

# IL MONDO FLUTTUANTE NEI

Nel decennio passato l'esplorazione speleologica si è avventurata in un campo trascurato, quello dei ghiacciai. Già dalla metà dell'800 era noto che sui grandi ghiacciai si formano torrenti che, dopo percorsi di poche centinaia di metri o, raramente chilometri, si gettano in pozzi formati nella massa del ghiaccio e riappaiono, riuniti in uno solo, alla fronte del ghiacciaio, rivelando l'esistenza, al di sotto del ghiaccio, di una struttura interna di drenaggio. A quel tempo quei buchi vennero considerate "grotte" ma le tecniche dell'epoca non ne permisero l'esplorazione.

Successivamente, alla metà degli anni '80, vari gruppi di speleologi iniziarono ad occuparsi di queste grotte. Sono state così esplorate grotte nei

ghiacciai di tutto il mondo e si è giunti a caratterizzare la fenomenologia generale del carsismo nei ghiacciai.

Questi processi sono resi ancora più importanti dalle attuali condizioni climatiche in cui le masse glaciali sono in evidente disequilibrio con l'ambiente.

La riduzione delle precipitazioni ha fatto sì che molti ghiacciai siano diventati quasi immobili ed il reticolo di drenaggio non è più una struttura di equilibrio che si rigenera risalendo verso monte alla velocità con cui il ghiacciaio va a valle.

La situazione di rischio sta nella possibilità che i depositi di acqua trattenuti dal ghiaccio a valle vengano liberati per il generale ritiro delle superfici glaciali rendendo instabile l'intera massa glaciale.

## INTRODUZIONE

La speleologia glaciale è andata formandosi in mezzo alla più totale indifferenza sia della glaciologia, che la vede come attività sportivo-estrema, sia della speleologia, che la sente come esercizio tecnico privo dello spessore che dà l'esplorazione di nuovi territori. Le ricerche condotte in questo ventennio mostrano invece che si tratta di

argomenti interessanti e, come sappiamo da poco, anche importanti; d'altra parte esse riguardano strutture localizzate in zone specifiche ma molto evidenti. Possibile che nessuno le avesse notate? Quando siamo andati a cercarne le citazioni fatte dai naturalisti che per primi avevano descritto i ghiacciai, abbiamo avuto l'enorme sorpresa di scoprire che essi avevano fatto molte

e accurate descrizioni dei fenomeni che riguardavano i pozzi glaciali. Ma quelle note sono state poi praticamente dimenticate per un secolo, dopo che le difficoltà tecniche li avevano fatti scivolare fuori dell'ambito delle cose interessanti. E, come si può vedere nelle citazioni di apertura dell'articolo, siamo giunti a ripetere indipendentemente le stesse riflessioni con le stesse parole.

*It is, in this respect, absolutely comparable to the water of a river, which has here its deep pools, here its constant eddy, continually changing in substance, yet ever the same in form.*

Forbes J., "Occasional Papers on the Theory of Glaciers", Adam and Charles Black, Edinburgh, 1859

# GHIACCIAI

*Ne derivava che esse sono strutture stabili come il gorgo in un fiume, fatto di acque sempre nuove: quando il ghiaccio arriva in quel punto assume la forma di una grotta, sempre più o meno quella.*

Badino G., "Il Carsismo Glaciale", Le Scienze, 372, 1999



## PRIME OSSERVAZIONI DI UN FENOMENO

Sui grandi ghiacciai si formano torrenti, in genere con portate dell'ordine del metro cubo al secondo che, dopo percorsi di poche centinaia di metri o, raramente, chilometri, si precipitano in rombanti pozzi formati nella massa di ghiaccio, per poi riapparire alla fronte; sotto i bianchi e regolari pianori c'è evidentemente una struttura interna di drenaggio.

Agli inizi della glaciologia, a metà '800, furono notati. Allora non si era ancora formato un distacco fra la speleologia e la glaciologia e dunque quei buchi vennero considerati "grotte" quanto quelle scavate nel calcare; salvo che

Pagina precedente:  
Patagonia, Argentina.  
Mulino fossile nel  
ghiacciaio Perito  
Moreno.

Sotto: Patagonia,  
Argentina. Galleria  
freatica fossile nel  
ghiacciaio Perito  
Moreno.



le tecniche dell'epoca non ne permettevano l'esplorazione e finirono per uscire dall'ambito di interesse degli speleologi.

I modellisti glaciali nei primi anni '70 tentarono di capire quel che poteva accadere all'interno. Le ricerche erano però indirizzate alle condizioni di formazione di condotte sul letto roccioso, una situazione di trasporto che è quasi certamente poco interessante se non nelle ultime decine di metri prima di uscire a giorno, là dove il ghiacciaio si fa sottile. In pratica il ghiaccio non era considerato una sostanza carsificabile nel suo insieme, ma solo sull'interfaccia rocciosa.

## LE ESPLORAZIONI DIRETTE

Alla metà degli anni '80 vari gruppi di speleologi iniziarono ad occuparsi di queste grotte. Quasi subito separammo il problema tettonico da quello dissolutivo: i crepacci e le grotte glaciali si escludono a vicenda, perché se un ghiacciaio è intensamente fratturato l'assorbimento d'acqua è diffuso, senza concentrazioni di energia che consentano lo scavo di grotte.

Scoprimmo che le cavità, in genere, si aprono con un pozzo sui 40-60 metri di profondità, creato dalle acque in caduta. Spesso al fondo di esso risulta impossibile avanzare perché il torrente si perde in fessure impraticabili. A volte, invece, il primo salto dà accesso ad una serie di ambienti imponenti, sorta di forre subglaciali lungo le quali il torrente procede a piccoli salti e brevi tratti orizzontali sino a perdersi in una pozza d'acqua da cui viene drenato per vie subacquee. Gli ambienti sono di dimensioni decrescenti, le pozze d'acqua conclusive si trovano nella maggior parte dei casi ad un centinaio di metri sotto la superficie, raramente

mente poco oltre.

Furono così esplorati ghiacciai in tutto il mondo da vari gruppi: canadesi e polacchi alle Svalbard, svizzeri sulle Alpi, francesi in Groenlandia, spagnoli in Islanda mentre gli italiani hanno realizzato una ricognizione generale con esplorazioni sulle Alpi e poi nel Tien Shan, nel Karakorum, in Islanda, in Antartide e soprattutto in Patagonia, giungendo a caratterizzare la fenomenologia generale del carsismo nei ghiacciai.

## CARATTERISTICHE DEL PROCESSO DI FORMAZIONE

Lo studio teorico dei processi di formazione del carsismo glaciale è stato prima condotto per via analitica e poi, per poter seguire l'evoluzione dei reticoli coi cicli stagionali, con una serie di modelli numerici.

Una prima, inusuale, caratteristica importante per la morfologia della struttura del reticolo di drenaggio è quella del comportamento plastico del ghiaccio, che a bassa pressione si comporta quasi come una roccia, ad alta pressione quasi come un liquido.

Una cavità a pochi metri di profondità ha una durata molto superiore al tempo di evoluzione locale del ghiaccio e dunque nel suo sviluppo la plasticità ha poca importanza: è come se fosse scavata nella roccia, e rimane stabile anche per anni, se il fluire a valle del ghiaccio lo permette.

Una cavità a 50 metri di profondità ha invece una vita media dell'ordine di una stagione, e dunque quella è la profondità massima alla quale possono sopravvivere strutture legate a cicli stagionali. A profondità maggiori i tempi di collasso sono più brevi e dunque si tratta di strutture che si formano e durano finché gli agenti che le scavano sono atti-

vi, per poi collassare e sparire "rapidamente" all'interno della massa di ghiaccio fluido.

Le strutture di drenaggio nelle parti più epidermiche, ove la plasticità è trascurabile, sono dunque piuttosto semplici: i ruscelli si formano ed ingrossano nelle zone più depresse del ghiacciaio e poi entrano nel ghiaccio in punti ove il loro flusso concentrato di energia diventa superiore al minimo per perforare la superficie: si forma un "mulino glaciale".

Al suo interno l'energia potenziale dell'acqua in caduta è rilasciata all'aria e nei punti dove essa batte e quindi il sistema si sviluppa in modo proporzionale all'energia rilasciata dalla cascata.

Nelle prime parti, sino ad una cinquantina di metri di profondità, essa non viene contrastata dal collasso plastico e quindi le cavità si ampliano lungo tutta la stagione. E' solo alla fine della stagione calda che le pareti cominciano a collassare sulla cavità, prevalentemente alle profondità maggiori, dove le sezioni dei pozzi vengono sensibilmente ristrette durante l'inverno.

A profondità maggiori la plasticità del ghiaccio prevale ed esso tende a crollare sulla cavità che così viene ad assumere caratteristiche forme sempre più ristrette, a canyon.

Questo semplice modello pare giustificare la grande maggioranza delle forme interne dei mulini glaciali.

Ma sin dalle prime esplorazioni ci apparve chiaro che queste grotte non erano che un frammento della struttura interna del ghiacciaio. Esse avevano un andamento verticale e dovevano essere tributarie del sistema di drenaggio principale che stava al di sotto dei piccoli specchi d'acqua in cui si precipitavano i torrenti in fondo alle grotte.

In pratica, a differenza di quanto aveva sino ad allora ipotizzato la glaciologia, i torrenti non arrivavano sino al letto roccioso, ma finivano in "acquiferi" posti sul limite del "comportamento plastico" del ghiaccio.

## IL RETICOLO SOMMERSO

Il calcolo numerico è stato sinora l'unico strumento per chiarire i processi che avvengono nel reticolo di drenaggio sommerso.

In condizioni sommerse, lo scavo carsico avviene per rilascio di energia potenziale nella caduta fra i punti a monte e a valle del reticolo di trasporto. Assume un ruolo chiave la perdita di carico lungo le condotte e questo rende difficile il calcolo perché si tratta di un parametro che dipende molto dalla loro forma, condizioni di trasporto e così via. La vita delle condotte si allunga grazie alla pressione dell'acqua.

Le condotte a pieno carico subglaciali sono dunque strutture di equilibrio fra lo scavo dovuto alla perdita di carico dell'acqua in

transito e il riempimento dovuto al ghiaccio che tende ad implodere sulla condotta.

Le dimensioni dipendono dunque dalla pressione del ghiaccio sulle pareti e dalla pendenza e forma della galleria: ad esempio una galleria percorsa da 1000 kg/s d'acqua, a cento metri di profondità, diventa stabile con un diametro di 0.9 m, e l'acqua vi corre a quasi 1.5 m/s, mentre se il flusso è di 100 kg/s il diametro di equilibrio diviene 35 cm e l'acqua vi corre ad un metro al secondo.

Le gallerie sono di diametro uniforme, perché un qualunque restringimento crea un aumento di impedenza e una concentrazione del rilascio locale di energia sino a che la disuniformità viene rimossa.

Quando il flusso d'acqua si ferma, ad esempio durante notti fredde, la galleria si stringe lentamente e aumenta di impedenza. Alla ripresa del flusso il rilascio di energia sarà perciò maggiore e lo scavo avverrà più rapidamente sino a ripristinare le condizioni

Patagonia, Argentina.  
Il ghiacciaio Viedma.





Sopra: Patagonia, Argentina. Colorazione idrogeologica in una galleria attiva nel ghiacciaio Perito Moreno.

Pagina a fianco: Patagonia, Chile. Mulino attivo nel ghiacciaio Tyndall. Il livello dell'acqua nei pozzi varia in dipendenza del flusso d'acqua di alimentazione. Il livello varia da -10 sino a -105. La curva di carico e scarico ha permesso per la prima volta di determinare in modo indiretto che la profondità del drenaggio è a -140 sotto la superficie, proprio dove era atteso dai modelli numerici di carsismo glaciale, e contrariamente a quanto in genere ipotizzato dalla glaciologia, che assume il drenaggio sul letto roccioso.

precedenti. In modo analogo, un temporaneo aumento del flusso dilata la condotta al di sopra della sezione di equilibrio alla quale però ritornerà appena si ridurrà il flusso.

Va dunque notato un fatto di importanza fondamentale: il processo è a retroazione negativa, cioè autostabilizzante.

La novità principale nei confronti dei reticoli di drenaggio nelle montagne calcaree riguarda però la struttura complessiva della rete di condotte di drenaggio, ed è dovuta al fatto che la temperatura di equilibrio fra acqua e ghiaccio dipende dalla pressione. Essa è 0°C a pressione atmosferica, ma diminuisce di 7.5 mK per ogni aumento di pressione di una atmosfera.

Questo effetto ha un ruolo fondamentale, perché in eventuali tratti ascendenti l'acqua si muove verso pressioni minori, e risulta fredda rispetto al ghiaccio e quindi solidifica sulle pareti. Il processo dunque evolve nel senso di allargamento delle parti discendenti e chiusura delle parti ascendenti; le sorgenti di tipo "valchiusano" non possono esistere nel ghiaccio.

Il fenomeno ha un effetto rilevante anche sulle singole condotte, perché l'acqua che vi scorre quando va in basso scava, quando tocca il soffitto deposita. Il risultato è che la galleria migra lentamente verso il basso e che perciò il reticolo tende ad "appiattirsi" sulla superficie locale dell'acquifero.

### **STABILITÀ' STAGIONALE**

E' interessante anche la stabilità del reticolo sul lungo periodo. Abbiamo visto come rapide variazioni del flusso comportino piccole fluttuazioni attorno alla struttura di equilibrio, e infatti sia il calcolo che le osservazioni dirette mostrano che i cicli diurni non causano variazioni significative.

La situazione cambia invece molto quando la variazione ha durata tipica maggiore di quella del collasso delle gallerie, situazione che si ha all'arrivo della stagione fredda. I flussi profondi si arrestano e le condotte iniziano lentamente a crollare su sé stesse, contrastate solo dalla pressione idrostatica della falda acquifera che viene spinta verso l'alto. In

inverno il reticolo glaciale viene riempito d'acqua sin nei pressi della superficie.

In primavera il reticolo c'è ancora, anche se più a valle e più in pressione di qualche mese prima. Il flusso d'acqua esterno riprende con modalità analoghe all'anno precedente, e va scavando pozzi praticamente negli stessi punti ove si erano formati l'anno prima.

Infatti la presenza di un pozzo glaciale riduce gli sforzi all'interno del ghiaccio circostante, che viene a tendere a "cadere" verso di esso. Accade dunque che nel torrente di alimentazione, a monte del pozzo, il ghiaccio sia maggiormente penetrabile dall'acqua che inizia a formare piccole perdite nel letto di scorrimento che arrivano nel pozzo, ma lungo vie sotterranee. Man mano che l'acqua circola amplia il percorso sino a che quella che era un'infiltrazione diventa un nuovo pozzo.

Le parti più a valle del reticolo vengono trascinate verso la fronte glaciale e macinate, mentre a monte, nelle profondità dei "nuovi" mulini glaciali, se ne riformano di nuove.

Anche il reticolo profondo risulta così essere una struttura che oscilla stagionalmente attorno ad una configurazione di equilibrio, e in pratica migra verso monte alla velocità con la quale il ghiaccio va a valle.

Questo processo di replica del reticolo un po' a monte avviene annualmente in condizioni normali, ma può non avvenire più in ghiacciai ormai fermi o ripetersi più volte per stagione in condizioni di fusione molto intensa su ghiacciai veloci, come avviene in Patagonia; e anzi, questo ripetersi con periodo minore dell'anno potrebbe essere una buona definizione di "ipercarsismo glaciale".

## DEPOSITI D'ACQUA

L'aspetto più rilevante per un utilizzo pratico degli studi di carsismo glaciale è lo studio dei depositi d'acqua subglaciali.

E' infatti ben noto che periodicamente dai ghiacciai fuoriescono improvvisamente enormi quantità d'acqua che si erano venute accumulando all'interno.

Le situazioni di rischio vanno crescendo proprio perché la generale fase di ritiro dei ghiacciai è destinata a liberare le tasche d'acqua esistenti. I depositi d'acqua interni tendono ad approfondirsi nella massa glaciale, ampliandosi. Questo è dovuto a tre fattori, che è interessante descrivere brevemente. Il primo è che l'acqua pura ha la sua massima densità a 4 °C e quindi quando essa viene scaldata dal contatto con l'esterno affonda e va a fondere ghiaccio nelle profondità. Un bacino esposto al sole trasferisce l'energia assorbita alle sue profondità, nascostamente. Il secondo fattore è che le turbolenze che vi possono essere innestate causano, per il già citato processo legato alla diminuzione con la pressione della temperatura di equilibrio acqua-ghiaccio, scavo alla base e deposizione di ghiaccio alla sommità del bacino. Il terzo e ultimo motivo di ampliamento è che la densità dell'acqua è maggiore di quella del ghiaccio e che quindi alla base del serbatoio la pressione tende ad allontanare il ghiaccio: un deposito d'acqua ha tendenza ad "affondare" nel ghiacciaio. Questo però è un processo che ha importanza solo per bacini molto profondi o per tempi molto lunghi. In pratica, vasti depositi d'acqua sono instabili e tendono ad ampliarsi per questi processi che innescano retroazioni di tipo positivo. Catastrofiche, sia nel senso matematico che in quello letterale.

## CAMBIAMENTI CLIMATICI E CONCLUSIONI

La situazione attuale in cui le masse glaciali sono in evidente disequilibrio con l'ambiente, ha reso questi processi ancora più critici.

La riduzione dell'alimentazione ha fatto sì che molti ghiacciai abbiano rallentato la corsa sino a quasi diventare immobili. In queste condizioni il reticolo di drenaggio non è più una struttura di equilibrio che si rigenera incessantemente, risalendo verso monte alla velocità con cui il ghiacciaio cala a valle. Ora sulle Alpi ritroviamo le grotte da un anno all'altro, non nel senso della loro forma esterna, come gorgi, ma proprio loro, con il ghiaccio che avevamo martellato l'anno prima.

All'interno delle grotte le pareti accumulano tensioni immense, che ne fanno esplodere ampie sezioni ad ogni infissione di attrezzi.

La cosa più minacciosa è però il fatto che è possibile che venga superato il sottile limite fra reticolo di drenaggio, autostabilizzante per retroazione negativa, e quello di depositi di acqua che tendono a "divergere" per retroazione positiva. E che quindi il reticolo delle gallerie, troppo invecchiato, diventi un semplice deposito d'acqua destinato a rendere instabile l'intera massa glaciale.

Una sorta di "aneurismi" del ghiacciaio.

La speleologia glaciale è nata molto recentemente da una costola della speleologia sportiva e per puro interesse estetico, ma molti indizi ci fanno sospettare che, in futuro, la nostra capacità di entrare nel mondo fluttuante che celano le bianche superfici dei ghiacciai guadagnerà molto interesse.



[www.laventa.it](http://www.laventa.it) - [www.laventa.it/it/patagonia](http://www.laventa.it/it/patagonia)

**LA VENTA**  
EXPLORING TEAM

Il team **La Venta** è un gruppo di ricerca multidisciplinare che elabora, organizza e gestisce progetti esplorativi in ambito geografico, con particolare interesse verso i mondi sotterranei, ambientati su aree del pianeta remote e di difficile accesso. La divulgazione ai vari livelli è il complemento indispensabile di ogni esplorazione, perché contribuisce in modo concreto alla conservazione delle aree in cui si opera e alla sensibilizzazione delle popolazioni che vi gravitano. La Venta dedica particolare attenzione a questo aspetto e alla qualità della documentazione: ciò ha consentito pubblicazioni sulle maggiori riviste mondiali e una forte presenza televisiva, in Italia e all'estero.

**Soci fondatori:** Italo Giulivo, Giovanni Badino, Tullio Bernabei, Gaetano Boldrini, Antonio De Vivo, Ugo Vacca, Marco Topani.