

# Ghiaccio e ghiacciai

## Introduzione

I ghiacciai sono immensi corpi di ghiaccio, ma il ghiaccio che li costituisce solo in minima parte è formato da ghiaccio di congelamento. La gran parte della massa di un ghiacciaio si forma per trasformazione della neve, a causa delle variazioni di temperatura e della pressione degli strati di neve che via via si accumulano.

Di tutta l'acqua dolce del pianeta, che rappresenta circa il 3% delle acque terrestri, quasi l'80% è immobilizzato sotto forma di ghiaccio: è necessario quindi tenerne conto quando si studia il ciclo idrologico.

## Il ghiaccio

### Come si forma il ghiaccio

Il ghiaccio è costituito da cristalli frammisti a numerose impurità, che vanno da sali disciolti inglobati nel reticolo cristallino del ghiaccio, a particelle di detrito, polveri atmosferiche, frammenti di roccia o di suolo intrappolati, a minuscole bolle d'aria rimaste imprigionate nelle fasi di congelamento o di trasformazione della neve in ghiaccio. Lo studio di queste impurità ci permette di ricavare importanti informazioni sui processi di formazione e sul luogo di provenienza del ghiaccio e persino sulla composizione e sulla temperatura dell'atmosfera al momento della formazione.

#### *La neve si trasforma*

La formazione del ghiaccio di un ghiacciaio inizia con la deposizione di neve. La neve, con i suoi cristalli a stella o esagonali, contiene moltissima aria, e ha una densità bassissima (per questo vi sprofondiamo così facilmente, e sempre per questo la neve ha la capacità di assorbire moltissimo i suoni, così che un paesaggio innevato ci appare anche stranamente "silente").

Non appena cade al suolo, la neve inizia una trasformazione che porta a modificare la forma e le dimensioni dei cristalli e a ridurre progressivamente il numero e le dimensioni dei vuoti, aumentando la densità. Questa trasformazione è molto nota agli sciatori, che ben conoscono la differenza tra sciare nella polverosa neve invernale o in quella primaverile, trasformata e granulosa! Il principale responsabile della trasformazione della neve è la **fusione**, che avvolge i singoli cristalli con una pellicola di acqua, fondendone le punte e dando loro una forma più arrotondata. Le variazioni di forma e la presenza di acqua negli interstizi tra i cristalli provocano una graduale riduzione dei vuoti tra i granuli, favorita anche dalla **compattazione** esercitata dal peso degli strati di neve superiori. Se si ha rigelo delle acque di fusione, le dimensioni dei pori diminuiscono ulteriormente e i cristalli più grandi si ingrandiscono a spese di quelli più piccoli, che scompaiono. Le trasformazioni sono molto rapide quando la neve subisce diversi cicli di fusione e di rigelo, più lente se le temperature rimangono basse: in quest'ultimo caso le trasformazioni avvengono per sublimazione, processo che richiede tempi più lunghi (questo è il motivo per cui abbondanti nevicate in inverno possono dare un elevato pericolo di valanghe, poiché il permanere di basse temperature non permette la trasformazione e la stabilizzazione del manto nevoso).

La neve si trasforma così in una massa poco compatta di cristalli di ghiaccio arrotondati, che prende il nome di **neve vecchia**, o, più elegantemente, di **nevato** o **Firn** (termine tedesco) se permane per più di un anno. Il Firn è caratterizzato da una densità superiore a 0,54 e una porosità inferiore al 40%.

La trasformazione di neve in Firn è tanto più rapida quanto maggiori sono i cicli di gelo e disgelo: circa 4 mesi sulle Ande, un anno sulle Alpi, 4 anni nell'Alaska meridionale, vent'anni in Groenlandia (dati da Smiraglia, 1992). Con l'età, le dimensioni dei granuli e la densità aumentano, e si riduce la porosità. Il passaggio da Firn a **ghiaccio di ghiacciaio** avviene quando i vuoti presenti non sono più intercomunicanti: il ghiaccio diviene impermeabile e l'aria presente rimane intrappolata in bolle tra i cristalli. Quando la massa di ghiaccio inizia a fluire, le bolle d'aria vengono ulteriormente compresse, e la densità del ghiaccio sale fino a circa 0.91 g/cm<sup>3</sup> (contro 1 dell'acqua). La trasformazione del Firn in ghiaccio è ancora più lenta, e dipende sempre dalle temperature.

## Proprietà fisiche

Il ghiaccio possiede una singolare proprietà, apparentemente banale, ma che ha importanti ripercussioni sulla vita dell'intero pianeta. Mentre la maggior parte delle sostanze subisce una diminuzione di volume passando dallo stato liquido a quello solido, l'acqua possiede la proprietà di essere meno densa allo stato solido che allo stato liquido: la massima densità, infatti, è raggiunta a una temperatura di 4°C.

Questo implica che il ghiaccio sia più leggero di un equivalente quantitativo di acqua liquida, per cui il ghiaccio galleggia sull'acqua: di questo è facile rendersi conto quando sorvegliamo una bibita da un bicchiere colmo di cubetti di ghiaccio, ma lo stesso fenomeno in natura si osserva negli iceberg e nella formazione di ghiaccio marino e lacustre.

Se il ghiaccio non possedesse questa proprietà, il ghiaccio formato sulla superficie di uno specchio d'acqua (un lago, o un mare) affonderebbe, accumulandosi sul fondo. Questo finirebbe per creare la formazione di spessi depositi di ghiaccio sul fondo di mari e laghi, che verrebbero ben presto trasformati in grandi masse di ghiaccio, dove il calore estivo produrrebbe soltanto un piccolo spessore di acqua liquida in prossimità della superficie. Le conseguenze di questa proprietà sulla vita del nostro pianeta sono quindi facilmente immaginabili.

La stessa proprietà fa sì che l'acqua, gelando, aumenti di volume. La cosa è facile da sperimentare quando mettiamo nel freezer una bottiglia d'acqua: la pressione esercitata dal ghiaccio può rompere la bottiglia, se questa è piena, il ghiaccio non ha spazio per espandersi e il contenitore non può deformarsi, come accade per una bottiglia di vetro. In natura, questo processo è importantissimo: la pressione esercitata dal congelamento dell'acqua all'interno di piccole fratture di una roccia può essere così grande da frantumare la roccia stessa in piccoli frammenti. Questo processo, chiamato **crioclastismo** (da *crio*: freddo e *clastismo*: rottura), è responsabile dell'alterazione delle rocce in alta montagna, e produce grandi distese di detriti spigolosi, che sono un tratto caratteristico del paesaggio montano al di sopra del limite della vegetazione arborea (quelle che gli alpinisti e gli escursionisti chiamano "ghiaioni": chi frequenta la montagna sa quanto sia faticoso camminarvi!).

## Quanto pesa il ghiaccio?

In modo analogo ad un oggetto che galleggia sull'acqua, così la crosta terrestre "galleggia" in equilibrio sulle rocce viscose e plastiche del mantello sottostante. Una diminuzione del peso della crosta, dovuta, per esempio, all'asportazione di rocce per erosione, fa alleggerire le rocce, e la crosta si solleva, mentre un aumento di peso fa affondare la crosta ancora di più nel mantello "morbido" e viscoso, con un processo chiamato isostasia. La formazione di spesse coltri di ghiaccio, come è accaduto durante le glaciazioni del passato, causa un sovraccarico sulla crosta coperta dai ghiacci, con il risultato che questa affonda nel mantello, abbassandosi di parecchie centinaia di metri, in alcuni casi anche al di sotto del livello del mare. Conoscendo la densità media del ghiaccio e il suo spessore, è facile calcolarne il peso alla base. Attualmente, a causa del peso della calotta, che in alcuni punti raggiunge i 4,5 km, l'Antartide si è abbassata di oltre 900 m. Misurazioni radar effettuate in Groenlandia mostrano che un terzo della base rocciosa si trova al di sotto del livello del mare e il peso del ghiaccio accumulato ha spinto, in alcuni punti, la roccia ad abbassarsi di più di 600 m. Al ritiro delle grandi calotte dell'ultima glaciazione, i territori liberati dal peso dei ghiacci sono ritornati ad innalzarsi. La regione circostante la Baia di Hudson, per esempio, ha subito, al ritiro della calotta laurenziana, un innalzamento di più di 300 m in poco più di 10.000 anni: questo innalzamento non è ancora terminato, poiché il territorio non ha ancora raggiunto l'altezza che aveva prima dell'ultima glaciazione. Anche la penisola scandinava si sta ancora sollevando con un ritmo che raggiunge i 9 mm/annui al centro del Golfo di Botnia. Il ritardo nel rispondere alla rimozione del carico è dovuto alla viscosità del materiale che costituisce il mantello, che ha una certa inerzia.

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.

## 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 poco 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 dorsi 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 "collegli" 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.

## Il ghiaccio racconta

### I cambiamenti dei ghiacciai

Le osservazioni sulle variazioni frontali consistono nel rilevare i cambiamenti di forma e di posizione della fronte di un ghiacciaio. Un tempo questa operazione veniva effettuata "a mano", disegnando pazientemente i profili della fronte, più recentemente fotografandoli da posizioni fisse, e misurando gli arretramenti con strumenti meccanici. Ora queste operazioni si svolgono generalmente con l'uso di GPS e di foto aeree o da satellite, che permettono di confrontare di anno in anno le variazioni. Il Comitato Glaciologico Italiano promuove ogni anno campagne di misure di variazioni frontali su tutti i ghiacciai dell'arco alpino e organizza interessanti corsi per chi volesse diventare operatore glaciologico.

### Il bilancio di massa

Il bilancio di massa è un'operazione più complessa: occorre, infatti, svolgere una serie di misure e di rilevamenti:

- **quantificare gli apporti**, misurando la quantità di precipitazioni sul ghiacciaio, tenendo conto anche delle cosiddette "precipitazioni occulte", come la brina o il formarsi di ghiaccio di sublimazione, e degli apporti da valanghe.

Per fare questo si **misura lo spessore** della neve caduta durante l'inverno e la primavera in punti fissi e

significativi del ghiacciaio, in genere infiggendo, durante l'estate, apposite aste lunghe e sottili, del diametro di un paio di centimetri, chiamate "paline", e deducendo dal loro sporgere lo spessore del manto nevoso. Poichè per il bilancio occorre **trasformare la neve caduta in millimetri d'acqua equivalenti**, è necessario conoscere anche la **densità della neve**: per questo si realizzano apposite trincee, scavando all'interno del manto nevoso e misurandone la densità a varie profondità. Queste operazioni devono essere fatte in diversi punti del ghiacciaio, a quote diverse, in modo da avere un quadro rappresentativo di tutto il ghiacciaio.

- **quantificare le perdite**, determinando la quantità di ghiaccio asportata per **ablazione**. La maggior parte dell'ablazione, almeno nei ghiacciai alpini, è dovuta alla fusione del ghiaccio. Per la misura di questo parametro, si dispongono sulla superficie del ghiacciaio delle serie di paline (che normalmente sono le stesse usate per determinare lo spessore del manto nevoso), che, numerate e contrassegnate, vengono infisse con un'apposita trivella per una profondità nota. Periodicamente, nel periodo estivo anche giornalmente, si misura l'altezza della palina che rimane scoperta via via che il ghiaccio fonde. In questo modo, si può misurare lo spessore di ghiaccio perduto in un determinato periodo di tempo, e da qui, con misure ripetute, stimare la quantità di ghiaccio globalmente perduta nel corso dell'estate. Sul Ghiacciaio dei Forni, nel Gruppo dell'Ortles-Cevedale, per esempio, nel periodo estivo l'ablazione asporta uno spessore di circa 3-3,5 m di ghiaccio, con una fusione che tra metà luglio e metà agosto raggiunge punte di 4-5 cm al giorno (dati da Smiraglia). Le stesse paline possono anche essere utilizzate, misurandone gli spostamenti rispetto a punti fissi fuori dal ghiacciaio, per quantificare la velocità di spostamento verso valle del ghiacciaio.

Poichè una grande quantità di ghiaccio fonde anche alla base del ghiacciaio, dove si raccoglie formando laghi e torrenti sottoglaciali, nel bilancio di massa è importante misurare anche le **portate dei torrenti** che fuoriescono alla fronte del ghiacciaio: a queste dovrebbe essere sottratta la quantità d'acqua dovuta all'ablazione superficiale, per ricavare la **fusione basale**.

Determinare un bilancio di massa di un ghiacciaio è un'operazione complessa, e in Italia vengono realizzati sistematicamente, ogni anno, solo su pochissimi ghiacciai, tra cui il Careser (dal 1966) e la Sforzellina (dal 1986) nel Gruppo del Cevedale, il Chardonay nel Gruppo del Gran Paradiso (dal 1992). Indicazioni di massima possono essere ricavate osservando, anche da foto aeree, il rapporto tra area di accumulo, coperta di neve, e area di ablazione alla fine dell'estate, oppure il limite delle nevi: se questo è a bassa quota, è probabile che il bilancio sia positivo, anche se non è possibile avere indicazioni quantitative. Anche l'osservazione delle caratteristiche della fronte può essere indicativa: a parità di posizione, una fronte alta e rigonfia indica in genere un bilancio positivo, al contrario di una fronte "depressa" e assottigliata.

## Misurare la velocità

La misura della velocità con cui si muove un ghiacciaio è stata sicuramente una delle prime operazioni effettuate dai primi glaciologi dell'800, insieme alle **osservazioni sulle variazioni frontali**. Per misurare la velocità con cui il ghiaccio si sposta, occorre fissare un punto del ghiacciaio, riconoscibile per qualche sua caratteristica naturale particolare, come, per esempio, un grosso masso sulla superficie, oppure marcandolo con una o più paline, e misurare costantemente, più volte all'anno e per diversi anni consecutivi, lo spostamento che questo subisce rispetto ad un punto di osservazione fisso al di fuori del ghiacciaio. Attualmente, l'uso di **fotografie aeree e immagini da satellite**, insieme all'utilizzo di strumenti particolari, come i GPS, permettono di rendere questa operazione molto più facile, veloce e precisa che in passato, quando occorre misurare direttamente sul terreno effettuate da un operatore che doveva raggiungere, spesso faticosamente, i punti di misura. Osservazioni più complesse, fatte su allineamenti di massi o su sistemi di inghiottiti glaciali, hanno permesso di riconoscere, all'interno di un ghiacciaio, zone di flusso differente, che si muovono con **velocità diverse**. Le velocità con cui si muovono i ghiacciai sono molto diverse nei diversi apparati glaciali. Subiscono delle variazioni nel corso dell'anno (rallentando, in genere, durante l'inverno) e possono variare di anno in anno.



## Misurare lo spessore

Lo spessore di un ghiacciaio può essere ricavato, con apposite formule, conoscendone la velocità, l'inclinazione, la larghezza, insieme alle caratteristiche del ghiaccio, come densità e viscosità, ma, trattandosi di parametri difficili da valutare e diversi in diversi punti del ghiacciaio, si tratta di una stima grossolana.

Il metodo più antico e più diretto per misurare lo spessore di un ghiacciaio consiste nel realizzare una **perforazione fino a raggiungere il substrato roccioso**. Si tratta, però di un metodo molto costoso, che richiede macchine pesanti e difficili da trasportare, soprattutto in montagna, e che, in ogni caso, permette di conoscere lo spessore soltanto in un punto preciso, e non su tutto il ghiacciaio. Il ghiaccio estratto per la perforazione, in forma di cilindri lunghi e sottili, detti, per il loro aspetto "carote", può essere studiato ricavandone molte informazioni.

Per conoscere lo spessore di un ghiacciaio in **modo indiretto**, si ricorre alla geofisica, una speciale branca della geologia che attraverso lo studio delle anomalie del campo gravitazionale terrestre e della propagazione di onde sismiche e ed elettromagnetiche ricava le caratteristiche dei materiali che costituiscono la crosta terrestre, ivi compreso il ghiaccio dei ghiacciai. Le **prospezioni sismiche** a riflessione sono la tecnica più usata sui ghiacciai: lo scoppio di una carica esplosiva o i colpi di un pesante maglio sulla superficie del ghiaccio generano onde che si propagano nel ghiaccio e si riflettono sul substrato roccioso: studiando i percorsi delle onde e conoscendone la velocità di propagazione nei diversi materiali, è possibile ricavare lo spessore del ghiaccio attraversato. Le **prospezioni elettriche**, invece, utilizzano l'analisi delle differenze di potenziale generate dal passaggio di una corrente elettrica tra due punti di misura infissi nel ghiaccio, sfruttando le differenze di conducibilità elettrica tra ghiaccio e roccia. Una tecnica recente, molto efficace e veloce, sfrutta, invece, il comportamento del ghiaccio rispetto alla propagazione di onde radar, che lo attraversano come se fosse trasparente. La grande utilità di questa tecnica è che gli strumenti di misura possono essere montati su aerei che sorvolano zone amplissime: è stato così possibile ricostruire l'andamento del substrato e gli spessori delle calotte antartiche e groenlandesi. Questa tecnica innovativa fu scoperta quasi per caso dai piloti di aerei che sorvolando l'Antartide riferivano funzionamenti "anomali" degli altimetri radar di cui erano dotati gli apparecchi.

## Carote e perforazioni

La presenza di impurità solide e di bolle d'aria intrappolate all'interno del ghiaccio fornisce importantissime informazioni sulla composizione chimica dell'atmosfera e sulle temperature al momento della formazione.

Naturalmente, è necessario che il ghiaccio non abbia subito processi di fusione, che disperderebbero le bolle d'aria: per questo tipo di studi, quindi, si deve lavorare su ghiacciai freddi, in **regioni polari**.

In alcuni luoghi della Terra, il ghiaccio può essere **molto antico**, come, per esempio, alla base delle grandi calotte antartiche e groenlandesi, dove l'età del ghiaccio può essere superiore ai 300.000- 500.000 anni. Lo studio del ghiaccio in questi luoghi permette quindi di **ricostruire in dettaglio le variazioni di temperatura e di composizione chimica dell'atmosfera** su un periodo di tempo molto lungo, permettendoci di avere accesso ad un preziosissimo archivio di dati sul clima del passato. Per questo tipo di studi, vengono effettuate delle **perforazioni** che prelevano campioni di ghiaccio sotto forma di una lunga carota cilindrica, che non deve presentare interruzioni o parti mancanti, dalla superficie fino alla profondità raggiunta: perforazioni di questo tipo in Antartide hanno raggiunto profondità di oltre 2.000 m, come a Dome C (progetto al quale ha partecipato anche l'Italia) o nella perforazione Vostok (sovietica): qui è stata recuperata la carota più lunga, che copre un intervallo di tempo di 420.000 anni.

## Bolle nel ghiaccio

Le temperature dell'atmosfera intrappolata vengono ricavate studiando il **rapporto tra isotopi pesanti dell'ossigeno**, come  $^{18}\text{O}$ , e il più comune  $^{16}\text{O}$ , l'isotopo più diffuso. Il rapporto  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  viene poi confrontato con la composizione di un campione standard di acqua marina, il cosiddetto **SMOW** (*Standard Mean Oceanic Water*), ricavandone la differenza, indicata con  $\delta^{18}\text{O}\%$ . Il **ghiaccio formato in un periodo freddo** ha un contenuto in isotopi pesanti, come  $^{18}\text{O}$ , minore, e quindi un  $\delta^{18}\text{O}\%$  negativo rispetto al ghiaccio formato con temperature più alte. Apposite tabelle permettono di ricavare le temperature medie dell'aria in funzione del valore di  $\delta^{18}\text{O}\%$ . Analisi di questo tipo su diverse carote in Antartide e Groenlandia hanno permesso, per esempio, di riconoscere, andando indietro nel tempo, la fine dell'ultima glaciazione,

all'incirca 13.000 anni fa, e il suo inizio, risalente a circa 75.000 anni fa, separato da episodi glaciali più antichi da un periodo caldo, un interglaciale, tra 120.000 e 140.000 anni fa (dove la temperatura era di oltre 2 °C più alta dell'attuale, secondo quanto ricostruito nella carota di Vostok). L'analisi della **composizione chimica dell'aria intrappolata**, invece, prende in considerazione, in particolare, i gas serra, come anidride carbonica e metano, considerati i responsabili principali di un riscaldamento globale. L'analisi delle carote mostra, in effetti, che il contenuto di questi gas è naturalmente più basso durante i periodi freddi, corrispondenti a periodi glaciali, e si innalza al contrario con l'aumentare delle temperature. E' stato possibile, con lo studio di numerose carote, ricostruire l'andamento dei due principali gas serra nel tempo, identificando diversi periodi caldi e freddi. Il dato più significativo di queste analisi è però il drammatico **aumento di questi gas negli ultimi 200 anni**, a partire dallo sviluppo delle attività industriali, con un incremento che non ha paragoni negli ultimi 160.000 anni. Dalla fine dell'ultimo episodio glaciale all'inizio dell'Olocene (un arco di tempo di circa 2-3.000 anni), la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera è aumentata di 70 ppm, e lo stesso aumento è stato riscontrato dall'epoca preindustriale ad oggi (meno di 200 anni)!

I dati forniteci dai ghiacciai ci permettono quindi di ricostruire con grande dettaglio informazioni sul clima e sull'atmosfera del passato fondamentali per comprendere il funzionamento del sistema climatico del nostro pianeta, e nello stesso tempo suonano un campanello d'allarme che dovrebbe invitarci a riflettere e a prendere provvedimenti: sapremo sfruttare i "consigli" dei nostri ghiacciai?

## Ghiaccio sporco

Il ghiaccio di ghiacciaio, formandosi, intrappola al suo interno, oltre alle bolle d'aria, numerose **impurità solide**, che, se opportunamente studiate, forniscono importanti e preziosi dati sulla storia del nostro pianeta. I detriti più grossolani provengono di solito dai versanti prossimi al ghiacciaio o dalla sua base: importantissimi per ricostruire, attraverso l'esame dei depositi glaciali, ghiacciai ormai scomparsi, non forniscono in genere informazioni significative circa i ghiacciai attuali, di cui ci sono già note l'estensione e la posizione.

Più interessanti sono i **frammenti più fini, polveri sottili portate dal vento**, che possono provenire da molto lontano. Dalla loro distribuzione si possono, per esempio, ricostruire le direzioni dei venti, mentre l'analisi della composizione delle polveri può presentare a volte delle sorprese: granuli di sabbie provenienti dal Sahara si trovano, per esempio, molto diffusi sui ghiacciai alpini, e non è infrequente trovare **tracce di eruzioni vulcaniche** particolarmente violente sotto forma di livelli ricchi di ceneri vulcaniche. Lo studio della composizione di queste ceneri permette sovente di risalire all'apparato vulcanico da cui sono partite, fornendoci informazioni sui venti che le hanno trasportate e sulla potenza dell'esplosione. Se riferibili a eventi vulcanici storici, forniscono anche una datazione del livello di ghiaccio in cui sono stati ritrovate, mentre, al contrario, la possibilità di datare i livelli di ghiaccio permette di stabilire un'età per eventi vulcanici molto antichi.

Lo studio delle **polveri in Antartide e in Groenlandia** mostra, per esempio, che le concentrazioni durante l'ultimo episodio glaciale sono molto superiori all'attuale: questo fa ipotizzare che durante le glaciazioni la circolazione atmosferica lungo i meridiani fosse più "energica" a causa delle maggiori differenze di temperatura tra la fascia tropicale e le zone polari e che le terre aride e desertiche fossero più estese.

Il ritrovamento di **inquinanti di origine industriale in carote di ghiacciai molto lontani** da insediamenti antropici, come quelli dell'Himalaya o del Karakorum, permette invece di studiare come queste sostanze si propagano nell'atmosfera e, in alcuni casi, anche di stabilire chi è il "colpevole".

## L'età del ghiaccio

Il ghiaccio di ghiacciaio, lungi dall'essere un materiale omogeneo, presenta in genere una sorta di stratificazione, dovuta al progressivo accumulo annuale di strati di neve di diverso spessore: le parti più vecchie si trovano alla base e le parti più giovani vicino alla superficie. In genere il ghiaccio estivo ha un aspetto vitreo, solitamente ricco di polveri scure e di limitato spessore, mentre il ghiaccio invernale è bianco e di maggior spessore. E' possibile quindi "contare" i **diversi strati** e risalire al numero di anni, un po' come si fa con gli anelli di accrescimento degli alberi. Questo metodo, però, funziona soltanto fino a che la pressione crescente all'interno del corpo del ghiacciaio non cancella la stratigrafia del

ghiaccio. Per il ghiaccio più antico e profondo, si utilizzano metodi indiretti e più complessi, che sfruttano le bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio.

Con il metodo del **radiocarbonio** si utilizza il carbonio <sup>14</sup>C contenuto nell'anidride carbonica intrappolata, in modo analogo a quanto si fa per datare manufatti umani o materiale organico, ma è un metodo poco usato, per la grande quantità di materiale richiesto. Il metodo più usato analizza il contenuto in isotopi pesanti dell'ossigeno dell'aria contenuta nelle bolle. Per gli strati più vecchi e profondi, invece, occorrono altri metodi, basati su **modelli matematici** del flusso del ghiaccio. Importanti sono i ritrovamenti di livelli ricchi di polveri, in particolare di ceneri vulcaniche: quando è possibile ricondurle ad un evento eruttivo noto, è possibile dare un'età precisa al livello in cui sono state ritrovate.

## Le glaciazioni

### Conoscenze per il futuro

Le glaciazioni, periodi di clima freddo che vedono una grande espansione dei ghiacciai su tutto il pianeta, e, in particolare, la **formazione di grandi calotte**, sono molto ben studiate e conosciute per quanto riguarda il periodo più recente, il Quaternario. Tutta la storia della Terra è costellata da **oscillazioni climatiche**, con alternanza di periodi caldi e freddi e di episodi di avanzata e ritiro dei ghiacciai. Lo studio di antichissimi depositi glaciali in Nord America, Africa, Australia ha permesso di ritrovare le tracce della più antica glaciazione, vecchia di più di 2 miliardi di anni. Depositati glaciali molto antichi sono stati ritrovati sempre in Africa e in Australia e risalgono a 900, 750 e 600 milioni di anni fa, a testimonianza di altrettante glaciazioni: l'estensione e le durate, però, non sono note con precisione, poichè depositi così antichi si conservano soltanto in piccoli lembi discontinui e non permettono ricostruzioni su più vasta scala.

Altre glaciazioni si sono avute nell'Ordoviciano Superiore, 450 milioni di anni fa, con ritrovamenti di depositi glaciali e rocce montonate nel deserto del **Sahara**, dove doveva esistere una vasta calotta, di dimensioni doppie rispetto all'Antartide attuale, e al passaggio Permiano- Carbonifero, circa 300 milioni di anni fa, con depositi glaciali che in **Sudafrica** raggiungono i 900 m di spessore, a testimonianza di una grande calotta che copriva, oltre all'**Antartide**, **l'Africa meridionale**, il **Madagascar**, gran parte dell'**India** e dell'**Australia** (naturalmente, per lo studio di questi depositi antichi, è necessario tenere presente che la disposizione delle terre emerse era molto diversa dall'attuale, così come era differente la posizione dei poli). Durante il Mesozoico non si sono trovate tracce di glaciazioni, mentre esistono testimonianze di periodi freddi nel Cenozoico, tra 65 e 22 milioni di anni fa. La calotta antartica iniziò a formarsi circa 15 milioni di anni fa, raggiungendo la sua massima espansione, più estesa dell'attuale, tra i 7 e i 4,4 milioni di anni fa. La **calotta glaciale artica** iniziò invece a formarsi soltanto 2,6 milioni di anni fa, data d'inizio dell'ultima "era glaciale", spesso chiamata "quaternaria", ma che inizia, in realtà, nel Pliocene, e continua per buona parte del Quaternario (che inizia 1,8 milioni di anni fa).

### Il Quaternario

Il Quaternario è diviso in due periodi. Il **Pleistocene**, caratterizzato da numerose glaciazioni, termina 10.000 anni fa, con la fine dell'ultima glaciazione: ogni glaciazione è separata dalla precedente e dalla successiva da periodi caldi detti interglaciali, con clima simile a quello attuale, o anche più caldo. Nel periodo successivo, **l'Olocene**, pur avendosi alternanze di periodi più caldi e più freddi, non si hanno glaciazioni vere e proprie, a scala mondiale, ma soltanto piccoli episodi di avanzate e ritiro dei ghiacciai alle alte latitudini e in alta montagna.

In passato si distinguevano **4 glaciazioni quaternarie**, denominate, dalla più antica, Gunz, Mindel, Riss e Würm, dai nomi di località dove vennero riconosciute e studiate per la prima volta, tuttavia ora ci si è resi conto che gli episodi glaciali sono stati molti di più, con grandi differenze nel numero delle fasi e nella superficie occupata nei diversi luoghi della Terra. Per esempio, **nelle Alpi**, nell'anfiteatro del Lago di Como- Lago Maggiore sono stati riconosciuti almeno 13 episodi di avanzata e ritiro, in luogo dei 4 tradizionali.

L'ultima glaciazione inizia circa 75.000 anni fa, dopo un lungo periodo interglaciale caldo, e raggiunge la sua massima espansione tra i 30.000 e i 18.000 anni fa, coprendo circa il 30% delle terre emerse: la calotta laurenziana copriva buona parte del **Nord America**, e una vasta calotta copriva anche **l'Europa del Nord**, mentre i ghiacciai alpini si spingevano a

Sud fino ad occupare parte della pianura padana. Sulle **Alpi**, il ritiro inizia 14.000-15.000 anni fa: lo studio dei cordoni morenici permette di ricostruire le fasi di ritiro, e mostra che non si è trattato di un ritiro regolare e progressivo, ma si sono avute molte piccole avanzate e successivi ritiri, le cosiddette pulsazioni tardiglaciali.

All'inizio dell'Olocene si ha un periodo di **oscillazioni climatiche**, seguito, intorno agli 8.000 anni fa, da un periodo caldo detto optimum climatico, con i ghiacciai molto più ridotti di quelli attuali: è il periodo a cui risale, per esempio, la mummia dell'uomo di Similaun, a testimonianza del fatto che a quell'epoca molti valichi alpini erano transitabile e frequentati. Vari studi hanno permesso di ricostruire, per le Alpi italiane, una serie di eventi, con avanzate locali tra il 1300 e il 1400 a.C e il 900-300 a.C, seguite da un periodo caldo tra il 400 e il 750 d.C, che coincide con l'espansione dell'Impero Romano, a cui segue poi una breve avanzata medioevale tra il 1150 e il 1350 d.C e quella che viene chiamata la **Piccola Età Glaciale**, o PEG, tra il 1550 e il 1860, la massima avanzata glaciale dopo la fine delle glaciazioni pleistoceniche. Molte delle grandi morene visibili in prossimità dei ghiacciai attuali risalgono proprio alla Piccola Età Glaciale (come per esempio quelle del ghiacciaio del Morteratsch, in Engadina, Svizzera, alte più di 40 m).

**L'espansione della PEG** è testimoniata anche da numerose riproduzioni, dipinti e, più recentemente, fotografie, di grandissimo valore storico. Testimonianze del grande ritiro alla fine della PEG sono numerosi manufatti, inizialmente costruiti in prossimità delle fronti e ora molto lontani da queste, come l'Albergo dei Forni, che attualmente dista più di 2 km dalla fronte vicino alla quale fu costruito. Il ritiro è stato anche accompagnato da una forte riduzione di spessore del ghiaccio, come testimoniano trincee della Prima Guerra Mondiale e rifugi alpini, che a volte sono rimasti "sospesi" di parecchie decine di metri sopra la superficie dei ghiacciai, come il Rifugio Konkordia sul Ghiacciaio dell'Aletsch, nel Gruppo della Jungfrau, ora raggiungibile risalendo di 100 m lungo una parete di roccia. Anche il Ghiacciaio dell'Aletsch si è ritirato di circa 3 km dal 1860, data in cui si pone il termine della PEG. **Piccole pulsazioni** si ebbero negli anni successivi, tra il 1880-1890, nel 1920 e, più recentemente, tra il 1960 e il 1980, a seguito di un periodo con temperature più basse tra gli anni '50 e '70. Attualmente, tutti i ghiacciai alpini risultano invece in regresso e con bilanci di massa negativi.

**Negli ultimi anni**, l'unico anno con bilancio positivo è stato l'anno 2000-2001, che ha visto abbondanti nevicate invernali e primaverili, ma a questo non ha fatto seguito, per ora, alcuna oscillazione positiva. Lo studio delle oscillazioni climatiche e delle avanzate e ritiri dei ghiacciai del passato ci permette di meglio comprendere i meccanismi che regolano l'esistenza e "lo stato di salute" dei ghiacciai attuali, e ci si rende conto che i ghiacciai sono indicatori sensibili delle variazioni del clima, in particolare della temperatura e delle precipitazioni.

## Oceani di ghiaccio

Quando, nel corso di una glaciazione, grandi quantità di acqua vengono intrappolate nelle calotte e nei ghiacci continentali, gli oceani e i mari vengono impoveriti di importanti quantità di acqua. Questo ha provocato, nel corso di ogni glaciazione, un abbassamento generalizzato del **livello dei mari** su tutto il pianeta. Durante l'ultima glaciazione, per esempio, il livello del mare si è abbassato di circa 110 m rispetto all'attuale. Molte terre ora sommerse risultavano quindi emerse. Per esempio, un ponte di terra univa l'Alaska e la Siberia, e quello che ora è il porto di New York si trovava a 160 km dalla costa. Anche le coste dell'Italia dovevano avere un aspetto molto diverso, in particolare lungo le sponde dell'Adriatico, dove i bassi fondali aumentavano l'estensione delle terre emerse. Con il fondersi dei ghiacci continentali al termine dell'ultima glaciazione, il livello dei mari e degli oceani è nuovamente risalito ai livelli precedenti l'espansione dei ghiacci. Queste **oscillazioni delle linee di costa e dei livelli dei mari** sono ricostruite studiando le morfologie delle coste: per esempio, antiche spiagge al di sopra dell'attuale livello marino testimoniano livelli più alti di quello odierno. Informazioni molto preziose vengono dallo studio delle grotte marine, che si trovano numerose in tutto il Mediterraneo: al loro interno, a profondità anche di 100 m, si trovano forme tipicamente "terrestri", come le concrezioni, la cui analisi isotopica e datazione permette di ricostruire le variazioni di temperatura del passato, variazioni che mostrano una sorprendente coincidenza con quanto ricostruito dallo studio delle carote di ghiaccio.

## Perché le glaciazioni

E' ancora acceso il dibattito circa le cause delle glaciazioni. Molti sono i fattori e i processi che le determinano, nessuno

di questi probabilmente agisce da solo, ma i più importanti episodi di glaciazione sono sicuramente il risultato della somma di diverse cause. Tra i vari "imputati", si può suddividere tra fattori "terrestri" e **fattori astronomici**, esterni al pianeta. Tra questi ultimi, un ruolo importante giocano le variazioni dell'orbita terrestre intorno al Sole, secondo la ben nota teoria di Milankovic. Tra i **fattori terrestri**, sicuramente la distribuzione delle terre emerse è il fattore più importante: la forma e la disposizione dei continenti, infatti, influenzano le correnti marine e la circolazione delle masse d'aria, a loro volta responsabili degli scambi del calore su tutto il pianeta. La tettonica delle placche, quindi, esercita un ruolo importantissimo nell'innescare modificazioni climatiche. Le glaciazioni quaternarie, in particolare, secondo le più recenti teorie sarebbero state innescate dalla separazione dei continenti, in particolare dal distacco dell'Antartide, e dalla conseguente stabilizzazione della corrente circumantartica, che impedisce scambi di calore con le più calde zone equatoriali e tropicali.

## Una previsione possibile?

Poiché le glaciazioni dipendono, tra le altre cose, dai cambiamenti ciclici dell'orbita terrestre intorno al Sole, il nostro pianeta starebbe per entrare, stando ai dati astronomici, in un periodo freddo. Una parte degli "addetti ai lavori" propende quindi per una previsione che vede l'avanzare di una nuova era glaciale, con i ghiacci che ritornano a coprire territori già occupati 20.000 anni fa (compresi il Central Park a New York e parte della Pianura Padana fino alle porte di Milano). A questa tendenza "naturale" si oppone, però, una tendenza al progressivo riscaldamento dell'atmosfera terrestre per un aumento dei gas serra in gran parte dovuto alle attività umane. Se, da una parte, l'aumento della copertura nuvolosa conseguente alla maggior evaporazione dovuta al riscaldamento impedisce alla Terra di disperdere calore, favorendo un ulteriore riscaldamento, la stessa coltre di nubi può fare da schermo alla radiazione solare, riducendo la quantità che raggiunge la superficie. Anche l'emissione di grandi quantità di polveri e ceneri vulcaniche potrebbe agire da schermo alla radiazione solare, favorendo un raffreddamento dell'atmosfera: un aumento dell'attività vulcanica potrebbe mitigare, o addirittura annullare l'effetto serra. I fattori in gioco sono molti, e costruire un modello di previsione che tenga conto di tutte le interazioni tra fattori contrastanti è praticamente impossibile.

Quando i fenomeni meteorologici ci toccano da vicino, siamo ovviamente portati a darvi grande risalto, ma non bisogna dimenticare che se alla scala della vita umana un anno o un decennio possono sembrare un lungo periodo, alla scala della vita della Terra, vecchia di 4,6 miliardi di anni, sono meno di un istante. Tra la metà degli anni '60 e l'inizio degli anni '80, a seguito di alcuni anni particolarmente freschi e nevosi, i ghiacciai di buona parte del mondo registrarono una piccola avanzata, avvalorando l'ipotesi di un'imminente glaciazione. Attualmente, l'allarme generato dal progressivo aumento delle temperature e il concomitante progressivo ritiro dei ghiacciai di tutto il mondo fa temere una rapida fusione pressoché totale di tutto il ghiaccio terrestre... Il disaccordo tra i più autorevoli scienziati, insieme all'oggettiva difficoltà di costruire validi modelli di previsione, rende difficile ipotizzare cosa ci attende per il futuro: l'allarmismo, a volte fuorviante, di certe teorie dovrebbe essere abbandonato, a favore di una seria ricerca, che avvalori le diverse teorie con dati raccolti sul campo, servendosi anche delle ricostruzioni degli eventi del passato, per costruire modelli, ma anche per servircene come salutari "lezioni". Un anno particolarmente caldo, o un inverno particolarmente ricco di neve non sono certo sufficienti per parlare di riscaldamento globale o di glaciazioni in arrivo: la cosa importante è invece monitorare il nostro pianeta e vivere nel maggior rispetto possibile degli equilibri naturali.

## I ghiacciai, una risorsa

### Una risorsa idrica

I ghiacciai delle regioni temperate aride forniscono una fonte di acqua molto importante nell'economia delle comunità rurali locali. L'uso più sistematico riguarda l'utilizzo delle acque glaciali per l'irrigazione dei campi, mentre l'uso a scopo potabile è spesso limitato dalla grande quantità di particelle solide trasportate dalle acque, che spesso hanno un colore grigiastro e un particolare aspetto lattiginoso. Nelle alte valli del Karakorum, veri e propri deserti di alta quota, dove le precipitazioni vanno da 200 a 80 mm annui, l'agricoltura dipende esclusivamente dalle acque di fusione glaciale. Per sfruttarla, vengono costruiti sistemi di canali, lunghi anche parecchi chilometri: costruiti spesso su instabili depositi

glaciali, necessitano di una costante manutenzione e di continue sistemazioni per adattarli alle variazioni frontali dei ghiacciai. Anche sulle Alpi, in Val d'Aosta o nella Valle del Rodano, esisteva in passato una rete di canali di irrigazione, chiamati bisse o ru, che sfruttavano le acque di fusione.

Nelle regioni polari, invece, le popolazioni dell'estremo Nord, come gli Inuit, hanno per molto tempo sfruttato gli iceberg come fonte di acqua potabile. Essendo costituiti da ghiaccio di ghiacciaio, originato, quindi, dalla trasformazione di neve, gli iceberg sono fatti per la gran parte da acqua dolce. Anche ora vengono periodicamente riproposti progetti per lo sfruttamento di queste preziose risorse, per esempio rimorchiando iceberg in prossimità di coste di Paesi con scarsità d'acqua potabile, tuttavia per ora i costi di queste operazioni risultano ancora molto superiori ai benefici.

## Una fonte di energia

La produzione di energia idroelettrica rappresenta una voce importante per le regioni montuose di molti Paesi, tra cui anche l'Italia. Le acque di fusione glaciali garantiscono un apporto di grandi quantità di acqua anche durante la stagione estiva, e moltissimi serbatoi e impianti idroelettrici sono alimentati direttamente dai torrenti glaciali. Sulle Alpi italiane, moltissimi esempi si osservano nelle regioni montuose del Nord, come Piemonte, Valle d'Aosta, Trentino-Alto Adige, Lombardia. In alcuni ghiacciai, le acque vengono captate direttamente all'interno del ghiacciaio. Tra i più famosi, possiamo ricordare l'Engabreen, in Norvegia, dove si trova, installato nei tunnel di captazione, un importante laboratorio glaciale, che permette di fare osservazioni sull'interno del ghiacciaio. Anche sul Ghiacciaio dell'Argentière, che scende dal versante francese del M. Bianco, negli anni Sessanta furono scavati dei tunnel nel ghiaccio per imbrigliare le acque di fusione, ma, a causa di impreviste variazioni di direzione dei torrenti sottoglaciali, il progetto non ha avuto il successo sperato, e le gallerie sono ora state chiuse e trasformate in laboratorio sotterraneo per lo studio dell'erosione basale.

## L'acqua all'interno del ghiacciaio

Lo studio di sistemi di grotte glaciali è molto importante anche dal punto di vista idrogeologico, perchè permette di capire come funziona e come si comporta l'acqua contenuta all'interno del ghiacciaio, quando costituisce un **acquifero glaciale**. Gli acquiferi glaciali hanno un comportamento molto simile agli acquiferi carsici, e vengono pertanto studiati con gli stessi metodi. Si cerca innanzi tutto di percorrere la maggior parte delle grotte accessibili, stendendone un rilievo topografico, in modo da capire come si estende il reticolo di condotte e quali sono le direzioni di flusso idrico. Per le parti non esplorabili dall'uomo, perchè allagate o troppo anguste per essere percorse, si studiano in dettaglio i dati di portata degli scaricatori glaciali, che costituiscono le sorgenti dei sistemi di grotte glaciali. E' importante, in particolare, osservare il bilancio tra portate che escono dal sistema e portate che entrano (in questo caso, l'acqua di fusione o eventuali precipitazioni) e come le "sorgenti" rispondono all'alimentazione esterna. Per aiutarsi in questo tipo di indagine, si effettuano anche operazioni di tracciamento delle acque, immettendo nelle grotte, in corrispondenza degli inghiottitoi, una quantità nota di apposite sostanze traccianti (in genere coloranti fluorescenti), e osservando come queste vengono restituite alle sorgenti. Dal tempo impiegato dal tracciante per uscire e dalla diluizione che ha subito, è possibile capire l'estensione e l'importanza delle gallerie glaciali, stabilire se l'acqua percorre sottili fratture o grandi gallerie, stimare il volume delle acque immagazzinate all'interno del ghiacciaio e per quanto tempo le acque che si infiltrano rimangono all'interno del ghiacciaio: in poche parole, si possono stimare il comportamento dell'acquifero e il volume delle sue riserve idriche. Questo è di grande importanza perchè in molti luoghi della Terra i ghiacciai offrono un **abbondante fonte di acqua**, sia ad uso agricolo, come in molte regione aride (in Karakorum, per esempio), sia a scopo idroelettrico, come in moltissimi ghiacciai alpini. Capire quanta acqua vi è immagazzinata e in che modo essa esce dal ghiacciaio, è di fondamentale importanza per progettare le opere di captazione e per prevenire possibili rischi. La presenza di grandi quantità di acqua immagazzinata in un mezzo che si muove e si deforma continuamente, infatti, può rappresentare un grande pericolo: la rottura delle pareti e delle soglie che sostengono quelli che sono, a tutti gli effetti, veri e propri laghi all'interno dei ghiacciai può causare la fuoriuscita improvvisa di grandi quantità d'acqua, provocando le cosiddette rotte glaciali, uno dei fenomeni più distruttivi e impressionanti a cui vanno incontro i ghiacciai.