

# STUDIO e MONITORAGGIO DELLE GROTTI CON GHIACCIO NELLE ALPI PIEMONTESI

**Luca Paro**

Dipartimento Rischi Naturali e  
Ambientali - Arpa Piemonte, Torino

**Bartolomeo Vigna**

Dipartimento di Ingegneria  
dell'Ambiente, del Territorio e delle  
Infrastrutture - Politecnico di Torino

*Le foto sono degli autori  
B. Vigna e L. Paro*

## **Ice caves monitoring in Piedmont Alps**

*Ice caves might be regarded as a specific form of permafrost where the mean annual air temperature is at least for some parts of the cave - below 0 °C. Considering this thought further, ice caves with their ice formations might be seen as one element of the periglacial domain. Research on ice in subsurface cavities has a long tradition in the Alps. In a recently published book dedicated to ice caves (Perşoiu & Lauritzen, 2018), national ice cave-overviews were presented for Switzerland, Austria, Italy, Germany, and Slovenia. In Italy, the most recent line of research concerning the study of the high elevated karstic environments of the Italian Alps involves researchers with different backgrounds engaged in the study of ice caves. The interest in ice caves dates back several centuries. By the end of the 15th century, Leonardo da Vinci made some observations and took note in his personal diary after visiting probably the "Ghiacciaia del Moncodeno" (Bergamo Alps) used as a private ice reserve by a wealthy family. Such ice caves nowadays are undergoing drastic transformations due to atmospheric warming causing a strong and rather quick reduction of cave-ice masses. Ice caves in the Italian Alps are distributed along the entire karstic area, mainly in the Central-Eastern Alps (Lombardy, Veneto, Trentino-Alto Adige-Südtirol, and Friuli Venezia Giulia regions) but also in the South-Western Alps (Maritime and Ligurian Alps in Piemonte region), with probably more than 1600 existing cryocaves, having within them permanent (pluriannual) masses of ice, firn or permanent snow; some 150 of them with ice deposits. In the Piedmont region, there are tens of caves with cryogenic deposits, but it is still not clear if some of them present permanent ice nowadays. Starting in 2016, Arpa Piemonte and DIATI of Politecnico di Torino established a thermometric monitoring network in 4 ice caves with permanent ice (3 in Ligurian Alps and one in Cottian Alps). "Rem del Ghiaccio" ice cave (Ligurian Alps) presents the greatest accumulation of ice with the most evident ice melting phase in the second part of the 2010s.*

Le grotte contenenti ghiaccio possono essere considerate una forma specifica di permafrost in cui la temperatura media annuale dell'aria è almeno per alcune parti della grotta inferiore a 0 °C, rientrando, quindi, nel dominio periglaciale (dominio caratterizzato dall'azione del freddo, non legato all'ambiente glaciale).

La ricerca sul ghiaccio nelle cavità sotterranee ha una lunga tradizione nelle Alpi. In un libro di recente pubblicazione dedicato alle grotte con ghiaccio (Perşoiu & Lauritzen, 2018), sono state presentate panoramiche nazionali delle grotte di ghiaccio per Svizzera, Austria, Italia, Germania e Slovenia. In Italia, la più recente linea di ricerca concernente lo studio degli ambienti carsici di alta quota delle Alpi italiane coinvolge ricercatori di diversa estrazione impegnati proprio nello studio delle grotte di ghiaccio.

L'interesse per queste grotte (definite nella letteratura scientifica "ice caves") risale a diversi secoli fa. Anche Leonardo da Vinci alla fine del XV secolo annotò alcune osservazioni dopo aver visitato probabilmente la "Ghiacciaia del Moncodeno" nelle Alpi Bergamasche.

Tali grotte di ghiaccio oggi stanno subendo drastiche trasformazioni dovute al riscaldamento atmosferico che provoca una forte e piuttosto rapida riduzione delle masse di ghiaccio in grotta. Per comprendere i meccanismi di formazione dei depositi di ghiaccio in grotta e la loro recente evoluzione nel contesto dei cambiamenti climatici, Arpa Piemonte e il DIATI del Politecnico di Torino hanno avviato un progetto di studio e monitoraggio di alcune ice caves nelle Alpi Liguri e Cozie.



## INTRODUZIONE

**Distribuzione delle grotte con ghiaccio e neve nelle Alpi italiane**

Le grotte contenenti ghiaccio (ice caves) possono essere considerate una forma specifica di *permafrost* in cui la temperatura media annuale dell'aria è almeno per alcune parti della grotta inferiore a 0 °C, appartenendo di fatto al dominio periglaciale (dominio caratterizzato dall'azione del freddo, non legato all'ambiente glaciale).

Le grotte di ghiaccio delle Alpi italiane sono distribuite lungo l'intera area carsica, principalmente nelle Alpi Centro-orientali (Lombardia, Veneto, Trentino-Alto Adige e Friuli Venezia Giulia) ma anche nelle Alpi sud-occidentali (Alpi piemontesi, Marittime e Liguri), con probabilmente più di 1600 crio-grotte esistenti, contenenti al loro interno masse permanenti (pluriennali) di ghiaccio, firn o neve permanente. In tali aree, i depositi di ghiaccio registrati in occasione di rilievi speleologici o studi di ricerca sono circa 150 (Maggi *et al.*, 2018). Il numero preciso di grotte con ghiaccio nelle regioni italiane è tuttavia incerta, a causa: (1) della mancanza di

studi diffusi sulle grotte con ghiaccio, e (2) del recente cambiamento climatico, che sta riducendo velocemente le masse di ghiaccio quasi ovunque e, in molti casi, ha già causato la fusione di tutto il deposito di ghiaccio.

In alcune di queste grotte, la presenza di ghiaccio è stata attestata dagli anni '60 agli anni '80 del XX secolo e negli ultimi 20 anni è stata documentata una graduale riduzione dei depositi di ghiaccio. Ma l'interesse per le grotte con ghiaccio risale a diversi secoli fa. Una delle grotte più documentate è la "Ghiacciaia del Moncodeno", situata nella Grigna Settentrionale (Alpi Centrali), e in passato utilizzata come riserva di ghiaccio privata da una ricca famiglia milanese. Verso la fine del 1400, Leonardo da Vinci fece alcune osservazioni che annotò nel suo diario personale dopo aver visitato probabilmente la stessa grotta, mentre era commissario della Valsassina (Brevini, 2004). Nelle Alpi italiane, molti nomi di grotte locali indicano che si tratta di grotte particolarmente fredde o di grotte contenenti depositi di ghiaccio, indicando che la popolazione locale conosceva questo ambiente da molto tempo (es.

"Balma ghiacciata del Mondolè" sul massiccio del Mondolè, in provincia di Cuneo, le cui cronache storiche ne attestano l'uso come ghiacciaia).

Prima di analizzare in dettaglio i casi studio nelle Alpi piemontesi, di seguito vengono presentate in sintesi le conoscenze principali sulle grotte con ghiaccio nei settori alpini centro-orientali, tratte da Maggi *et al.* (2018).

In **Lombardia**, in un recente database di grotte (Ferrario & Tognini, 2016) sono elencate 149 grotte con ghiaccio, firn e neve permanente. Queste crio-grotte presentano una distribuzione altimetrica molto ampia, compresa tra 1340 e 2840 m s.l.m., spostandosi principalmente da sud a nord. Solo 12 ice caves presentano depositi di ghiaccio ben noti e due di esse sono state studiate negli ultimi 10 anni. Le grotte con ghiaccio lombarde sono ubicate in pozzi verticali o doline di crollo, con un'apertura superficiale del sistema verticale. La distribuzione di queste grotte, sia per localizzazione che per altitudine, è sicuramente correlata alle diverse condizioni meteo-climatiche lungo la regione ma non esistono studi che mettano in relazione l'assetto topografico delle crio-grotte e le condizioni climatiche locali; oltretutto, a causa dello sviluppo verticale dei sistemi carsici, la circolazione dell'aria ipogea potrebbe influenzare le temperature negative al loro interno (Maggi *et al.*, 2018).

Nella regione del **Trentino-Alto Adige**, nonostante l'area montuosa carsica sia molto diffusa, esistono informazioni sulle ice caves solo per le Dolomiti del Brenta (Alpi Retiche Meridionali). In quest'area, circa 100 grotte presentano depositi criogenici, ubicate tra 1900 e 2750 m s.l.m., con oltre il 50% di queste distribuite nella fascia compresa tra 2300 e 2500 m s.l.m. Tali grotte sono generalmente a singolo pozzo verticale con neve e firn sul fondo (Ischia & Borsato, 2005) e solo cinque di loro presentano depositi di ghiaccio permanenti, con spessori da pochi metri fino a circa 20 m. Nelle Dolomiti del Brenta sono state studiate esaurientemente due grotte di

Fig. 1 - Pozzo a neve sui versanti nord del M. Mongioie.



ghiaccio: la Grotta dello Specchio (quota ingresso 1930 m s.l.m.) e la Grotta del Castelletto di Mezzo (quota ingresso 2435 m s.l.m.). Sebbene legati a diversi processi termodinamici, come la circolazione dell'aria in "tubo di vento" per la prima e la "trappola d'aria fredda" per la seconda, i depositi di ghiaccio nelle due grotte hanno subito una evoluzione simile. Le fasi di accumulo/ablazione si sono alternate regolarmente negli ultimi 500 anni, regolate dalle temperature estive, fino agli anni '80 del secolo scorso quando il tasso di ablazione ha accelerato bruscamente. Attualmente, l'evoluzione dei due depositi di ghiaccio è controllata dall'ablazione, che è direttamente correlata alle temperature estive, mentre l'accumulo annuale è minimo (Borsato *et al.*, 2006).

Il **Veneto** rappresenta un'altra area carsica delle Alpi italiane, con montagne composte principalmente da calcari e dolomie. Nonostante la vocazione carsica, le informazioni sulle grotte con ghiaccio sono molto scarse. Sicuramente depositi criogenici sono presenti nella maggior parte delle grotte, soprattutto nelle aree dolomitiche e nell'Altopiano di Asiago, ma di queste grotte non esiste un database definito. Su informazioni desunte dai diversi circoli speleologici veneti, si desume l'esistenza di almeno 50 grotte con depositi di ghiaccio, la maggior parte esplorate negli anni '60 del XX secolo e per questo motivo non è chiaro se i depositi siano ancora presenti o meno (Maggi *et al.*, 2018).

Nella Regione **Friuli Venezia Giulia** (FVG) le grotte con ghiaccio sono diffuse in ambienti carsici di alta quota. Recentemente, sono state individuate 1111 grotte contenenti tracce di materiale criogenico perenne (neve, firn e ghiaccio), su un totale di 3068 grotte conosciute, situate al di sopra dei 1000 m s.l.m., e collettivamente indicate come crio-grotte (Colucci *et al.*, 2016a). Di queste, 123 grotte (l'11% del totale) sono state considerate "grotte con ghiaccio" in cui è stata segnalata con certezza la presenza di ghiaccio. La maggior parte



Fig. 2 - Ingresso del Pozzo ghiacciato 2 del Mondolè.

del ghiaccio è presente nei primi 20 m di profondità, mentre tra i 20 e 60 m la presenza di ghiaccio è meno frequente, e al di sotto degli 80 m è solo occasionale. Nessuna traccia di ghiaccio è stata trovata al di sotto di circa 150 m dalla superficie (Maggi *et al.*, 2018). Queste grotte di ghiaccio nel FVG si trovano generalmente tra 1500 e 2200 m s.l.m. La percentuale più alta di grotte di ghiaccio si registra nell'area del Canin, massiccio carsico di alta quota sulle Alpi Giulie. Qui si trovano 79 crio-grotte, con un'altitudine media di 1928 m s.l.m. Per le grotte con ingresso inferiore a 1000 m s.l.m. non si hanno notizie di alcuna massa di ghiaccio permanente. In generale, la distribuzione delle crio-grotte è ben correlata con la MAAT (Temperatura Media Annuale dell'Aria) e l'altitudine, essendo questa tipologia di grotte significativamente più frequenti dove la MAAT è inferiore a 2 °C (grotte con ghiaccio) e 5 °C (crio-grotte) (Colucci *et al.*, 2016b).

## DEPOSITI DI GHIACCIO NELLE CAVITÀ E CAMBIAMENTI CLIMATICI

### Alcuni esempi nelle Alpi Liguri e Cozie

Nell'area piemontese, che rappresenta la parte occidentale italiana degli affioramenti carbonatici, sono presenti diverse decine di grotte con depositi criogeni-

ci, in particolare "pozzi a neve" perenni (Fig. 1) ed alcune cavità con ghiaccio permanente. Tra questi il "pozzo a neve" più interessante è il "Pozzo ghiacciato 2" del Mondolè (Fig. 2) a quota 2200 m che raggiunge una profondità di circa 80 m ed ospita un nevaio con ghiaccio che nel 1988, anno della sua prima esplorazione, si incontrava ad una profondità di 12 m dall'ingresso mentre nell'estate del 2022 i depositi criogenici si sono ridotti notevolmente, attestandosi a partire da 25 m dall'ingresso cavità. In ogni caso, questo glacio-nevato presenta ancora uno spessore di oltre 50 m e può essere considerato uno dei più meridionali depositi di neve perenne dell'arco alpino. Informazioni relative alla presenza di neve e ghiaccio al fondo delle cavità si trovano nel catasto regionale online (<https://catastogrotte-piemonte.net>). Le aree principali con crio-grotte (prevalentemente con depositi di neve) si trovano nelle Alpi Liguri e in particolare nelle aree dei massici del Marguareis, del Mongioie, del M. Conoia, del Biecai e del Mondolè dove sono state censite almeno 40 crio-grotte, per lo più costituite da pozzi verticali con depositi di neve e ghiaccio perenni (Gruppo Speleologico Piemontese, 2014; Vigna & Paro, 2019). Nell'abisso dello "Scarasson" (ubicato a quota 2200 m nel settore medio-alto nella Conca delle Carsene) si trova a 120 m di profondità un ghiacciaio ipo-

## GLACIOLOGIA

geo, scoperto nel 1960, che superava in quel periodo uno spessore di 30 m. Tale ghiacciaio (Fig. 3) è stato oggetto di una serie di studi da parte degli speleologi francesi ed italiani (Boscart, 2008; Morel et al., 2017; Callaris, 2019). Negli anni questo ghiacciaio ha subito una drastica riduzione di spessore e nel 2019 presentava una altezza inferiore a 5 m.

Nell'ambito del progetto di ricerca denominato "Ice caves", iniziato nel 2016 e tutt'ora in corso, condotto da Arpa Piemonte e dal DIATI del Politecnico di Torino (con la collaborazione dell'Ente Parco Alpi Marittime e dello Speleo Club Tanaro), sono state individuate nel settore delle Alpi Liguri e delle Alpi Cozie alcune cavità con presenza di ghiaccio perenne: l'abisso "Rem del ghiaccio", il

pozzo "Lambda-21" e le grotte "Pertus d'la Patarassa" e "Ro-mina". In quest'ultima, stando alle testimonianze degli speleologi che hanno esplorato per primi la cavità, i depositi di ghiaccio hanno iniziato a formarsi in fondo alla grotta in seguito all'apertura artificiale dell'ingresso nel 2008.

I depositi di ghiaccio interessati da questo studio hanno diverse modalità di formazione in quanto sono ubicati in cavità caratterizzate da morfologie e circolazioni d'aria piuttosto differenti tra loro. Con l'obiettivo di condurre un monitoraggio termico in tali grotte, sono stati installati acquisitori automatici per rilevare la temperatura dell'aria e della roccia e per esaminare come le variazioni stagionali in superficie influenzano la

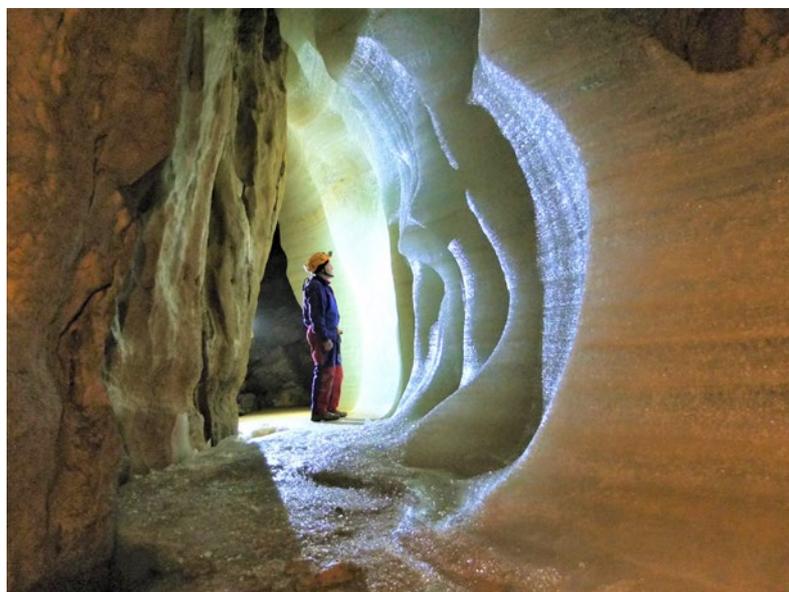
situazione climatica in profondità. La temperatura della roccia viene registrata con sensori posti in fori di diametro da 8 a 12 mm e profondi da 20 a 100 cm, adeguatamente isolati dalla superficie rocciosa. La temperatura dell'aria in superficie viene misurata in parte da strumentazioni ubicate presso gli ingressi e in parte da stazioni meteorologiche di Arpa Piemonte situate in prossimità di queste cavità. I datalogger utilizzati sono dei Tinytag 2 plus della Gemini Scientific Ltd. con alimentazione a batteria e 2 sensori (termistori NTC) con cavo di lunghezza variabile da 1,5 a 10 m, accuratezza di 0,2 °C, risoluzione di 0,01 °C, con custodia IP68 e dimensioni contenute. L'acquisizione dei dati è impostata con registrazione del valore massimo e minimo di temperatura nell'intervallo di 1 o 2 ore.

Nel corso di questo studio sono state effettuate anche analisi chimiche delle acque di fusione del ghiaccio delle diverse cavità analizzando gli ioni principali, i metalli e le terre rare. Sulla base di alcune datazioni al  $^{14}\text{C}$  effettuate su residui vegetali prelevati nei livelli più bassi di alcuni di questi ghiacciai è ipotizzabile che la loro formazione sia iniziata prima della Piccola Età Glaciale (iniziata nell'area alpina circa a metà del XIV secolo e durata 500 anni). Alcune datazioni evidenziano che i frammenti di legno provenienti dal ghiacciaio del Pertus d'la Patarassa sono del 933 AD ( $\pm 20$  anni). Un livello di foglie di faggio, perfettamente conservato, campionato nel settore intermedio del ghiacciaio della grotta Lambda-21 è, invece, risultato essere di circa 1000 anni più recente, con deposizione risalente al 1923 AD ( $\pm 20$  anni).

*Fig. 3 - Il ghiacciaio ipogeo dello Scarason: i sottili livelli di colore scuro sono legati alla deposizione di materiale organico.*



*Fig. 4 - Il ghiacciaio ipogeo dell'abisso Rem del ghiaccio formato da migliaia di livelli di ghiaccio di spessore centimetrico, con numerose discordanze angolari legate probabilmente a diverse fasi di fusione e rigelo (foto luglio 2016).*



### L'Abisso "Rem del ghiaccio"

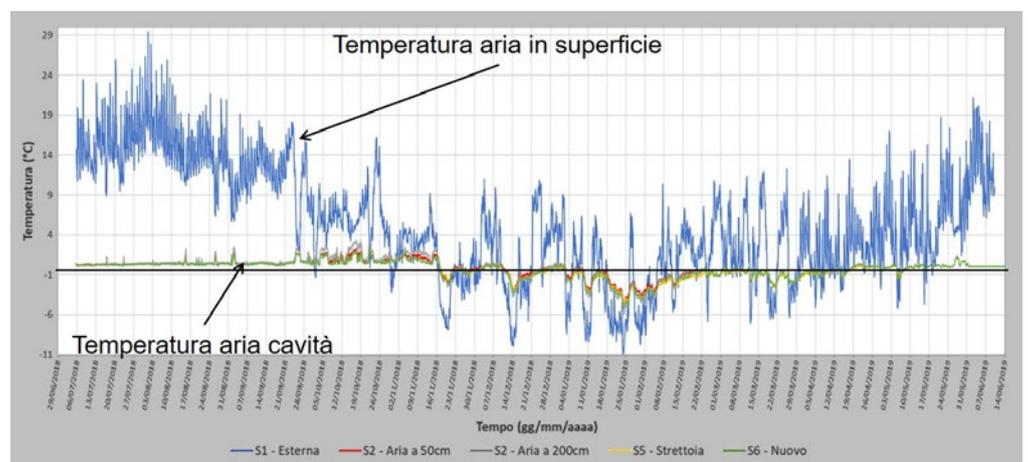
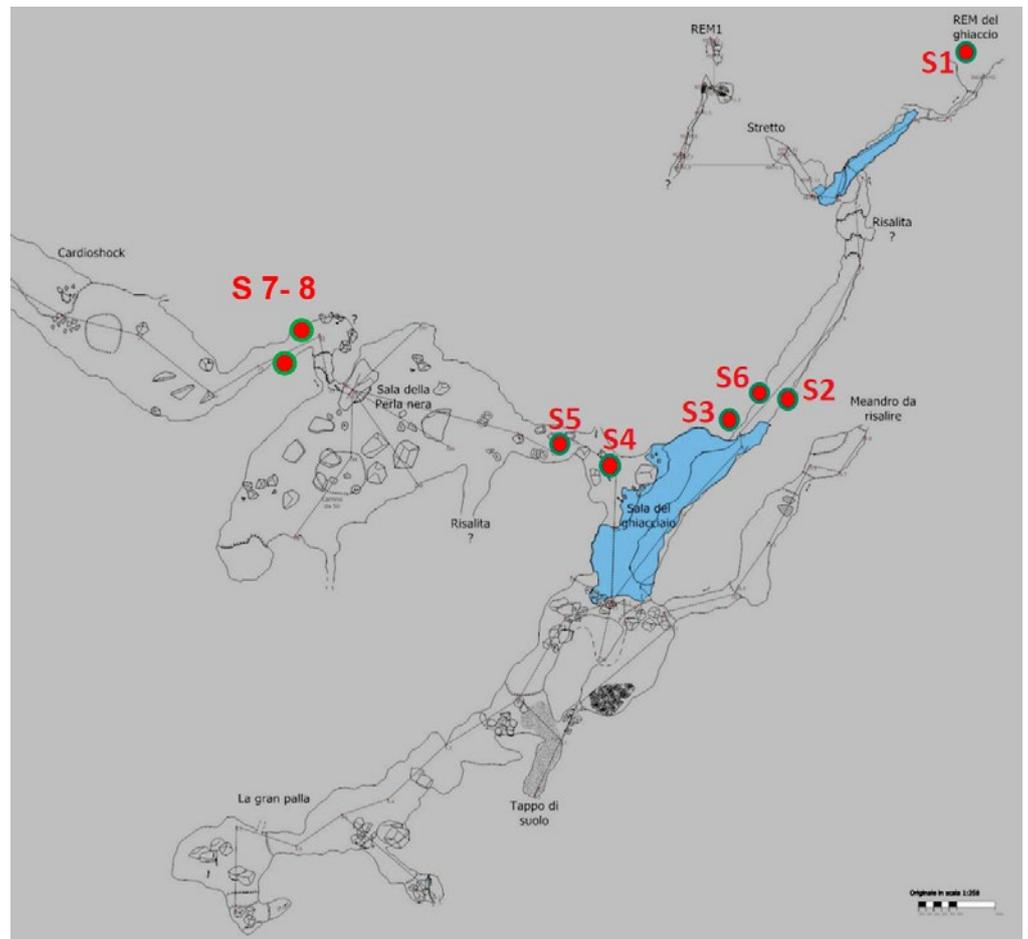
L'ingresso dell'Abisso Rem del ghiaccio è situato nelle Alpi Liguri (alta valle Casotto), a quota 1900 m s.l.m., ed è costituito da un meandro che dopo pochi metri si approfondisce in un pozzo di una quindicina di metri. Al fondo si incontra un primo ghiacciaio con spessore di oltre 5 m, sospeso su un successivo pozzo di

almeno 15 m. La grotta prosegue, alla base del primo salto, lungo una risalita di 8 m che conduce ad una forra che, al momento della prima esplorazione nel 1995, era in gran parte occupata da depositi di ghiaccio che raggiungevano uno spessore di alcuni metri. Al fondo, dopo una cinquantina di metri, si trovava un ambiente del tutto chiuso dal ghiaccio. Nel 2014 è stato individuato un nuovo passaggio, apertosi in seguito alla fusione parziale del ghiaccio stesso. Questo passaggio ha permesso di raggiungere un successivo ampio salone in parte occupato dal ghiacciaio principale (Fig. 4).

La grotta prosegue poi attraverso una serie di passaggi tra blocchi di frana fino ad un altro ampio ambiente di crollo collegato a meandri, pozzi e gallerie con uno sviluppo complessivo finora esplorato di 2420 m e con un dislivello totale di 330 m. La prima parte della cavità è percorsa da una notevole corrente d'aria, uscente nella stagione estiva ma con temporanee inversioni del flusso in occasione di cambiamenti meteorologici in superficie (legati a perturbazioni, variazioni barometriche, vento). Un anemometro ad ultrasuoni piazzato all'imbocco della prima forra ha rilevato dati in una settimana estiva evidenziando tale situazione. Con la stagione fredda la circolazione d'aria si inverte, presentando ancora inversioni temporanee dei flussi.

Gli acquisitori sono stati installati a partire dal 2016 in diverse zone della cavità, iniziando dai settori a monte e a valle del ghiacciaio principale (Fig. 5). Grazie alla notevole quantità di dati ed alle numerose osservazioni, è possibile ipotizzare in via preliminare sia le modalità di formazione del ghiacciaio, sia le cause della sua fase attuale di accelerata fusione. La genesi è probabilmente legata al congelamento delle acque di percolazione che raggiungono questi ambienti dove le temperature dell'ammasso roccioso e dell'aria sono  $< 0^{\circ}\text{C}$  per 5-6 mesi l'anno (Fig. 6).

Nei restanti mesi le temperature di roc-



cia e aria rimangono pochi decimi di grado al di sopra di  $0^{\circ}\text{C}$ . Tale situazione è legata alla circolazione d'aria presente nella cavità. Nei mesi freddi, significativi volumi d'aria entranti dall'ingresso della grotta abbassano di diversi gradi sotto lo zero la temperatura dell'aria (minima registrata di  $-7,6^{\circ}\text{C}$ ) e dell'ammasso roccioso (minima di  $-1,2^{\circ}\text{C}$  ad una profondità di 1 m), interessando questi ambienti fino a distanze di diverse centinaia di metri dall'imbocco. Nel periodo primaverile, in seguito alla fusione della

neve, si infiltrano acque con temperature prossime a  $0^{\circ}\text{C}$  che raggiungono la cavità. Si originano in questo modo dei veli d'acqua che scorrendo sulla roccia o su altri depositi di ghiaccio, congelano poco alla volta, dando origine ai numerosi strati che compongono il ghiacciaio. In estate, in seguito all'inversione della circolazione d'aria, la temperatura di questi ambienti continua a rimanere molto bassa. L'aria, proveniente dagli ingressi alti del sistema carsico e con temperature di alcuni gradi sopra gli 0

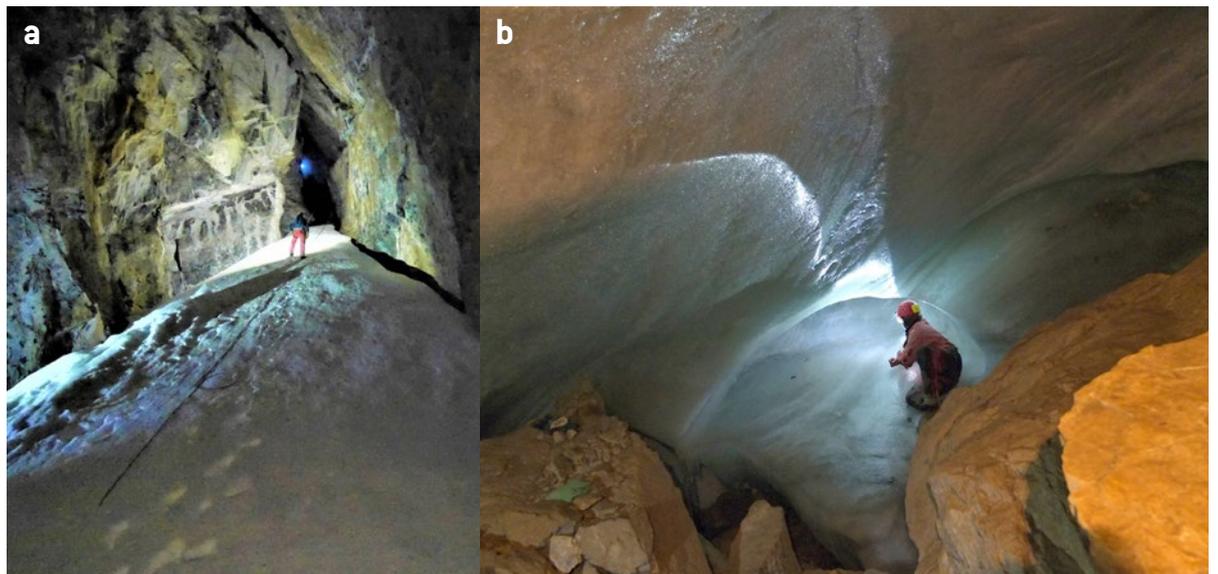
Fig. 5 - Planimetria della prima parte della cavità con ubicazione dei due ghiacciai ipogei ed ubicazione dei sensori.

Fig. 6 - Andamento annuale (luglio 2018-luglio 2019) della temperatura dell'aria in superficie e nella cavità del Rem del ghiaccio.

Fig. 7 - Progressiva riduzione del ghiacciaio ipogeo del Rem del ghiaccio tra gli anni 2016 e 2021.



Fig. 8 - a) Il pozzo di Lambda 21 con il nevaio superficiale. b) Il ghiacciaio ipogeo di Lambda 21 sottostante il nevaio.



°C, si raffredda fluendo nelle gallerie e nei meandri dove la temperatura della roccia è ancora molto ridotta, condizionata dai valori invernali e dalla presenza del ghiaccio fondente.

Benché i dati termici ipogei presentino solo blande oscillazioni con una certa variabilità interannuale, nei sette anni di osservazioni (2016-2022) si è assistito alla sensibile riduzione del volume della massa glaciale nell'abisso Rem (Fig. 7). Al fine di studiare e preservare alcuni

campioni di ghiaccio di questa grotta, nel 2019 sono state prelevate 6 carote di ghiaccio di circa 50 cm di lunghezza ciascuna, lungo una sezione verticale del ghiacciaio principale. Le carote sono conservate presso l'Euro Cold Lab del Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra dell'Università di Milano-Bicocca e sono in corso le analisi cristallografiche delle sezioni sottili e le analisi isotopiche (quest'ultime a cura dell'Università Ca' Foscari di Venezia).

#### Il Pozzo "Lambda-21"

Il Pozzo Lambda-21 si trova nel massiccio del M. Mongioie (Alpi Liguri) ed è costituito da un ampio pozzo con una inclinazione di circa 45° con ingresso a quota 2330 m s.l.m. A 20 m di profondità inizia un esteso conoide di neve (Fig. 8a) che ricopre il sottostante ghiacciaio (Fig. 8b). Al fondo di questo grande ambiente un ingente deposito di frana occlude il passaggio agli speleologi ma lascia fluire una notevole circo-

lazione d'aria. Analogamente all'abisso Rem del ghiaccio, anche questa cavità si comporta da "ingresso basso": nella stagione fredda la neve penetra all'interno del pozzo principalmente per piccole valanghe che si staccano dai ripidi versanti sovrastanti che si riversano nell'ampio imbuto dell'ingresso. La genesi di questo ghiacciaio ipogeo è quindi simile a quella che porta alla formazione dei ghiacciai di superficie. Sulla parete al fondo della cavità sono evidenti anche depositi di ghiaccio legati al congelamento dell'acqua di percolazione. Sono le basse temperature legate alla circolazione dell'aria (minime registrate al fondo della cavità  $< -5$  °C, a partire dal 2018) e della roccia (minima di  $-2,8$  °C registrata a 40 cm di profondità), con un meccanismo del tutto simile a quello descritto per l'abisso Rem del ghiaccio, a creare le condizioni che nei secoli hanno preservato la massa glaciale.

#### La Grotta "Ro-mina"

Sullo stesso versante e un'ottantina di metri più in basso del Pozzo Lambda-21 si trova l'ingresso della Grotta Ro-mina

che nel 2008, quando è stata scoperta, era una fessura soffiante di alcuni decimetri di lunghezza. L'allargamento artificiale di tale passaggio ha consentito l'accesso e l'esplorazione di una stretta condotta orizzontale chiusa dopo 120 m da un importante accumulo di frana. Dopo alcuni anni dalla sua apertura, gli speleologi hanno iniziato ad osservare la formazione di depositi di ghiaccio nel settore terminale di questa cavità, la cui origine è legata al notevole incremento di circolazione d'aria, in particolare nella stagione invernale. Infatti, prima dello scavo, l'ingresso aspirava significativi volumi d'aria fintanto che la fessura non veniva intasata dalla neve, in occasione delle precipitazioni nevose. Con l'allargamento dell'ingresso e la sistemazione di una lamiera per impedirne la chiusura da parte della neve, da allora confluiscono in grotta ingenti volumi d'aria nei mesi freddi che abbassano di alcuni gradi la temperatura della roccia. In seguito a temporanee chiusure dell'ingresso, legate ad abbondanti nevicate, la temperatura della grotta (misurata ad alta frequenza a partire dal 2016) mostra

significativi aumenti di alcuni decimi di grado in tali periodi (Fig. 9). Un sensore di temperatura, piazzato nel ghiaccio a pochi centimetri di profondità, ha evidenziato il periodo in cui si formano questi depositi (Fig. 10). Nella stagione invernale si osservano temperature molto ridotte (minima registrata di  $-2,6$  °C) con oscillazioni evidenti legate alla variazione termica della situazione in superficie (grotta in aspirazione). In primavera, in seguito alla percolazione delle acque di fusione nivale, i veli d'acqua liquida che scorrono sulla superficie del ghiaccio solidificano e progressivamente il sensore di temperatura viene coperto ed isolato da diversi decimetri di ghiaccio. Di conseguenza la temperatura registrata aumenta fino ad un valore che rimane molto costante per diversi mesi, dell'ordine di qualche centesimo di grado  $< 0$  °C.

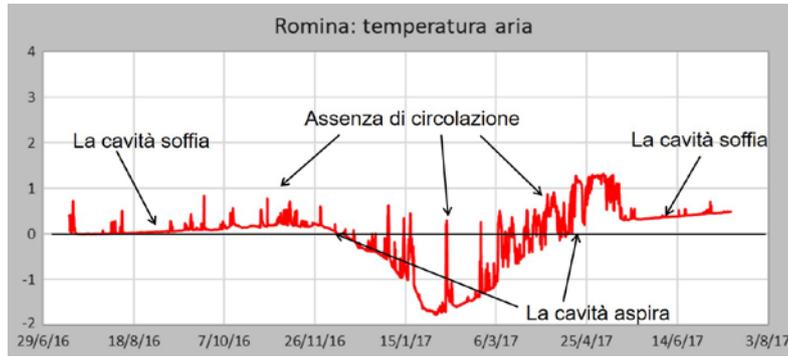
#### La grotta del "Pertus d'la Patarassa"

L'ingresso della Grotta Pertus d'la Patarassa si trova nella valle di Narbona (valle laterale dell'alta valle Grana) ad una quota di 2024 m s.l.m. La cavità,



*Fig. 9 - Depositi di ghiaccio nella Grotta Ro-mina legati al congelamento dell'acqua di percolazione ad ottobre del 2022, nonostante l'estate particolarmente calda appena trascorsa.*

Fig. 10 - Andamento annuale (luglio 2016 - luglio 2017) della temperatura dell'aria della Grotta Ro-mina.



lunga 34 m e profonda 8 m, ospita al fondo un piccolo ghiacciaio, residuo di un deposito molto più ampio ormai quasi del tutto scomparso. La circolazione d'aria è assente, la grotta si comporta da trappola di aria fredda che consente oggi una parziale conservazione del ghiaccio anche nel periodo estivo raggiungendo una temperatura massima di + 1,8 °C nel mese di ottobre (misurata a partire dal 2017). La formazione di questi depositi è legata alla solidificazione delle acque di percolazione che giungono in primavera in un ambiente con temperature fino a -3,6 °C.

Sulla base di tutti i dati raccolti in questo studio risulta quindi che l'incremento delle temperature in superficie ha causato un cambiamento della situazione meteorologica sotterranea (anche se con variazioni di temperature di pochi decimi di grado), interrompendo l'equilibrio favorevole alla formazione e al mantenimento delle masse glaciali.

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le Alpi sud-occidentali (dalle Liguri alle Cozie) sono caratterizzate dalla presenza di vaste aree carsiche e numerosissime

sono le cavità presenti che raggiungono anche notevoli profondità e svariati chilometri di lunghezza. Mentre i principali fenomeni carsici sia superficiali che profondi sono conosciuti ed ampiamente descritti in numerosi lavori, pochi sono i dati riguardanti le cavità caratterizzate dalla presenza di depositi di ghiaccio perenne o con veri e propri ghiacciai ipogei ubicati anche a quote relativamente basse. Insieme ai "pozzi a neve", cavità ad andamento prettamente verticale con profondità variabili da 10 ad oltre 80 metri che contengono cospicui depositi di neve perenne, queste grotte rappresentano dei punti estremamente interessanti per osservare l'impatto sugli ambienti ipogei legato ai cambiamenti del clima nella zona alpina. La presenza di ghiaccio perenne in diverse cavità del settore alpino è testimoniata oralmente dalle popolazioni locali, ma si trovano descrizioni sommarie anche in alcuni testi del XVIII e del XIX secolo.

I notevoli incrementi della temperatura in atmosfera che si stanno registrando soprattutto nel settore alpino condizionano pesantemente la presenza di questi depositi, in alcuni casi provocando la completa scomparsa del ghiaccio nel periodo di fine estate e in autunno, in altri con la marcata riduzione di spessore dei ghiacciai ipogei. A partire dagli inizi del XXI secolo ed in particolare nell'ultima decina di anni tali fenomeni sono stati oggetto della osservazione diretta degli speleologi. Nelle Alpi Liguri, nella famosa "Balma Ghiacciata" del Mondolè, come in numerose cavità sui versanti settentrionali dei massicci del Monte Mongioie e del Marguareis, il ghiaccio, che una volta era presente anche nel periodo autunnale, è ora del tutto scomparso o fonde completamente verso fine estate.

Nel 2016 è iniziato lo studio di alcune ice caves da parte del Dipartimento Rischio Naturale e Ambientale di Arpa Piemonte e del Dipartimento Ingegneria dell'Ambiente, Territorio e Infrastrutture del Politecnico di Torino (con il supporto dello Speleo Club Tanaro ed il Parco Alpi Marittime). La ricerca viene condotta

attraverso il monitoraggio in continuo dei valori di temperatura di aria e roccia in diversi settori delle cavità, con analisi chimico-fisiche del ghiaccio, campionamenti di materiale organico e datazioni con  $^{14}\text{C}$ . Quasi tutte le grotte in fase di studio sono caratterizzate da una notevole circolazione d'aria di tipo "tubo a vento". Nei periodi freddi notevoli flussi d'aria entrano dagli ingressi bassi (le zone con ghiaccio sono prossime a tali ingressi) e fuoriescono dagli ingressi alti. Nei mesi più caldi la circolazione d'aria all'interno degli ammassi rocciosi si inverte. Tale fenomeno è legato alla differenza di densità tra le colonne d'aria esterne e quelle interne che hanno temperature differenti. Si viene così a formare un gradiente di pressione fra interno ed esterno della montagna che provoca questi importanti flussi d'aria. Quindi, nei settori dove si trova il ghiaccio la temperatura dell'aria e della roccia è, nelle stagioni fredde, decisamente inferiore a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  poiché l'aria proviene direttamente dalla superficie, mentre nei periodi estivi, l'aria più calda entrante dagli ingressi alti, attraversa l'ammasso roccioso raffreddandosi progressivamente nei settori prossimi agli ingressi bassi dove, a causa della forte aspirazione nel periodo invernale, la temperatura della roccia è sempre prossima ad  $1\text{-}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura media di queste zone è di poco inferiore a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , condizioni che hanno consentito la conservazione del ghiaccio. I meccanismi genetici che portano alla formazione dei depositi di ghiaccio sono diversi ma sempre riconducibili alla temperatura della roccia fratturata e carsificata, nella quale scorrono significativi flussi di aria e di acqua che la raffreddano. Negli ultimi decenni, nelle cavità, questi delicati equilibri tra la temperatura della roccia e quella dell'aria sono cambiati a causa dell'incremento delle temperature in superficie. Di conseguenza la situazione ideale che ha permesso la formazione e la conservazione per secoli di questi depositi è venuta meno ed è iniziata così una progressiva riduzione della massa glaciale e/o nevosa.

Lo studio ed il monitoraggio di queste cavità da parte di Arpa Piemonte e Politecnico di Torino continua e, alle grotte sopra citate, si aggiungono altri siti che consentono di aumentare l'area di osservazione e migliorare la definizione del modello genetico (nel giugno 2022 è stata installata una nuova rete di monitoraggio termico nella Balma ghiacciata del Mondolè Fig. 11). Altre reti strumentali installate in grotte con uno o più ingressi contribuiscono a completare il quadro degli scambi energetici che av-

vengono tra geosfera, idrosfera, atmosfera e criosfera. Tra queste ricordiamo quelle del primo tunnel alpino realizzato nel XV secolo a 2900 m di quota vicino al Monviso ("Pertus du Viso" o "Buco di Viso") in Valle Po e la grotta turistica di Bossea in Val Corsaglia, che ospita da oltre 50 anni anche un importante laboratorio carsologico del CAI, recentemente implementato con il progetto Paleo Lab del Politecnico di Torino a cui collaborano Arpa Piemonte e INRIM (Istituto Nazionale per la Ricerca Metrologica).



Fig. 11 - Stalagmiti di ghiaccio nella grotta Balma ghiacciata del Mondolè, giugno 2022.

## Bibliografia

- Borsato A., Miorandi R. & Flora O. (2006) - I depositi di ghiaccio ipogei della Grotta dello Specchio e del Castelletto di Mezzo (Dolomiti di Brenta, Trentino): morfologia, età ed evoluzione recente, *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.* 81 (2004); p. 53-74.
- Brevini F. (2004) - Rocce, Mondadori; pp.252
- Boscart J. (2008) - Italie: Gouffre Scarasson, *Spéléo Magazine*, 64: 18-23.
- Callaris V. (2019) - Il ghiacciaio sotterraneo di Scarasson: la brina e la rugiada, *Speleologia*, 80: 51-55.
- Colucci R.R., Fontana D., Forte E., Potleca M. & Guglielmin M. (2016a) - Response of ice caves to weather extremes in the Southeastern Alps, Europe, *Geomorphology* 261; p. 1-11.
- Colucci R.R., Boccali C., Žebre M. and Guglielmin M. (2016b) - Rock glaciers, protalus ramparts and pronival ramparts in the south-eastern Alps, *Geomorphology* 269; p. 112-121.
- Ferrario A. & Tognini A. (Eds.) (2016) - *Catasto Speleologico Lombardo (Progetto Tu.Pa.Ca.)*, Federazione Speleologica Lombarda; pp. 448.
- Gruppo Speleologico Piemontese (2014) - *Il Biecai, Grotte* 161; p. 20-60.
- Ischia M. & Borsato A. (2005) - Depositi di ghiaccio nelle cavità delle Dolomiti di Brenta, In: *Atti XIII Conv. Reg. Spel. Trent.* - A. Adige, Villazzano, ottobre 2005.
- Maggi V., Colucci R.R., Scotto F., Giudice G. & Randazzo L. (2018) - Ice caves in Italy, chapter 19, in Perşoiu A. and Lauritzen S.-E. (eds.) - *Ice Caves*, Elsevier, ISBN: 978-0-12-811739-2; p. 399-423.
- Morel L., Maire R., Valla F., Decker J., Siffre M., Boscart J., Caillault S., Lamboglia C., Lamboglia J., Petit J. R. & Ogand M. (2017) - *Fonte du glacier souterrain de Scarasson (Marguareis, Italie)*. Suivi instrumenté de la température, de l'humidité et du recul, *Collection EDYTEM*, 19 ; p. 101-108.
- Perşoiu A. & Lauritzen S.-E. (eds.) (2018) - *Ice Caves*, Elsevier, ISBN: 978-0-12-811739-2; p. 729.
- Vigna B. & Paro L. (2019) - Ghiacciai ipogei e grotte con depositi di ghiaccio e neve, in Mercalli L. & Cat Berro D. (eds.) - *Ultimi ghiacci. Clima e ghiacciai nelle Alpi Marittime, Memorie dell'Atmosfera* 11, Edizioni Società Meteorologica Subalpina, ISBN 978-88-903023-9-8; p. 307-313.