

## Ghiaccio, morfologie glaciali e permafrost nella ricostruzione climatico-ambientale del Trentino

Roberto SEPPI

Sezione di Geologia, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, 38100 Trento, Italia  
E-mail: [seppi@mtsn.tn.it](mailto:seppi@mtsn.tn.it)

**RIASSUNTO** - *Ghiaccio, morfologie glaciali e permafrost nella ricostruzione climatico-ambientale del Trentino* - Viene presentata una breve rassegna delle informazioni paleoclimatiche e paleoambientali che possono essere ottenute dallo studio dei ghiacciai, delle morfologie glaciali e del permafrost, con particolare riferimento alle potenziali fonti di dati disponibili nel territorio alpino del Trentino. Importanti informazioni paleoambientali sono state recentemente ricavate dall'analisi delle carote di ghiaccio estratte sia nelle regioni polari che nelle Alpi. Tale archivio non è tuttavia disponibile in Trentino, dal momento che i ghiacciai presenti non hanno le caratteristiche fisiche adatte a indagini di questo tipo. In Trentino sono localmente ben documentate le variazioni glaciali recenti (Olocene), e le principali avanzate sono state datate con  $^{14}\text{C}$ . Lo studio delle morfologie risalenti alle ultime avanzate glaciali (Olocene) rappresenta quindi un'importante fonte di informazioni per le ricostruzioni paleoambientali ed è un settore di indagine potenzialmente molto promettente per il Trentino. Le ricerche sul permafrost, sulle informazioni paleoclimatiche che esso può fornire e sulle forme geomorfologiche relitte connesse con la sua antica presenza (rock glacier) sono state sviluppate in limitati settori del territorio trentino e potrebbero ricevere ulteriore impulso con l'avvio di progetti di monitoraggi sistematici e a lungo termine.

**SUMMARY** - *Ice, glacial landforms and permafrost in the climatic and environmental reconstruction of Trentino* - A brief review of the paleoclimatic and paleoenvironmental information that can be achieved by the study of glaciers, glacial landforms and permafrost is presented. The potential data sources available in the alpine territory of Trentino has been emphasized. Important paleoenvironmental data has recently been obtained from the analysis of ice cores extracted from glaciers both in the polar regions and in the Alps. Nevertheless, such archives are not available in Trentino, since the glaciers located in its mountain ranges don't have the suitable physical characteristics for this kind of investigations. Holocene glacier variations are locally very well documented in Trentino and the main glacier advances have been dated with  $^{14}\text{C}$ . Therefore, the study of the landforms dating back to the last glacial advances (Holocene) represents an important source of information for the paleoenvironmental reconstructions of Trentino and is a potential field of very promising investigations. Researches on permafrost, on the paleoclimatic information that it can provide and on the relict landforms connected with its ancient presence (rock glaciers) have been developed in only limited areas of Trentino. This kind of investigations could receive further impulse with the beginning of systematic and long-term monitoring projects.

*Parole chiave:* ghiacciai, morfologie glaciali, permafrost, ricostruzioni paleoambientali, clima, Trentino  
*Key words:* glaciers, glacial landforms, permafrost, paleoenvironmental reconstructions, climate, Trentino

### 1. INTRODUZIONE

La parte di idrosfera terrestre che si trova allo stato solido è detta criosfera. Essa include tutto il ghiaccio esistente sul nostro pianeta, dalle grandi calotte polari, ai ghiacciai montani, al manto nevoso stagionale, al ghiaccio marino, lacustre e fluviale, a quello incluso nel permafrost e nel ghiaccio di grotta (Orombelli 2003). La maggior parte del ghiaccio a carattere non stagionale presente sulla catena alpina deriva dalla

trasformazione (costipamento, sinterizzazione e metamorfismo) del manto nevoso e costituisce i corpi glaciali. Il volume complessivo di ghiaccio presente nei ghiacciai alpini negli anni '80 dello scorso secolo era stimato in circa 100 km<sup>3</sup>; da allora fino al 2000 si è assistito a una perdita in volume pari a circa il 25% (Haeberli 2005). Rilevanti volumi di ghiaccio sono inclusi nel permafrost alpino, la cui origine è sia glaciale sia derivata dai processi di formazione del suolo perennemente congelato. Una stima quantitativa di

questa risorsa idrica nell'arco alpino è di problematica valutazione, in quanto difficile da individuare e studiare (Guglielmin 2004a).

La caratteristica fondamentale della maggior parte del ghiaccio presente sulle Alpi (sia esso ghiaccio di ghiacciaio o contenuto nel permafrost) è che si trova a temperature poco inferiori a 0 °C e quindi molto vicine al punto di fusione. Questo determina un'estrema sensibilità del crioambiente alpino ai cambiamenti climatici per cui anche un limitato riscaldamento termico può potenzialmente indurre imponenti e rapide trasformazioni negli ambienti di alta quota. La degradazione alla quale è soggetto il ghiaccio alpino, oltre che a depauperare una delle principali risorse idriche, rischia di far perdere irrimediabilmente uno dei più importanti archivi di informazioni paleoclimatiche e paleoambientali, rendendo ancora più urgenti e prioritari gli studi in questo settore.

Le potenzialità dei ghiacciai per le ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali sono state indagate soprattutto nelle regioni polari del nostro pianeta, dove sono state effettuate perforazioni profonde nelle calotte glaciali sia dell'Antartide (Petit *et al.* 1999; EPICA Community Members 2004) che della Groenlandia (NGRIP Members 2004). Più limitate sono state le ricerche di questo tipo condotte sui ghiacciai montani e nella catena alpina, dove soltanto pochi siti risultano potenzialmente adatti a fornire record paleoambientali sufficientemente affidabili (Cozzi & Barbante 2004; Maggi *et al.* 2004; Schwikowski 2006).

Le informazioni paleoambientali ricavabili dai ghiacciai possono essere anche di tipo indiretto, legate soprattutto allo studio di evidenze geomorfologiche e alla datazione dei depositi ascrivibili alle espansioni più o meno recenti (Baroni 2000; Orombelli 2005). Quasi sempre, tuttavia, le informazioni ottenute da studi di questo tipo sono discontinue ed eccessivamente legate alle condizioni ambientali locali.

Anche lo studio del profilo termico dei terreni interessati da permafrost o delle caratteristiche fisico-chimiche del ghiaccio in esso contenuto possono offrire importanti informazioni di tipo ambientale e paleoambientale (Harris *et al.* 2003; Guglielmin 2004b; Guglielmin *et al.* 2004). Dati qualitativi e quantitativi sull'antica presenza del permafrost e sulle condizioni climatico-ambientali che la determinano possono essere ottenute dall'analisi della distribuzione delle forme periglaciali relitte (Kerschner 1978, 1985; Frauenfelder & Kääb 2000).

In questo articolo vengono esaminate le potenzialità del ghiaccio e delle morfologie connesse ai ghiacciai e al permafrost per la ricostruzione delle condizioni climatiche e ambientali del passato. L'attenzione è focalizzata principalmente sulla catena alpina e in particolare sulle potenziali fonti di informazioni disponibili nel territorio alpino del Trentino.

## 2. GHIACCIAI POLARI E GHIACCIAI ALPINI COME ARCHIVIO AMBIENTALE

I ghiacciai polari si differenziano dalla maggior parte di quelli alpini per le loro caratteristiche termiche. Nei primi, la trasformazione in firn (densità pari a 550 kg m<sup>-3</sup>; Paterson 1994) e poi in ghiaccio (densità pari a 920 kg m<sup>-3</sup>; Paterson 1994) delle nevicate annuali progressivamente accumulate avviene in assenza di fenomeni di fusione. I ghiacciai polari sono anche definiti "freddi", per indicare che il profilo termico si mantiene per tutto lo spessore a una temperatura inferiore a quella di fusione (Fig. 1) (Benn & Evans 1998). Questo si traduce nella completa assenza di fenomeni di fusione e di percolazione d'acqua nel corpo del

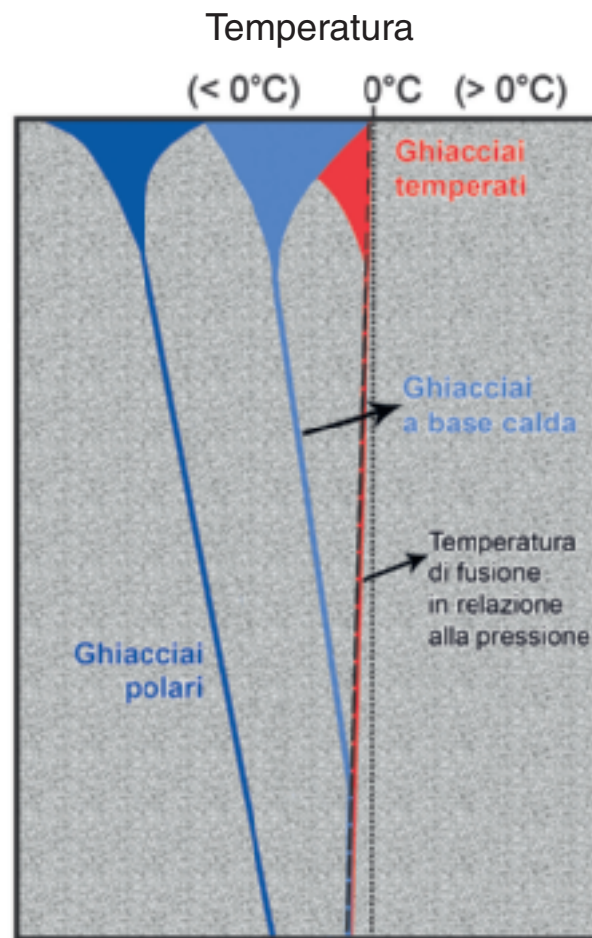


Fig. 1 - Profili termici dei ghiacciai polari (linea blu scuro) e temperati (linea rossa). I ghiacciai a base calda (linea azzurra) hanno le stesse caratteristiche di quelli polari, ma alla base raggiungono la temperatura di fusione in relazione alla pressione.

Fig. 1 - Thermal profiles of polar (dark blue line) and temperate (red line) glaciers. The warm based glaciers (blue line) have the same characteristics of the polar ones, but their base is at the pressure melting point.

ghiacciaio, condizione essenziale affinché i dati paleoambientali rimangano indisturbati nella successione degli strati di ghiaccio. Altra condizione essenziale per la conservazione del *record* paleoambientale è che il ghiaccio non subisca movimenti in senso orizzontale e che la deformazione degli strati avvenga soltanto in direzione verticale, indotta dalla pressione esercitata dal peso crescente di quelli soprastanti.

### 2.1. Il record paleoambientale nei ghiacciai polari

I parametri fisici e chimici del ghiaccio misurati lungo le carote estratte dalle calotte polari sono direttamente legati alle condizioni dell'atmosfera (e del clima) del passato e forniscono un *record* pressoché continuo di informazioni. Dall'analisi dei campioni di aria fossile inclusi nel ghiaccio, inoltre, è possibile risalire alla composizione chimica dell'atmosfera presente presso il sito studiato durante le fasi di deposizione e trasformazione dei diversi strati di neve. I principali dati paleoambientali che si possono ricavare sono i seguenti: la temperatura e l'umidità dell'aria, la composizione chimica e il contenuto di polveri dell'atmosfera, la circolazione atmosferica e la velocità del vento, l'attività solare, l'attività vulcanica e altri ancora (Tab. 1) (Traversi *et al.* 2005). La datazione delle carote di ghiaccio include diversi metodi, come il conteggio degli strati annuali, l'uso degli isotopi stabili, il riconoscimento di orizzonti di riferimento di età nota, l'uso di modelli di flusso, la correlazione stratigrafica con altri record paleoclimatici (Cozzi & Barbante 2004; Stenni 2005; Schwander 2006).

I più antichi dati paleoclimatici e paleoambientali da carote di ghiaccio sono quelli ottenuti da perforazioni realizzate in Antartide, in particolare in occasione della perforazione denominata EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) conclusasi nel

2004. L'età del ghiaccio basale della carota EPICA è stata stimata in 950.000 anni (Orombelli 2005) e fino ad ora sono stati ottenuti i dati paleoclimatici (tramite l'analisi del deuterio) relativi ai primi 740.000 anni (EPICA Community Members 2004). Recentemente, sono stati pubblicati i risultati delle paleo-concentrazioni dei principali gas-serra ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) nella sequenza stratigrafica della carota EPICA ed è stato messo in evidenza come le loro concentrazioni non abbiano mai raggiunto i valori attuali, almeno fino a 650.000 anni dal presente (Siegenthaler *et al.* 2005; Spahni *et al.* 2005).

In precedenza, la perforazione effettuata presso la stazione russa Vostok, terminata nel 1998, aveva consentito di ottenere un record paleoclimatico che includeva 4 cicli glaciali completi ed era esteso fino a 420.000 anni dal presente. L'analisi della concentrazione di  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  aveva mostrato una stretta correlazione con le variazioni di temperatura dei cicli glaciali/interglaciali (Petit *et al.* 1999) (Fig. 2).

Nell'emisfero nord, i dati paleoambientali da carote di ghiaccio che risalgono più indietro nel tempo sono quelli ottenuti dalle perforazioni effettuate in Groenlandia (Johnsen *et al.* 2001). La calotta glaciale della Groenlandia è caratterizzata da tassi di accumulo superiori rispetto a quelli antartici e da strati annuali di spessore maggiore. Il *record* paleoambientale che è possibile ricavare è quindi più limitato nel tempo, ma la risoluzione è spesso annuale. La perforazione più recente ha consentito di ricostruire nel dettaglio l'evoluzione del clima dell'emisfero nord a partire da 123.000 anni fa, comprendendo l'ultimo interglaciale (NGRIP Members 2004). La caratteristica peculiare dell'ultima fase glaciale registrata dalle perforazioni in Groenlandia è rappresentata da eventi climatici a elevata frequenza (eventi di Dansgaard-Oeschger), durante i quali fluttuazioni di temperatura di ampiezza fino a 15 °C potevano

Tab. 1 - Informazioni paleoambientali che si possono ottenere dallo studio delle carote di ghiaccio (da Traversi *et al.* 2005).

Tab. 1 - *Paleoenvironmental information that can be achieved from ice cores (from Traversi et al. 2005).*

Informazioni	Parametri misurati
Paleotemperature	Strati di fusione, $\delta\text{D}$ , $\delta^{18}\text{O}$
Umidità	Eccesso di deuterio
Accumulo nevoso	Segnali stagionali, $^{10}\text{Be}$
Attività vulcanica	Conducibilità, non-sea-salt solfati (nss $\text{SO}_4^{2-}$ )
Turbolenza troposferica	Microparticolato, elementi in tracce
Velocità del vento	Dimensione e concentrazione delle particelle
Composizione chimica dell'atmosfera	Contenuto di $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$ , glaciocimica
Circolazione atmosferica	Glaciocimica(contenuto ionico)
Attività solare	$^{10}\text{Be}$

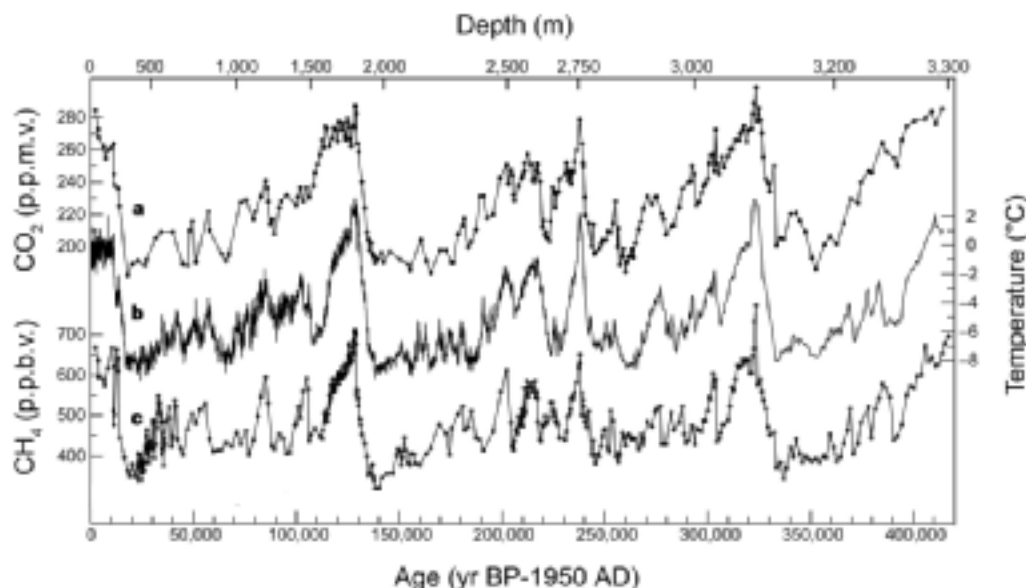


Fig. 2 - Variazioni di  $\text{CO}_2$  (a),  $\text{CH}_4$  (c) e temperatura (b) negli ultimi 420.000 anni ricavati dalla carota di Vostok (Antartide) (modificato da Petit *et al.* 1999).

Fig. 2 -  $\text{CO}_2$  (a),  $\text{CH}_4$  (c) and temperature (b) variations in the last 420.000 years, as obtained from the Vostok ice core (Antarctica) (redrawn from Petit *et al.* 1999).

verificarsi anche in pochi secoli/decenni (Johnsen *et al.* 2001).

## 2.2. Il record paleoambientale nei ghiacciai alpini

La maggior parte dei ghiacciai delle Alpi è di tipo temperato e il ghiaccio lungo tutto lo spessore è alla temperatura di fusione in relazione alla pressione (Fig. 1). Soltanto i primi metri di ghiaccio verso la superficie sono soggetti a fluttuazioni annuali di temperatura, mentre le porzioni sottostanti rimangono alla temperatura di fusione per tutto il corso dell'anno. Nei ghiacciai temperati è sempre presente acqua allo stato liquido e in essi si trovano sistemi di circolazione idrica epi- endo- e sub-glaciali. La presenza di acqua all'interfaccia ghiaccio-substrato ha notevoli ripercussioni sul comportamento dinamico del ghiacciaio, inducendo processi di scivolamento alla base e favorendo la deformazione dei sedimenti basali. L'acqua, inoltre, determina l'entità e l'efficienza dei processi glaciali di erosione, trasporto e sedimentazione di materiale detritico (Benn & Evans 1998).

Una conseguenza rilevante delle caratteristiche termiche dei ghiacciai delle Alpi è la completa cancellazione di qualsiasi record stratigrafico. Non è quindi possibile utilizzare i ghiacciai di tipo temperato come archivi ambientali, poiché, a causa della fusione estiva in superficie e della percolazione interna dell'acqua, i segnali fisico-chimici originali della neve vengono confusi o completamente obliterati.

Soltanto pochi siti sulla catena alpina conservano una serie stratigrafica continua e indisturbata e sono adatti a effettuare indagini di tipo paleoambientale. Si tratta di siti localizzati sopra i 4000 m di quota, ove le temperature sufficientemente basse del nevato permettono la presenza di ghiaccio "freddo", simile a quello delle regioni polari. Inoltre, tali aree hanno una morfologia particolare (sella ghiacciata o calotta), per cui la deformazione laterale degli strati di ghiaccio è limitata al massimo. I più importanti siti di perforazione nella catena alpina sono localizzati sul Monte Bianco (Col du Dôme, 4250 m s.l.m.), sul Monte Rosa (Colle Gnifetti, 4450 m s.l.m.; Colle del Lys, 4250 m s.l.m.), nelle Alpi Bernesi (Fischerhorn Plateau, 3850 m s.l.m.) e nell'area del Bernina (Piz Zupo, 3850 m s.l.m.) (Maggi *et al.* 2000, 2004; Schwikowski 2006). Gli alti tassi di accumulo nevoso nei siti alpini (da 1,0 a 2,5 m di equivalente in acqua) consentono di avere un *record* cronologico che si estende al massimo alcune centinaia di anni, ma una risoluzione annuale o stagionale. Un'eccezione è rappresentata dal Colle Gnifetti, dove, a causa dell'erosione eolica del manto nevoso, lo scarso tasso di accumulo nevoso (circa 0,30 m di equivalente in acqua) permette di avere potenzialmente un record stratigrafico che include gli ultimi 1000 anni, ma che si potrebbe spingere fino a 2000 anni dal presente e oltre (Schwikowski 2006). I carotaggi alpini hanno consentito di ottenere importanti risultati, ad esempio per quanto riguarda la ricostruzione storica della concentrazione nell'atmosfera dei metalli pesanti potenzialmente dannosi per l'uomo (Cozzi & Barbante



2004), dei principali ioni di origine antropica, come ammonio, nitrati e solfati, e delle polveri (Maggi *et al.* 2004).

Da quanto accennato in precedenza, risulta evidente che non è possibile utilizzare i ghiacciai del Trentino come archivi ambientali effettuando perforazioni profonde. Si tratta infatti esclusivamente di ghiacciai temperati, dove la fusione estiva della neve arriva a interessare anche le porzioni più elevate dei bacini di accumulo e la percolazione dell'acqua cancella il *record* stratigrafico. Nel territorio trentino, le aree glacializzate situate alle quote più elevate superano di poco i 3700 m s.l.m. (area del Monte Cevedale) e nemmeno le caratteristiche topografiche dei siti sarebbero adatte per indagini di questo tipo (Fig. 3).



Fig. 3 - Il Ghiacciaio de la Mare e il Monte Cevedale (3769 m s.l.m.), l'area del Trentino più elevata e più estesamente glacializzata.

Fig. 3 - La Mare Glacier and Monte Cevedale (3769 m a.s.l.), the highest and most widely glaciated area of Trentino.

### 3. VARIAZIONI DEI GHIACCIAI, MORFOLOGIE GLACIALI E RICOSTRUZIONI PALEOAMBIENTALI

I ghiacciai variano le loro dimensioni e le loro caratteristiche dinamiche in risposta alle sollecitazioni climatiche. Avanzate e ritiri sono la conseguenza di cambiamenti nel bilancio di massa del ghiacciaio, che a sua volta è strettamente correlato con le principali variabili climatiche (temperatura e precipitazioni). Esiste, infatti, una concatenazione di relazioni che legano il clima globale con il clima locale, gli scambi di massa ed energia, il bilancio di massa e le fluttuazioni della fronte del singolo ghiacciaio (Benn & Evans 1998). Ridotte precipitazioni nevose invernali ed elevate temperature medie estive determinano valori negativi nel bilancio di massa, con un conseguente innalzamento della ELA (*Equilibrium Line Altitude*), definita come la

quota teorica che separa la zona di accumulo da quella di ablazione e in corrispondenza della quale il bilancio di massa annuale è pari a zero. La risposta indotta dalle variazioni di temperatura e precipitazioni nel bilancio di massa di un ghiacciaio (e quindi nelle fluttuazioni di quota della ELA) viene registrata annualmente in base all'evoluzione meteo-climatica dell'anno idrologico precedente. I cambiamenti di forma e dimensioni dei ghiacciai, e quindi gli arretramenti o gli avanzamenti della fronte, derivano dai cambiamenti nel bilancio di massa: essi vengono registrati con un certo ritardo, che per i ghiacciai alpini è compreso tra pochi e qualche decina di anni.

I parametri comunemente utilizzati per indagare il rapporto fra ghiacciai e condizioni climatiche sono la fluttuazione della fronte e la variazione di quota della linea di equilibrio. Quest'ultima è senz'altro un parametro più sensibile e affidabile e permette di effettuare indagini paleoclimatiche e paleoambientali di un certo dettaglio. Ricostruendo e datando opportunamente le antiche dimensioni raggiunte dai ghiacciai, infatti, è possibile confrontare la quota della paleo-ELA con la quota attuale, stimando le variazioni di temperatura intercorse nel periodo di tempo considerato. L'antica superficie glaciale viene ricostruita basandosi su evidenze geologiche e geomorfologiche che consistono innanzitutto nella posizione delle morene latero-frontali e nel riconoscimento del limite superiore dell'erosione glaciale, denominato *trimline*.

L'affidabilità delle ricostruzioni paleoambientali basate sull'estensione dei ghiacciai del passato dipende dall'accuratezza con la quale è possibile datare gli eventi della storia glaciale. A questo scopo vengono attualmente utilizzati vari sistemi di datazione dei depositi glaciali, da quelli radiometrici basati sul decadimento del  $^{14}\text{C}$  (Fig. 4), a metodi incrementali, come la lichenometria o la dendrocronologia. Gli eventi più recenti possono essere datati pure ricorrendo a fonti iconografiche e a documenti storici. La ricostruzione dell'antica quota della ELA, basata sulle evidenze geomorfologiche di terreno, consente di stimare anche quantitativamente le condizioni climatiche del passato, in particolare la temperatura e l'entità delle precipitazioni (Kerschner 1980, 1985; Sailer & Kerschner 1999).

Un accurato studio sulla variazione del limite delle nevi dal Tardiglaciale al presente è stato effettuato per i principali ghiacciai dell'Alta Val di Peio. In quest'area, il limite delle nevi (che per i ghiacciai alpini può essere considerato coincidente con la linea di equilibrio) si sarebbe innalzato di circa 100 m dalla massima espansione del XIX secolo (coincidente con la Piccola Età Glaciale) agli anni '70 del secolo scorso (Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia - CNR 1986). In Val di Genova, nel medesimo intervallo di tempo, è stato calcolato un innalzamento della linea di equilibrio di circa 60 m per il Ghiacciaio della

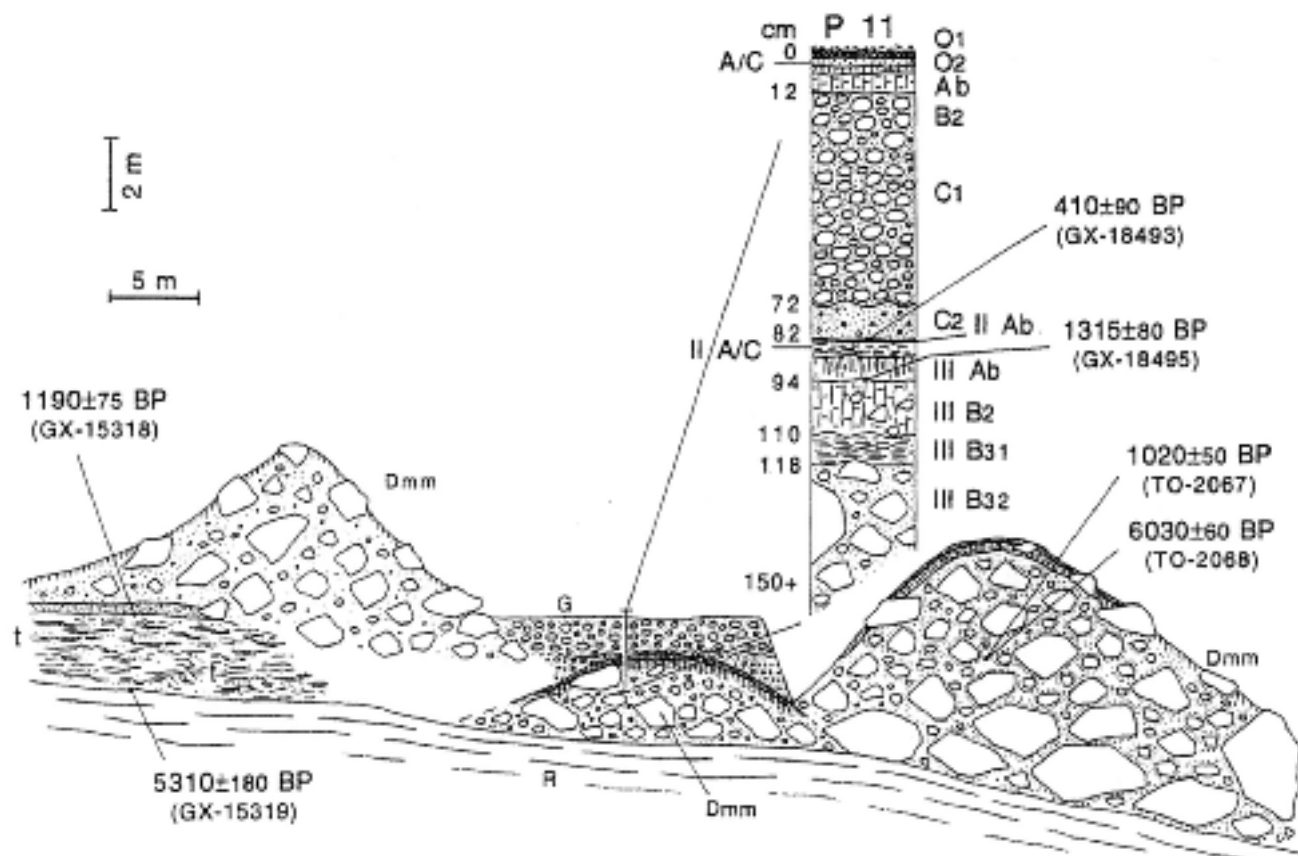


Fig. 4 - Rapporti stratigrafici e date  $^{14}\text{C}$  delle morene oloceniche dei ghiacciai della Lobbia e dell'Adamello-Mandrone (Val di Genova, Gruppo Adamello-Presanella) (da Baroni & Carton 1996).

Fig. 4 - Holocene moraines of the Lobbia and Adamello-Mandrone glaciers (Val di Genova, Adamello-Presanella Group) stratigraphical relationships and  $^{14}\text{C}$  dates (from Baroni & Carton 1996).

Lobbia. Tale variazione, se riferita esclusivamente a un innalzamento di temperatura, coinciderebbe con un aumento di circa  $0,37^\circ\text{C}$  (Baroni & Carton 1996).

L'indagine geomorfologica e geologico-glaciale ha permesso di ricostruire con una certa accuratezza le fluttuazioni oloceniche di numerosi ghiacciai alpini, consentendo di caratterizzare meglio segnali globali come l'espansione della Piccola Età Glaciale (PEG, secoli XIV-XIX), ma anche di mettere in evidenza espansioni precedenti, ripetutesi più volte e durate da alcune decine di anni ad alcuni secoli (Baroni 2000; Orombelli 2005).

Le condizioni glaciali oloceniche, e in particolare l'espansione della PEG, sono ben documentate anche in Trentino o in aree limitrofe, in particolare nel Gruppo Adamello-Presanella e nel Gruppo Ortles-Cevedale, dove sono disponibili numerose date  $^{14}\text{C}$ . Per il Ghiacciaio di Pissana (Gruppo dell'Adamello), ad esempio, è documentata un'espansione neoglaciale precedente la PEG, verificatasi tra  $3015 \pm 75$  e  $2354 \pm 125$   $^{14}\text{C}$  BP (Baroni & Carton 1991a); il Ghiacciaio della Lobbia (Gruppo dell'Adamello) ha raggiunto la

sua massima espansione olocenica attorno a  $5310 \pm 180$   $^{14}\text{C}$  BP (Baroni & Carton 1991b); per il Ghiacciaio di Cornisello (Gruppo della Presanella), è stata attestata con una data  $^{14}\text{C}$  un'espansione precedente la PEG, successiva a  $2745 \pm 110$  anni  $^{14}\text{C}$  BP (Baroni *et al.* 1998). Il Ghiacciaio dei Forni (Gruppo Ortles-Cevedale) ha avuto una fase di espansione attorno a  $2670 \pm 130$  anni  $^{14}\text{C}$  BP (cal 930-710 BC) (Orombelli & Pelfini 1985). Depositi glaciali ascrivibili all'espansione della PEG sono stati datati con  $^{14}\text{C}$  per il Ghiacciaio della Lobbia e del Mandrone nel Gruppo dell'Adamello (Baroni & Carton 1996).

Oltre alle aree interessate dagli studi sopra citati, numerose altre zone del territorio alpino trentino potrebbero essere oggetto di indagini paleoambientali volte a ricostruire la storia delle espansioni oloceniche dei ghiacciai, anche se il ritrovamento di materiale databile in posizioni stratigrafiche chiave rimane un evento piuttosto raro (Fig. 5).

L'utilizzo dei ghiacciai per il monitoraggio e la ricostruzione delle condizioni ambientali può avvenire anche attraverso dati glaciologici diretti, quali le



Fig. 5 - Morene oloceniche del Ghiacciaio d'Amola (Gruppo Adamello-Presanella). Le morene risalgono probabilmente alla Piccola Età Glaciale (secoli secoli XIV-XIX), ma presso questo sito mancano date  $^{14}\text{C}$ .

Fig. 5 - Holocene moraines of Amola Glacier (Adamello-Presanella Group). The set of moraines probably dates back to the Little Ice Age (sec. XIV-XIX), but  $^{14}\text{C}$  dates lack at this site.

fluttuazioni delle fronti e i bilanci di massa. I dati di variazione delle fronti sono stati raccolti su numerosi ghiacciai delle Alpi italiane a partire dall'inizio del secolo scorso e il considerevole numero di apparati glaciali osservati ogni anno consente di effettuare analisi complessive sul comportamento dei ghiacciai del versante meridionale delle Alpi (Santilli *et al.* 2002). Anche in Trentino, in alcuni casi, si dispone di serie storiche lunghe qualche decina di anni. È necessario, tuttavia, tenere presente che la fluttuazione della fronte è un indicatore glaciologico indirettamente collegato alle variazioni climatiche, essendo fortemente influenzato dalle condizioni locali e dalle particolarità dei singoli ghiacciai. Vanno quindi analizzati campioni significativi di ghiacciai, eliminando i fattori che determinano localmente la loro dinamica (Baroni 2000).

Studi sistematici di bilancio di massa sono iniziati nelle Alpi a partire dalla metà del '900, applicando diverse metodologie (IUGG (CCS)–UNEP–UNESCO–WMO 2005). Per quanto riguarda le Alpi italiane, la più lunga serie storica di bilancio di massa è quella relativa al Ghiacciaio del Careser, per il quale il monitoraggio è iniziato nel 1967 (Zanon 1992; Giada & Zanon 2001; Carturan 2002). Pur nella sua limitata estensione temporale, la serie storica dei bilanci di massa del Ghiacciaio del Careser mostra una situazione di sostanziale in equilibrio, con bilanci in pareggio o debolmente negativi, fino all'inizio degli anni '80 dello scorso secolo e un deciso *trend* di bilanci fortemente negativi a partire da quella data. L'anno idrologico 2002-2003 è risultato il più negativo di tutta la serie,

con una perdita netta pari a 3317 mm di equivalente in acqua (Carturan com. pers.).

Recentemente, in Trentino sono stati indagati depositi di ghiaccio ipogei, potenzialmente importanti per le ricostruzioni paleoambientali. Nelle Dolomiti di Brenta, in particolare, sono stati studiati alcuni depositi, la cui origine sembra risalire alla prima metà del '500, quindi all'inizio della Piccola Età Glaciale (Borsato *et al.* 2006). Analogamente ai ghiacciai subaerei, tali siti sono soggetti a un forte tasso di ablazione in conseguenza del riscaldamento climatico in atto.

#### 4. INFORMAZIONI PALEOCLIMATICHE E PALEOAMBIENTALI DA PERMAFROST E ROCK GLACIERS

Il permafrost, definito come un qualsiasi terreno che rimane per almeno due anni consecutivi a una temperatura pari o inferiore a 0 °C (van Everdingen 1998), reagisce ai cambiamenti climatici secondo scale temporali diverse. A scala stagionale/annuale si verificano cambiamenti nello spessore dello strato attivo (porzione superficiale di un suolo con permafrost che va incontro a fasi stagionali di congelamento e scongelamento); a scala da decennale a secolare si verificano perturbazioni nel profilo termico profondo del permafrost; infine, a scala da secolare a millenaria si può ridurre lo spessore complessivo del permafrost, fino a una sua completa scomparsa (Haeberli 2005).



#### 4.1. Perforazioni profonde in permafrost

L'analisi del profilo termico del permafrost, condotte dove siano state effettuate perforazioni profonde, può fornire rilevanti indicazioni di tipo paleoclimatico. Il profilo termico, infatti, registra le variazioni climatiche che si sono verificate nel passato, mostrando un andamento non lineare a profondità comprese fra poche decine e alcune centinaia di metri: così, un riscaldamento climatico avvenuto nel passato si traduce, a una certa profondità, in una deviazione del profilo termico verso valori di temperatura più elevati.

L'estrapolazione in superficie dei gradienti termici del permafrost presso 6 diverse perforazioni effettuate lungo un transetto latitudinale che va dalle Isole Svalbard alle Alpi (progetto europeo PACE, Harris *et al.* 2001, 2003) ha evidenziato un riscaldamento della superficie del suolo compreso fra 0,5 e 1 °C negli ultimi 100 anni (Fig. 6). Escludendo le perforazioni effettuate nei paesi nordici, i valori relativi alle Alpi mostrano un riscaldamento compreso fra 0,5 e 0,8 °C.

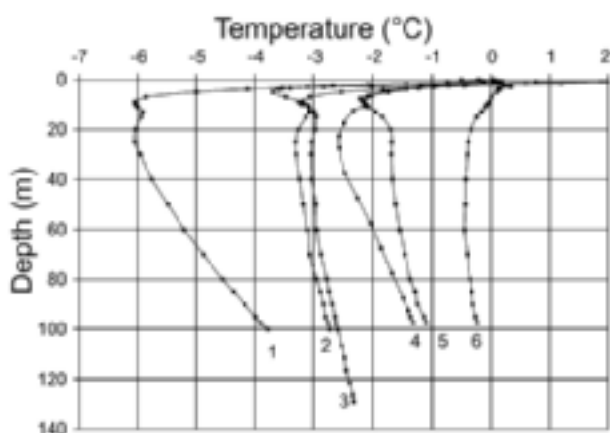


Fig. 6 - Profili geotermici misurati nei pozzi in permafrost perforati nell'ambito del progetto europeo PACE (Permafrost and Climate in Europe). 1) Janssonhaugen (Svalbard), temperatura agosto 2000; 2) Tarfalaryggen (Svezia), temperatura giugno 2000; 3) Juvvasshøe (Norvegia), temperatura agosto 2001; 4) Stockhorn (Svizzera), temperatura gennaio 2001; 5) Passo dello Stelvio (Italia), temperatura luglio 2000; 6) Schilthorn (Svizzera), temperatura gennaio 2001 (da Harris *et al.* 2003).

Fig. 6 - Geothermal profiles measured in the boreholes drilled within the PACE project (Permafrost and Climate in Europe). 1) Janssonhaugen (Svalbard), August 2000 temperature; 2) Tarfalaryggen (Svezia), June 2000; 3) Juvvasshøe (Norvegia), August 2001 temperature; 4) Stockhorn (Svizzera), temperature 2001 temperature; 5) Passo dello Stelvio (Italia), July 2000 temperature; 6) Schilthorn (Svizzera), January 2001 temperature (from Harris *et al.* 2003).

Applicando un semplice modello di conduzione termica al profilo geotermico di una perforazione in permafrost effettuata nelle Alpi italiane presso il Passo dello Stelvio, è stata ricostruita l'evoluzione storica della temperatura della superficie del suolo dal 1800 a oggi (Guglielmin 2004b). È stata individuata la fase fredda dell'ultima parte della Piccola Età Glaciale (temperatura del suolo di quasi -3,5 °C) e un intenso riscaldamento a partire dagli anni '40 dello scorso secolo, con un picco centrato attorno agli anni '80 (temperatura del suolo superiore a -1,5 °C).

L'esistenza di permafrost nel territorio alpino del Trentino è documentata nel Gruppo Adamello-Presanella e in alcuni settori del Gruppo Ortles-Cevedale, grazie soprattutto all'analisi della distribuzione di forme geomorfologiche connesse con la presenza del terreno perennemente congelato (vedi par. 4.2.). È ipotizzabile che il permafrost sia diffusamente presente sopra i 2300/2500 m di quota, specialmente sui versanti esposti a Nord, ma sarebbero necessarie accurate indagini su numerose aree campione, allo scopo di definirne meglio la distribuzione. Il monitoraggio a lungo termine del permafrost in funzione delle condizioni climatiche è ancora a uno stadio iniziale nel Trentino e consiste principalmente nell'analisi delle condizioni termiche della superficie del suolo in un numero limitato di siti. La realizzazione di carotaggi profondi, pur comportando una logistica complessa e un impegno economico considerevole, sarebbe di rilevante interesse anche per le ricerche di carattere paleoclimatico.

#### 4.2. Distribuzione di forme periglaciali relitte

L'analisi della distribuzione di forme periglaciali relitte può fornire notevoli informazioni di tipo paleoambientale, sia di tipo qualitativo che quantitativo. Nelle Alpi l'attenzione si deve concentrare soprattutto sullo studio della distribuzione dei rock glaciers relitti, forme periglaciali che non contengono più ghiaccio al loro interno, ma che segnalano la quota del limite inferiore raggiunto dal permafrost alpino in condizioni climatiche diverse rispetto a quelle attuali.

La corretta datazione delle forme periglaciali relitte rimane uno dei problemi chiave per poter effettuare ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali. Datazioni numeriche sono state effettuate con metodi radiometrici, utilizzando il  $^{14}\text{C}$  su materiale organico incluso nel rock glacier o su orizzonti organici di suoli sepolti. Più recentemente sono state applicate tecniche come la termoluminescenza, la datazione cosmogenica delle superfici di esposizione, l'analisi dello spessore e delle caratteristiche delle patine di alterazione del materiale (Calderoni *et al.* 1998; Haeberli *et al.* 1999, 2003; Konrad *et al.* 1999; Laustela *et al.* 2003). Altre tecniche di datazione numerica sono basate sull'interpolazione delle linee di flusso della superficie



del deposito in funzione della velocità di spostamento orizzontale (Kääb *et al.* 1997; Frauenfelder *et al.* 2004).

I dati e le informazioni disponibili concordano nell'attribuire un'età olocenica ai rock glacier attivi e inattivi (forme intatte che contengono ancora permafrost) e un'età più antica, risalente alle ultime fasi del Pleistocene, a quelli relitti, privi di materiale congelato al loro interno (Fig. 7). Questi ultimi sarebbero quindi riconducibili alle principali fasi del Tardiglaciale, in particolare agli stadi di Daun ed Egesen (Younger Dryas) (Kerschner 1978, 1980, 1985; Barsch 1996; Sailer & Kerschner 1999; Frauenfelder & Kääb 2000; Lambiel & Reynard 2001; Frauenfelder *et al.* 2001).

La distribuzione spaziale dei rock glacier relitti è stata utilizzata per effettuare ricostruzioni paleoclimatiche che hanno consentito di valutare la variazione di alcuni parametri climatici (in particolare la temperatura media annua e la quantità di precipitazioni) fra il Tardiglaciale, l'Olocene e il presente. Potenzialmente, è possibile utilizzare i rock glacier relitti per effettuare ricostruzioni paleoclimatiche quantitative, poiché la quota media della loro fronte definisce, in base alle condizioni climatiche attuali che determinano la presenza di forme attive, la paleo-quota regionale dell'isoterma media annua di  $-1/-2$  °C. Utilizzando tale metodo (incrociato con la ricostruzione delle variazioni di quota della ELA dei ghiacciai), ad esempio, è stato possibile stimare che nelle Alpi austriache le fasi di Daun ed Egesen sono state caratterizzate da marcate condizioni di aridità, con precipitazioni ridotte del 10-40% rispetto al presente (Kerschner 1980, 1985; Sailer & Kerschner 1999). In alcune aree, la quota della



Fig. 7 - Rock glacier relitto in Val Garmenega (Gruppo Adamello-Presanella). Questa forma non contiene più permafrost e si colloca a una quota di poco superiore a 2000 m s.l.m.

Fig. 7 - Relict rock glacier in Garmenega Valley (Adamello-Presanella Group). This landform doesn't contain permafrost anymore and is located just above 2000 m a.s.l.

fronte dei rock glacier nelle ultime fasi dello Younger Dryas (Egesen III) era più bassa di circa 400 m rispetto all'attuale, indicando una temperatura media annua più bassa di circa 3 °C rispetto al presente. Nelle Alpi svizzere è stato stimato un abbassamento della quota minima del permafrost (basato sulla distribuzione dei rock glacier relitti) di 500-600 m durante lo Younger Dryas, corrispondenti a una temperatura media annua inferiore di almeno 3 °C rispetto a quella attuale. Il contemporaneo abbassamento di quota della ELA dei ghiacciai è stato stimato in soli 300 m, suggerendo anche in questo caso una riduzione delle precipitazioni del 30-40% nelle ultime fasi del Tardiglaciale rispetto a oggi (Frauenfelder *et al.* 2001).

Nel territorio trentino, la documentazione sulla distribuzione dei rock glacier è sufficientemente accurata soltanto per quanto riguarda il Gruppo Adamello-Presanella e alcuni settori del Gruppo Ortles-Cevedale (Baroni *et al.* 2004; Seppi 2006). Nel primo, in particolare, i rock glacier relitti si trovano circa 420 m più in basso rispetto ai rock glacier attivi/inattivi. Se si considerano le forme esposte verso i quadranti settentrionali (N, NE e NW), la differenza di quota con i depositi attivi/inattivi è di circa 370 m, mentre se si osservano le forme esposte verso i quadranti meridionali (S, SE e SW) tale differenza sale a circa 510 m. Per quest'area non sono disponibili datazioni numeriche, ma sulla base dei risultati ottenuti nelle altre aree alpine è possibile attribuire un'età tardiglaciale ai rock glacier relitti. Applicando il gradiente termico calcolato per l'intero Gruppo Adamello-Presanella (Baroni *et al.* 2004), la differenza di quota fra forme attive/inattive e forme relitte corrisponde a una differenza di temperatura media annua di circa 2,5 °C. Tale valore consente di avere una stima approssimativa della variazione di temperatura media annua fra il Tardiglaciale (durante il quale i rock glacier attualmente relitti erano attivi) e il presente (Seppi 2006). Sarebbero necessarie, tuttavia, ulteriori indagini sia per datare più precisamente le forme relitte che per caratterizzare meglio il territorio studiato dal punto di vista climatico, soprattutto a scala locale.

## 5. CONCLUSIONI

La rassegna delle principali informazioni paleoambientali che è possibile ottenere da ghiacciai, morfologie glaciali e permafrost consente di trarre alcune considerazioni, riferendosi soprattutto al territorio alpino del Trentino.

- I ghiacciai del Trentino non possono essere utilizzati come archivi di informazioni paleoambientali, in quanto sono tutti di tipo temperato, sono collocati a quote troppo basse e anche sui bacini di accumulo più elevati sono esposti a fenomeni di fusione estiva.

- Le serie storiche di fluttuazione delle fronti e dei bilanci di massa sono lunghe al massimo qualche decennio e possono fornire soprattutto dati di tipo qualitativo sull'evoluzione recente dei ghiacciai in funzione delle condizioni climatiche. Le variazioni frontali, in particolare, rappresentano una risposta indiretta, devono essere depurate dai fattori locali e vanno valutate in funzione della qualità del dato raccolto sul terreno.
- In alcune aree alpine del Trentino sono ben documentate le espansioni più recenti dei ghiacciai, in particolare quelle risalenti all'Olocene e alla PEG. Sono state definite numerose date  $^{14}\text{C}$  e in alcuni casi è stato possibile mettere in relazione le variazioni di quota della ELA con le variazioni di temperatura. Le ricostruzioni paleoambientali basate sulla documentazione geomorfologica delle espansioni glaciali recenti sono certamente un settore d'indagine che per il territorio alpino trentino riserva ancora grandi potenzialità.
- Il monitoraggio a lungo termine delle condizioni del permafrost alpino in Trentino è agli inizi, ma potrebbe rivestire considerevole interesse anche per la ricerca paleoclimatica, soprattutto se venissero realizzate perforazioni profonde su roccia in posto. L'utilizzo della distribuzione di forme periglaciali relitte (rock glacier) per ottenere informazioni paleoambientali ha rilevanti potenzialità. Analisi di questo tipo sono state applicate soltanto su limitati settori alpini del Trentino e potrebbero essere estese a tutto il territorio.

## BIBLIOGRAFIA

- Baroni C., 2000 - Il comportamento dei ghiacciai alpini in risposta alle variazioni climatiche oloceniche. In: Antonioli F. (a cura di), *Le fluttuazioni del clima nel corso dell'Olocene. Il Quaternario*, 13/1: 100-103.
- Baroni C. & Carton A., 1991a - Vedretta di Pisgana (Gruppo dell'Adamello) geomorfologia e variazioni oloceniche della fronte. *Nat. Bresciana*, 26: 5-34.
- Baroni C. & Carton A., 1991b - Variazioni oloceniche della Vedretta della Lobbia (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 13: 105-119.
- Baroni C. & Carton A., 1996 - Geomorfologia dell'alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 19: 3-17.
- Baroni C., Carton A., Leso M., Martin S., Montresor L. & Rigatti G., 1998 - *Carta Geologica della Provincia di Trento. Sezione 042130 Laghi di Cornisello (scala 1:10000)*. Note Illustrative. Provincia Autonoma di Trento, Servizio Geologico: 40 pp.
- Baroni C., Carton A. & Seppi R., 2004 - Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps). *Permafrost and Periglac. Process.*, 15: 243-259.
- Barsch D., 1996 - *Rockglaciers: Indicators for the Present and Former geoecology in High Mountain Environments*. Springer, Berlin: 331 pp.
- Benn D.I. & Evans D.J.A., 1998 - *Glaciers and Glaciation*. Arnold, London: 734 pp.
- Borsato A., Miorandi R. & Flora O., 2006 - I depositi di ghiaccio ipogei della Grotta dello Specchio e del Castelletto di Mezzo (Dolomiti di Brenta, Trentino): morfologia, età ed evoluzione recente. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 81 (2004): 53-74.
- Calderoni G., Guglielmin M. & Tellini C., 1998 - Radiocarbon dating and postglacial evolution, Upper Valtellina and Livignese area (Sondrio, Central Italian Alps). *Permafrost and Periglac. Process.*, 9: 275-284.
- Carturan L., 2002 - Il Ghiacciaio del Caresèr: la più lunga serie italiana di bilanci di massa. *Nimbus*, 7/1-4 (1999): 60-69.
- Cozzi G. & Barbante C., 2004 - I ghiacciai alpini, archivi ambientali della qualità dell'aria: la valutazione dell'inquinamento da metalli pesanti negli ultimi secoli. In: Orombelli G. (a cura di), *Il ghiaccio nelle Alpi*. Bononia University Press, Bologna: 11-24.
- EPICA Community Members, 2004 - Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429: 623-628.
- Frauenfelder R. & Kääb A., 2000 - Towards a palaeoclimatic model of rock-glacier formation in the Swiss Alps. *Ann. Glaciol.*, 31: 281-286.
- Frauenfelder R., Haeberli W., Hoelzle M. & Maisch M., 2001 - Using relict rockglaciers in GIS-based modelling to reconstruct Younger Dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alps. *Norsk Geog. Tidsskrift-Norwegian Journ. Geogr.*, 55: 195-202.
- Frauenfelder R., Laustela M. & Kääb A., 2004 - Velocities and relative surface ages of selected Alpine rockglaciers. *Mitt. der VAW/ETH*, 184: 103-118.
- Giada M. & Zanon G., 2001 - Caratteri delle modificazioni areali, di livello e volumetriche per il Ghiacciaio del Caresèr (alto bacino del Noce-Adige, Gruppo Ortles-Cevedale) tra il 1990 e il 1997. *Geogr. Fis. Dinam. Quat., Suppl.*, 5: 129-146.
- Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia - CNR, 1986 - Ricerche geomorfologiche nell'alta Val di Peio (Gruppo del Cevedale). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 9: 137-191.
- Guglielmin M., 2004a - Il permafrost, componente critico dell'ambiente alpino e memoria paleoambientale. In: Orombelli G. (a cura di), *Il ghiaccio nelle Alpi*. Bononia University Press, Bologna: 115-135.
- Guglielmin M., 2004b - Observations on permafrost ground thermal regimes from Antarctica and the Italian Alps, and their relevance to global climate change. *Global Planet. Change*, 40: 159-167.
- Guglielmin M., Camusso M., Polesello S. & Valsecchi S., 2004 - An old relict glacier body preserved in permafrost environment: the Foscagno rock glacier ice core (Upper Valtellina, Italian Central Alps). *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 36: 108-116.

- Haerberli W., 2005 - Climate change and glacial/periglacial geomorphodynamics in the Alps: a challenge of historical dimensions. *Geogr. Fis. Dinam. Quat. Suppl.*, 7: 9-14.
- Haerberli W., Kääb A., Wagner S., Vonder Mühll D., Geissler P., Haas J.N., Glatzel-Mattheier H. & Wagenbach D., 1999 - Pollen analysis and  $^{14}\text{C}$  age of moss remains in a permafrost core recovered from the active rock glacier Murtèl-Corvatsch, Swiss Alps: geomorphological and glaciological implication. *Journ. Glaciol.*, 45: 1-8.
- Haerberli W., Brandova D., Burga C., Egli M., Frauenfelder R., Kääb A., Maisch M., Mauz B. & Dikau R., 2003 - Methods for absolute and relative age dating of rock-glacier surfaces in alpine permafrost. In: Phillips M., Springman S.M., & Arenson L.U., (eds), *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. Balkema Publishers, Lisse: 343-348.
- Harris C., Haerberli W., Vonder Mühll D. & King L., 2001 - Permafrost monitoring in the high mountain of Europe: the PACE project in its global context. *Permafrost and Periglac. Process.*, 12: 3-11.
- Harris C., Vonder Mühll D., Isaksen K., Haerberli W., Sollid J.L., King L., Holmlund P., Dramis F., Guglielmin M. & Palacios D., 2003 - Warming permafrost in European mountains. *Global Planet. Change*, 39: 215-225.
- IUGG (CCS)-UNEP-UNESCO-WMO, 2005 - *Glacier Mass Balance Bulletin. Bulletin No. 8 (2002-2003)*. Haerberli W., Noetzi J., Zemp M., Baumann S. & Frauenfelder R. (eds): 100 pp.
- Johnsen S.J., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Steffensen J.P., Clausen H.B., Miller H., Masson-Delmotte V., Sveinbjörnsdottir A.E. & White J., 2001 - Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journ. Quat. Science*, 16/4: 299-307.
- Kääb A., Haerberli W. & Gudmundsson H.G., 1997 - Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben Rock Glacier, Swiss Alps. *Permafrost and Periglac. Process.*, 8: 409-426.
- Kerschner H., 1978 - Paleoclimatic inferences from late Würm rock glaciers, Eastern Central Alps, Western Tyrol, Austria. *Arct. and Alp. Res.*, 10/3: 635-644.
- Kerschner H., 1980 - Outline of the climate during the Egesen advance (Younger Dryas, 11000-10000 BP) in the Central Alps of the Western Tyrol, Austria. *Zeitsch. Gletscherk. und Glazialgeol.*, 16: 229-240.
- Kerschner H., 1985 - Quantitative palaeoclimatic inferences from lateglacial snowline, timberline and rock glaciers data, Tyrolean Alps, Austria. *Zeitsch. Gletscherk. und Glazialgeol.*, 21: 363-369.
- Konrad S.K., Humphrey N.F., Steig E.J., Clark D.H., Potter N. & Pfeffer W.T., 1999 - Rock glacier dynamics and paleoclimatic implications. *Geology*, 27/12: 1131-1134.
- Lambiel C. & Reynard E., 2001 - Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes-Hérémence area (Western Swiss Alps). *Norsk Geog. Tidsskrift-Norwegian Journ. Geogr.*, 55: 219-223.
- Laustela M., Egli M., Frauenfelder R., Kääb A., Maisch M. & Haerberli W., 2003 - Weathering rind measurements and relative age dating of rockglacier surface in crystalline regions of the Eastern Swiss Alps. In: Phillips M., Springman S.M., & Arenson L.U., (eds), *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. Balkema Publishers, Lisse: 627-632.
- Maggi V., Smiraglia C., Novo A., Casati P., Delmonte B., Johnston P. & Rossi G., 2000 - Ice core drilling on Colle del Lys (Monte Rosa, Italian Alps): climate and environmental signals. *Boll. Geofis.*, 23: 57-66.
- Maggi V., Casati P., Uglietti C., Marino F., Filipazzi M., Stenni B., Udisti R. & Flora O., 2004 - I ghiacciai alpini archivi ambientali della qualità dell'aria: l'evoluzione del carico chimico e delle polveri atmosferiche nell'ultimo trentennio. In: Orombelli G. (a cura di), *Il ghiaccio nelle Alpi*, Bononia University Press, Bologna: 25-34.
- NGRIP Members, 2004 - High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431: 147-151.
- Orombelli G., 2003 - Il ghiaccio risorsa strategica della montagna. Convegno Internazionale La difesa della montagna, Roma 9-10 dicembre 2002. *Atti Convegni Linnei*, 196: 93-108.
- Orombelli G., 2005 - Cambiamenti climatici. *Geogr. Fis. Dinam. Quat. Suppl.*, 7: 15-24.
- Orombelli G. & Pelfini M., 1985 - Una fase di avanzata glaciale nell'Olocene superiore, precedente alla Piccola Glaciazione, nelle Alpi Centrali. *Rend. Soc. Geol. It.*, 8: 17-20.
- Paterson W.S.B., 1994 - *Physics of glaciers*. 3<sup>rd</sup> ed. Pergamon Press, New York: 480 pp.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E. & Stievenard M., 1999 - Climate and atmospheric history of the last 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.
- Sailer R. & Kerschner H., 1999 - Equilibrium-line altitudes and rock glaciers during the Younger Dryas cooling event, Ferwall group, western Tyrol, Austria. *Ann. Glaciol.*, 28: 141-145.
- Santilli M., Orombelli G. & Pelfini M., 2002 - Variations of Italian glaciers between 1980 and 1999 inferred by the data supplied by the Italian Glaciological Committee. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 25/1: 61-76.
- Schwander J., 2006 - Dating ice cores. *PAGES News*, 14/1: 21-22.
- Schwikowski M., 2006 - Paleoenvironmental reconstruction from Alpine ice cores. *PAGES News*, 14/1: 16-18.
- Seppi R., 2006 - I rock glaciers delle Alpi Centrali come indicatori ambientali (Gruppo Adamello-Presanella e settore orientale del Gruppo Ortles-Cevedale). Tesi di dottorato, non pubblicata, Università di Pavia: 199 pp.
- Siegenthaler U., Stocker T.F., Monnin E., Lüthi D., Schwander J., Stauffer B., Raynaud D., Barnola J.M.,



- Fischer H., Masson-Delmotte V. & Jouzel J., 2005 - Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 310: 1313-1317.
- Spahni R., Chappellaz J., Stocker T.F., Louergue L., Hausammann G., Kawamura K., Flückiger J., Schwander J., Raynaud D., Masson-Delmotte V. & Jouzel J., 2005 - Atmospheric methane and nitrous oxide of the Late Pleistocene from Antarctic ice cores. *Science*, 310: 1317-1321.
- Stenni B., 2005 - Applicazione degli isotopi stabili in paleoclimatologia: le carote di ghiaccio. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 80 (2003): 17-27.
- Traversi R., Becagli S., Castellano E., Severi M., Morganti A. & Udisti R., 2005 - Ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali per l'ultimo milione di anni di storia climatica della Terra, dall'analisi di carote di ghiaccio prelevate in Antartide. *Nimbus*, 11/3-4 (2003): 6-19.
- van Everdingen R., 1998 - *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*. International Permafrost Association: 230 pp.
- Zanon G., 1992 - Venticinque anni di bilancio di massa del ghiacciaio del Careser, 1966-67/1990-91. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 15: 215-220.