Miocene superiore-Pliocene in condizioni geomorfologiche, idrografiche e climatiche profondamente diverse dalle attuali, mentre le cavità di Tipo 1 documentano la predominanza di processi morfogenetici recenti. La presenza di depositi glaciali persistenti in numerose cavità testimonia l'interazione tra processi carsici e glaciocarsici, con significative implicazioni paleoclimatiche per la comprensione dell'evoluzione quadernaria dell'area dinarica.

INTRODUZIONE

L'altopiano di Kučke Planine (a volte citato nella letteratura internazionale come Žijovo Range) è situato al confine tra Montenegro e Albania, e rappresenta uno dei settori meno conosciuti e remoti del sistema carsico dinarico meridionale. Quest'area, caratterizzata da quote elevate (1800-2000 m s.l.m.) e da estese formazioni carbonatiche principalmente mesozoiche, costituisce un laboratorio naturale ideale per lo studio dei processi speleogenetici in ambiente di alta montagna, dove l'interazione tra carsismo, tettonica e dinamiche glacioquadernarie ha prodotto notevoli fenomeni ipogei. Nonostante l'importanza geomorfologica delle Alpi Dinariche nel panorama carsico europeo, le conoscenze sui sistemi d'alta quota di questa zona rimangono frammentarie in quanto sono rimaste sostanzialmente inesplorate dal punto di vista speleologico.

Le spedizioni condotte dalla Commissione Grotte Eugenio Boegan (CGEB) di Trieste (Italia) tra il 2022 e il 2025 sull'altopiano di Kučke Planine hanno colmato questa lacuna conoscitiva attraverso un approccio multidisciplinare. Dopo le brevi ricognizioni preliminari del 2022 e 2023, il progetto è divenuto pienamente operativo con due campagne (2024 e 2025) della durata di dieci giorni ciascuna, che hanno impegnato squadre di sei e dodici persone rispettivamente e utilizzato GIS e droni ad alta definizione per l'ottimizzazione delle strategie esplorative in ambiente carsico d'alta quota.

Obiettivi e strategie operative

La campagna del 2024 ha mirato alla ricognizione sistematica, all'esplorazione e alla documentazione topografica delle cavità individuate durante le esplorazioni preliminari, integrando i rilievi speleologici con indagini geologiche e analisi geomorfologiche. La spedizione del 2025, composta da undici speleologi e un geologo, ha completato le esplorazioni interrotte l'anno precedente, individuato e mappato nuovi sistemi ipogei, e condotto un rilevamento geomorfologico estensivo finalizzato alla comprensione dei processi morfogenetici.

La presente ricerca si propone di fornire un contributo significativo alla conoscenza della speleogenesi dinarica attraverso la caratterizzazione di 41 nuove cavità e la definizione di un modello evolutivo che distingue sistemi pre-quadernari da morfologie di degradazione recente, con importanti implicazioni per l'esplorazione e per la ricostruzione paleoclimatica e paleogeografica dell'area.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL MONTENEGRO

2.1.1 Geografia

Il Montenegro è situato nell'Europa sudorientale, all'interno della regione balcanica, e confina con Croazia, Bosnia ed Erzegovina, Serbia, Kosovo, Albania e il Mare Adriatico. Dal punto di vista geografico, il paese si articola in tre regioni distinte per caratteristiche climatiche, litologiche, idrografiche e vegetazionali: la regione Costiera, la regione Centrale e quella Settentrionale-Nordorientale (FRANKL et al., 2016).

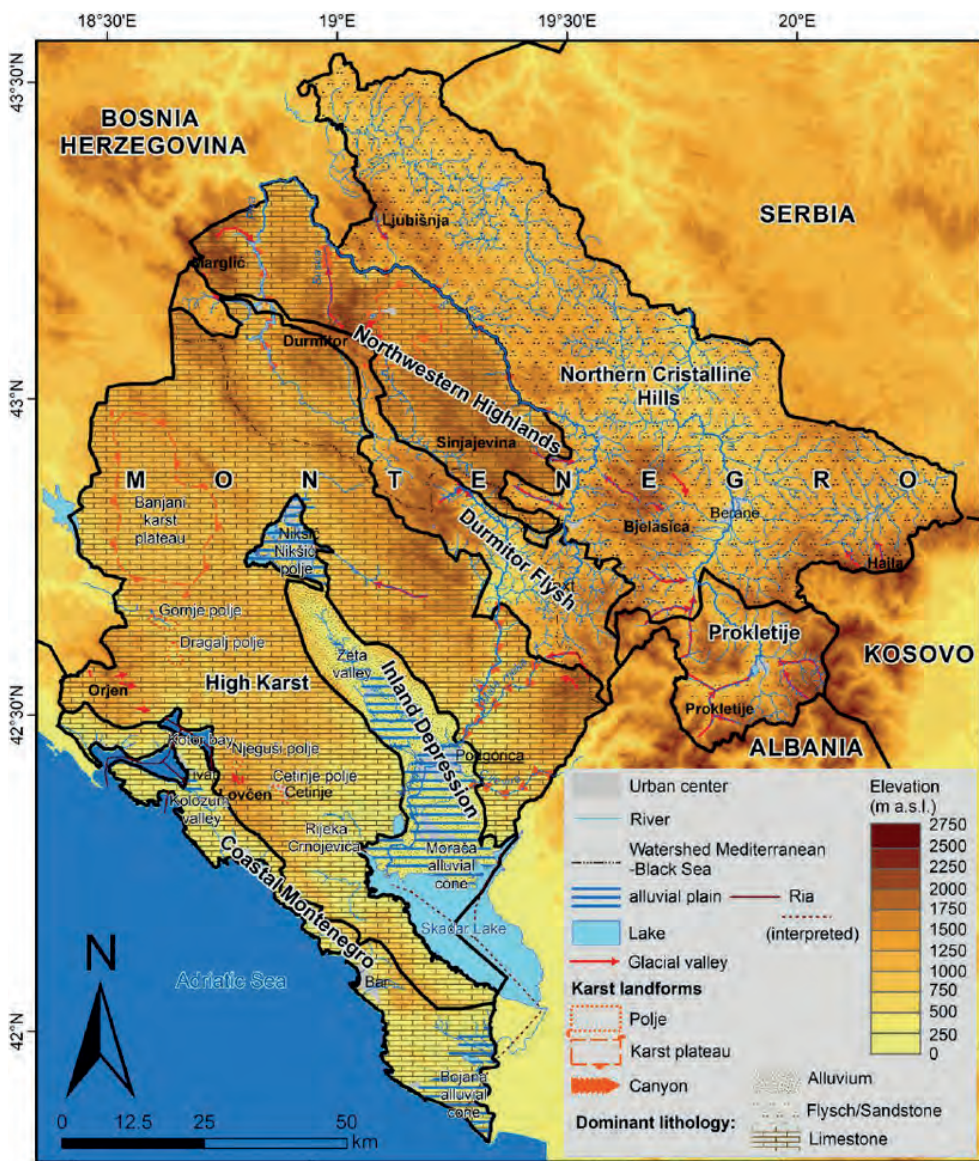


Fig. 1 - Carta geografica-geomorfologica del Montenegro (FRANKL et al., 2016).

Regione Costiera

Questa regione è costituita da una stretta fascia litoranea dominata da imponenti rilievi calcarei che si innalzano direttamente dal mare fino a circa 800 metri di altitudine. Il clima è di tipo mediterraneo, con inverni miti e piovosi ed estati lunghe, calde e aride. Il fiume Bojana, al confine con l'Albania, è il principale corso d'acqua della regione e funge da emissario del Lago di Scutari, drenandone le acque nel Mare Adriatico. La vegetazione è dominata dalla macchia mediterranea.

Regione Centrale

La regione centrale è formata da un altopiano carsico, inciso da una depressione colmata da sedimenti fini. Nelle zone di bassa quota il clima, ancora di stampo mediterraneo, assume caratteri più continentali nelle valli interne. Procedendo verso nord, il carattere continentale si accentua, poiché le Alpi Dinariche agiscono come una barriera naturale tra le masse d'aria mediterranee e quelle continentali.

Data la sua natura prevalentemente carsica, l'idrografia della regione è particolarmente complessa, con numerosi bacini che defluiscono in un reticolo idrografico sotterraneo. I principali corsi d'acqua, il Morača e lo Zeta, confluiscono nel Lago di Scutari. Dal punto di vista vegetazionale, predominano le foreste di tipo mediterraneo.

Regione Settentrionale e Nordorientale

Le aree settentrionali e nordorientali del Montenegro presentano un carattere prevalentemente montuoso, con valli profondamente incise nelle formazioni calcaree, alternate a zone più collinari e densamente popolate dove si trovano le città di Pljevlja e Bijelo Polje. Qui si trovano le cime più elevate del paese, tra cui spiccano il Bobotov Kuk (2.522 m) nel massiccio del Durmitor, la Zla Kolata (2.535 m) nei monti Prokletije e i monti Surdup (2184 m) e Stitan (2052 m) nell'altopiano di Kučke Planine. Il clima è continentale, caratterizzato da inverni freddi ed estati calde e umide.

I fiumi di questa regione come la Tara e la Piva scavano profondi canyon nelle rocce calcaree. L'area è caratterizzata da diverse tipologie vegetazionali, che includono foreste subalpine di latifoglie, pinete ad altitudini maggiori e praterie alpine sugli altipiani.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO DEL MONTENEGRO

Il Montenegro presenta una struttura geologica definita dalla sua posizione chiave nel sistema orogenetico delle **Dinaridi**, nate dalla collisione tra la placca Adria e quella Eurasiatica.

La regione riflette una storia tettonica assai complessa fatta di sovrascorrimenti, pieghe e intensi movimenti compressivi che hanno organizzato le successioni stratigrafiche in grandi unità geologiche. (KALUĐEROVIĆ & MIHAJLEVIĆ, 2021).

Unità geologiche principali

- **Alto Carso (High Karst):** in questa unità si colloca l'altipiano di Kučke Planine; rappresenta la regione geomorfologica più continua e omogenea del Montenegro, costituita da:
- **Triassico:** formazioni di calcari nodulari, dolomie, radiolariti e carbonati di piattaforma del tardo Triassico, con facies variabili tra laguna e mare aperto.
- **Giurassico:** calcari ammonitici, pelagici, selciferi e di piattaforma, che segnano i processi di approfondimento e transizione ambientale.
- **Cretaceo:** calcari massicci a strati di elevata potenza, fortemente fratturati, rappresentano la litologia prevalente della zona carsica sommitale e degli altipiani più estesi.
- **Unità Durmitor (Flysch):** caratterizzata da una sequenza sedimentaria clastica che in-

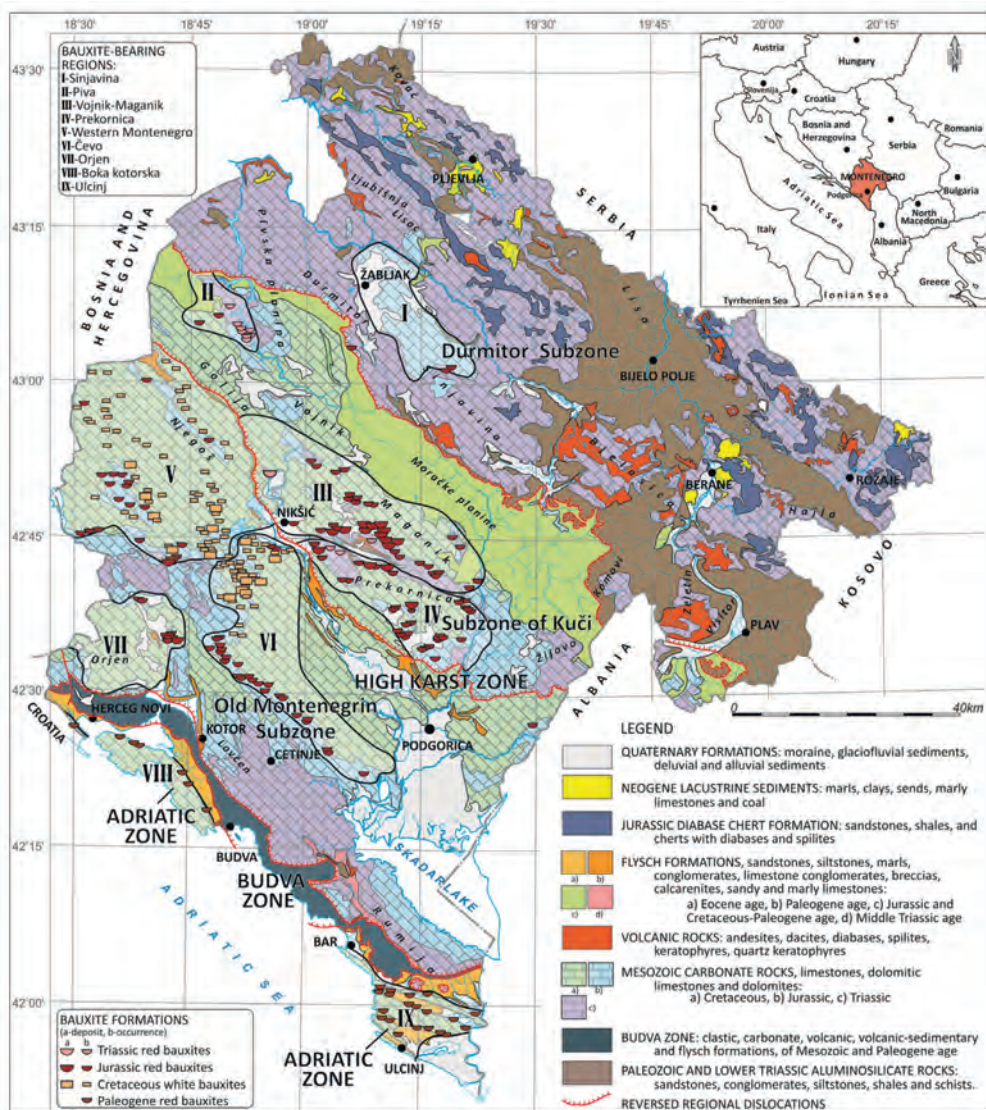


Fig. 2 - Carta geologica semplificata del Montenegro (RADUSINOVIĆ, S., PAPADOPOULOS, A.M., 2021)..

clude rocce devoniano-carbonifere, sedimenti flysch del Carbonifero e depositi clastici permiani, tipici dell'unità sovrainposta di tipo esterno.

- **Budva-Cukali (zona costiera):** dominata da sedimenti pelagici mesozoici, sormontati da depositi sinorogenici paleogenici. La loro messa in posto avviene sopra la Kruja-Dalmazia dal tardo Eocene al Miocene medio.
- **Basamento cristallino paleozoico:** scarsamente affiorante e quindi poco accessibile, costituisce il substrato profondo delle principali unità strutturali.
- **Successioni cenozoiche:** ben rappresentate dai calcari a foraminiferi paleogenici (Thanetiano - Cuisiano), associati ai depositi flysch torbiditici tra Eocene medio e Miocene medio.

Dinamica strutturale e paleogeografia

La struttura attuale mostra pieghe di sollevamento terziario parallele alla costa, con grandi anticlinali e thrust sovrascorrenti, piegati e rovesciati verso il mare. Il quadro stratigrafico presenta una prevalenza di calcari batiali e neritici nelle zone più esterne e materiali clastici grossolani, flysch e marne verso l'entroterra, segno dell'antica geosinclinale dinarica. (RADU-SINOVIĆ, S., PAJOVIĆ, M., 2024)

INQUADRAMENTO CLIMATICO DI KUČKE PLANINE

L'altopiano di Kučke Planine costituisce un sistema montuoso caratterizzato da condizioni climatiche tipiche delle aree carsiche di alta montagna delle Alpi Dinariche. Questa zona montuosa, che si estende come parte del complesso sistema dei Prokletije, presenta un **clima alpino con marcate variazioni stagionali** e caratteristiche peculiari legate all'elevata altitudine e alla morfologia carsica. (ČULAFIĆ, G., KRSTAJIĆ, J., 2024).

REGIME TERMICO

Durante la stagione invernale, che si estende da novembre ad aprile, le **temperature massime oscillano tra -6°C e 8°C**. Le temperature minime possono raggiungere **valori estremamente rigidi, anche inferiori a -18°C nelle zone più elevate o non esposte alla radiazione solare**. Il mese più freddo è generalmente gennaio, con temperature medie che si mantengono costantemente sotto lo zero.

La stagione estiva, relativamente breve, presenta **temperature massime a 1800m s.l.m. Mediamente comprese tra 21°C e 26°C** nei mesi di luglio e agosto. Le **temperature notturne rimangono fresche, oscillando tra 11°C e 15°C**, caratteristica tipica dei climi di alta montagna. Questa marcata escursione termica diurna è amplificata in condizioni di cielo sereno, tipiche dei mesi estivi.

REGIME PLUVIOMETRICO

Le **precipitazioni annuali in Kučke Planine sono abbondanti**, con valori che mediamente si attestano attorno ai 1800mm, ma possono arrivare fino a **2500 mm annui**. Il regime pluviometrico presenta una **distribuzione stagionale caratteristica** delle aree montane mediterranee:

- **Inverno:** Le precipitazioni raggiungono i valori massimi tra dicembre e febbraio, con quantitativi mensili che possono superare i 180-190 mm
- **Primavera:** Si registra una graduale diminuzione delle precipitazioni, con valori tra 110-140 mm mensili
- **Estate:** Rappresenta la stagione più secca, con precipitazioni minime nei mesi di luglio-agosto (60-80 mm)
- **Autunno:** Le precipitazioni aumentano progressivamente, raggiungendo 150-170 mm nei mesi di ottobre-novembre

REGIME NIVALE

Il **regime nivale costituisce un elemento fondamentale** del clima di Kučke Planine. La neve è presente per **4-6 mesi all'anno**, tipicamente tra novembre e aprile, con possibili precipitazioni nevose anche a maggio e ottobre alle quote più elevate. Lo **spessore del manto nevoso può raggiungere i 3-5 metri** nelle aree di accumulo e nelle depressioni carsiche, similmente a quanto osservato nel vicino massiccio del Durmitor.

CARATTERISTICHE MICROCLIMATICHE

La **morfologia carsica** di Kučke Planine genera specifiche **condizioni microclimatiche** che differiscono notevolmente dalle aree circostanti. Le numerose **depressioni carsiche** fungono da **zone di accumulo dell'aria fredda**, creando inversioni termiche locali che possono determinare differenze di temperatura di diversi gradi rispetto alle aree circostanti alla stessa quota.

Le **pareti rocciose calcaree esposte** e i **campi solcati (karren)** che caratterizzano il paesaggio superficiale presentano **forti escursioni termiche diurne**, con temperature che possono avvicinarsi ai 30°C a 2000m di altitudine nelle ore centrali delle giornate estive soleggiate, per poi scendere rapidamente durante le ore serali e notturne. Questo fenomeno è particolarmente accentuato a causa della diffusa assenza di copertura vegetale e dà origine a fenomeni di **degradazione termoclastica**.

INFLUENZA SUI PROCESSI CARSI

Le **condizioni climatiche di Kučke Planine** esercitano un **controllo fondamentale sui processi di carsificazione**. L'abbondanza delle precipitazioni, concentrata principalmente nei mesi autunno-invernali, garantisce un apporto idrico significativo per i processi di dissoluzione chimica delle rocce carbonatiche. L'**alternanza di cicli di gelo-disgelo**, particolarmente frequenti durante i mesi di transizione stagionale, accelera i processi di **fratturazione meccanica** delle rocce calcaree, aumentando la superficie di contatto tra l'acqua e la roccia e favorendo quindi l'intensificazione dei processi di dissoluzione.

La **permanenza prolungata della copertura nevosa** ha importanti implicazioni per i processi carsici, in quanto l'acqua di fusione nivale, caratterizzata da temperature prossime a 0°C e da un alto contenuto di anidride carbonica disciolta, rappresenta uno dei principali agenti di dissoluzione delle rocce carbonatiche del massiccio. Inoltre, durante i cicli di gelo-disgelo, particolarmente intensi in primavera e autunno, si verifica un'accelerazione dei processi di **crioclastismo** che contribuisce alla modellazione del paesaggio carsico.



Fig. 3 - L'altopiano di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).

LA GEOLOGIA DI KUČKE PLANINE

Posizione Tettonica e Inquadramento Strutturale

Kučke Planine si inserisce nel complesso sistema orogenetico delle Dinaridi, rappresentando un settore della zona tettonica denominato **Unità Tettonica di Kuči**. A differenza delle tipiche strutture dinariche con orientamento NW-SE, **l'area esaminata presenta una disposizione caotica dei rilievi che si estendono in tutte le direzioni**, in quanto è possibile che le deformazioni estensionali di tipo egeo (BIERMANN et al., 2022) si sovrappongano alle strutture compressive dinariche principali. Questa caratteristica distintiva deriverebbe dalla posizione di transizione tra le Dinaridi propriamente dette e il sistema delle Prokletije, conferendo alla regione una complessità strutturale peculiare.

QUADRO STRATIGRAFICO REGIONALE

La stratigrafia della zona di Kučke Planine riflette la complessa evoluzione geodinamica delle Alpi Dinariche, caratterizzata da una successione di eventi che spaziano dal Paleozoico al Cenozoico. Quest'area comprende unità stratigrafiche appartenenti a diversi domini paleogeografici del margine orientale della microplacca adriatica e rappresenta una sezione chiave per comprendere l'evoluzione mesozoica e cenozoica della regione dinarica.

L'area è caratterizzata da **estese formazioni calcaree mesozoiche** che rappresentano il substrato dominante dell'altopiano carsico. Le formazioni carbonatiche, prevalentemente costituite da calcari e dolomie del Triassico, Giurassico e Cretacico, formano la base strutturale su cui si sono sviluppati i sistemi carsici e speleologici della regione.

Basamento Triassico

Le formazioni triassiche dell'area sono caratterizzate da successioni carbonatiche di piattaforma che costituiscono il basamento principale del massiccio, caratterizzati da strati di notevole potenza che testimoniano un ambiente di piattaforma carbonatica marina (**Piattaforma Carbonatica Adriatica, AdCP**). Queste formazioni presentano un'intensa fratturazione dovuta all'attività tettonica e ai processi glacio-carsici.

Successioni Giurassiche

Le formazioni giurassiche sovrastanti integrano la successione carbonatica triassica con banconi calcarei di potenza metrica, ben evidenti dalle foto aeree del territorio e dalle ricognizioni effettuate sul terreno. L'alternanza di calcari massivi e livelli più stratificati riflette le variazioni del livello del mare durante il Giurassico.

Successioni Carbonatiche Cretaciche

Le formazioni cretatiche dell'area sono caratterizzate da calcari di piattaforma carbonatica che rappresentano la continuazione dell'evoluzione della Piattaforma Carbonatica Adriatica.

Depositi quaternari

I periodi glaciali pleistocenici hanno caratterizzato l'evoluzione morfologica recente dell'area. Inoltre, le caratteristiche del rilievo glaciale pleistocenico si sono conservate grazie alla struttura geologica favorevole (PETROVIC A., 2014).

Tipi di depositi quaternari presenti

- **Morene glaciali:** morene laterali e terminali, costituite da materiale eterogeneo non stratificato, spesso di composizione carbonatica (ciottoli, blocchi di varia dimensione).
- **Depositi di till:** materiali mal classificati prevalentemente sabbioso-limosi con inclusi di rocce carbonatiche subangolari o arrotondate, tipici delle zone moreniche.

- **Sedimenti periglaciali e fluvioglaciali:** presenti in aree di drenaggio e depressioni, costituiti da materiali più fini (sabbie, argille, limo) derivanti dall'azione delle acque di fusione glaciale.
- **Depositi di copertura regolata dal carsismo:** nei settori carsici sono possibili accumuli di terra rossa e residui alterativi, generati dal disfacimento chimico delle rocce carbonatiche nel contesto post-glaciale.

Potenziale carsico ipogeo

Secondo la carta geologica dell'*Istituto per la ricerca geologica della SRCG (Yugoslavia, 1958-1968)*, la zona è caratterizzata da calcari, calcari dolomitici e dolomia del Triassico superiore, che a nord-est sono in contatto tettonico con il Flysch e la breccia calcarea del Durmitor.

Interpretando le sezioni geologiche si rileva che il potenziale carsico ipogeo delle formazioni carbonatiche potrebbe arrivare fin oltre i 1200 metri, come testimoniato dalla Opasna Jama, unica grotta verticale conosciuta nell'area (profonda più di 600 metri) e posta a quote molto inferiori (1300m s.l.m. e più a sud rispetto all'altopiano esplorato).



Fig. 4 - Carta geologica dell'area indagata (nel cerchio rosso).

GEOMORFOLOGIA E PAESAGGIO CARSICO

L'altopiano di Kučke Planine è sistema geomorfologico complesso dove la tettonica alpina, i processi glaciali quaternari e il carsismo hanno interagito per produrre uno dei paesaggi carsici di alta montagna più significativi delle Alpi Dinariche meridionali.

Situato tra 1800 e 2000 metri di altitudine, la morfologia dell'altopiano può dare una falsa impressione dell'altitudine reale delle vette, poiché i rilievi emergono da un plateau già elevato di circa 1500-1800 metri: la vetta più elevata, il Surdup, raggiunge i 2184 metri, mentre altre quindici sommità superano i 2000 metri.

Morfologia glaciocarsica nel Kučke Planine

La morfologia epigea di Kučke Planine rivela un complesso sistema di processi glaciali e periglaciali che ha plasmato profondamente il paesaggio carsico durante il Quaternario. L'interazione tra processi glaciali e carsici ha prodotto forme uniche di glaciocarsismo, mentre l'attuale presenza di grotte con depositi di ghiaccio e neve testimonia la continuità temporale dei processi crionivali nella regione, seppur molto attenuati rispetto al passato. La fase gla-



Fig. 5 - L'altopiano di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).

ciale più antica e più estesa è attribuita al MIS 12 (470-420 ka), durante il quale si formarono estese calotte glaciali che ricoprirono gran parte dell'area centrale del Montenegro. Questo rappresenta l'evento glaciale più significativo dell'intera storia pleistocenica della regione, con evidenze di morene terminali conservate a quote relativamente basse. (ŽEBRE et al., 2013; BAROVIĆ et al., 2023).

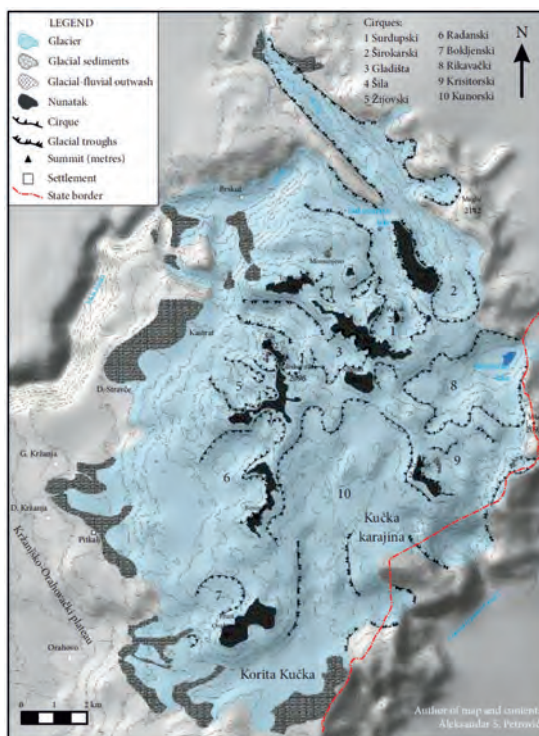


Fig. 6 - Rappresentazione dell'estensione dei ghiacci e delle morfologie durante il Massimo Glaciale Pleistocenico (PETROVIC A., 2014).

Ricostruzione del Massimo Glaciale Pleistocenico

Gli studi geomorfologici dettagliati hanno permesso di ricostruire l'estensione del massimo glaciale pleistocenico in Kučke Planine.

Durante questa fase, caratterizzata da un ghiacciaio unico esteso su tutta l'area del massiccio, la superficie glacializzata raggiunse circa 180 km².

Il rilievo pre-glaciale impedì la formazione di una tipica calotta glaciale, determinando invece lo sviluppo di ghiacciai interconnessi (icefields).

I **nunatak**² presenti nell'area sono la prova diretta che la copertura di ghiaccio, sebbene estesa, non era abbastanza spessa da sommergere l'intera catena montuosa. Questo ha permesso di escludere la presenza di una calotta glaciale (*ice cap*) completa e uniforme.

Questo ha prodotto un sistema glaciale complesso caratterizzato da un ghiacciaio di transection (o di transfluenza) nelle parti centrali e nord-occidentali, dove il ghiaccio fluiva attraverso le valli, e un **ghiacciaio di tipo icefield** nella parte orientale. (Petrovic A., 2014)

Forme glaciali

Le forme erosive glaciali in Kučke Planine mostrano una chiara impronta dell'interazione tra processi glaciali e substrato calcareo. I circhi glaciali, le valli glaciali e le forme di erosione subglaciale testimoniano l'intensità dei processi erosivi durante le fasi glaciali principali. L'erosione glaciale ha modellato profondamente il paesaggio calcareo, creando ampie valli a U che contrastano nettamente con le strette gole carsiche caratteristiche dei settori non glacializzati.

Forme periglaciali

L'attività periglaciale ha seguito un pattern simile a quello glaciale, espandendosi verso valle durante le glaciazioni e spostandosi verso quote più elevate durante i periodi interglaciali. Attualmente, i processi periglaciali nelle montagne mediterranee sono principalmente legati al gelo stagionale, ma gli ambienti interessati da condizioni di permafrost nel passato erano significativamente più estesi.

Interazione tra Processi Glaciali e Carsici

L'interazione tra processi glaciali e carsici in Kučke Planine è stata fortemente influenzata dall'accumulo di enormi quantità di acqua in alta quota durante le fasi glaciali. Durante i periodi interglaciali, la fusione ha prodotto notevoli flussi, probabilmente responsabili di una speleogenesi molto intensa e di una carsificazione profonda.



Fig. 7 - Blocchi di ghiaccio a -160m nella Grotta Prepih (foto Ida Cossetтини).

² I nunatak (in lingua inuit: picco isolato) sono picchi rocciosi che emergono dalla superficie dei ghiacciai.

Nelle condizioni odierne, l'area è esposta a intensi processi glaciocarsici. Fattori molto importanti nell'attuale fase di sviluppo delle grotte sono le acque di fusione derivate dallo scioglimento stagionale del manto nevoso in superficie, così come la neve e il ghiaccio accumulati all'ingresso delle grotte. In numerose cavità sono stati osservati spessi depositi di neve, firn e ghiaccio che con tutta probabilità, nel periodo invernale potrebbero raggiungere anche i 10 m di spessore.

CARSISMO EPIGEO

L'area di Kučke Planine rappresenta un esempio significativo di carsismo epigeo di alta montagna nell'area dinarica. Questo massiccio carbonatico costituisce un laboratorio naturale ideale per l'osservazione e lo studio dei fenomeni carsici superficiali che si sviluppano in ambiente montano, dove i processi di dissoluzione chimica delle rocce carbonatiche interagiscono con gli agenti morfogenetici tipici dell'alta quota.

DEGRADAZIONE

Denudazione carsica

Oltre agli effetti erosivi dei ghiacciai, va sempre considerata la **denudazione carsica** il cui effetto è il progressivo **abbassamento della superficie** con la contestuale demolizione di tutte le cavità che vengono intercettate.

Come ordine di grandezza, numerosi studi eseguiti dall'Università di Trieste attribuiscono a questo fenomeno tassi medi di abbassamento della superficie topografica che variano tra 20-40 mm/ka. Va anche considerato che in una zona di tipo alpino, le temperature medie piuttosto basse favoriscono l'aggressività dell'acqua e quindi possono contribuire positivamente alla corrosione della compagine calcarea, che quindi potrebbe avere tassi di denudazione ancora superiori.

Weathering

Il crioclastismo rappresenta il processo di disaggregazione meccanica delle rocce causato dalla pressione esercitata dall'aumento di volume dell'acqua durante la fase di congelamento all'interno delle fessure rocciose. Questo fenomeno è particolarmente attivo negli ambienti alpini dei Kučke Planine, dove le condizioni climatiche favoriscono frequenti cicli di gelo-disgelo, soprattutto durante i periodi di transizione stagionale.

In Kučke Planine sono attivi anche fenomeni secondari di termoclastismo, un processo di degradazione delle rocce causato dalle ripetute dilatazioni e contrazioni che la porzione superficiale di una roccia subisce durante i cicli di riscaldamento e raffreddamento. Questo fenomeno assume particolare rilevanza durante il periodo estivo, quando le differenze di temperatura tra la roccia irraggiata dalla luce solare e la temperatura notturna raggiungono valori elevati, creando significativi gradienti termici all'interno del materiale roccioso.

Influenza tettonico/strutturale

Le dinaridi sono una catena montuosa ancora soggetta a sollevamento tettonico che genera stress dando origine a un'intensa fratturazione della roccia, rilevabile sia dalle foto aeree che sul campo; si creano, quindi, condizioni ideali per i processi geomorfologici di degradazione della roccia sopra descritti.

MICROFORME CARSICHE

Le **microforme di dissoluzione** sono estremamente diffuse su tutto l'altopiano e spesso notevolmente evolute.



Fig. 8 - L'ingresso dell'abisso Ledo ripreso dal drone (foto Alberto Giorgi).

Le più diffuse sono:

- **Campi solcati (Karren, o campi carreggiati)**
- **Scannellature (Rillenkarrren)**
- **Solchi carsici (Rinnenkarren e Kluftkarren)**
- **Solchi a meandro**
- **Fori carsici**
- **Crepacci**

Vale la pena citare le **vaschette di corrosione (kamenitza)**, che sono praticamente assenti (ne sono state segnalate solo due), probabilmente a causa della loro particolarità genetica e cioè alla macerazione del materiale organico vegetale (che su questo altopiano è quasi assente) in acqua con la sua conseguente acidificazione.



Fig. 9 - Una delle rare kamenitza dell'altopiano di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).



Fig. 10 - Esteso karren a circa 1850m s.l.m. (foto Alberto Giorgi).

MACROFORME CARSICHE

La macro-morfologia carsica dell'altopiano di Kučke Planine è dominata da ampie distese di karren e da bassi rilievi separati da selle, avvallamenti e doline, con circolazione idrica superficiale assente; questo assetto è tipico del *Dinaric Karst* ed è il risultato congiunto di strutture tettoniche, eredità glaciali, glaciocarsismo recente e dissoluzione carsica. Allo stato attuale non risultano studi specifici e pubblicati sul sistema idrogeologico e sull'acquifero di Kučke Planine, per cui la caratterizzazione idrogeologica di dettaglio rimane lacunosa e va inferita dal contesto regionale dinarico.



Fig. 11 - Superficie ad avvallamenti e dossi a 1900m s.l.m. (foto Alberto Giorgi).

CARSISMO IPOGEO

Durante le cinque spedizioni speleologiche effettuate sull'altipiano di Kučke Planine, la Commissione Grotte Eugenio Boegan ha esplorato e rilevato 41 cavità. È quindi possibile avanzare un'ipotesi sulle fasi speleogenetiche che hanno interessato l'altipiano, correlando i dati speleologici alle osservazioni effettuate all'esterno, alla litologia, ai dati strutturali e alla ricostruzione paleoclimatica quaternaria presente in letteratura.

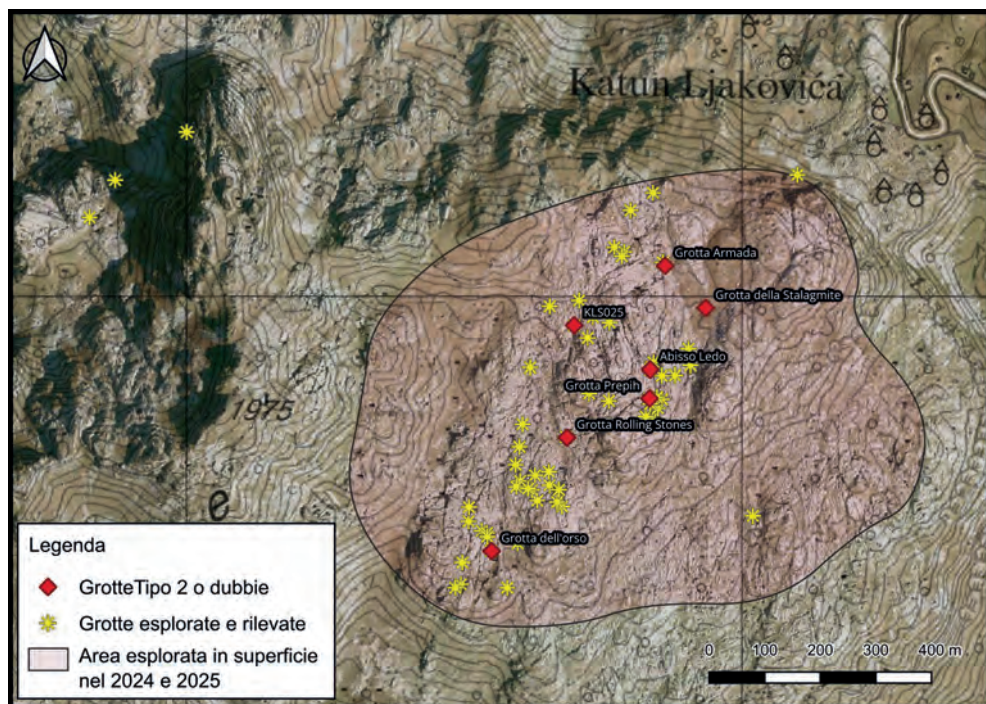


Fig. 12 - Le grotte esplorate e rilevate dalle spedizioni CGEB 2024-2025.

IPOTESI SPELEOGENETICHE

Le evidenze raccolte durante le spedizioni sull'altopiano di Kučke Planine permettono la classificazione delle cavità esplorate in **due principali gruppi morfogenetici**, con alcune di esse a probabile evoluzione mista.

Impatto della glaciazione sulla speleogenesi

Contrariamente a quanto sostenuto da alcune teorie, le recenti datazioni (U/Th, paleomagnetismo) eseguite in altre zone simili hanno dimostrato che molte grotte profonde di montagna sono più antiche delle glaciazioni. Il ruolo dei ghiacciai sembra limitato principalmente all'approfondimento delle valli e al riempimento con sedimenti nei condotti durante i periodi glaciali. (AUDRA, 1994, 2004; BINI 1994; HÄUSELMANN 2002). Durante i periodi interglaciali, le condizioni climatiche più miti favoriscono lo sviluppo di una copertura vegetale e di suoli maturi sulla superficie carsica. Questa biomassa, attraverso la respirazione delle radici e la decomposizione della materia organica, arricchisce notevolmente l'acqua di infiltrazione con anidride carbonica (CO₂). Di conseguenza, l'acqua acquisisce una maggiore acidità iniziale, potenziando la sua capacità di dissolvere la roccia calcarea e quindi di favorire la formazione di fenomeni epigenetici (AUDRA 2004).



Fig. 13 - Cascate di ghiaccio nella grotta Prepilh (foto Veronika Paulina).

Importanza dell'epicarso

I processi carsici sotterranei non si limitano alla genesi dei grandi sistemi ipogei, spettacolari ma remoti e spesso di difficile accesso.

L'**epicarso** rappresenta la fascia superficiale della roccia carbonatica, caratterizzata da elevata alterazione fisico-chimica e, nel caso di Kučke Planine, un'elevata frequenza di discontinuità strutturali quali fratture e faglie; in quest'area si concentra un'efficace raccolta e infiltrazione delle acque meteoriche e di fusione nivale/glaciale, e quindi rappresenta la sede più evidente e osservabile del carsismo.

L'epicarso, zona intensamente fratturata per decompressione dell'ammasso roccioso e processi morfogenetici, presenta una porosità e permeabilità secondarie marcatamente superiori rispetto alla roccia sottostante. Questo incremento di permeabilità è dovuto principalmente all'allargamento delle fessure per azione dell'acqua acidificata dal CO_2 prodotto nel suolo e dalla zona radicale della vegetazione. La porosità e la permeabilità diminuiscono progressivamente con la profondità, man mano che si riduce l'effetto dell'alterazione superficiale e le fratture si restringono.

Questa zona superficiale può fungere da serbatoio temporaneo di acqua, trattenendo e rallentando le acque di percolazione prima che esse raggiungano la zona di trasmissione inferiore, nonché saturandole di carbonato abbassando, quindi, la loro capacità corrosiva.

Sull'altopiano indagato, oltre alle morfologie epigee classiche, l'epicarso ospita un insieme di cavità superficiali e forme ipogee minori che non sono direttamente connesse ai sistemi profondi di drenaggio, quantomeno non attraverso passaggi percorribili dagli speleologi. Di norma, infatti, nei sistemi ipogei montani, la percentuale di ingressi superficiali che permettono l'accesso a sistemi sotterranei estesi e profondi è molto bassa rispetto al numero totale degli ingressi rilevati.

Queste cavità si originano soprattutto in condizioni di flusso idrico laminare o poco turbolento, dalla percolazione e, talvolta, anche in seguito a fenomeni locali di condensazione. Studi di riferimento (KLIMCHOUK, 1995) descrivono dettagliatamente le fasi evolutive morfologiche dell'epicarso, attribuendo un ruolo centrale alla dinamica delle discontinuità e alla concentrazione del flusso percolante nella formazione di doline e pozzi di dissoluzione.

Tuttavia, l'epicarso riveste una significativa importanza speleologica in quanto la caratterizzazione morfologica delle cavità superficiali permette di **formulare un protocollo esplo-**

rativo per la localizzazione dei potenziali ingressi ai sistemi profondi, risultando fondamentale anche per la pianificazione di future campagne esplorative. Infatti, essere in grado di riconoscere un pozzo di percolazione epigeo dall'ingresso a una cavità di origine freatica che la denudazione carsica ha portato alla luce può rendere più efficienti le future campagne esplorative speleologiche, che normalmente sono tese al ritrovamento di accessi a sistemi profondi.



Fig. 14 - L'epicarso di Kučke Planine (foto Cristiano Toffoletti).

LE DUE TIPOLOGIE DI GROTTA DELL’ALTIPIANO DI KUČKE PLANINE

L’integrazione fra le osservazioni geomorfologiche in superficie, quelle ipogee, i dati geografici e le analisi delle foto aeree e da drone, consente di classificare le grotte esplorate sull’altipiano di Kučke Planine in **due tipi principali**, secondo un **criterio morfogenetico** riassunto nella tabella sottostante.

TABELLA COMPARATIVA

Aspetto	Tipo 1	Tipo 2
Controllo strutturale	Controllate da discontinuità verticali	Controllate anche da discontinuità inclinate o sub-orizzontali
Geometria	Pozzi semplici, rare anastomosi locali	Sequenze di pozzi e vani, tratti sub-orizzontali, condotte freatiche relitto
Profondità tipica	5–30 m	Da 10m fino a 160 m
Depositi	Detrito grossolano, massi di crollo, firn	Detrito mal classato, ghiaccio, argille residuali
Speleotemi	Assenti	Presenti in stato vestigiale o comunque deteriorato
Tracce di flusso idrico incanalato	Assenti	Scallops, meandri, evorsioni, risultati di eventi paragenetici
Microclima	Cold-trap locale, firn	Ghiaccio ipogeo esteso, stratificazione termica, temperature molto basse (1.7°C a -120m)

GROTTA TIPO 1: CAVITÀ DI DEGRADAZIONE EPIGEA

Questa tipologia, composta da **34 cavità tra le 41 esplorate e mappate**, è caratterizzata da morfologie riconducibili a processi di weathering e carsismo epigeo di epoca quaternaria, prevalentemente interglaciale, con evoluzione attiva in epoca recente.

Le grotte di questa categoria manifestano le seguenti caratteristiche morfologiche:

- Pozzi di percolazione sviluppati lungo discontinuità sub-verticali della roccia, quindi totalmente controllati dalla struttura e con ampio accesso diretto dalla superficie.
- Profondità variabile, prevalentemente tra 5 e 30 metri, coerente con l'influenza del controllo strutturale locale. forma a fuso
- Fondo costituito da detrito di crollo mal classato, con frazioni granulometriche superiori alle ghiaie, spesso di dimensioni decimetriche o più; scarsa presenza della frazione più sottile o del till glaciale.
- La maggior parte delle cavità di questo tipo risulta isolata, ma alcune presentano fenomeni di anastomosi per coalescenza di due o più pozzi contigui e paralleli.
- Assenza di vani sub-orizzontali e di evidenze di flusso idrico incanalato.
- Nei pozzi più profondi si osservano depositi di firn, in accordo con la persistenza di condizioni microclimatiche glaciali o periglaciali.
- Le pareti risultano generalmente instabili, in condizioni molto lontane dall'equilibrio strutturale.

In sintesi, le grotte di Tipo 1 suggeriscono prevalenti condizioni periglaciali recenti, crolli gravitativi, glaciocarsismo, termoclastismo e intrappolamento del freddo con firn o raro ghiaccio pluriennale.

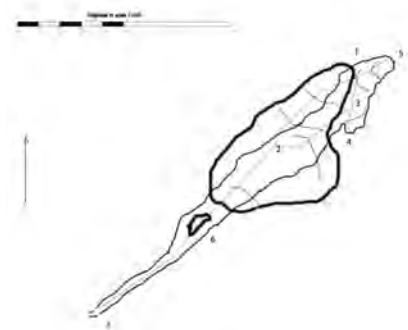
A titolo d'esempio, si illustrano di seguito le caratteristiche di due grotte di tipo 1 rappresentative di tutto il gruppo.

Grotta KLS005 (Tipo 1)



Sviluppo spaziale: 25 m

Profondità: 8 m

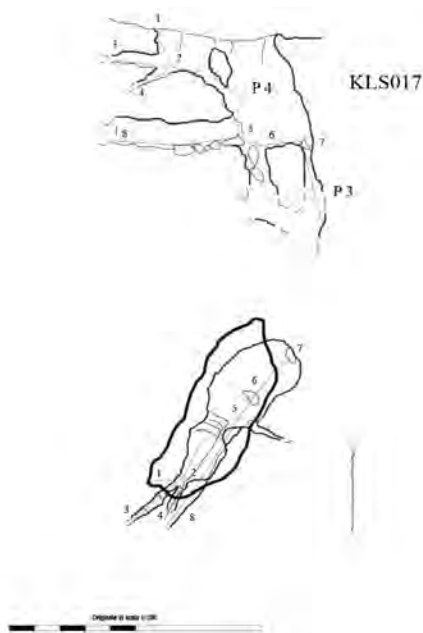


Ampio ingresso di m 4 x 6 Impostato su una frattura sub-verticale con direzione NE-SW. Scendendo, l'ingresso rastrema per trasformarsi in una diaclasi allargata il cui fondo inclinato è ingombro di massi e ciotoli di crollo. È evidente che l'imboccatura in superficie, più soggetta agli agenti atmosferici, risulta più di dimensioni maggiori rispetto al fondo della cavità.

Rilievo: Umberto Mikolic

Umberto Mikolic 10-08-2024

Grotta KLS0017 (Tipo 1)



Sviluppo spaziale: 22 m

Profondità: 8 m

La cavità è impostata su una discontinuità sub-verticale con direzione NE-SW.

Il fondo è occluso da enormi massi. Tra di essi s'apre un ulteriore pozzo di almeno 4 metri.

Rilievo: Umberto Mikolic/Aldo Fedel/Veronika Paulina

Umberto Mikolic - Aldo Fedel - Veronika Paulina 16-08-2024

GROTTA TIPO 2: CAVITÀ PREQUATERNARIE

Queste cavità, più profonde e complesse, rappresentano sistemi relitti di **probabile speleogenesi pre-quaternaria** impostati in regime freatico/epifreatico, rimodellati da fasi stadiali e interstadiali quaternarie e portati alla luce dalla denudazione carsica. Sono di particolare interesse per la ricostruzione paleogeografica e speleogenetica dell'altipiano.

Indicatori principali:

- Architettura articolata, con sviluppo di sequenze di pozzi e vani collegati che suggeriscono una lunga storia evolutiva e fasi multiple di rimodellamento.
- Ingressi talora sub-orizzontali o a caverna, indicativi di una genesi antica in regime freatico o di scorrimento idrico incanalato.
- Profondità generalmente superiori rispetto al gruppo 1 (attualmente è stato raggiunto un massimo di 160 metri di profondità).
- Presenza di detriti di crollo e con una componente importante di accumuli di ghiaccio.
- Presenza di forme tipiche di un flusso idrico, che testimoniano una persistente attività di trasporto e rimodellamento dovuta allo scorrimento sotterraneo incanalato (scallops, meandri, condotte freatiche).
- Evidenze di una lunga storia evolutiva: vestigia di speleotemi, micro-forme paragenetiche e livelli di argille residuali rosse.

Implicazioni paleoclimatiche

Le grotte di Tipo 2 conservano archivi paleoclimatici: ghiacci ipogei stratificati, speleotemi relitti e sedimenti fini che possono registrare sequenze climatiche e idrologiche pre-quaternarie, e che se indagate si possono dimostrare particolarmente importanti ai fini della ricostruzione paleoclimatica e della dinamica carsica dell'altipiano.

Grotta Armada (Tipo 2)

Quota ingresso: 1862 m	Sviluppo: 68 m	Profondità: 34 m
------------------------	----------------	------------------

L'ingresso della grotta si trova a 1850 metri di altitudine ed è facilmente accessibile; l'accesso conduce a un vano principale dove sono stati osservati numerosi elementi morfologici e sedimentari di notevole interesse. Successivamente, attraverso un passaggio verticale si accede a un pozzo che termina in un vano ingombro di massi di frana; anche qui si osservano ulteriori morfologie di scorrimento idrico.

Caratteristiche interne della grotta

- Ampia colata calcitica in situ, fortemente alterata dagli agenti atmosferici: testimonia fasi di deposizione chimica seguite da esposizione agli agenti atmosferici e successiva degradazione.
- Porzione di soffitto con pendenti, in roccia indicativi di una fase vadosa antica durante la quale i sedimenti si accumularono fino alla quota di volta, costringendo l'acqua a corrodere la roccia in modo anti-gravitativo e generando forme coniche per anastomosi dei canali di volta.
- Numerosi segni di evorsione, morfologie di origine idrodinamica prodotte da vortici dello scorrimento idrico, anche con carico solido, confermano il ruolo delle acque incanalate nella genesi della cavità.
- Evidenti effetti di dislocazione sulle pareti e su soffitto, probabilmente attribuibili a tettonica recente o comunque post-speleogenetica interessano le succitate forme.

Interpretazione genetica e paleogeografica

Il complesso morfologico della cavità, la successione delle forme idrodinamiche e le evidenze tettoniche recenti suggeriscono un'origine risalente al Miocene o al Pliocene, coerente con la speleogenesi di numerose altre aree dinariche. In quei periodi, l'altopiano doveva presentare assetti geomorfologici, idrografici e climatici profondamente diversi da quelli attuali; tali condizioni dovettero favorire la formazione di condotti freatici e successivamente una circolazione idrica di tipo vadoso, oggi testimoniata dalle forme relitte all'interno della grotta.



Fig. 15 Pendenti e tracce di neotettonica alla grotta Armada (foto Alberto Giorgi).

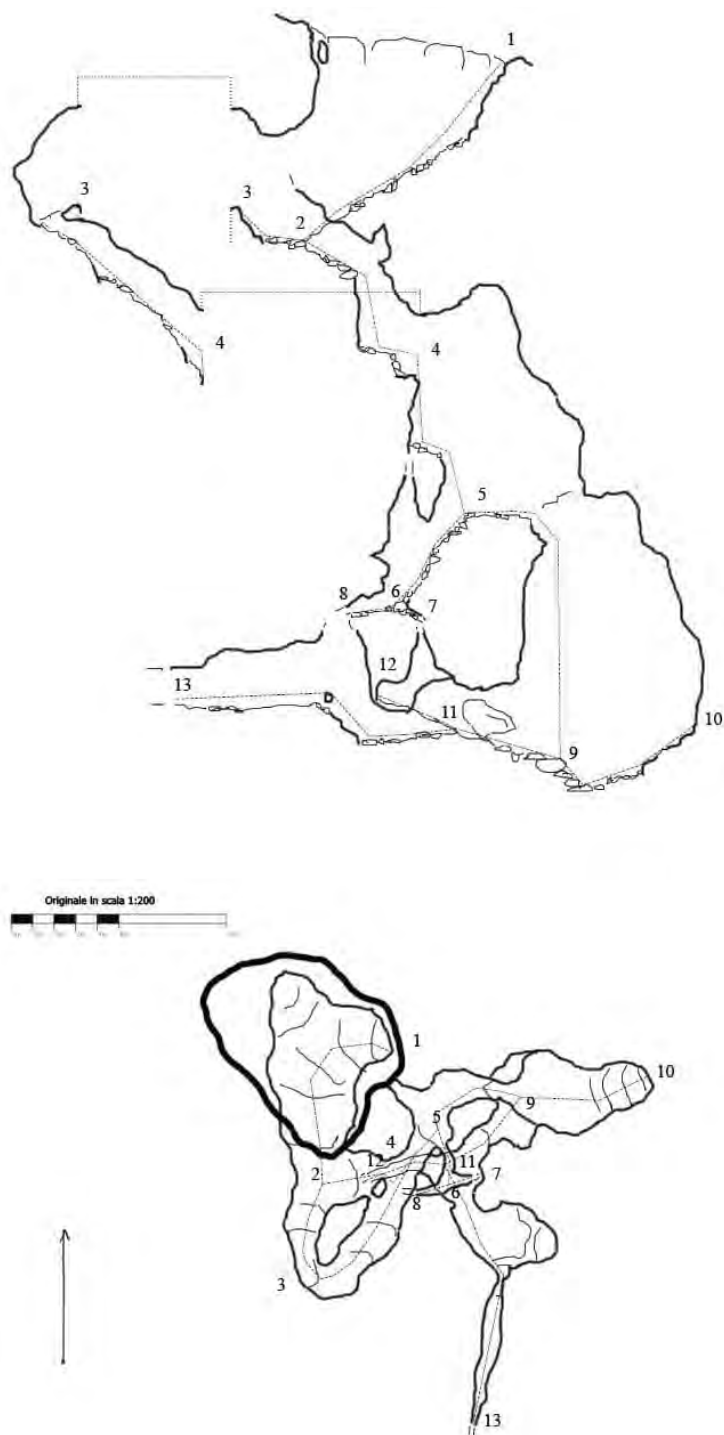


Fig. 16 - Rilievo topografico della grotta Armada (rilievo di Umberto Mikolic).



Fig. 17 - Colata calcitica degradata (foto Alberto Giorgi).



Fig. 18 - Fenomeni di dislocazione neotettonica (foto Alberto Giorgi).

Grotta Prepih (Tipo 2)

Quota ingresso: 1849 m	Sviluppo: 279 m	Profondità: 160 m
------------------------	-----------------	-------------------

La grotta Prepih (ingresso a 1850 metri di altitudine) si sviluppa con una sequenza di pozzi e brevi gallerie inclinate, raggiungendo una profondità di 160 metri. L'ingresso si presenta come una voragine verticale di circa 15 metri di profondità dalla geometria irregolare.

Evidenze geomorfologiche

La grotta è soggetta a intensi fenomeni carsici e glaciocarsici che ne hanno rimodellato profondamente le forme originali: gran parte delle forme dovute allo scorrimento idrico sono state asportate o modificate dall'azione del ghiaccio combinata allo scorrimento dell'acqua di fusione e a un'intensa fratturazione della roccia calcarea. Questa condizione è tipica delle grotte d'alta quota, dove le fasi glaciali e interglaciali hanno alterato e demolito le forme primarie e operato cicli di sedimentazione/asportazione, sia fisici che chimici, favorendo una complessa ridefinizione morfologica dell'ambiente.

Inoltre, durante l'ultima esplorazione della grotta Prepih, a circa 40 metri di profondità, è stata rilevata una perdita notevole di spessore del ghiaccio ipogeo (stimata fino a 1m) avvenuta tra il 2024 e il 2025.

Caratteristiche morfologiche significative

- Pendenti in roccia sul soffitto di una galleria inclinata: queste forme testimoniano una fase paragenetica, probabilmente di età tardo pliocenica o pleistocenica inferiore, durante la quale la grotta fu quasi interamente riempita di sedimenti. L'acqua, costretta a scorrere lungo il tetto, ha prodotto canali di volta e successivi pendenti per processi di anastomosi e scavo anti-gravitativo.
- Presenza di un meandro sinuoso che collega due pozzi sub-verticali: questa forma è un residuo idrodinamico, indicativo di un'evoluzione in ambiente epifreatico o vadoso.
- I pavimenti dei vani sono quasi completamente ricoperti da uno spesso strato di ghiaccio molto compatto e da detrito di crollo, dimostrando la combinazione di fenomeni carsici e glaciocarsici. Sulle pareti si segnalano numerose cascate di ghiaccio in corrispondenza di camini.
- La roccia è interessata da processi di degradazione intensi, favoriti dalla sua elevata fratturazione.
- Sono assenti gli speleotemi, tranne che nel secondo pozzo d'ingresso della cavità (ingresso alto), dove si osservano vestigia di una copertura calcitica.

Significato paleogeografico

La presenza di residui di deposizione calcitica, pendenti e meandri, seppur parzialmente rimodellati, suggerisce che la cavità abbia vissuto una fase speleogenetica pre-quaternaria durante episodi climatici antichi e condizioni morfologiche esterne assai diverse dall'attuale. La grotta rappresenta, quindi, un archivio di processi e relativi agenti utili per la ricostruzione della paleoevoluzione carsica dell'altipiano.

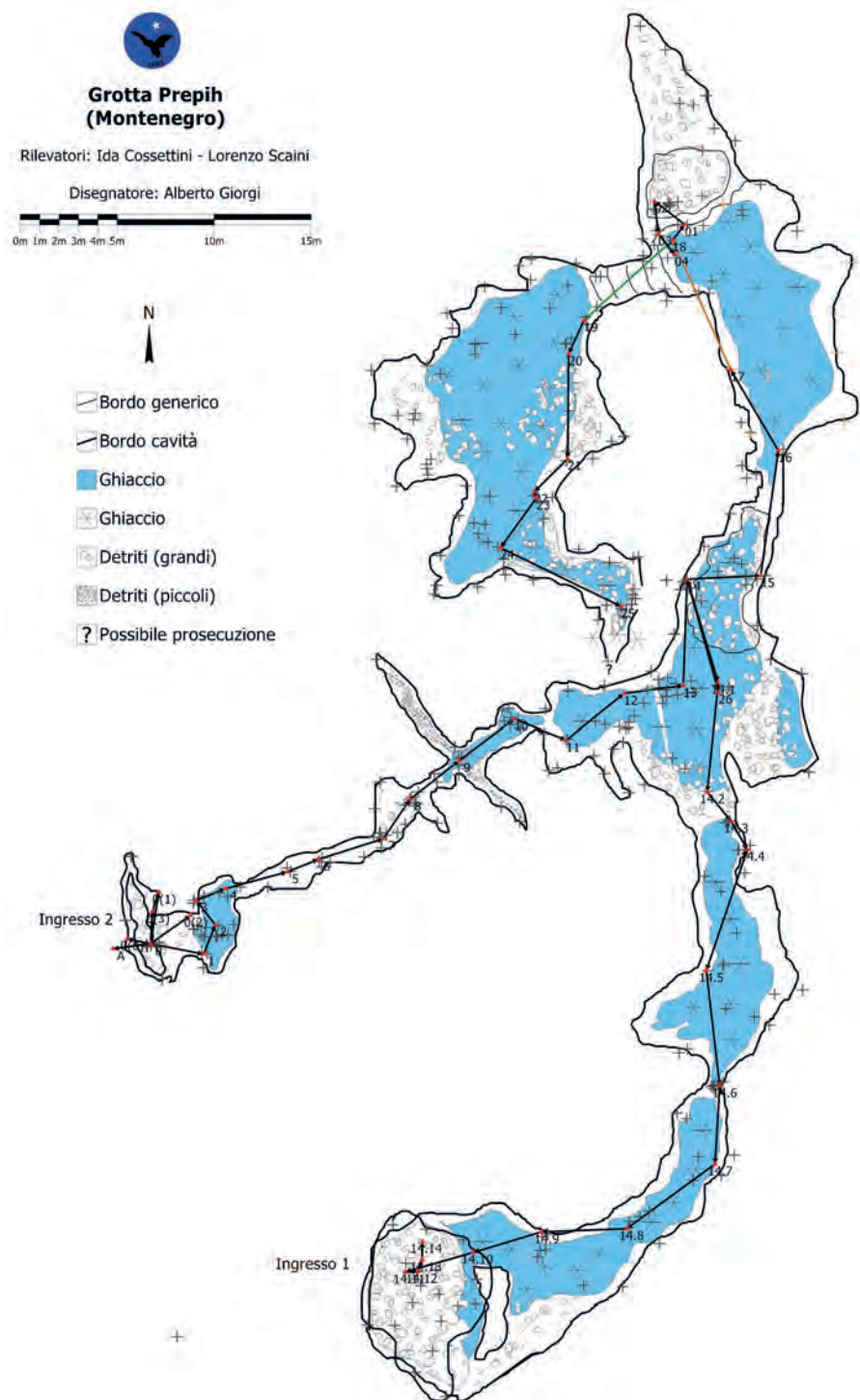


Fig. 19 - Rilievo della Grotta Prepih, pianta e sezione.

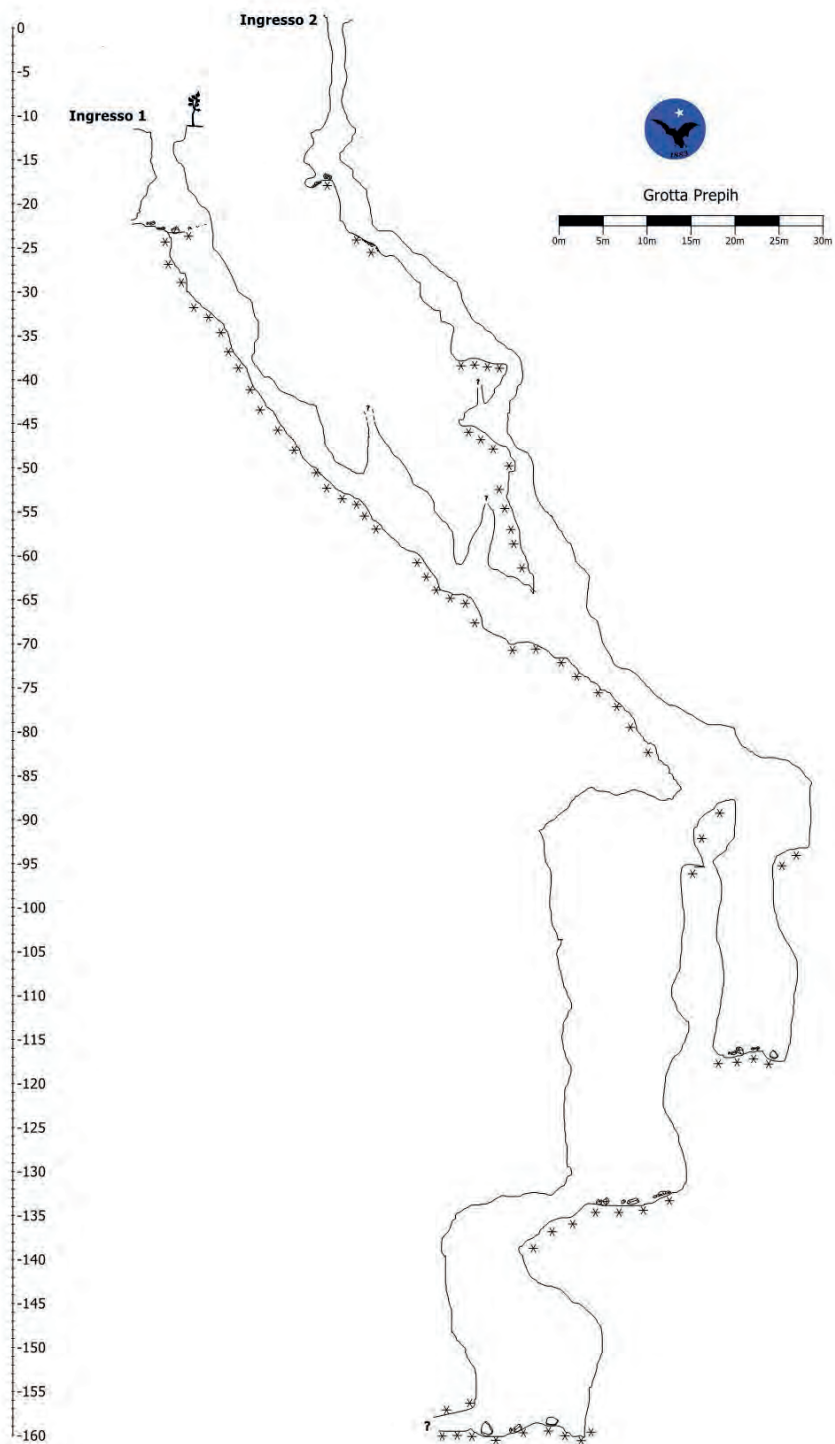




Fig. 20 - Meandro nella grotta Prepih (foto Ida Cossettini).



Fig. 21 - Piccoli pendenti in roccia (foto Ida Cossettini).

Grotta della Stalagmite (Tipo 2)

Quota ingresso: 1860 m	Sviluppo: 8 m	Profondità: 11 m
------------------------	---------------	------------------

La Grotta della Stalagmite è una piccola cavità verticale profonda meno di 10 metri, situata in corrispondenza di una piccola dolina facente parte di un gruppo allineato di cinque sviluppatosi su uno dei pochissimi prati identificati nell'area investigata.

Caratteristiche morfologiche e paleoambientali

Questa grotta, classificata tra le cavità di tipo 2, mostra sulle pareti alcune antiche colate calcitiche ben conservate, osservabili anche nella documentazione fotografica.

Tali strutture sono la prova di condizioni climatiche e idrologiche differenti rispetto all'attuale, riconducibili probabilmente a periodi pluviali antichi. Queste colate testimoniano, come per le maggiori cavità descritte in precedenza, una paleogeografia radicalmente diversa, con livelli di percolazione e condizioni di saturazione calcitica delle acque più pronunciati.

Sul fondo del pozzetto si rinvenivano stalagmiti spezzate da vecchi crolli e successivamente corrose. Questo fenomeno è attribuibile sia ai processi di corrosione per condensazione, sia alla percolazione di acque che dissolvono parzialmente i depositi preesistenti. Tali morfologie fungono quindi da marker ambientale e crono-stratigrafico, confermando l'importanza delle micro-cavità quale archivio di paleoambienti carsici, anche in assenza di estesi volumi ipogei o grandi sviluppi planimetrici.



Fig. 22 - Il fondo della Grotta della Stalagmite (foto Ida Cossetini).



Fig. 23 - Stalagmite spezzata e rimodellata (foto Ida Cossettini).

Rolling Stones (kls029)

Quota ingresso: 1825 m	Sviluppo: 130 m	Profondità: 83 m
------------------------	-----------------	------------------

L'ingresso si apre con un portale che immette in breve corridoio discendente dal quale parte un primo pozzo interno di m 18. Lo sovrasta un camino che sbocca in superficie con uno stretto foro, che viene a costituire un ingresso alto.

La grotta **Rolling Stones** (così denominata per l'instabilità degli accumuli di detrito sui pozzi) rappresenta un esempio significativo di un antico sistema ipogeo successivamente influenzato da processi glaciocarsici (crioclastismo). Sono molto evidenti, infatti, le peculiari modificazioni morfologiche indotte dall'interazione tra i processi quaternari di degradazione e il carsismo.

Evidenze geomorfologiche

Si tratta di un sistema ipogeo caratterizzato da ampie sale interconnesse attraverso pozzi e gallerie di notevoli dimensioni. La morfologia dominante è costituita da ambienti di crollo e da volumi irregolari, con altezze variabili che raggiungono diversi metri.

I pavimenti di tutti i vani presentano accumuli detritici molto abbondanti costituiti da clasti angolosi di dimensioni eterogenee, interpretabili come **crioclasti** prodotti dall'azione del gelo-disgelo sulle pareti rocciose. Questa caratteristica morfologica è diagnostica dei processi glaciocarsici, dove l'alternanza di fasi di congelamento e scongelamento dell'acqua interstiziale provoca la fratturazione meccanica della roccia carbonatica.

L'assenza di forme tipicamente fluviali (evorsioni, scallops, solchi) potrebbe essere dovuta all'asportazione delle morfologie originarie di origine idrodinamica. Unica vestigia dell'antico periodo freatico/epifreatico della cavità è una breve condotta di collegamento tra due pozzi dalla classica forma di origine freatica impostata su una frattura sub-verticale.

Significato Paleoclimatico e Paleoambientale

La presenza di estesi fenomeni glaciocarsici nella cavità fornisce importanti indicazioni sui paleoclimi quaternari della regione montenegrina. L'intensità dei processi crioclastici documentati suggerisce condizioni climatiche particolarmente severe durante le fasi glaciali pleistoceniche, con temperature medie annue molto basse e significative escursioni termiche giornaliere.

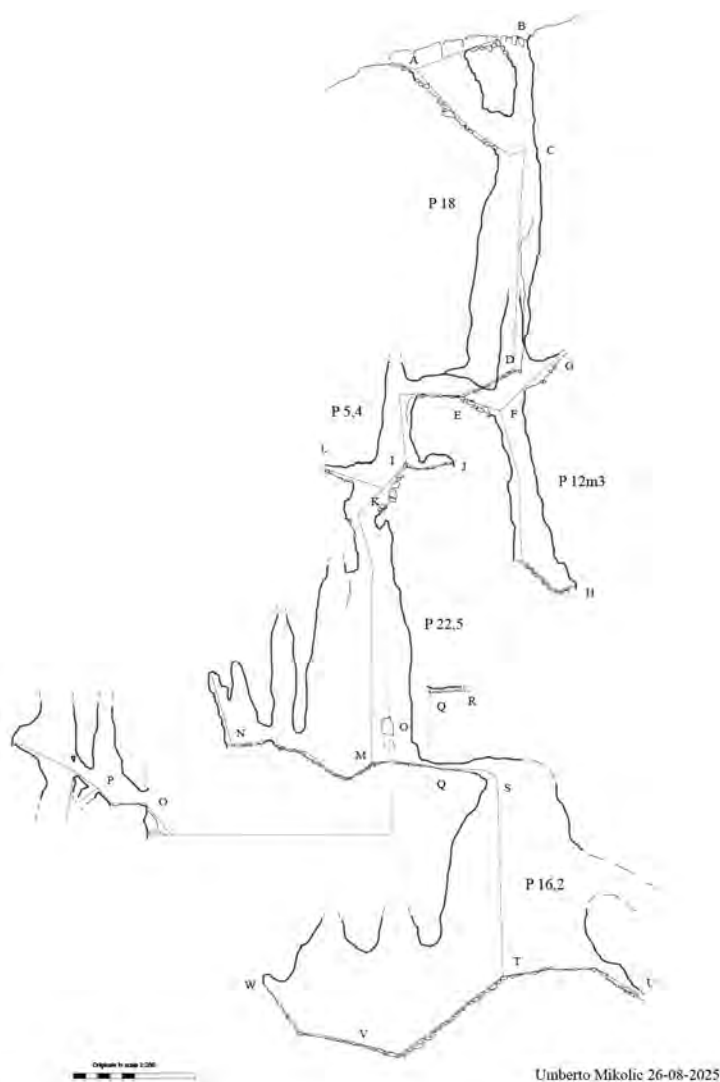
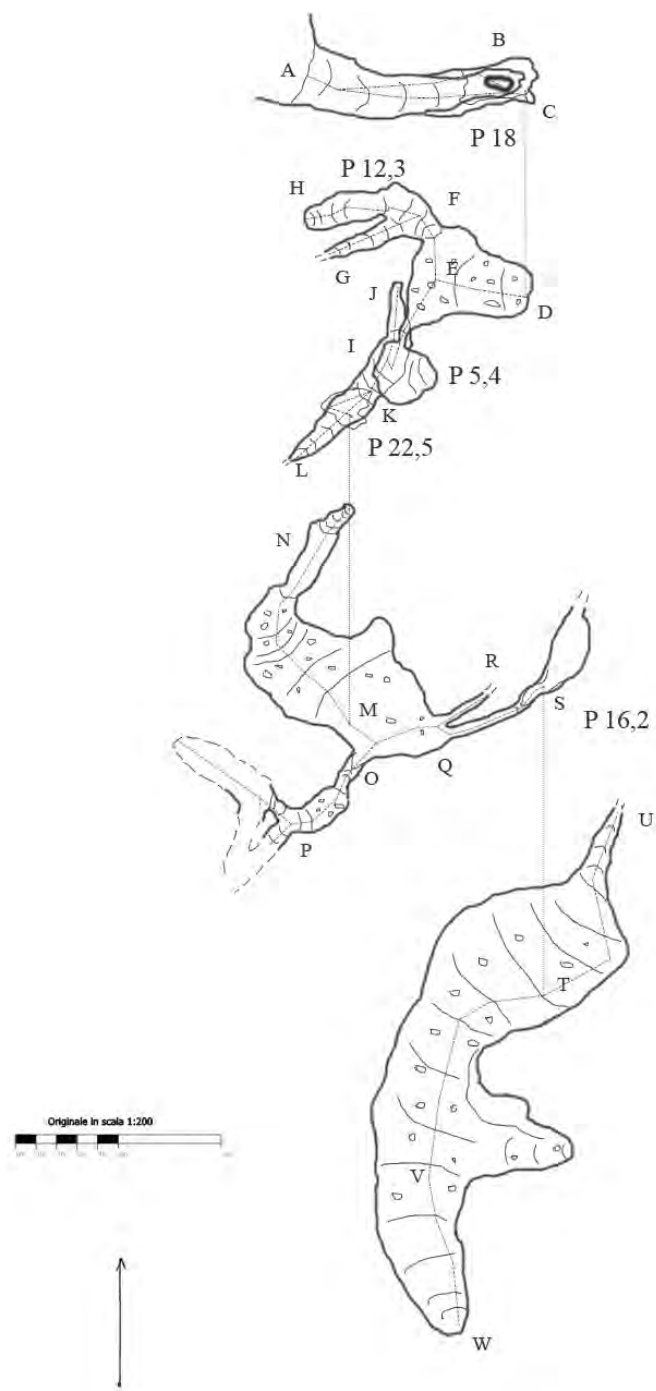


Fig. 24 - Sezione longitudinale della grotta Rolling Stones (Umberto Mikolic).



Umberto Mikolic 26-08-2025

Fig. 25 - Pianta della grotta Rolling Stones (Umberto Mikolic).



Fig. 26 - Piccola condotta freatica (foto Veronika Paulina).



Fig. 27 - Pozzo d'ingresso con evidenti solchi da deflusso (foto Veronika Paulina).



Fig. 28 - Evidenti risultati del crioclastismo (foto Veronika Paulina).

Grotta dell'orso

Quota ingresso: da verificare	Sviluppo:	Profondità:
-------------------------------	-----------	-------------

Questo nome si deve a una particolarità biologica: il pavimento all'ingresso della grotta è disseminato di deiezioni cilindriche di grandi dimensioni.

Aspetti Biologici e Denominazione

La presenza di **feci di grandi dimensioni** all'ingresso della cavità costituisce un indicatore biologico significativo. L'ipotesi della presenza di *Ursus arctos* (orso bruno) per le fasi di letargo invernale è biologicamente plausibile, considerando che le grotte sub-orizzontali con ingresso ampio forniscono condizioni microclimatiche stabili ideali per l'ibernazione. L'orso bruno è storicamente presente nei territori montani del Montenegro, e l'utilizzo di cavità naturali per il letargo rappresenta un comportamento etologico documentato.

Depositi Clastici

La presenza di **detriti mal classificati** (massi metrici e detrito angoloso centimetrico) suggerisce processi di crollo gravitativo attivo e glaciocarsismo. Questa distribuzione granulometrica bimodale è tipica di ambienti di grotta caratterizzati da:

- Instabilità strutturale della volta
- Processi crioclastici stagionali
- Alterazione per carsismo d'infiltrazione

Classificazione nel Gruppo Tipo 2

La classificazione proposta trova giustificazione in tre parametri diagnostici fondamentali:

- Andamento sub-orizzontale articolato, seppur breve.
- Si segnalano depositi di argille rosse che rappresentano un elemento di particolare interesse paleoambientale. Questi depositi, assenti nelle altre cavità della zona, potrebbero derivare dal trasporto e deposizione di materiale alloctono durante fasi paleoclimatiche differenti. L'unicità di questi depositi nella zona suggerisce condizioni genetiche particolari, meritevoli di future analisi mineralogiche e sedimentologiche approfondite.
- Presenza di rare vestigia di speleotemi che indicano fasi di attività concrezionale antica, successivamente interrotta e in seguito degradata. Questo aspetto fornisce informazioni paleoclimatiche e idrogeologiche cruciali per la comprensione dell'evoluzione speleogenetica della zona.

Piccole caverne

Le piccole cavità osservate sui versanti che delimitano l'altopiano carsico di Kučke Planine, poste a quote superiori rispetto agli attuali ingressi delle principali cavità carsiche, rappresentano un elemento di grande rilevanza sotto il profilo speleogenetico.

Queste cavità di modeste dimensioni sono interpretabili come **relitti di antiche condotte idriche freatiche** sviluppatesi nelle fasi iniziali della storia evolutiva del paesaggio e testimoniano le tappe fondamentali dell'evoluzione che hanno interessato la regione nel corso della fase di speleogenesi carsica avvenuta probabilmente nel **Miocene/Pliocene**.



Fig. 29 - Grotte relitto dell'antica rete freatica pre-aterniana (foto Cristiano Toffoletti).

GROTTE NON CLASSIFICABILI

Abisso Ledo

Quota ingresso: 1855 m	Sviluppo: 79 m	Profondità: 130 m
------------------------	----------------	-------------------

L'abisso Ledo rappresenta un sistema carsico di notevole interesse geologico e speleologico, caratterizzato da peculiari fenomeni crionivali che ne condizionano sia la morfologia interna che l'accessibilità esplorativa.

Caratteristiche Morfologiche Generali

La cavità si sviluppa lungo una probabile faglia con orientamento NW-SE, lunga approssimativamente 150 metri, che costituisce il controllo strutturale primario del sistema. Il pozzo principale presenta uno sviluppo verticale di 100 metri, con pareti caratterizzate da estese coperture glaciali perenni.

La temperatura dell'aria misurata sul fondo della cavità (1,7°C) indica condizioni termiche che favoriscono la persistenza delle formazioni glaciali durante tutto l'arco dell'anno, anche se nelle vicinanze dell'ingresso si segnala un forte stillicidio da fusione.

Configurazione degli Ingressi

L'accesso principale presenta dimensioni di 5×10 metri e si apre direttamente sulla discontinuità principale. Due ingressi secondari si localizzano lungo la medesima discontinuità strutturale, procedendo verso nord-ovest. La posizione dell'ingresso principale, situato sotto un blocco roccioso prominente, suggerisce processi di erosione differenziale che hanno portato alla formazione di un riparo naturale di ampie dimensioni.

Morfologia Interna e Processi Crionivali

La discesa iniziale presenta una serie di terrazzi detritici instabili, indicativi di processi gravitativi attivi lungo le pareti della faglia. L'ampio vano di confluenza dove convergono i tre ingressi presenta un pavimento costituito da blocchi caotici e depositi nivali.

Il pozzo d'accesso in profondità (1×2 metri all'imbocco) subisce un significativo allargamento dopo i primi 10 metri, estendendosi verso sud-est. Le "lingue" di ghiaccio scuro persistente rappresentano formazioni crionivali di particolare interesse, forse alimentate da processi di infiltrazione e successivo congelamento delle acque di percolazione.

Fenomeni Glaciali e Formazioni Crionivali

Le pareti del pozzo principale sono rivestite da estese colate glaciali con formazioni di notevole rilevanza estetica e scientifica. La presenza di un "tappo" di neve ghiacciata a circa 40 metri di profondità, attraversabile mediante un passaggio naturale di 1×2 metri, indica la formazione di occlusioni glaciali che possono condizionare significativamente l'accessibilità della cavità.

Il settore terminale attualmente esplorabile presenta una china glaciale mista a depositi di firn che conduce a un piccolo bacino dove si raccoglie l'acqua di fusione e di percolazione. Le colate glaciali che occludono le possibili prosecuzioni suggeriscono che l'estensione reale del sistema potrebbe essere significativamente maggiore di quella attualmente accessibile.

Implicazioni Paleoclimatiche ed Evolutive

La persistenza delle formazioni glaciali anche a profondità considerevoli (oltre 100 metri) indica condizioni microclimatiche abbastanza stabili, probabilmente correlate alla configurazione morfologica della cavità, ai processi di circolazione dell'aria e probabilmente a un



Fig. 30 - Ingresso all'abisso Ledo (foto Aldo Fedel).

comportamento di tipo *cold-trap*. L'eventuale fusione futura di queste masse glaciali, in relazione alle attuali variazioni climatiche, potrebbe rivelare ulteriori sviluppi del sistema carsico profondo attualmente inaccessibile.

La configurazione strutturale dell'abisso Ledo, controllata dalla lunga frattura ben visibile all'esterno, suggerisce una genesi legata ai processi tettonici regionali che hanno interessato l'area, con successiva evoluzione carsica facilitata dalla presenza di litotipi carbonatici molto solubili. Allo stato attuale, non sono state trovate evidenze di alcun tipo che possano aiutare a classificare questa cavità come grotta di Tipo 2.



Fig. 31 - Nel ghiaccio dell'abisso Ledo (foto Alberto Giorgi).

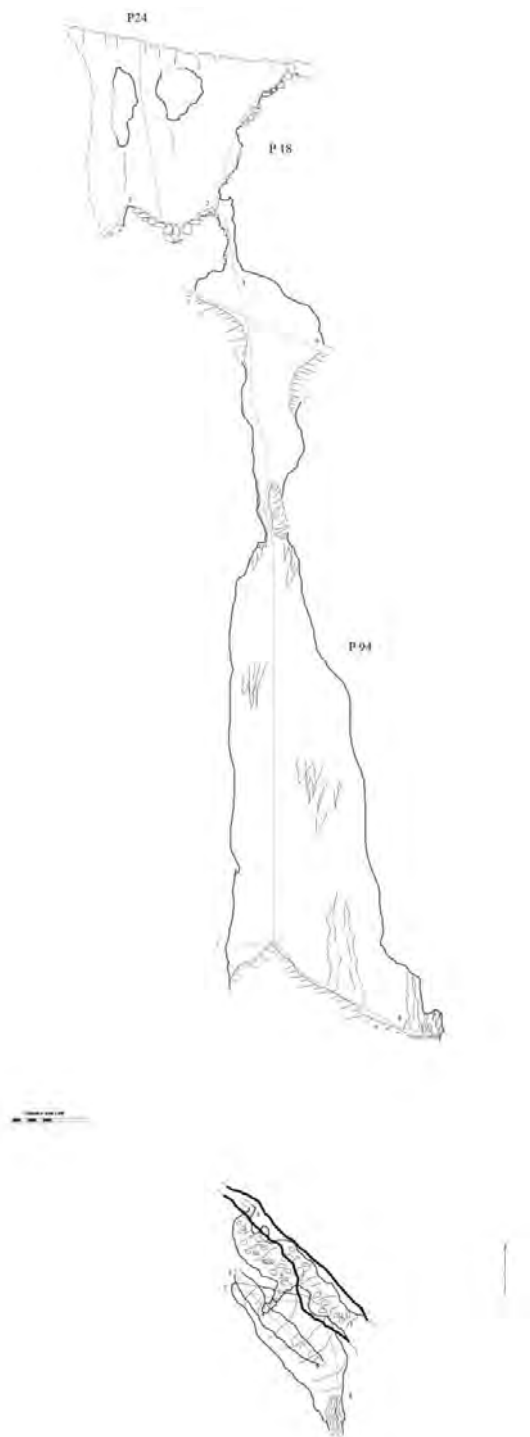


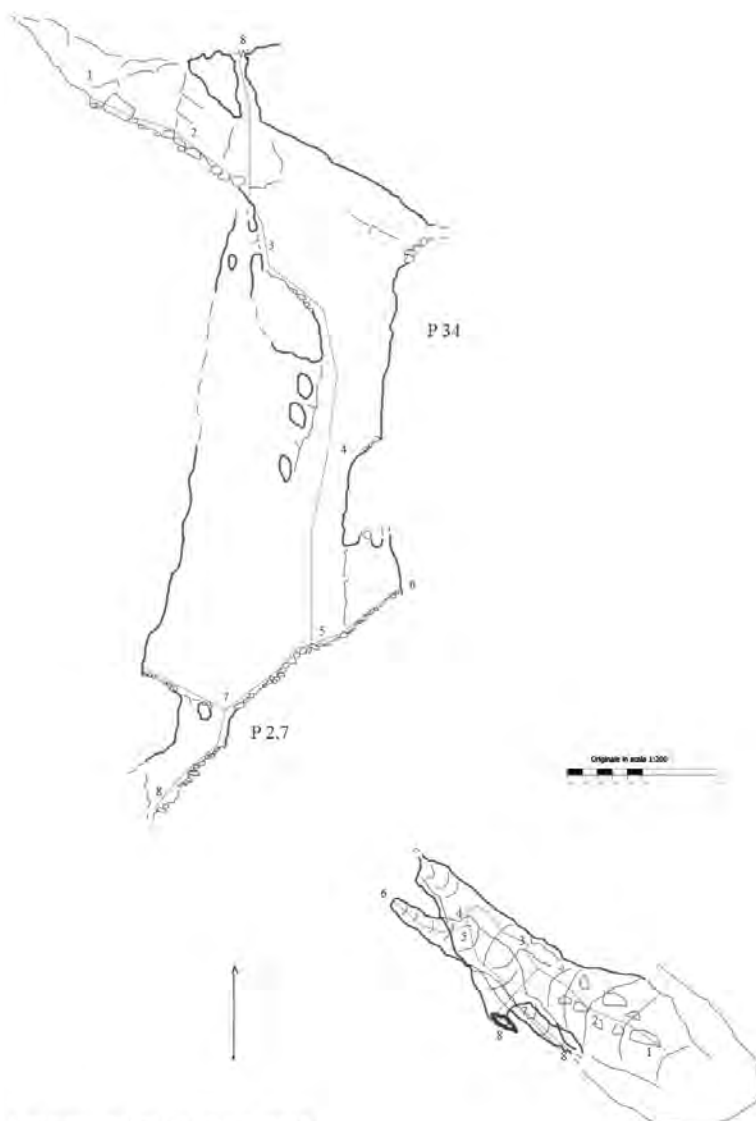
Fig. 32 - Rilievo topografico dell'abisso Ledo (Umberto Mikolic).

KLS025 (Tipo 2)

Quota ingresso: 1847 m	Sviluppo: 130 m	Profondità: 83 m
------------------------	-----------------	------------------

L'ampio ingresso a portale s'apre in una dolina in terreno in pendenza posta sul lato ovest della collina centrale dell'altipiano.

Si tratta di una cavità la cui classificazione nel tipo due è dubbia in quanto non soddisfa alcun criterio di catalogazione, nonostante la geometria generale suggerisca un'origine antica.



Umberto Mikolic 25-08-2025

Fig. 33 - Rilievo topografico della grotta KLS025 (Umberto Mikolic).



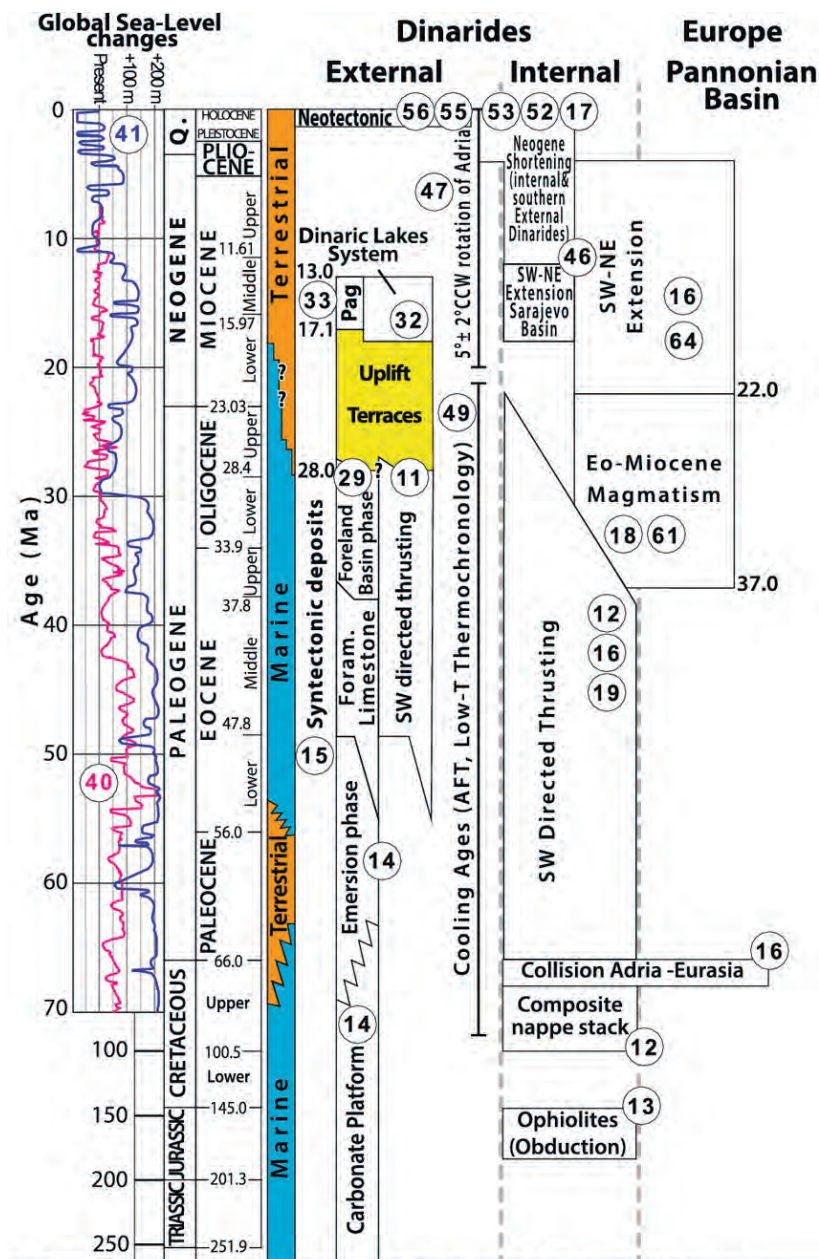
Fig. 34 - Ingresso della grotta KLS025 (foto Umberto Mikolic).

IPOTESI SPELEOGENETICA

Lo studio geomorfologico delle grotte di Tipo 1 e 2 offre una chiave fondamentale per la ricostruzione dell'evoluzione del sistema carsico dell'altopiano di Kučke Planine, in particolare per quanto riguarda la genesi delle cavità più antiche.

Le analisi geomorfologiche speditive indicano l'esistenza di una fase carsica pre-quadernaria, durante la quale doveva essere attiva una rete fluviale epigea e ipogea responsabile della formazione di un sistema di pozzi e gallerie. Tali cavità non appaiono collegate agli elementi geomorfologici e idrografici odierni (epicarso), e quindi suggeriscono una genesi in contesti paleogeografici e paleoclimatici profondamente differenti.

Di seguito si illustra un'ipotesi speleogenetica e in parte paleogeografica ottenuta dalle osservazioni effettuate e dalla comparazione con gli studi effettuati in aree con caratteristiche analoghe.



12 Schmid et al. (2020) 13 Robertson et al. (2009) 14 Vlahović et al. (2005)
 15 Tari and Mrinjek, (1994) 16 Ustaszewski et al. (2010) 17 van Unen et al. (2019)
 18 Schefer et al. (2011) 19 van Hinsbergen et al. (2020) 29 Zupanić and Babić (2011)
 32 de Leeuw et al. (2012) 33 Jiménez-Moreno et al. (2009) 40 Miller et al. (2005)
 41 Haq et al. (1987) 46 Andrić et al. (2017) 47 Le Breton et al. (2017)
 49 Šrodoň et al. (2018) 52 Picha (2002) 53 Schmitz et al. (2020) 55 Markušić & Herak (1995)
 56 Kuk et al. (2000) 61 Prelević et al. (2005) 64 Horváth et al. (2015)

Fig. 35 - Tabella cronologica che illustra i principali eventi tettonici nelle Dinaridi Esterne e Interne e nell'adiacente Bacino Pannonico settentrionale. (BALLING P. et al., 2021).

Oligocene (34-23 Ma)

La collisione della placca Adriatica con il margine europeo segna l'inizio della strutturazione orogenetica dinarica (SCHMID et al., 2008). Questo evento tettonico fondamentale fornisce il quadro strutturale primario su cui si svilupperà successivamente il carsismo alto-montano della zona di Kučke Planine, definendo l'architettura dei sistemi di fratturazione che controllerà la circolazione idrica sotterranea, creando i prerequisiti geologici per la successiva carsificazione.

Il perdurare della convergenza tettonica innesca sollevamenti regionali, e l'emersione progressiva delle unità carbonatiche crea le condizioni per l'avvio dei **primi processi carsici subaerei**, sebbene ancora limitati dall'assetto strutturale poco maturo.

Miocene Inferiore (23-11 Ma)

Le Dinaridi risultano definitivamente emerse e si organizzano i sistemi idrografici superficiali, l'asportazione di compagini rocciose soprastanti la piattaforma carbonatica e le fasi iniziali di incisione carsica (BABIĆ & ZUPANIČ, 1994). L'organizzazione delle reti di drenaggio superficiale innesca i primi processi significativi di dissoluzione carbonatica, favoriti dalle condizioni climatiche molto piovose del periodo, mentre l'abbassamento graduale del livello di base regionale crea i gradienti idraulici necessari per l'avvio della speleogenesi freatica. Il continuo sollevamento orogenetico intensifica la progressiva organizzazione del drenaggio e favorisce lo sviluppo dei primi sistemi ipogei, nonché delle prime inversioni di rilievo significative su altopiani carbonatici (FLOWER & KENNETT, 1994).

Miocene Superiore–Pliocene (11-2.6 Ma)

Questo intervallo temporale rappresenta la probabile finestra di formazione delle **cavità di Tipo 2** di Kučke Planine. Esso è caratterizzato da forte sottrazione d'acqua al reticolo idrografico superficiale e allo sviluppo estensivo di cavità, successivamente elevate alle quote attuali attraverso l'effetto combinato del sollevamento orogenetico e dell'incisione fluviale. In generale, la morfogenesi di questo periodo produce i caratteristici sistemi ipogei di gallerie sub-orizzontali oggi osservabili come cavità disconnesse dal drenaggio attuale.

Pleistocene (2.6-0.01 Ma)

I cicli glaciali-interglaciali pleistocenici introducono una forte ciclicità nei processi speleogenetici: i periodi **glaciali** riducono drasticamente la speleogenesi a causa delle temperature medie annuali di -6°C al margine delle calotte glaciali (MIHEVC, 2007), mentre le fasi **interglaciali** riattivano parzialmente la dissoluzione carbonatica e l'asportazione dei depositi.

Sull'altopiano di Kučke Planine, l'erosione glaciale e il carsismo (denudazione) riesumano progressivamente le cavità precedentemente riempite o abbandonate e ne modificano l'assetto morfologico portandole gradualmente a uno stato di relitto. I cicli di circa 100.000 anni che caratterizzano il Pleistocene medio-superiore determinano alternanze sistematiche tra fasi di stasi speleogenetica (stadiali) e riattivazione dei processi carsici (interstadiali).

Inizia lo sviluppo dell'epicarso attuale e la speleogenesi delle grotte di tipo 1.

Olocene–Attuale (11.7 ka-presente)

La dinamica periglaciale attuale e i processi gravitativi di versante rimaneggiano continuamente gli ingressi e i vani delle grotte di Kučke Planine, mascherando parzialmente le evidenze morfologiche delle fasi genetiche più antiche.

I processi crioclastici e gravitativi post-glaciali producono l'accumulo di detriti nelle cavità, creando le caratteristiche morfologie di riempimento osservabili nelle **cavità di Tipo 2**, in associazione con il contestuale accumulo di notevoli spessori di ghiaccio, di età molto recente, forse formati durante la **Piccola Età Glaciale** (approssimativamente 1260-1860 d.C.).

Note Metodologiche e Limitazioni

La cronologia evolutiva proposta integra vincoli strutturali e stratigrafici regionali delle Dinaridi con modelli consolidati di carsismo che spiegano efficacemente la genesi dei livelli ipogei e la loro successiva riesumazione in risposta all'incisione del reticolo idrografico e alle oscillazioni climatico-eustatiche quaternarie (LOWE, 2007). L'approccio metodologico utilizzato per l'analisi delle cavità dell'altopiano di Kučke Planine combina l'osservazione geomorfologica con i principi della speleogenesi, utilizzando come analogie i sistemi carsici alpini e dinarici già studiati.

Tuttavia, permangono ragionevoli incertezze sulla tempistica esatta delle fasi di sollevamento tettonica e sull'eventuale riattivazione parziale recente, considerato il complesso mosaico di strutture compressive ed estensionali documentato in Montenegro e nei settori adiacenti delle Dinaridi esterne. L'assenza di datazioni assolute sui depositi di riempimento delle cavità di Kučke Planine limita la precisione cronologica delle ricostruzioni proposte, rendendo necessari futuri approfondimenti analitici attraverso metodi di datazione diretta.

La variabilità locale dei processi morfogenetici e l'eterogeneità dell'assetto strutturale richiedono cautela riguardo i risultati ottenuti sull'altipiano di Kučke Planine, suggerendo la necessità di indagini sistematiche più approfondite per validare il modello evolutivo proposto. Le interazioni complesse tra controlli tettonici, climatici e morfogenetici richiederanno futuri approcci multidisciplinari per una comprensione completa dell'evoluzione dei sistemi carsici montani delle Dinaridi.

CONCLUSIONI

Dal punto di vista geologico, l'area di Kučke Planine è formata da calcari mesozoici con strati di notevole potenza. Nonostante la notevole compattezza, queste rocce sono caratterizzate da un'intensa fratturazione dovuta all'attività tettonica e ai processi di degradazione. La morfologia carsica dell'area è quella tipica delle alte quote e suggerisce un elevato potenziale per ulteriori scoperte speleologiche.

Implicazioni geomorfologiche

Le cavità di origine quaternaria documentano la predominanza dei processi attuali e recenti - principalmente crioclastismo, crollo gravitativo, neotettonica e percolazione. Esse testimoniano la forte dipendenza dalle discontinuità strutturali e dalla morfogenesi correlata a eventi climatici post-glaciali, con assenza di fasi di scorrimento idrico incanalato e profili di instabilità accentuata.

Implicazioni paleoclimatiche e stratigrafiche

Le cavità pre-quaternarie (tipo 2) conservano architetture interne complesse e sedimentazioni stratificate (detriti, ghiaccio, speleotemi) che rappresentano archivi preziosi di condizioni paleoclimatiche e idrogeologiche antiche. La presenza di vani sub-orizzontali, ingressi a caverna e tracce di scorrimento idrico incanalato documenta fasi di speleogenesi pre-glaciale, in ambienti radicalmente diversi dall'attuale.

Implicazioni strutturali ed evolutive

La presenza di due distinte famiglie di grotte rivela la coesistenza di regimi morfogenetici multipli: uno legato alla struttura e tettonica attuale, l'altro alla storia tettonica, idrogeologica e climatica passata. Il confronto sottolinea l'importanza delle strutture tettoniche ereditate (Dinaridi e corrugamenti alpino-dinarici) non solo per il controllo della morfologia superficiale, ma anche per l'evoluzione delle cavità più profonde. Inoltre, le grotte di tipo 2 fungono da

indicatori di stabilità ambientale prolungata, mentre quelle di tipo 1 sono testimoni di processi evolutivi tuttora in atto.

RINGRAZIAMENTI

Si desidera esprimere un sentito ringraziamento alla **Commissione Grotte E. Boegan** per l'indispensabile supporto logistico e finanziario offerto alle attività di esplorazione e alla **Società Alpina delle Giulie** per l'uso dei due furgoni sociali. Un particolare apprezzamento è rivolto a tutti i partecipanti alle spedizioni, il cui impegno, competenza e spirito collaborativo hanno costituito la base indispensabile per il raggiungimento degli obiettivi esplorativi e scientifici di questa campagna speleologica in Montenegro.

Spedizione 2025

Alberto Giorgi (capo spedizione), Veronika Paulina, Rocco Romano, Silvia Foschiatti, Andrea Lalovich, Adriano Balzarelli, Umberto Mikolic, Laura Bertolini, Cristiano Toffoletti (Commissione Grotte E. Boegan); Daniele Santarossa (Unione Speleologica Pordenonese); Ida Cossettini (Circolo Speleologico Idrologico Friulano di Udine); Lorenzo Scaini (Gruppo Speleologico "Bertarelli" di Gorizia).

Spedizione 2024

Lucio Comello (capo spedizione), Veronika Paulina, Aldo Fedel, Umberto Mikolic, Mario Privileggi, Alberto Giorgi. (Commissione Grotte E. Boegan).

Spedizioni leggere 2022-2023

Lucio Comello, Riccardo Corazzi, Luca Bussani, Lorenzo Marini, Stefano Colaprico (Commissione Grotte E. Boegan).

BIBLIOGRAFIA

- AUDRA P., 2004: *Kitzsteinhorn high-alpine karst (Salzburg, Austria): Evidence of non-glacial speleogenesis*. Die Höhle: 12–17.
- AUDRA P., BINI, A., GABROVŠEK F., HÄUSELMANN P., HOBLÉA F., JEANNIN P.-Y., KUNAVÉR J., MONBARON M., ŠUŠTERŠIĆ F., TOGNINI P., TRIMMEL H., & WILDBERGER, A., 2007: *Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography*. Acta Carsologica: 53–67.
- BALLING P., GRÜTZNER, C., TOMLIJENVIĆ, B., SPAKMAN, W., USTASZEWSKI, K., 2021: *Post-collisional mantle delamination in the Dinarides implied from staircases of Oligo-Miocene uplifted marine terraces*. Scientific Reports: 11.
- BAROVIĆ G., 2023: *Speleology of Montenegro*. Springer Professional.
- BIERMANN P., SCHMITZ, B., MECHERNICH, S., WEISMÜLLER, C., ONUZI, K., USTASZEWSKI, K., & REICHERTER, K., 2022: *Aegean-style extensional deformation in the contractional southern Dinarides: Incipient normal fault scarps in Montenegro*. Solid Earth: 957–974.
- BONACCI O., 1987: *Karst hydrology: With special reference to the Dinaric karst*. Springer.
- COLUCCI R., et al., 2022: *Multi-year evolution of 75 snow and ice deposits in schachtdolines*. Geomorphology.
- ĆULAFIĆ G., & KRSTAJIĆ, J., 2024: *Hydrology of surface water and climate characteristics of Montenegro*. In G. Barović (Ed.), *Speleology of Montenegro: Cave and karst systems of the world: xx–xx*. Springer.

- DELVAUX D., MOSAR, J., & STAPEL, G., 2004: *Sedimentary setting of Adriatic flysch formation (Middle Eocene–Middle Miocene) in the Southern Dinarides (Montenegro)*. *Geologica Balcanica*: 188–201.
- DIJUROVIĆ P., 2020: *Genesis of the Pleistocene hummocky moraines in the Moračke Planine, Montenegro*. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*.
- FORD D., & WILLIAMS, P., 2007: *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley.
- FRANKL A., LENAERTS, T., RADUSINOVIĆ, S., SPALEVIĆ, V., & NYSSSEN, J., 2016: *The regional geomorphology of Montenegro mapped using land surface parameters*. *Zeitschrift für Geomorphologie*: 60.
- HUGHES P.D., WOODWARD, J.C., & GIBBARD, P.L., 2010: *Little Ice Age glaciers in the Balkans: Low altitude glaciation enabled by cooler temperatures and local topoclimatic controls*. *Earth Surface Processes and Landforms*: 35(2).
- HUGHES P.D., et al., 2011: *Reply: The glacial history of the Dinaric Alps, Montenegro*. University of Manchester Research.
- HUGHES P.D., et al., 2012: *“The glacial history of the Dinaric Alps, Montenegro” – Response to comments*. *Quaternary Science Reviews*.
- HUGHES P.D., WOODWARD, J.C., & GIBBARD, P.L., 2017: *Quaternary glaciation in the Mediterranean mountains: A new synthesis*. Geological Society, London, Special Publications: 433, 1–23.
- JEREMIĆ M., & MILOŠEVIĆ, M., 2022: *The primary and secondary mineral resources of Montenegro and their development possibilities*. *Geologia Croatica*: 189–202.
- KALUĐEROVIĆ M., & MIHAJEVIĆ, D., 2021: *Geological and tectonic characteristics of Montenegro*. *Albanian Journal of Natural & Technical Sciences*: 52, 1–15.
- KASPRAK A. H., SEPÚLVEDA, J., PRICE-WALDMAN, R., WILLIFORD, K. H., SCHOEPPER, S. D., HAGGART, J. W., WARD, P. D., SUMMONS, R. E., & WHITESIDE, J. H., 2015: *Geochemical records of the end-Triassic crisis preserved in a deep marine section of the Budva Basin (Dinarides, Montenegro)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*: 436, 187–203.
- KLIMCHOUK A. B., 1995: *Morphogenesis and hydrodynamics in the epikarst zone*. In *Atti del Convegno Internazionale sul Carsismo*. Università di Kiev.
- KLIMCHOUK A. B., FORD, D. C., PALMER, A. N., & DREYBRODT, W., 2000: *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. NCKRI.
- MARKOVIĆ S. B., WOODWARD, J. C., MARIJANOVIĆ, M., ANTIĆ, A., HUGHES, P. D., SPALEVIĆ, V., MARKOVIĆ, R., RADAKOVIĆ, M., BRĐANIN, E., LUKIĆ, T., & TOMIĆ, N., 2025: *An integrated glacial geosite assessment framework and its application in Montenegro: Inventory, evaluation, and prospects for geotourism*. *International Journal of Geoheritage and Parks*: 13(3).
- PALMER A. N., 2007: *Cave geology*. Cave Books.
- PETROVIĆ A., 2014: *A reconstruction of the Pleistocene glacial maximum in the Žijovo Range (Prokletije Mountains, Montenegro)*. *Acta Geographica Slovenica*: 54(2).
- RADUSINOVIĆ S., & PAJOVIĆ, M., 2024: *Geology of Montenegro*. In G. Barović (Ed.), *Speleology of Montenegro: Cave and karst systems of the world*: xx–xx. Springer.
- RADUSINOVIĆ, S., & PAPADOPOULOS, A., 2021: *The Potential for REE and Associated Critical Metals in Karstic Bauxites and Bauxite Residue of Montenegro*. *Minerals*, 11(9), 975.
- SCHMID S. M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., & MATENCO, L., 2008: *The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: Correlation and evolution of tectonic units*. *Swiss Journal of Geosciences*: 101, 139–183.
- SPÖTL C., BAKER, J. L., SKIBA, V., HONLAT, A., FOHLMEISTER, J., LUETSCHER, M., & TRÜSSEL, M., 2024: *Speleothems in subglacial caves: An emerging archive of glacial climate history and mountain glacier dynamics*. *Quaternary Science Reviews*: 333.
- TARI V., 2002: *Evolution of the northern and western Dinarides: A tectonostratigraphic approach*. EGU Stephan Mueller Special Publication Series: 1, 223–236.
- TARI V., 2007: *Geodynamic evolution of the Dinarides*. *Marine and Petroleum Geology*: 24, 495–513.

- U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021: *The mineral industry of Montenegro in 2020–2021*. Minerals Yearbook, Vol. 3, Area Reports: International.
- USTASZEWSKI K., KOUNOV, A., SCHMID, S. M., & SCHALTEGGER, U., 2008: *Late Cretaceous intra-oceanic magmatism in the internal Dinarides*. Lithos: 108, 90–118.
- ZUPAN HAJNA N., MIHEVC, A., PRUNER, P., & BOSÁK, P., 2008: *Paleomagnetism and magnetostratigraphy of Pliocene sediments from the Dinaric karst*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology: 259, 388–397.

FONTI WEB VERIFICATE

- ADAPTATION FUND. (2023). *Adaptation to Climate Change and Resilience in the Montenegrin Mountains*. Link: https://www.adaptation-fund.org/wp-content/uploads/2023/03/AFB.PPRC_31.15-Proposal-for-MONTENEGRO.pdf
- CLIMATE CHANGE KNOWLEDGE PORTAL. (2024). *Montenegro - Country Overview*. World Bank. Link: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/montenegro>
- IUCN PORTAL. (2023). *Enhancing Nature-based Solutions in Montenegro*. Link: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2023-037-En.pdf>
- MONTENEGRO THIRD NATIONAL COMMUNICATION ON CLIMATE CHANGE. (2019). Link: <https://www.sustainability.gov/pdfs/ggi-montenegro-tnc.pdf>
- PMC. (2020, April 1). Investigation of the vulnerability of a partly covered karst feature in Bosnia and Herzegovina. *PMC*. Link: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7244619/>
- UNECE. (2023). New Environmental Performance Review of Montenegro finds waste issues and adaptation challenges. Link: <https://unece.org/environment/press/new-environmental-performance-review-montenegro-finds-waste-issues-and-adaptation>
- UNITED NATIONS IN MONTENEGRO. (2016, April 21). Our Changing Planet. Link: <https://montenegro.un.org/en/43433-our-changing-planet>

Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”	Vol. 54 (2025)	pp. 81-88	Trieste 2025
--	----------------	-----------	--------------

JOSEF VUCH¹, BENEDETTA RIGO², ALBERTO RIVA^{3,4,5}

CENSIMENTO DEI “BATTERI ORO E ARGENTO” NELLE GROTTI DEL FRIULI-VENEZIA GIULIA: NASCITA DEL PROGETTO, FLUORESCENZA BATTERICA E SPETTROMETRIA APPLICATA

ABSTRACT

The microbial community known as “golden and silver bacteria” typically forms biofilm-like layers coating cave walls, often associated with the presence of water droplets. These biofilms become visible only when illuminated with light sources characterized by specific wavelengths capable of exciting the pigments responsible for their fluorescence.

As part of this study, in addition to defining the objectives of a research project dedicated to the identification and mapping of golden and silver bacteria in the caves of Friuli-Venezia Giulia, spectrometric tests were conducted on several lamps commonly used in speleological progression.

Various commercial UV torches were also analyzed, leading to the identification of a model that enables a more selective and clearer visualization of the phenomenon.

RIASSUNTO

La comunità microbica nota come “batteri oro e argento” forma tipicamente strati simili a biofilm che ricoprono le pareti delle grotte, spesso associati alla presenza di goccioline d’acqua. Questi biofilm diventano visibili solo quando illuminati con sorgenti luminose caratterizzate da specifiche lunghezze d’onda in grado di eccitare i pigmenti responsabili della loro fluorescenza.

Nell’ambito di questo studio, oltre a definire gli obiettivi di un progetto di ricerca dedicato all’identificazione e alla mappatura dei batteri oro e argento nelle grotte del Friuli-Venezia Giulia, sono stati condotti test spettrometrici su diverse lampade comunemente utilizzate nella progressione speleologica.

Sono state analizzate anche varie torce UV commerciali, che hanno portato all’identificazione di un modello che consente una visualizzazione più selettiva e chiara del fenomeno.

¹ Club Alpinistico Triestino.

² Unione Speleologica Pordenonese.

³ Gruppo Grotte Solve CAI Belluno.

⁴ Gruppo Grotte Treviso.

⁵ Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra.

INTRODUZIONE

L'osservazione di colonie batteriche note come “batteri oro e argento” ha suscitato crescente interesse tra speleologi e biologi, poiché questi biofilm fluorescenti potrebbero giocare un ruolo importante negli ecosistemi ipogei, caratterizzati da scarsità di nutrienti e assenza di luce solare. In tali ambienti, l'attività microbica rappresenta la base delle reti trofiche e costituisce una risorsa primaria per molti organismi cavernicoli.

Nel 2024, gli autori di questo articolo hanno deciso di avviare un censimento sistematico di questi biofilm nelle grotte del Friuli-Venezia Giulia. La decisione è nata dall'assenza di dati strutturati sulla distribuzione dei “batteri oro e argento” nella regione e dall'interesse ecologico legato al possibile ruolo di questi biofilm nell'equilibrio delle comunità ipogee. In aggiunta, l'avvento delle lampade LED ha reso possibile l'osservazione di questi fenomeni fluorescenti, fino ad allora completamente nascosti.

La possibilità che esistano altri batteri con pigmenti fluorescenti sensibili a lunghezze d'onda diverse da quelle attualmente utilizzate apre scenari affascinanti. Se la tecnologia delle lampade non si fosse evoluta verso il blu-viola, questi biofilm potrebbero non essere mai stati scoperti. È plausibile che ulteriori pigmenti, attivabili da altre lunghezze d'onda, attendano solo la “luce giusta” per essere rivelati.

È importante sottolineare che la fluorescenza osservata non implica la presenza di metalli preziosi. Sebbene alcune specie batteriche come *Cupriavidus metallidurans* siano in grado di precipitare oro metallico in condizioni specifiche, le colonie osservate nelle grotte devono il loro aspetto alla fluorescenza dei pigmenti piuttosto che alla presenza di metalli. Questo sfata l'idea di depositi d'oro o argento e riconduce il fenomeno a un processo biochimico legato ai pigmenti microbici.

Analisi condotte in Slovenia⁽¹⁾ e Nuova Guinea⁽²⁾ hanno dimostrato che molte colonie fluorescenti sono costituite da batteri del genere *Pseudomonas*, noti per la produzione di pigmenti come le pioverdine, che funzionano sia come siderofori per il trasporto del ferro sia come molecole fluorescenti. Tuttavia, la comunità batterica è spesso complessa e include diversi generi minori, suggerendo che la fluorescenza sia un fenomeno diffuso e non limitato a un'unica specie.

Storicamente, la fluorescenza nelle grotte non era osservabile perché le fonti luminose utilizzate dagli speleologi, candele, lampade a carburo o alogene, emettevano principalmente nello spettro rosso e infrarosso, oltre 700 nm, lontano dalle lunghezze d'onda necessarie per eccitare i pigmenti batterici. Solo con l'avvento delle lampade LED, in grado di emettere luce nel blu-viola, è stato possibile osservare i riflessi caratteristici dei biofilm. Questa innovazione tecnologica ha trasformato la percezione degli ambienti ipogei, rivelando un vero e proprio arcobaleno nel buio, prima invisibile.

La fluorescenza è un fenomeno fisico in cui alcune molecole, dette fluorofori, assorbono fotoni a una certa lunghezza d'onda e riemettono luce a lunghezze d'onda maggiori. Nei biofilm batterici osservati nelle grotte, questa proprietà è legata a pigmenti specifici prodotti dai microrganismi. Quando illuminati con radiazioni tra 393 e 419 nm, i pigmenti assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile, tipicamente a 460 nm (blu) e 600 nm (arancione)⁽³⁾ (Figura 1).

REALIZZAZIONE DELLO SPETTROMETRO AUTOCOSTRUITO

Per valutare quali sorgenti luminose fossero realmente efficaci nell'evidenziare la fluorescenza batterica, è stato realizzato uno spettrometro autocostruito (Figura 2) ispirato al progetto open-hardware di GaudiLabs (GaudiLabs LLC, Lucerna, Svizzera).

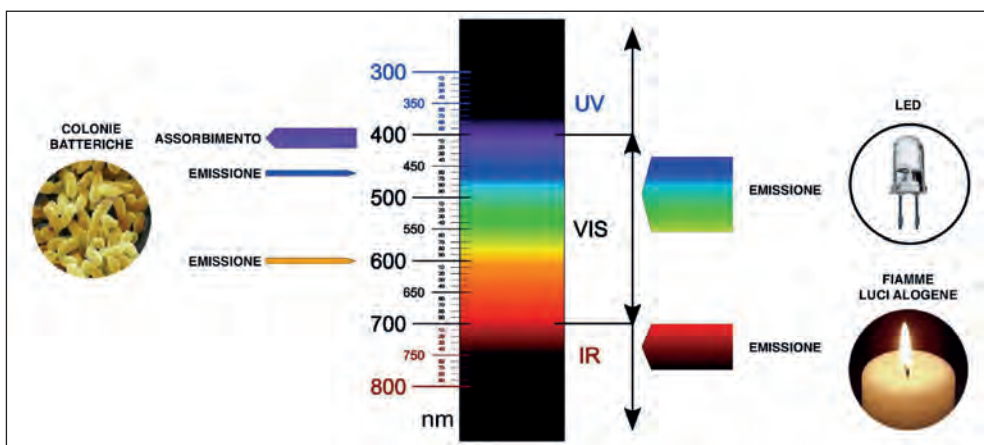


Fig. 1 - I pigmenti dei biofilm batterici assorbono luce tra 393-419 nm (viola) ed emettono fluorescenza a 460 nm (blu) e 600 nm (arancione). Le luci tradizionali emettono nell'intervallo rosso-infrarosso (>700 nm), mentre i LED, utilizzati in speleologia, emettono luce tra 446 e 556 nm, vicino al massimo assorbimento del biofilm. Questo ha permesso l'osservazione delle colonie batteriche solo con l'illuminazione LED, rispetto a quella tradizionale⁽³⁾.

Componenti principali:

- Modulo telecamera USB HBV-1313, 1600×1200 px, 2 MP, con obiettivo grandangolare (Keenso, store amazon)
- Griglia di diffrazione lineare 1000 linee/mm (fotomir24 store eBay)
- Scatola stampata in 3D in PLA nero.
- Fessura ottenuta incidendo un film di alluminio con una lama sottile.



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

Le immagini spettrali ottenute sono state elaborate tramite il software online messo a disposizione dal progetto GaudiLabs (<https://gaudi.ch/Spectrometer/>). Lo strumento è stato calibrato utilizzando lo spettro di emissione del mercurio e dell'europro proveniente da una lampada fluorescente, che presenta righe spettrali note e ben definite (Figura 3).

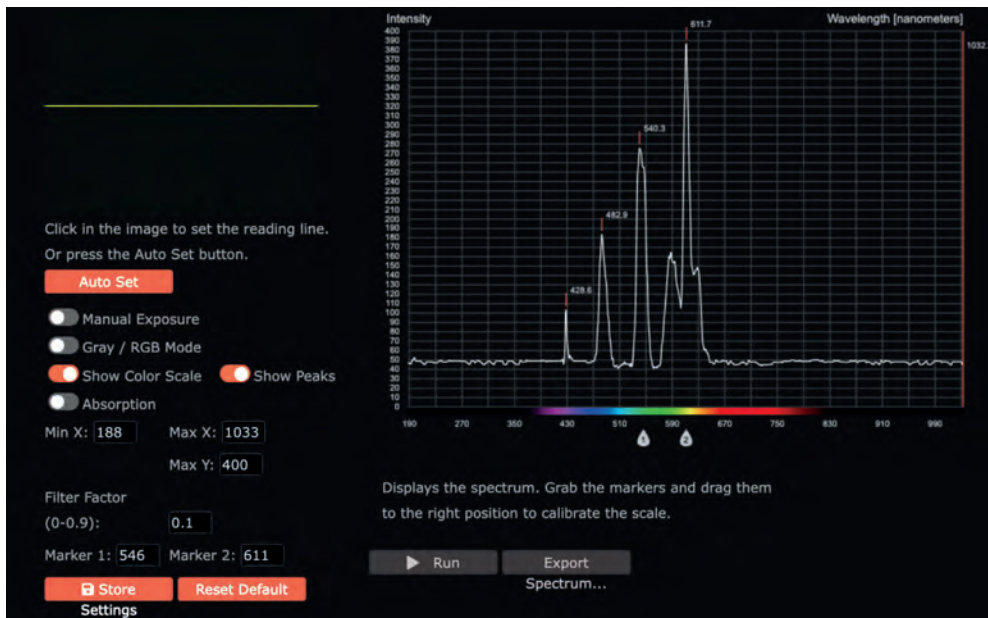


Fig. 3 - Taratura con lampada fluorescente Philips Economy 11 W Energy saver. Poland. Picco del mercurio 546,5 nm, picco del europio 611,6 nm.

RISULTATI SPETTROMETRICI DELLE SORGENTI LUMINOSE TESTATE

Le misurazioni effettuate tramite lo spettrometro autocostruito hanno permesso di analizzare in dettaglio lo spettro di emissione di diverse lampade normalmente utilizzate per la progressione in grotta. I risultati mostrano che tutte le lampade LED analizzate presentano picchi prevalenti nello spettro del blu (437–455 nm), componente compatibile con l'assorbimento dei pigmenti responsabili della fluorescenza dei biofilm. Tuttavia, queste sorgenti emettono anche un'intensa componente visibile nelle lunghezze d'onda maggiori (verde e rosso), che può mascherare la fluorescenza emessa dai biofilm stessi.

Nella Tabella 1, sono riportati i dati spettrometrici ottenuti dai modelli testati.

VALUTAZIONE DELLE LAMPADIE UV PER L'ESALTAZIONE DELLA FLUORESCENZA BATTERICA

Sono state inoltre analizzate diverse lampade UV commerciali, tra cui modelli non filtrati (DARKBEAM 365 nm e 395 nm) e un modello filtrato (DARKDAWN 365 nm). I modelli non filtrati presentano emissione residua nel visibile, tale da mascherare la fluorescenza batterica. Al contrario, la lampada UV filtrata ha mostrato un picco a 371,2 nm con una banda ristretta (360,0–394,0 nm), permettendo una visualizzazione chiara e nitida della fluorescenza, grazie all'assenza quasi totale di emissione nel visibile (Tabella 2).

Modello lampada a LED	Picchi principali dello spettro misurato (nm)	Intervallo dello spettro di emissione (nm)
Rude Nora 2	437,1	403,0 - 652,6
	531,8	
	591,5	
Zebralight, H604d	454,3	435,8 - 686,0
	519,8	
	601,1	
Tikka 350 lumens, PETZL	450,6	426,6 - 679,5
	520,8	
	600,2	
LEDHEADLIGHT,2000lumen	453,4	422,9 - 658,3
	525,4	
	596,5	
KIKKO, fredda	446,9	420,2 - 689,7
	527,2	
	592,8	
Wurkkos, HD20 profondità	450,6	415,5 - 656,5
	527,2	
	596,5	
ACEBEAM profondità	454,3	423,8 - 706,3
	548,5	
	592,8	
Scurion 700, fredda	455,2	426,6 - 654,6
	534,6	
	590,9	
LED, FORCLAZ	451,5	423,8 - 672,2
	513,4	
	595,5	

Tabella 1 - Lampade speleologiche testate, con indicazione dei principali picchi di emissione spettrale e dell'intervallo complessivo di lunghezze d'onda rilevato per ciascuna sorgente luminosa.

Modello lampada UV	Picco principale dello spettro (nm)	Intervallo dello spettro di emissione (nm)
DARKBEAM Torcia UV 365 nm	381,4	361,1 - 420,2
DARKBEAM Torcia UV 395 nm	407,2	386,9 - 442,3
DARKDAWN Torcia UV 365 nm con filtro	371,2	360,0 - 394,0

Tabella 2 - Lampade UV testate, comprendente due modelli non filtrati (DARKBEAM 365 nm e 395 nm) e un modello filtrato (DARKDAWN 365 nm). Per ogni modello è indicato il picco principale dello spettro di emissione e l'intervallo dello spettro di emissione.

CONCLUSIONE OPERATIVA

Le lampade LED da grotta sono sufficienti per osservare i biofilm fluorescenti durante la progressione e hanno avuto un ruolo chiave nella loro individuazione. Le lampade UV filtrate sono più performanti, offrendo un'evidenziazione più chiara e controllabile del fenomeno, particolarmente utile in un contesto di censimento e analisi (Figura 4).

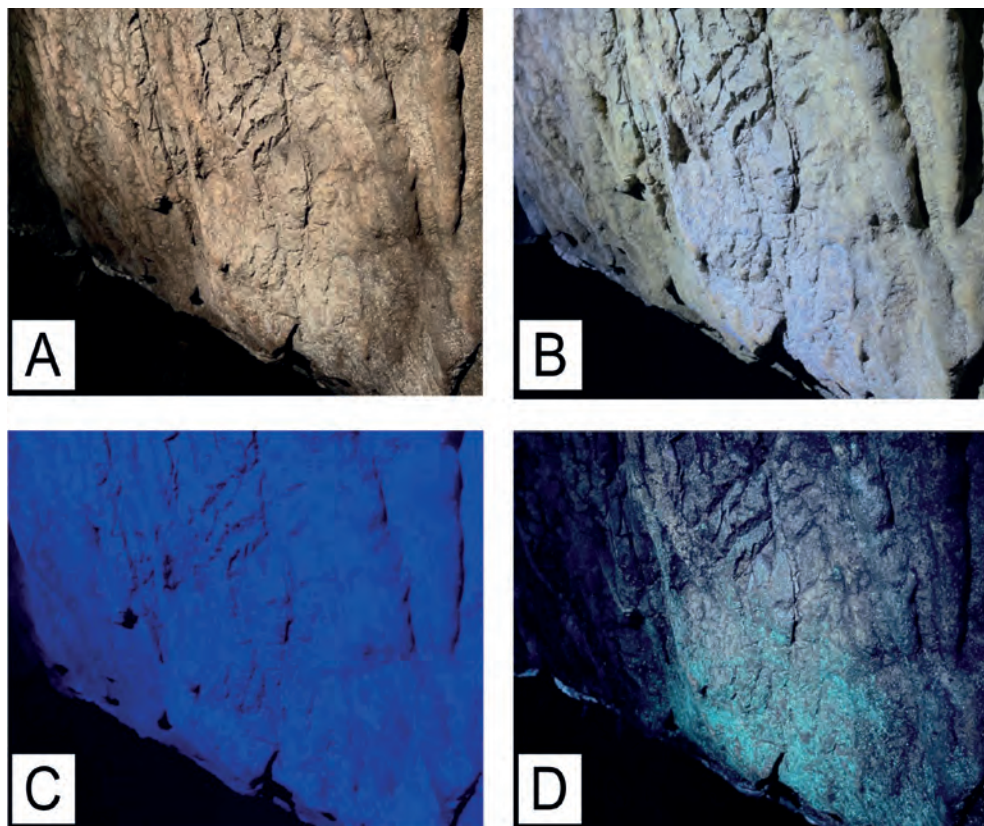


Fig. 4 - Osservazione delle colonie microbiche fluorescenti esposte a diverse fonti luminose.

A: Parete rocciosa della Grotta Azzurra 34 - 257 VG CSR, 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.

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 Treviso per monitorare la presenza di “golden” e “silver bacteria” nelle grotte del Friuli - Venezia Giulia.

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 la presenza di batteri argento.

Nel modulo è presente una sezione che si riferisce alla presenza o assenza di tali colonie batteriche e al loro luogo di osservazione (grotta: ingresso, metà, fondo). È inoltre presente 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.

Il modulo Google è visibile scansando il seguente QR code (Figura 5) con uno smartphone o tablet.



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

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 realizzato 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⁽⁴⁾.

BIBLIOGRAFIA

- (1) MULEC J. et al., 2015 - *Characterization and fluorescence of yellow biofilms in karst caves, southwest Slovenia*. International Journal of Speleology, 44 (2): 107-114.
- (2) 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.
- (3) VUCH J., 2023 - *Arcobaleno nel buio*, Cronache ipogee, n. 3.
- (4) RIGO B., VUCH J., 2024 - *Brillanti curiosità nel buio*, Esplorare n. 14 - Appunti di Speleologia Porde-
nonese.

INDICE

ATTI

BESENGHI F., FEDEL A.: Relazione dell'attività della Commissione Grotte "Eugenio Boegan" nell'anno 2024 (142°)	"	V
--	---	---

MEMORIE

MATTES J.: The making of "classical" karst: serbian geographer Jovan Cvijić, (inter) nationalism, and the emergence of karst sciences, 1870-1914	"	3
BUSSANI A., FEDEL A.: Revisiting atmospheric thermal tides in the 'Costantino Doria' cave (n. 3875 V.G.), Trieste: insights from old and new data	"	25
GIORGI A.: Kučke Planine (Montenegro): nuove cavità, processi glaciocarsici e speleogenesi nelle Alpi Dinariche meridionali	"	35
VUCH J., RIGO B., RIVA A.: Censimento dei "batteri oro e argento" nelle grotte del Friuli-Venezia Giulia: nascita del progetto, fluorescenza batterica e spettrometria applicata	"	81