

## Cosa sono i ghiacciai

### Come funzionano

La massa di ghiaccio che costituisce un ghiacciaio non è una massa statica e omogenea: il ghiaccio ha diverse caratteristiche nei diversi punti del ghiacciaio e si comporta in modo differente a seconda della sua compattezza, della sua densità, della temperatura all'interno e alla base del ghiacciaio e delle caratteristiche del substrato roccioso su cui poggia.

Sulla superficie di ogni ghiacciaio è quindi possibile individuare diverse zone, dove processi diversi sono all'opera per plasmare la forma del ghiacciaio e determinarne il comportamento.

In ogni ghiacciaio si individuano due zone fondamentali: la **zona di accumulo**, dove la neve caduta durante l'inverno rimane conservata anche durante la stagione calda, che costituisce la zona dove il ghiacciaio riceve l'alimentazione nevosa necessaria alla sua sopravvivenza, e la **zona di ablazione**. In questa zona si ha invece una perdita di ghiaccio, principalmente per fusione della neve caduta nella precedente stagione invernale e del ghiaccio messo a nudo dopo la fusione nivale, ma anche per crolli e distacchi di materiale dal corpo del ghiacciaio, come avviene, per esempio, nella formazione di iceberg.

Vi sono quindi zone del ghiacciaio dove si produce ghiaccio e zone dove il ghiaccio viene invece distrutto e allontanato. Le due zone sono ben riconoscibili in estate: la zona di accumulo presenta una superficie bianca, coperta di neve e firn, mentre la zona di ablazione mostra ghiaccio vivo, in genere di aspetto "sporco" per la presenza di detriti rocciosi affioranti dal ghiaccio.

L'estensione e l'importanza di queste due zone caratterizza ciascun ghiacciaio e ne condiziona il comportamento. L'estensione delle due zone non è fissa nel tempo: esse, infatti, sono delimitate tra loro dalla linea di equilibrio, che coincide, grossomodo, con il limite delle nevi perenni. Poiché questo limite varia molto in funzione delle condizioni climatiche, variazioni del clima a breve e a lungo termine influiscono grandemente sulla sua posizione, e, di conseguenza, sull'ampiezza della zona di alimentazione e della zona di ablazione.

Il corpo di un ghiacciaio montano è normalmente confinato dalle pareti rocciose che lo circondano, in genere, su quasi tutti i lati, ma di norma esiste sempre un lato non confinato, dove il ghiacciaio è libero di espandersi o di ritirarsi: è la zona della fronte, che segna il limite oltre il quale il ghiacciaio non può più esistere, perché qui, semplicemente, l'ablazione distrugge tutto il ghiaccio.

Una delle caratteristiche più evidenti di un ghiacciaio, che lo differenzia da un deposito di neve, è che il ghiaccio si muove, scivolando verso valle sotto la spinta del suo stesso peso. In questo modo, il ghiaccio perso nella zona di ablazione viene continuamente rimpiazzato da nuovo ghiaccio che, formatosi nella zona di accumulo, viene trasportato dal movimento verso valle.

### Come si muovono

Il movimento di un ghiacciaio non è uniforme in tutta la massa e nemmeno costante nel tempo. La velocità di movimento è più bassa in prossimità delle pareti e della base, dove il ghiacciaio è rallentato dall'attrito con il substrato roccioso, e massima nelle zone centrali, dove gli attriti sono minimi e lo spessore del ghiaccio è massimo.

Differenti velocità si possono osservare anche alla confluenza di due lingue glaciali, di solito marcate da una morena mediana "galleggiante", una lunga striscia di detriti che percorre il ghiacciaio per tutta la lunghezza della zona di ablazione. Se alla base si trova dell'acqua di fusione, il ghiacciaio si muove più velocemente: i ghiacciai temperati sono quindi quelli che "camminano" di più, mentre quelli a base fredda possono rimanere "ancorati" al substrato gelato e muoversi molto poco, o "a scatti", un po' come avviene lungo una faglia.

Le velocità di movimento variano molto a seconda delle caratteristiche del ghiacciaio e del substrato: si va da pochi metri all'anno a parecchie centinaia di metri annui. Uno dei più veloci ghiacciai è il Columbia, in Nord America, che a partire dagli anni '70 si muove con una velocità di 24 metri al giorno. Intuitivamente, si può pensare che questo inarrestabile movimento spinga continuamente la fronte verso valle: più il ghiacciaio è "veloce", più questo dovrebbe farlo avanzare.

Quindi, l'osservazione continua nel tempo della posizione e della forma della fronte di un ghiacciaio dovrebbe darci indicazioni attendibili sul suo stato di avanzamento o di ritiro. Ma le cose sono, nella realtà, molto più complesse. Anche quando la fronte è stabile, apparentemente ferma, il ghiacciaio continua a muoversi verso valle: il fatto che la fronte non si sposti, significa che il ghiaccio perso per ablazione viene continuamente rimpiazzato da nuovo ghiaccio proveniente dalla zona di accumulo, allo stesso ritmo con cui viene perduto. Nel caso del Ghiacciaio Columbia, la cui elevata velocità ce lo farebbe pensare in rapida avanzata, le abbondanti perdite alla fronte ne fanno un ghiacciaio complessivamente in ritiro: dal 1982 il regresso è stato di 14 km.

## Delicati equilibri

Per valutare lo "stato" di un ghiacciaio, in particolare se questo sia in fase di avanzata o di ritiro, non basta quindi valutare le variazioni di posizione della fronte, ma occorre considerare il delicato equilibrio tra apporti nevosi, e quindi formazione di nuovo ghiaccio, e perdite di ghiaccio nella zona di ablazione: in poche parole, si devono valutare le variazioni di volume del ghiacciaio, studiando il "bilancio" tra questi due fattori, realizzando quello che i ricercatori chiamano "bilancio di massa". Si tratta, in pratica, di misurare gli apporti e le perdite, un po' come in un bilancio aziendale, e dedurre da questo se il volume del ghiacciaio stia aumentando o diminuendo.

Se il bilancio è positivo, e gli apporti superano le perdite, il ghiacciaio tenderà ad espandersi, spostando la posizione della fronte più a valle, mentre se il bilancio è negativo, il ghiacciaio si ridurrà, sia assottigliando il proprio spessore, sia ritirando progressivamente la fronte verso monte. Una fronte stabile nel tempo indica invece una situazione stazionaria, di equilibrio tra apporti e perdite (ma non significa affatto che il ghiacciaio sia fermo!).

La risposta del ghiacciaio non è però immediata: in genere, il ghiacciaio risponde con una certa inerzia, che dipende anche dalle sue dimensioni, e occorrono alcuni anni di bilancio positivo per assistere ad un'avanzata e viceversa. Molti ghiacciai delle Alpi sono studiati da decenni, alcuni da oltre un secolo, e i ricercatori dispongono quindi di lunghe serie temporali di misure di variazioni alla fronte e di bilanci di massa: questo ha permesso, confrontando gli avanzamenti e i ritiri dei ghiacciai con dati climatici e meteorologici, di comprendere come i ghiacciai hanno reagito alle variazioni climatiche più recenti, permettendo quindi di avanzare ipotesi sul futuro dei nostri ghiacciai.

## Un materiale particolare

Il ghiaccio gode di singolari proprietà fisiche, che condizionano tutti i processi che si svolgono sulla superficie e all'interno di un ghiacciaio.

A pressione ambiente, il ghiaccio è un materiale molto fragile, che, se sottoposto a sollecitazioni meccaniche come compressione o distorsioni reagisce fratturandosi e rompendosi in modo fragile (per verificarlo, provate a far cadere un cubetto di ghiaccio: otterrete una miriade di schegge che si fonderanno rapidamente sul pavimento della vostra cucina...). In condizioni di pressione elevata, come, per esempio, all'interno di un ghiacciaio, o per sollecitazioni applicate molto lentamente, il ghiaccio, invece, si comporta in modo plastico, deformandosi e distorcendosi in modo continuo, senza dare luogo a fratture (un po' come fa un panetto di "Pongo"). Per verificare, provate il classico esperimento di appoggiare su un cubetto di ghiaccio un filo caricato da due pesi all'estremità: lentamente, il filo penetrerà all'interno del cubetto, con i bordi del "passaggio" che si risaldano mano a mano che il filo avanza, fino ad attraversarlo completamente senza lasciare traccia del proprio passaggio. Questo fa sì che il ghiaccio di un ghiacciaio si comporti in modo molto diverso in superficie e in profondità. La cosa potrebbe sembrare di poca importanza, ma è fondamentale per la circolazione di acqua e l'immagazzinamento di riserve idriche all'interno del ghiacciaio. Il ghiaccio, infatti, è di per sé un materiale impermeabile, che non consente il passaggio dell'acqua: diviene permeabile, però, consentendo una circolazione idrica, quando è fratturato.

La fragilità degli strati superficiali è anche responsabile di quelle che sono tra le più conosciute morfologie della superficie di un ghiacciaio: i crepacci e i seracchi, immense fratture che a volte rendono estremamente difficile e pericoloso il percorrere i ghiacciai. Spesso descritti come "abissi senza fondo", in realtà raggiungono, proprio grazie alle caratteristiche fisiche sopra descritte, una profondità che di rado supera i 40 50 m (poca cosa su un ghiacciaio dove lo spessore del ghiaccio supera gli 800 m, come il ghiacciaio dell'Aletsch, ma sufficienti ad ispirarci un reverente timore!).

La disposizione dei crepacci e delle fratture dipende dalle tensioni che si originano nel ghiaccio in risposta alle irregolarità del substrato roccioso e dell'attrito lungo le pareti, e ci può essere utile per ricostruire l'andamento della roccia sottostante o per valutare lo spessore del ghiaccio.

Per esempio, campi di seracchi, grandi "cascate" di blocchi di ghiaccio intensamente crepacciati, possono indicare una brusca variazione di pendenza del substrato, o una "soglia" rocciosa, che potrebbe far supporre la presenza di laghi sottoglaciali, estremamente pericolosi per la loro instabilità.

L'innalzamento verificatosi alla fine dell'ultima glaciazione è in gran parte mascherato dall'innalzamento del livello marino conseguente alla fusione di grandi quantità di ghiacci continentali.

## Un grande nastro trasportatore

Con il movimento del ghiacciaio e l'attrito con la roccia lungo le pareti e sul fondo, la caduta di materiale dai versanti circostanti, la polvere portata dal vento, carcasse di animali, rifiuti lasciati dall'uomo, ivi compresi residuati bellici e corpi di sfortunati soldati o alpinisti possono essere "catturati" e inglobati nel ghiaccio di un ghiacciaio, sia in superficie che all'interno. Il movimento del ghiacciaio, prima descritto come uno scivolamento verso valle, è in realtà più complesso, e contribuisce a far penetrare in profondità i detriti nella zona di accumulo e a riportarli a giorno nella zona di ablazione, dove anche la fusione collabora a metterli allo scoperto.

Quando un ghiacciaio avanza, come una gigantesca ruspa spinge detriti e rocce incoerenti sotto e avanti a sé, quando si ritira abbandona tutto il materiale che aveva in carico, costituendo depositi glaciali, detti anche **till**, da un termine scozzese, che prendono diversi nomi in funzione di come il ghiacciaio li ha messi in posto (per esempio, "spalmandoli" sui versanti e sul fondo, schiacciandoli e stirandoli con il suo peso, come per i "till di alloggiamento", oppure accumulandoli per lenta fusione del ghiaccio che li contiene, come per i "till di ablazione").

I depositi glaciali presentano caratteristiche inconfondibili (per esempio, la presenza contemporanea di grossi massi e di matrice finissima, i ciottoli arrotondati e striati dalle enormi pressioni e dal reciproco attrito cui sono stati sottoposti durante il trasporto) che fanno sì che sia possibile riconoscerli anche quando il ghiacciaio che li ha prodotti è scomparso da molto tempo. Proprio grazie al rinvenimento di depositi di origine glaciale è stato possibile ricostruire il succedersi di vari episodi di glaciazione nel tempo: talvolta, i luoghi dove sono stati rinvenuti depositi glaciali sono davvero sorprendenti. Per esempio, i recenti ritrovamenti nel deserto della Namibia o del Sahara, a testimonianza di una glaciazione di più di 400 milioni di anni fa.

I depositi più giovani spesso conservano anche delle forme particolari, come le morene, che permettono di ricostruire non solo la presenza del ghiacciaio, ma anche la forma della sua fronte e la quota dei suoi fianchi. Poiché i ghiacciai possono anche essere lunghi decine o centinaia di km, e in passato esistevano apparati glaciali ancora più estesi, anche lo studio del tipo di rocce che costituiscono i depositi glaciali ci dà importanti informazioni, permettendoci di ricostruire il percorso di antichi ghiacciai ora scomparsi. Per esempio, nei territori a Nord di Milano si ritrovano ciottoli di rocce provenienti dalla Valtellina e dalla Valchiavenna, cosa che ha permesso di ricostruire il percorso di un antico ghiacciaio che, a più riprese, scendeva lungo la valle dell'Adda occupando quello che è ora il lago di Como. Studi di dettaglio hanno permesso, in quest'area, di ricostruire esattamente il percorso delle diverse lingue in cui si divideva il ghiacciaio principale, aggirando diversi nunatak, al suo sbocco in pianura. Lo studio dei sedimenti glaciali è quindi fondamentale per comprendere le variazioni di estensione e di forma dei ghiacciai nel tempo, ma questo può essere fatto in modo efficace soltanto se si conoscono molto bene i processi che regolano il comportamento dei ghiacciai attuali.

## Ghiacciai bianchi e ghiacciai neri

La quantità di detriti all'interno e sulla superficie di un ghiacciaio è molto variabile, e dipende sia dal movimento del ghiacciaio, sia dal tipo di substrato su cui si muove, sia dalla conformazione e dalle caratteristiche geologiche delle pareti che lo sovrastano. Particolari tipi di rocce, sensibili a processi di alterazione come il crioclastismo, o versanti soggetti a frequenti franamenti e colate di detriti, possono fornire grandi quantità di materiale detritico che va a ricoprire la superficie del ghiacciaio. Questa normalmente appare bianca, costituita da neve nella zona di accumulo, e da ghiaccio disseminato di detriti nella zona di ablazione. Quando l'apporto di materiali detritici dai versanti è elevato, tuttavia, la

superficie del ghiacciaio può risultare completamente coperta di detriti rocciosi di varie dimensioni, fino a rendere praticamente invisibile il ghiaccio: si parla allora di ghiacciai neri, in contrapposizione ai ghiacciai bianchi. Esempi di questo tipo sono molti ghiacciai dell'Himalaya o del Karakorum. In Italia, un esempio molto bello è costituito dal Ghiacciaio del Miage, in Valle d'Aosta, celebre anche per il suo lago terminale. La presenza di detriti protegge il ghiaccio dalla fusione: i ghiacciai neri sono quindi più protetti dei loro colleghi che, bianchi e nudi, non possono difendersi dalla radiazione solare.

## Chi è passato di qui?

Tutti i ghiacciai lasciano tracce del loro passaggio, tracce che possono conservarsi anche per migliaia e persino milioni di anni. Studiando i ghiacciai attuali, i geologi sono in grado di riconoscere agevolmente gli indizi dell'esistenza di antichi ghiacciai.

Un ghiacciaio, muovendosi e scivolando sul substrato roccioso, lascia due diversi tipi di tracce: può depositare il materiale che trasporta al suo interno e sulla sua superficie, dando depositi glaciali accumulati in forme caratteristiche e facilmente riconoscibili, oppure può erodere le rocce su cui si muove, lasciando superfici lisce e levigate.

I depositi glaciali sono in genere caratterizzati da una granulometria che comprende sia materiale molto fine, che deriva dalla frantumazione di ciottoli e detriti per attrito tra loro e con il substrato roccioso, sia materiale molto grossolano, compresi blocchi di parecchi metri di diametro. Questo deriva dalle proprietà viscosi del ghiaccio, che fa sì che possa prendere in carico materiali di peso e densità molto diversi, al contrario di altri agenti di trasporto, molto più selettivi (come, per esempio, il vento, che è in grado di trasportare soltanto sabbia, o le acque correnti, che trasportano materiale le cui dimensioni sono funzione della velocità della corrente). I blocchi più grandi sono noti con il nome di "massi erratici" e sono un buon metodo per capire fino a che quota e a che distanza si siano spinti i ghiacciai del passato.

Se le forme dei depositi glaciali sono conservate, si hanno anche testimonianze sulla forma della fronte, sulle caratteristiche del trasporto e del movimento del ghiacciaio, sulle sue avanzate e sui suoi ritiri e molto altro.

Le forme più caratteristiche e conosciute sono sicuramente le morene, che possono essere morene laterali, o di sponda, formate tra i bordi del ghiacciaio e il versante, o le morene frontali, o terminali, messe in posto davanti al ghiacciaio, in genere a formare archi concentrici. Altre forme, meno conosciute sui ghiacciai alpini, si originano alla base del ghiacciaio, per effetto sia delle deformazioni dovute al peso del ghiaccio, come le **fluted moraine** o i **drumlin**, sia per effetto delle acque che circolano alla base, come gli **esker**. Altre forme si originano al contatto tra il ghiacciaio e i versanti, nei depositi di contatto glaciale, come i **terrazzi di kame**, depressioni formate tra le morene di sponda e il versante, che possono ospitare piccoli laghi, essere colmate da detriti di versante o depositi di frana o da valanga che scendono dai versanti. Lo studio dei depositi e delle forme permette di ricostruire con molto dettaglio la forma e le caratteristiche di antichi ghiacciai, ed è fondamentale per ricostruire gli ambienti e i climi del passato.

Le forme di erosione, o di esarazione, costituiscono anch'esse un ottimo indizio del passaggio di un ghiacciaio e possono a volte essere l'unico tipo di traccia conservata. Possono essere forme molto grandi, come intere valli con il caratteristico profilo a U, circhi glaciali separati da creste sottili (a dare i cosiddetti **horn**, come il Cervino), oppure essere riconosciute su singoli affioramenti rocciosi, come nelle rocce montonate, dette anche dorsali di balena, per la forma allungata e arrotondata. Le rocce montonate, lisce e levigate dall'azione abrasiva del ghiaccio ricco di detriti, mostrano spesso delle caratteristiche strie e scanalature della roccia, dovute al raschiamento operato sul substrato da ciottoli duri, e permettono di ricostruire non soltanto il passaggio, ma anche la direzione e il verso in cui il ghiacciaio fluiva.

Molto importante è la ricostruzione, attraverso lo studio delle forme e dei depositi lasciati dai ghiacciai, del limite massimo raggiunto dai ghiacciai nel corso delle glaciazioni del Quaternario. Con l'acronimo **MEG** (Maximum Extention Glacier), si indica la quota massima raggiunta dai ghiacciai pliocenici e quaternari, mentre il termine LGM (Last Glacial Maximum) indica la quota massima raggiunta dai ghiacciai nel corso dell'ultima glaciazione: le due quote non sono uguali, soprattutto in zone di pianura, poiché i ghiacciai non hanno raggiunto la massima espansione durante l'ultima glaciazione.

L'età dei depositi glaciali più recenti viene ricavata osservando lo stato di alterazione delle rocce che li costituiscono, il

grado di sviluppo di suoli, che determina un diverso grado di copertura vegetale, l'età della vegetazione (dendrocronologia) e dei licheni (lichenometria) che ricoprono le rocce.

## E per il futuro?

I ghiacciai sono sensibili indicatori delle variazioni climatiche, in particolare delle variazioni di temperatura e di precipitazioni e come, attraverso lo studio delle variazioni frontali e dei bilanci di massa, sia possibile seguirne il comportamento nel corso degli anni.

In generale, a partire dalla metà degli anni '80, dopo una breve fase di avanzamento, la maggior parte dei ghiacciai in tutto il mondo è in **fase di regresso**, anche se, naturalmente, non mancano le eccezioni. Per esempio, in Norvegia, il ghiacciaio Nigardsbreen, uno dei ghiacciai di sbocco del grande Jostedalbreen, il più grande d'Europa, esclusa l'Islanda, monitorato dal 1962, mostra, in 40 anni di osservazione, 26 anni di bilancio positivo, ed è avanzato di 260 m tra il 1988 e il 2000, mostrando quindi una grande differenza con i "colleghi" alpini. Proprio queste differenze ci fanno comprendere come i processi che legano il comportamento dei ghiacciai alle variazioni climatiche siano molto poco conosciuti e molti anni di ricerche sul campo siano ancora necessari per poter fare ipotesi sul futuro che attende, insieme ai ghiacciai, anche noi e l'intero nostro pianeta.

Anche per quanto riguarda le **grandi calotte**, i dati sono ancora incompleti per avere un quadro generale. Si può osservare che i distacchi di iceberg, anche di grandi dimensioni, sono un evento comune, così come anche le dimensioni delle piattaforme di ghiaccio oscillano continuamente, espandendosi e ritirandosi con una tendenza che non è ancora stato possibile determinare. Nel maggio 2002 la piattaforma di Ross ha "perso" un iceberg lungo poco meno di 200 km e nel giro di pochi mesi almeno altri tre giganti, lunghi da 80 a 50 km, si sono staccati dalla stessa zona: dopo questi eventi, la piattaforma di Ross è ritornata alle dimensioni rilevate nel 1911 dall'esploratore Robert Scott. Questo sembrerebbe indicare un'espansione rispetto ai primi anni del secolo scorso. Dal 1979, sembrerebbe però che la frammentazione delle piattaforme antartiche si stia intensificando, tuttavia soltanto dalle osservazioni sugli iceberg non è possibile dire se i ghiacci dell'Antartide si stiano riducendo. Ogni anno le piattaforme antartiche perdono circa **1.450-2.000 km<sup>3</sup> di ghiaccio**, ma questo dato non è sufficiente: per poter fare affermazioni più precise, occorre verificare se la quantità di ghiacci persi sotto forma di iceberg superi o meno la quantità di nuovo ghiaccio formatosi a seguito delle annuali precipitazioni nevose. Soltanto con questi dati a disposizione su un certo numero di anni è possibile determinare un bilancio e quindi azzardare una previsione sul futuro dei ghiacci antartici. Quello che è certo è che rispetto agli anni '40 si è registrato un aumento della temperatura media annua di 2,5 °C, che dovrebbe accelerare la fusione dei ghiacci, ma accanto a questo in alcune zone dell'Antartide si è registrato da alcuni anni un aumento delle precipitazioni nevose, che dovrebbe andare ad alimentare la calotta e i suoi ghiacciai: quale di queste due tendenze prevarrà in futuro, non è dato ancora saperlo, ma è evidente come tutto dipenda da un fragile equilibrio, in cui i fattori accennati sopra sono soltanto due tra le tante variabili nel complesso gioco del clima terrestre. In definitiva, occorrono ancora anni di studi e di costanti osservazioni per poter comprendere il funzionamento del clima del nostro pianeta e per poter di conseguenza presentare modelli previsionali per il prossimo futuro: si comprende quindi come la ricerca sul campo sia di fondamentale importanza per suffragare, con dati oggettivi raccolti "in natura", teorie scientifiche e modelli di previsione.