

## *Approfondimenti*



## **I carsismo nei ghiacciai**

*Giovanni Badino*

- Contenuto:** Descrizione dei fenomeni pseudocarsici da fusione che interessano i ghiacciai e analogie con il carsismo classico.
- Content:** Description of the pseudocarstic phenomena that occur on glacier and analogies with the classical karst.
- Key-words:** ghiacciai, pseudocarsismo, cavita endoglacviali, glaciers, pseudokarst, englacial caves.
- Year:** 2000
- Reference:** inedito

## IL CARISMO NEI GHIACCIAI

GIOVANNI BADINO

Dipartimento di Fisica Generale dell'Università di Torino - Associazione Culturale La Venta

### Riassunto

Nel decennio passato le tecniche della speleologia hanno permesso l'esplorazione sistematica delle grotte nei ghiacciai, attraverso le quali avviene il drenaggio dell'acqua endoglaciale. Qui viene fatta una rassegna dei processi fisici che portano alla formazione delle grotte glaciali e una sui ghiacciai visitati. Il carsismo glaciale viene correlato al clima locale sia tramite la valutazione della temperatura media annuale, sia con una tecnica di "gradi positivi". Questi studi hanno delineato la forma dei reticoli interni dei ghiacciai e permetteranno la valutazioni di situazioni di rischio connesse con la liberazione improvvisa di depositi d'acqua interni al ghiacciaio.

### Introduzione

Nel decennio passato l'esplorazione speleologica si è avventurata in un campo trascurato, quello dell'interno dei ghiacciai.

L'evidenza principale, ben nota da secoli, è che sui grandi ghiacciai temperati si formano torrenti, in genere con portate d'acqua 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, i cosiddetti mulini glaciali. I torrenti così spariti riappaiono riuniti in uno solo, alla fronte del ghiacciaio, in genere al contatto fra il letto morenico e il ghiaccio. Sotto i bianchi e regolari pianori c'è evidentemente una struttura interna di drenaggio.

Sin dagli inizi della glaciologia ci si interessò dei rumorosi pozzi in cui si precipitavano i torrenti. A quel tempo, siamo alla fine dell'800, 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 le tecniche dell'epoca non ne permettevano l'esplorazione e finirono per uscire dall'ambito di interesse degli speleologi.

I modellisti glaciali (lo svizzero Röthlisberger e, in modo indipendente, il californiano Shreve) nei primi anni '70 tentarono di modellare quel che poteva accadere all'interno. Di massima però le ricerche erano 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. Il motivo di questa limitazione è ovvio: all'epoca la verifica sul campo era impossibile e le strutture che si vedevano alla bocca dei ghiacciai erano sempre di interfaccia ghiaccio-roccia. E, d'altra parte le ridotte possibilità di calcolo numerico dell'epoca rendevano difficile l'analisi a calcolatore.

### Le esplorazioni dirette

Alla metà degli anni '80 alcuni gruppi di speleologi, in giro modo indipendente, iniziano ad occuparsi di queste grotte. Quasi subito viene separato il problema tettonico (cavità formate da rotture meccaniche) da quello dissolutivo: i crepacci e le grotte glaciali si escludono a vicenda, perché se un ghiacciaio è intensamente fratturato l'assorbimento d'acqua vi avviene in modo diffuso, senza concentrazioni di energia che consentano all'acqua di scavarvi grotte.

I ghiacciai interessati al carsismo sono dunque sub-pianeggianti e temperati.

Le esplorazioni dirette, sempre molto complicate, portano a caratterizzare il fenomeno nel suo complesso, almeno nelle parti più epidermiche: le cavità, in genere, si aprono con un pozzo sui 40-60 metri di profondità, creato dalle acque in caduta in queste parti superficiali del ghiacciaio. 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 sub-glaciali 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 in genere di

dimensioni decrescenti, le pozze d'acqua conclusive si trovano nella maggior parte dei casi ad un centinaio di metri sotto la superficie, raramente poco oltre.

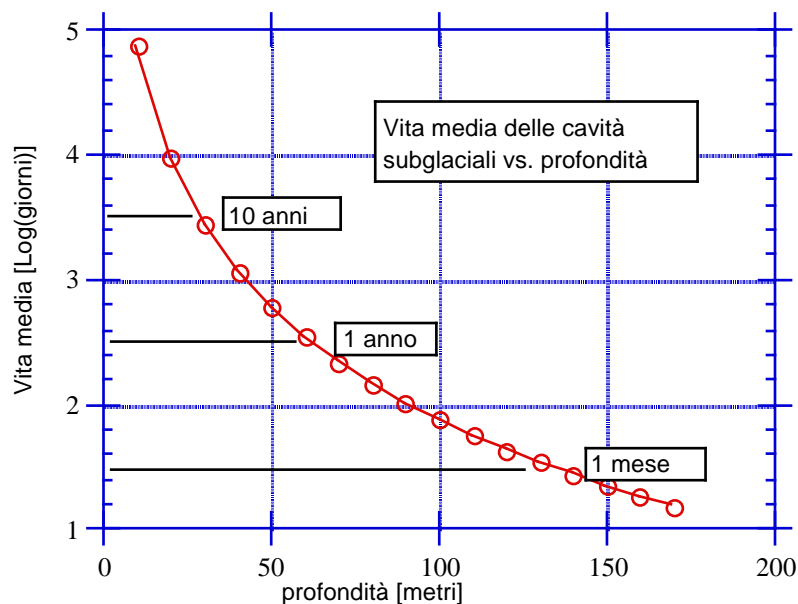
Sono stati così esplorati ghiacciai in tutto il mondo dai vari gruppi: canadesi e polacchi alle Svalbard, svizzeri sulle Alpi, francesi in Groenlandia, spagnoli in Islanda mentre gli italiani hanno realizzato un survey generale con esplorazioni sulle Alpi e poi nel Tien Shan, nel Karakorum, in Islanda,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

### Caratteristiche del processo di formazione

Presso il Dipartimento di Fisica Generale dell'Università di Torino è stato sviluppato il modellamento teorico di questi fenomeni, derivandolo dall'approccio analitico della microclimatologia ipogea. Lo studio è stato prima condotto per via analitica e poi, per poter seguire l'evoluzione dei reticoli inserendovi anche le periodicità stagionali, con una serie di modelli numerici sviluppati che ci hanno permesso di chiarire la fenomenologia complessiva del trasporto delle acque interne.

Una prima, inusuale, caratteristica importante per la morfologia del reticolo di drenaggio è il comportamento plastico del ghiaccio, che a bassa pressione (<0.1 Mpa) si comporta quasi come una roccia, ad alta pressione (>1 Mpa) quasi come un liquido.

Da questo deriva che una cavità (grotta o crepaccio) a pochi metri di profondità ha un 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.

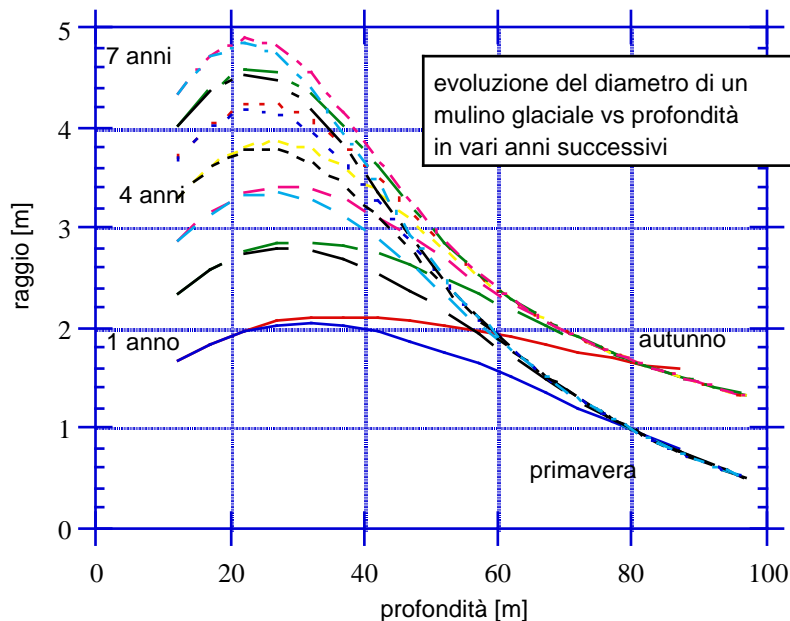


Una cavità a 50 metri di profondità ha invece una vita media dell'ordine di una stagione, e dunque quella è la profondità massima alla quale possono sopravvivere strutture legate a cicli stagionali. A profondità maggiori i tempi di collasso sono più brevi e dunque si tratta di strutture che si formano e durano sinché gli agenti che le scavano sono attivi, per poi collassare e sparire "rapidamente" all'interno della massa di ghiaccio fluido.

Il grafico lo illustra.

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 punto di assorbimento, un "mulino glaciale".

Al suo interno l'energia potenziale dell'acqua in caduta viene rilasciata all'aria e nei punti dove essa batte. Trattandosi di un sistema a pressione atmosferica e in condizioni rigorosamente isoterme il sistema si sviluppa in modo proporzionale all'energia rilasciata in caduta dalle cascate. 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, in modo proporzionale al flusso d'acqua che vi cade. E' solo alla fine della stagione calda che le pareti cominciano a crollare sulla cavità, prevalentemente alle profondità maggiori, dove le sezioni dei pozzi vengono sensibilmente ristrette durante l'inverno. Il grafico illustra l'evoluzione del diametro di un mulino glaciale, alle varie profondità, negli anni, ottenuto tramite calcolo numerico. In questo caso il flusso d'acqua ipotizzato durante la stagione calda è di 50 kg/s.



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.

Sin dalle prime esplorazioni, però, ci apparve chiaro che le strutture in cui avanzavamo fra mille difficoltà non potevano essere che un frammento ben piccolo della struttura interna del ghiacciaio. Le grotte avevano sempre un andamento prevalentemente verticale e dunque esse dovevano essere semplici tributarie del sistema di drenaggio principale che doveva essere 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 andavano a caricare più falde freatiche poste sul limite del "comportamento plastico" del ghiaccio.

Lo scorrimento principale, cioè, non avveniva sul letto del ghiacciaio ma in prossimità della sommità delle falde interne, a 50-150 metri sotto la superficie.

### Il reticolo sommerso

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

In condizioni sommerse i tempi di collasso delle cavità all'interno delle falde acquifere si riducono grazie al contrasto della pressione dell'acqua. Come nel caso delle parti epidermiche, lo scavo carsico avviene per rilascio di energia potenziale nella caduta fra i punti a monte e a valle del reticolo di trasporto. Assume dunque un ruolo chiave la perdita di carico lungo le condotte e questo rende il modellamento molto delicato perché si tratta di un parametro che dipende criticamente dalla loro forma, condizioni di trasporto e così via.

Le condotte a pieno carico sub-glaciali sono 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. Il calcolo deve essere applicato a casi reali, ma diremo che il diametro al quale diventa stabile una galleria percorsa da 1000 kg/s d'acqua, a cento metri di profondità, è circa 0.9 m, e l'acqua vi corre a quasi 1.5 m/s. Se il flusso è di soli 100 kg/s il diametro di equilibrio diviene 35 cm e l'acqua vi corre ad un metro al secondo.

Si tratta di dimensioni coerenti coi frammenti di condotte che, in rari casi, abbiamo potuto osservare direttamente.

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

Inoltre il processo è a retroazione negativa, cioè autostabilizzante: 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 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.

La novità principale mostrata dai nostri lavori riguarda però la struttura complessiva della rete di condotte di drenaggio, strettamente legata al fatto che il processo di scavo non è più né isobaro né isoterma, dato che la temperatura di equilibrio fra acqua e ghiaccio dipende dalla pressione.

Essa è 0°C (273.15 K) a pressione atmosferica, ma diminuisce di 7.5 mK per ogni incremento di una atmosfera: questo effetto ha un ruolo fondamentale, perché in eventuali tratti ascendenti l'acqua si muove verso pressioni minori, risulta troppo fredda rispetto al ghiaccio circostante e quindi solidifica sulle pareti. Il processo dunque evolve nel senso di allargamento delle parti discendenti e chiusura (e aumento dell'impedenza) delle parti ascendenti delle gallerie.

E' dunque fortemente contrastata la formazione di tratti ascendenti del reticolo e questo, in pratica, vincola l'acqua a crearsi un reticolo di drenaggio "appiattito" sul livello di falda.

La dipendenza fra la pressione e la temperatura di equilibrio fra le due fasi ha un effetto rilevante anche sulle singole condotte di drenaggio. L'acqua vi scorre in modo turbolento e dunque passa dal pavimento al soffitto: ma in basso la sua pressione è maggiore e perciò non è in equilibrio con il ghiaccio e perciò liquefa ghiaccio per ridepositarlo sul soffitto quando vi arriva: il risultato è che la galleria migra lentamente verso il basso. Questo è l'altro motivo che "appiattisce" il reticolo di drenaggio sul livello dell'acquifero: le gallerie infatti non possono migrare troppo in profondità perché se i tratti in uscita sarebbero in risalita e dunque le acque tenderebbero a depositare e a chiuderle.

### **Stabilità stagionale**

Passiamo a discutere 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, perciò, 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, dato che essi sono legati alla struttura tensiva del ghiacciaio che è a sua volta determinata dalle condizioni di vincolo della roccia, che variano di ben poco da una stagione all'altra. 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. E' curioso notare la glaciologia si accorse di questo processo un'ottantina di anni fa, sul ghiacciaio del Lys.

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 verso valle.

### Formazione di tasche d'acqua

Sin da tempi remoti si sa che i ghiacciai hanno la pericolosa tendenza a liberare improvvise e imponenti masse d'acqua che si erano evidentemente formate nelle loro profondità.

La nostra attività ne ha permesso l'esplorazione diretta subacquea di alcune, soprattutto in Patagonia, ma anche sul Gorner.

I processi fisici che permettono la formazione e l'ampliamento delle tasche d'acqua sono tre.

Il primo è un processo già citato: in un serbatoio d'acqua le acque in caduta incontrano pressioni via via maggiori e dunque si vengono a trovare troppo calde rispetto al ghiaccio circostante: l'entalpia eccedente viene impiegata a liquefare altro ghiaccio. Questo processo, in un sistema termicamente isolato, fa migrare verso il basso la cavità dato che le acque in salita depositano ghiaccio, ma se il sistema, come quasi sempre avviene, non è isolato ma connesso energeticamente all'esterno o tramite una grotta o direttamente dall'aria aperta, la cavità può allungarsi verso il basso senza staccarsi dalla superficie.

Il secondo processo è quello dovuto al fatto che l'acqua è più densa del ghiaccio e quindi esercita sul fondo una spinta, tanto maggiore quanto più essa è alta, che tende a far scorrere il ghiaccio verso l'alto e ad affondare la cavità.

Il terzo processo avviene solo se c'è una qualche forma di riscaldamento diretto della superficie dell'acqua nella cavità, ed è legato al fatto che la densità massima dell'acqua pura si ha a 4.0°C: l'acqua scaldata è più densa di quella circostante, circa a 0°C, e dunque affonda andando a portare eccedenze di entalpia nelle parti profonde.

Questi processi sono i responsabili delle particolari forme di scavo che abbiamo osservato nelle cavità glaciali piene d'acqua.

Si tratta di processi che evolvono a velocità proporzionali alle loro dimensioni: tanto maggiore è la cavità, tanto più rapido il suo ampliamento. Viene da chiedersi come mai i ghiacciai non si trasformino in una distesa di grandi cavità piene d'acqua, visto che si tratta di processi a retroazione positiva. La risposta è duplice: da una parte, in effetti, certi ghiacciai probabilmente si riempiono proprio di acqua sul letto tanto che ad un certo punto scorrono via quasi d'improvviso... E' il cosiddetto fenomeno dei surge. Dall'altra occorre ricordare che il ghiacciaio scorre e dunque bisogna confrontare il tempo tipico di sviluppo della cavità con il suo tempo di permanenza nella zona in cui ci sono le condizioni favorevoli all'ampliamento. In pratica, prima che la cavità possa assumere dimensioni davvero grandi essa viene trascinata via e va in frantumi.

Grandi tasche d'acqua sono dunque possibili o su ghiacciai molto uniformi, dove le condizioni di ampliamento permangono lungo la traiettoria verso valle della cavità, come avviene nei ghiacciai patagonici (Tyndall) o se un ghiacciaio si è quasi fermato, come probabilmente sta avvenendo in diversi ghiacciai alpini, quali il Gorner.

### Condizioni generali di formazione

I quindici anni di attività di ricerca hanno permesso di caratterizzare le condizioni di formazione del carsismo glaciale e, d'altra parte, di notare come accanto a forme assiduamente ripetute ce ne siano di inusuali.

Vediamo dunque di caratterizzare in modo estremamente sommario quanto abbiamo osservato sul campo per correlarlo poi con le condizioni meteorologiche, rimandando ad altra pubblicazione un'analisi più dettagliata delle caratteristiche morfologiche dei singoli carsismi glaciali.

I primi ghiacciai che abbiamo indagato con un punto di vista speleologico sono stati quelli europei. Mer de Glace, massiccio del Monte Bianco (Francia). Il fenomeno carsico è limitato al suo celebre inghiottitoio e a *bediere* di alimentazione.

Ghiacciaio del Miage, massiccio del Monte Bianco (Italia). Il fenomeno carsico occupa una regione ristretta al centro della lingua, ma con alcuni mulini di una certa entità.

Gornergletscher, massiccio del Monte Rosa (Svizzera). Si tratta del ghiacciaio alpino con il fenomeno carsico più sviluppato, quasi certamente a causa della sua pendenza ridotta in modo anomalo. Vi si aprono fra venti e trenta mulini, alcuni di dimensioni veramente notevoli, ed un reticolo epiglaciale molto sviluppato. La zona carsica è concentrata in corrispondenza del lago su cui galleggia la massa glaciale: crediamo sia questo letto fluido che dà al ghiacciaio del Gorner una pendenza ridotta e dunque condizioni di drenaggio che si possono trovare solo su ghiacciai ben più vasti.

Hansbreen, zona meridionale dell'isola Spitsbergen (Norvegia). Il fenomeno carsico è abbastanza diffuso con anche qualche mulino imponente nella parte terminale ma, in confronto alla vastità del ghiacciaio, abbastanza ridotto.

Skeidararjokull e Kviarjokull, lingue di drenaggio del Ghiacciaio Vatna (Islanda). Fenomeni carsici diffusi, intensi ma, per quel che abbiamo visto, abbastanza poco imponenti, forse perché le condizioni strutturali non favoriscono la formazione di grossi ruscellamenti di alimentazione.

In Asia abbiamo visitato tre ghiacciai.

Biafo catena del Karakorum, (Pakistan). E' stato il primo esplorato speleologicamente fuori Europa, probabilmente in assoluto. Presenta fenomeno carsico intenso e profondo su tutta la lunghissima parte in ablazione. Le *bediere* e le grotte si formano, ad intervalli regolari, ai lati delle morene centrali, probabilmente in corrispondenza di avvallamenti dovuti a scorrimenti differenziali delle lingue. Nelle parti inferiore due *bediere* assumono dimensioni imponenti e si inoltrano in portali sub-orizzontali non esplorati. Si è trattata della prima evidenza di reticoli sub-epidermici di drenaggio.

Batura glacier, catena del Karakorum, (Pakistan). Si tratta di una lingua molto più limitata della precedente ma in cui il fenomeno carsico è ben sviluppato ed interessante: ci sono numerosi mulini di piccole dimensioni, qua e là, pochi imponenti in posizioni speciali, grotte di risorgenza, tracce di condotte epidermiche.

Enilchek lednik, Tien Shan (Kirgizistan). Si tratta di un ghiacciaio molto lungo ma coperto di detrito, caratterizzato da una piena annuale che si ha quando il lago Metz baker, 14 km a monte della fronte, si svuota attraverso il ghiacciaio. Abbiamo potuto visitare solo la parte vicina al lago ove ci sono imponenti cavità di distensione e forme carsiche diffuse.

Nell'America meridionale di siamo concentrati in modo quasi esclusivo su lingue di drenaggio dello Hielo Continental Sur, che con oltre 22000 kmq di superficie è la più vasta massa glaciale fuori dei poli.

Glaciar Marconi, Patagonia, (Argentina). Si tratta di un piccolo ghiacciaio a nord del Fitz Roy, di avvicinamento molto semplice. Il carsismo è notevole se confrontato con le limitate dimensioni della lingua, concentrato nella sua parte di altopiano, attorno ad un piccolo lago epiglaciale.

Glaciar Perito Moreno, Patagonia, (Argentina). Ghiacciaio non imponente ma le cui forme e intensità di carsismo ci hanno mostrato per la prima volta quel che possiamo definire ipercarsismo glaciale. C'è un drenaggio principale (Rio Malbec) che genera più volte in una sola stagione una enorme cavità là dove va ad incontrare zone fratturate per l'incipiente distensione della fronte. Parallelo ad esso c'è un altro prevalentemente in condotte appena sub-glaciale: la grotta Perito Meccanico è stata esplorata in piccola parte ma riesce lo stesso ad essere la più lunga del mondo coi suoi 1150 m di sviluppo.

Glaciar Viedma, Patagonia, (Argentina). E' probabilmente il più promettente ghiacciaio carsico del mondo, ma la sua esplorazione presenta difficoltà logistiche tremende. Le aree di carsismo sono diffuse ed inframezzate da aree di crepacci in ablazione: i fenomeni carsici sono intensissimi, anche se meno di quanto avviene nel Perito Moreno. Al centro vi è una gigantesca *bediere* che non è stata esplorata sino al termine.

Ventisquero Tyndall, Patagonia, (Cile). Altro ghiacciaio classificabile come ipercarsico, anche se con assorbimenti non diffusi ma concentrati nelle zone laterali e soprattutto nella parte terminale della lingua dove le tre *bediere* che lo percorrono in parallelo penetrano sotto. Rimandiamo ad articoli specifici l'analisi dei particolari comportamenti di questi assorbimenti.

Tabella 1	Caratteristiche di alcune zone carsiche glaciali					
	Lat. [°]	Long. [°]	Dir. [°]	Slope [m/km]	Alt. Min. [m slm]	Alt. Max. [m slm]
<b>EUROPA</b>						
<b>mer de glace</b>	45.7 N	5 W	340	100	2050	2200
<b>gorner</b>	46 N	7.5 W	270	40	2400	2550
<b>miage</b>	45.8 N	5 W	140	70	2100	2300
<b>hansbreen</b>	77 N	16 W	180	30	100	250
<b>skeidarar</b>	64 N	18 W	180	40	100	500
<b>kviar</b>	64 N	18 W	100	70	50	150
<b>ASIA</b>						
<b>biafo</b>	35.7 N	76 W	100	25	3300	3700
<b>batura</b>	36.3 N	75 W	110	30	3100	3600
<b>enilchek</b>	42 N	80 W	270	35	3350	3550
<b>S. AMERICA</b>						
<b>marinelli</b>	54.5 S	69 E	0		100	500
<b>viedma</b>	49.5 S	73 E	130	30	800	1100
<b>moreno</b>	50.5 S	73 E	70	40	350	600
<b>tyndall</b>	51.2 S	74 E	170	30	300	600
<b>marconi</b>	49 S	73 E	30	80	1000	1200
<b>ANTARCTICA</b>						
<b>collins</b>	62 S	59 E	90	180	0	80

Ventisquero Marinelli, Tierra del Fuego (Chile). E' un drenaggio glaciale sulle falde settentrionali della Sierra Darwin che è stato oggetto solo di una ricognizione aerea. Il carsismo vi appare sviluppato nella parte terminale ma la zona di ablazione pare iniziare a quote abbastanza basse. In Antartide abbiamo potuto visitare solo una zona ristrettissima su un solo ghiacciaio: altre cavità che abbiamo trovato altrove nel continente non vengono qui riportate perché hanno genesi totalmente diversa.

Collins Glacier, King George (South Shetland). La formazione delle cavità, di dimensioni comunque molto contenute, è limitata alle zone laterali dei drenaggi glaciali che scendono dalla calotta ed entrano in mare. Le zone di ablazione sono piccole e poco potenti (sino a 100 m slm) dato che la massima parte della rimozione del ghiaccio avviene tramite *calving* in mare.

La tabella riassume alcune caratteristiche generali del fenomeno glaciale che abbiamo descritto: posizione geografica, direzione e pendenza, limiti altimetrici (molto approssimativi) delle aree di carsismo profondo.

### Generazione del carsismo glaciale: la temperatura

Passiamo ora a determinare le condizioni meteorologiche che permettono l'esistenza del carsismo profondo glaciale. Va da sé che le grotte glaciali per formarsi hanno bisogno di ghiacciai ed essi non possono esistere in zone dove la temperatura media annuale è molto maggiore di 0°C. D'altra parte per esistere hanno anche bisogno di ruscellamenti e dunque non possono formarsi in zone dove la temperatura media annuale sia molto inferiore a questo valore: questo nell'insieme, ma possiamo quantificare meglio.

Grazie alla cortesia della Società Meteorologica Italiana abbiamo potuto utilizzare i dati di alcune stazioni meteorologiche della rete mondiale per dedurre le condizioni medie alle quote limite del carsismo, concentrandoci in particolari sulle tabelle delle temperature medie mensili.

Per le interpolazioni dalla posizione della stazione a quella della zona glaciale il gradiente termico con la quota è stato assunto di -6°C/km e quello di latitudine di 0.2°C/°Lat verso l'equatore. Solo nel caso dei ghiacciai asiatici quest'ultimo termine non è stato utilizzato perché a intorno a quelle zone la variazione della temperatura con la latitudine è trascurabile. Ogni valutazione è stata ripetuta con tutte le stazioni circostanti ed è stata verificata la coerenza del dato. Nel caso di scostamenti sensibili è stata preso il valor medio.



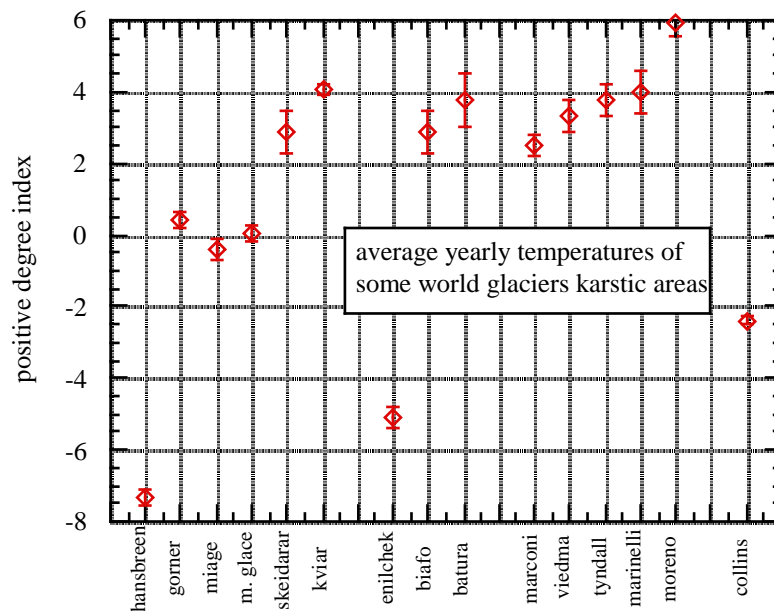
<b>Tabella 2</b>	Origine dati meteo glaciali	
<b>Ghiacciaio</b>	Stazione Meteorologica	Distanza [km]
<b>Mer de glace</b>	Plateau Zermatt	2-15
<b>Gorner</b>	Chamonix	
<b>Miage</b>		
<b>Hans</b>	Longyearbyn	140
<b>Skeidarar</b>	Kirkjubaejar	50
<b>Kviar</b>		
<b>Viedma</b>	Punta Arenas	80-330
<b>Perito Moreno</b>	Lago Argentino	
<b>Tyndall</b>		
<b>Marconi</b>		
<b>Marinelli</b>	Ushuaya Punta Arenas	40-200
<b>Biafo</b>	Chitral	120-160
<b>Batura</b>	Srinagar	
<b>Enilchek</b>	Naryn	340
<b>Collins</b>	Frey	10

<b>Tabella 3</b>	T medie delle zone carsiche glaciali			
	Alt. Min. [m slm]	<T> [°C]	Alt. Max. [m slm]	<T> [°C]
<b>EUROPA</b>				
<b>mer de glace</b>	2050	0.5	2200	-0.4
<b>gorner</b>	2400	0.9	2550	0.0
<b>miage</b>	2100	0.2	2300	-1.0
<b>hansbreen</b>	100	-6.9	250	-7.8
<b>skeidarar</b>	100	4.1	500	1.7
<b>kviar</b>	50	4.4	150	3.8
<b>ASIA</b>				
<b>biafo</b>	3300	4.1	3700	1.7
<b>batura</b>	3100	5.3	3600	2.3
<b>enilchek</b>	3350	-4.5	3550	-5.7
<b>S. AMERICA</b>				
<b>marinelli</b>	100	5.2	500	2.8
<b>viedma</b>	800	4.2	1100	2.4
<b>moreno</b>	350	6.7	600	5.2
<b>tyndall</b>	300	4.7	600	2.9
<b>marconi</b>	1000	3.1	1200	1.9
<b>ANTARTIDE</b>				
<b>collins</b>	0	-2.2	80	-2.6

Il risultato è mostrato in tabella 3: le temperature medie annuali sono intorno a 0°C, come ci aspettavamo, ma è pure evidente una grande variabilità.

Il grafico seguente lo illustra in dettaglio, mostrando pure i limiti di temperatura media attorno a cui si sviluppa il fenomeno carsico glaciale. Balza all'occhio che in Europa il fenomeno è realmente concentrato intorno alla quota corrispondente alla temperatura media di 0°C, ma è pure evidente che sia in Asia che in Sud America il fenomeno si spinge a quote ben più basse. Qui appare evidente che si tratta di processi abbastanza differenti: l'alimentazione delle lingue glaciali del Karakorum e soprattutto di quelle patagoniche è tanto più elevata di quella dei ghiacciai europei che le lingue si spingono sino a quote assurdamente basse, naturalmente con ablazioni specifiche enormi. Anche la protezione offerta dalle pareti delle montagne del Karakorum ai ghiacciai può avere un peso importante nel proteggerli dal caldo e introduce quasi certamente un errore nella valutazione della temperatura locale così come l'abbiamo fatta

basandoci su stazioni in zone “aperte”: quanto più grande è un ghiacciaio tanto più esso è in grado di influenzare il clima locale.



Tre ghiacciai (i due polari e quello dell'Asia centrale) si staccano nettamente dall'insieme degli altri. D'altra parte la lettura delle sequenze temporali della temperatura mostra che il puro dato “temperatura media annuale” ha poco senso se usato per comparare zone che si estendono da 62°S a 78°N passando per l'equatore...

### Generazione del carsismo glaciale: i gradi positivi

Per migliorare la stima abbiamo dunque fatto uso di una tecnica diversa: grosso modo al di sotto di 0°C non c'è ablazione, al di sopra di 0°C la quantità di calore che riceve il ghiaccio, e dunque l'ablazione, è grosso modo proporzionale alla  $\Delta T$ , cioè alla temperatura centigrada.

Per ogni punto abbiamo quindi stimato la temperatura media mensile basandoci su quella delle stazioni meteorologiche e poi abbiamo fatto la somma dei gradi limitatamente ai mesi in cui essi erano positivi. Chiameremo questo indice GKI, Glacier Karst Index. Il risultato è mostrato in tabella 4.

Si vede subito come il quadro si sia differenziato da quello fornito dalle temperature medie annuali.

L'Hans e soprattutto il Collins sono finiti dove dovevano essere: al limite estremo del carsismo glaciale, l'uno a Nord e l'altro a Sud. Si noti, infatti che i ghiacciai della parte centro-settentrionale delle Svalbard non mostrano segni di carsismo.

L'eccezionalità dell'Enilchek, che la stima della temperatura media annuale relegava fra i ghiacciai polari, si dimostra apparente: sono le condizioni meteorologiche dell'Asia centrale ad essere eccezionali, il ghiacciaio ha un GKI intorno a 30, come quelli alpini, e difatti ha un carsismo di tipo alpino.

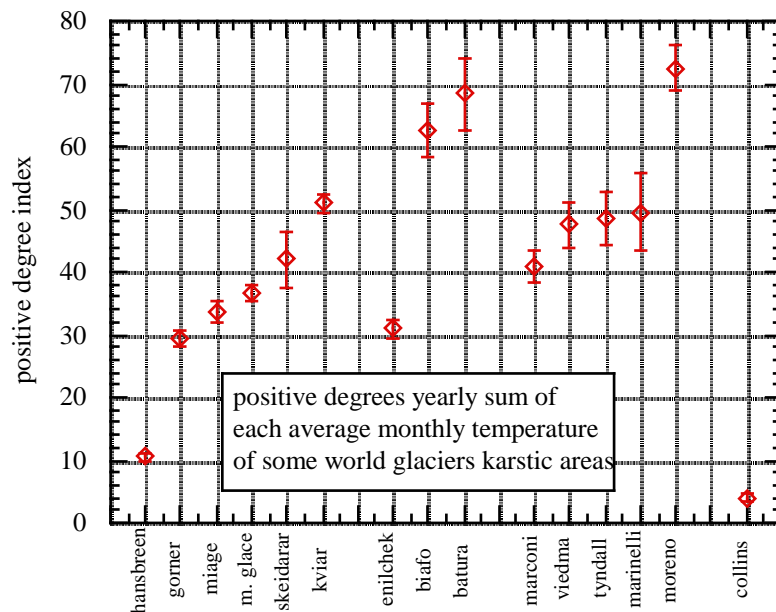
La salita del GKI corrisponde strettamente a quanto abbiamo visto sul campo: valori intorno a 50 descrivono carsismo molto intenso (Kviar, Marinelli, Marconi), al di sopra il fenomeno diventa di una tale intensità da meritare, probabilmente, il titolo di iper-carsismo glaciale.

Il GKI dei ghiacciai pakistani li indica simili al Perito Moreno: pur essendo, in effetti, carsismo intenso la valutazione è eccessiva: probabilmente qui si fanno sentire ancora di più i limiti di affidabilità del metodo di interpolazione da stazioni lontane.

Sta di fatto che il GKI pare un indice in grado di far prevedere se e di quale tipo sia il carsismo che incontreremo su un ghiacciaio se le altre condizioni di formazione lo permetteranno.

Tabella 4	GKI delle zone carsiche glaciali			
	Alt. Min. [m slm]	GKI	Alt. Max. [m slm]	GKI
<b>EUROPA</b>				
mer de glace	2050	39	2200	34
gorner	2400	32	2550	27
miage	2100	37	2300	30
hansbreen	100	12	250	9
skeidarar	100	51	500	33
kviar	50	54	150	48
<b>ASIA</b>				
biafo	3300	71	3700	54
batura	3100	80	3600	57
enilchek	3350	34	3550	28
<b>S. AMERICA</b>				
marinelli	100	62	500	37
viedma	800	55	1100	40
moreno	350	80	600	65
tyndall	300	57	600	40
marconi	1000	46	1200	36
<b>ANTARCTICA</b>				
collins	0	5	80	3

Il grafico lo riassume, zona carsica per zona carsica.



### Generazione del carsismo glaciale: la pendenza

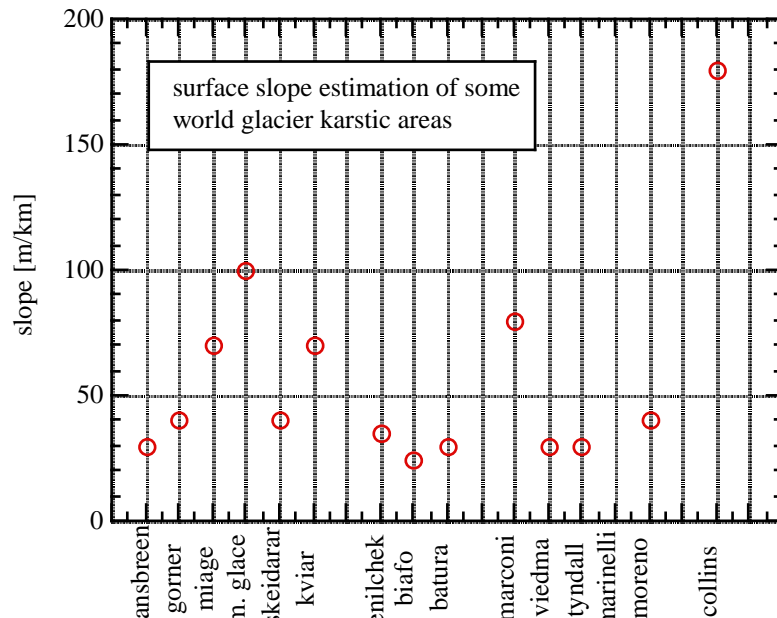
Uno dei parametri più importanti per permettere la formazione di carsismo glaciale è quello della pendenza della superficie: alte pendenze corrispondono a condizioni di scorrimento troppo distensive e la superficie del ghiacciaio si riempie di crepacci, impedendo la formazione delle grotte e soprattutto delle *bediere*.

Il grafico mostra la distribuzione delle pendenze delle zone carsiche visitate. Si tratta di stime complessive abbastanza rozze (sui ghiacciai la pendenza varia parecchio) che dovranno essere

perfezionate sul campo, area per area, ma rimane abbastanza chiaro che la pendenza “carsica” non deve eccedere il 5 %.

Si vede pure come la principale qualità del Gorner pare proprio essere quella di una pendenza lieve, comparabile con quella dei grandi ghiacciai sudamericani, grazie al suo letto liquido.

Ci sono indizi che suggeriscono che quanto più bassa è la pendenza tanto più è favorita la formazione di sistemi di drenaggio a condotte epidermiche. Il problema è però ancora aperto.



### Conclusioni e future ricerche

La speleologia glaciale è nata molto recentemente da una costola della speleologia sportiva, e si è sviluppata nell’ambito degli studi di climatologia sotterranea, ma sta riuscendo a chiarire molti processi che avvengono nei ghiacciai e ne sta delineando il mondo che contengono.

Il carsismo in rocce calcaree è il risultato dell’intera storia del massiccio in cui è scavato perché la roccia conserva memoria di strutture molto antiche. Inoltre una parte sostanziale della loro genesi è legata ad eventi puramente interni, invisibili all’esterno. Da una parte questo fa sì che le grotte siano molto complesse dato che sono il risultato della somma di innumerevoli eventi e condizioni climatiche e geografiche, dall’altra la previsione della loro esistenza è praticamente impossibile, perché ci sono ignote le situazioni passate e le condizioni profonde.

Nel caso del carsismo glaciale questo quadro muta in modo radicale. La plasticità del materiale e il fatto che esso venga incessantemente rinnovato permette il mantenimento delle sole forme in scavo: l’essere fossili è permesso solo su una scala temporale molto breve, legata alla profondità sotto ghiaccio. Questo porta con sé che possiamo prevedere l’esistenza di carsismo glaciale dal solo analizzare le situazioni in cui lo scavo è possibile.

La forte dipendenza del carsismo glaciale dalle condizioni meteorologiche e dalla pendenza della superficie glaciale ci ha permesso di introdurre un indice di carsificazione che, insieme alla misurazione di altri parametri d’insieme, sarà in grado di permetterci previsioni sulla morfologia di drenaggio di un ghiacciaio senza fare una ricognizione diretta.

In prospettiva immediata tutte queste ricerche miglioreranno l’accuratezza delle valutazioni dei “bilanci di massa” dei ghiacciai che vengono utilizzati per stimare i cambiamenti globali del clima. Ma l’aspetto più rilevante per un utilizzo pratico di questi studi è senza dubbio quello della fenomenologia dei depositi d’acqua sub-glaciali;

E’ infatti ben noto che periodicamente dai ghiacciai fuoriescono improvvisamente enormi quantità d’acqua che si erano venute accumulando negli anni precedenti all’interno della massa glaciale. Questo tipo di fenomeni, di estrema rilevanza per le opere umane costruite a valle dei

grandi ghiacciai, pare fosse già noto agli ingegneri della Roma antica: è probabile che l'enorme struttura del ponte romano di Pont Saint Martin fosse proprio giustificata dal mettere la strada delle Gallie al riparo da eventi catastrofici di questo tipo, innescati dal ghiacciaio del Lys.

La situazione di rischio va attualmente crescendo proprio perché la generale fase di ritiro delle superfici glaciali sulle Alpi è destinata a liberare le tasche d'acqua esistenti, trattenute dal ghiaccio a valle.

Sino ad ora, però, non è stata condotta nessuna analisi sistematica delle dimensioni e delle condizioni di stabilità di questi depositi.

Tutto questo va verificato sul campo, sia con ricognizioni dirette che indirette, ed è proprio in questa direzione che stiamo orientando le attuali ricerche.

#### Bibliografia

- AGASSIZ L., 1847 - Etudes et Expériences sur les Glaciers actuels, Masson, Paris,  
AMBACH W., 1988 - Interpretation of the Positive-Degree-Days Factor by Heat Balance Characteristics, Nordic Hydrology, 19: 217-224.  
BRAITHWAITE R., OLESEN O., 1989 - Calculation of Glacial Ablation from Air Temperature, in Glacier Fluctuations and Climatic Change, J. Oerlemans, 219-233  
BADINO G., 1990 - Fisica dei Buchi nell'Acqua, Proc. of 1st Int. Symp. of Glacier Caves and Karst in Polar Regions, Madrid, 119-133.  
BADINO G., 1992 - Ice Shaft Genesis: a Simple Numerical Approach, Proc. Of 2nd Int. Symp. of Glacier Caves and Karst in Polar Regions, Miedzygorze, 21-27.  
BADINO G., 1994 - Phenomenology and First Numerical Simulations of the Freatic Drainage Network Inside Glaciers, Proc. of 3rd Int. Symp. of Glacier Caves and Karst in Polar Regions, Chamonix, 47-54.  
BADINO G., PICCINI L., 1995 - Aspetti Morfologici ed Evolutivi delle Cavità Endoglaciali di Origine Criocarsica, Geogr. Fis. Quat., 18:225-228  
DÉSOR E., 1844 - Excursions et Séjour dans les Glaciers, Kissling, Neuchatel.  
ERASO A., 1985 - Método de Predicción de las direcciones principales de drenaje en el karst, Kobie, Serie Sc. Nat. XV, 15-165, Bilbao.  
FERUGLIO E., 1938 - Variaciones del frente del Glaciar Moreno. Gaea, Soc. Arg. Est. Geograficos, 6:185-192.  
FORBES J., 1843 - Travels through the Alps and Savoy, Edinburgh.  
FORBES J., 1859 - Occasional Papers on the Theory of Glaciers, A&C Black, Edinburgh.  
HOOKE R., 1984 - On the role of mechanical energy in maintaining subglacial water conduits at atmospheric pressure, Journal of Glaciology, 30, 105, 80-187.  
NYE J., 1976 - Water Flow in Glaciers, J. of Glaciology, 17, 76, 181, 181-207  
PATERSON W., 1994 - The Physics of Glaciers, Pergamon Press.  
ROTHLISBERGER H., 1972 - Water Pressure in Intra and Subglacial Channels, J. of Glaciology, 11, 62, 177, 177-203.  
SHREVE R., 1972 - Movement of Water in Glacier, J. of Glaciology, 11, 62, 205-214.  
BENN D., EVANS D., 1998 - Glaciers and Glaciation, Arnold Publishers.  
VALLOT J., 1898 - Exploration des Moulins de la Mer de Glace, Spelunca, IV, 16.