

CHIARA VANUZZO

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Via Emanuelli, Milano

## METODI E FINALITA' DELLA RICOSTRUZIONE DEL GLACIALISMO ANTICO

### I Introduzione

Scopo di questa relazione è quello di descrivere le finalità e alcuni dei metodi che possono essere utilizzati per ricostruire la storia dei ghiacciai alpini, nonché quello di presentare alcuni risultati preliminari raggiunti in una ricerca svolta studiando 143 ghiacciai della Valle d'Aosta.

I ghiacciai sono sempre stati uno degli elementi caratterizzanti il paesaggio alpino. Chiunque abbia osservato per più anni consecutivi lo stesso ghiacciaio avrà notato che si tratta di un corpo dinamico. Un ghiacciaio può infatti essere descritto come un sistema aperto, all'interno del quale si verificano il guadagno, l'accumulo, il trasferimento e la perdita di massa.

La fonte principale dell'accumulo è costituita dalle precipitazioni nevose, ma contribuiscono all'accumulo anche altri processi tra i quali le valanghe, l'acqua piovana che gela, la condensazione. L'ablazione include invece tutti i processi grazie ai quali il ghiacciaio perde neve e ghiaccio. I principali meccanismi attraverso i quali si realizza l'ablazione sono: la fusione, l'evaporazione e la rimozione di neve da parte del vento.

Il ghiacciaio trasferisce ogni anno dalla zona d'accumulo una quantità di massa sufficiente a compensare le perdite per ablazione; si tratta quindi di un equilibrio dinamico.

Quando un ghiacciaio si trova in equilibrio stazionario con l'ambiente e quindi con le condizioni climatiche, l'apporto di massa che si

verifica ogni anno è uguagliato dalla perdita di massa nella zona d'ablazione, il bilancio di massa sarà quindi uguale a zero. Se invece un ghiacciaio non viene più a trovarsi in equilibrio con le condizioni climatiche, se si verificano quindi variazioni nelle precipitazioni solide e nella temperatura media della stagione d'ablazione, si verificheranno delle modificazioni nel suo bilancio di massa, nella quota della Linea d'Equilibrio (Equilibrium Line Altitude - ELA) e quindi nel suo comportamento dinamico (fig. 1). Queste variazioni daranno luogo a modificazioni nella posizione della fronte, che sul terreno saranno leggibili in termini di evidenze geomorfologiche (depositi glaciali e forme di erosione).

La risposta di un ghiacciaio a variazioni climatiche non è istantanea, il ritardo è dell'ordine di  $10^2$  anni per i piccoli ghiacciai temperati, mentre anche di parecchie migliaia di anni per la calotta antartica e per quella groenlandese.

I ghiacciai possono quindi essere utilizzati per ricostruire la storia climatica, infatti dallo studio delle evidenze presenti sul territorio è possibile ricostruire la storia di un ghiacciaio e risalire alle diverse condizioni climatiche che hanno determinato un certo comportamento dinamico.

Per quanto riguarda invece lo studio delle cause climatiche, responsabili delle variazioni nel comportamento dinamico del ghiacciaio, va innanzitutto ricordato che il nostro sistema climatico è sempre stato caratterizzato da una variabilità più o meno accentuata. Attualmente la percezione che la sua instabilità possa essere dovuta anche all'intervento antropico ha reso ancora più attuale lo studio di tutti gli indicatori - tra i quali i ghiacciai - in grado di fornire indicazioni sulle condizioni del clima e sulle modificazioni in atto.

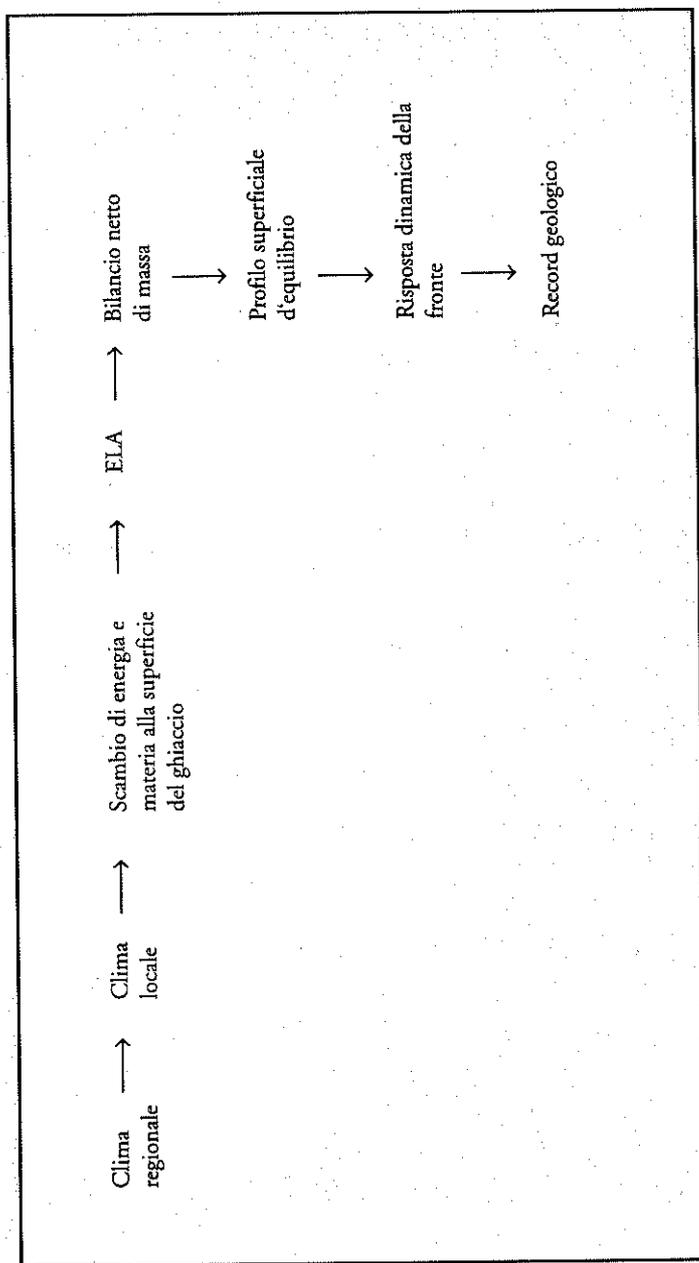


Fig. 1 - Relazioni esistenti tra un ghiacciaio, il clima e la risposta glaciale. Ridisegnato da Andrews (1975) e Porter (1981).

## 2 Finalità e metodi

Nella ricerca che viene presentata in questa relazione sono stati studiati 143 ghiacciai della Valle d'Aosta (fig. 2) e con maggior dettaglio i ghiacciai posti alla testata della Valpelline e della Valtournenche. L'intervallo di tempo considerato è quello che va dalla Piccola Età Glaciale alla seconda metà del XX secolo.

La Piccola Età Glaciale rappresenta una fase di espansione dei ghiacciai alpini sincrona su buona parte del pianeta, avvenuta in risposta a variazioni climatiche di limitata entità, ma registrate globalmente. Per parecchi ghiacciai localizzati sia nella regione alpina sia in altre aree dell'emisfero nord, questa avanzata è stata la maggiore nell'Olocene (Porter, 1981; 1986).

L'inizio della Piccola Età Glaciale, preceduta dal periodo caldo Medievale, può essere collocato tra il XIII e il XIV secolo A.D., il suo culmine va invece posto tra la metà del XVI e quella del XIX secolo (Grove, 1988).

Questo periodo è stato caratterizzato da un generale abbassamento della temperatura su buona parte del nostro pianeta, che ha avuto conseguenze importanti sia sull'ambiente che sulle condizioni di vita delle popolazioni interessate, in particolare quelle ubicate alle elevate latitudini e altitudini, dove esistono condizioni limite per la crescita delle piante e quindi per l'agricoltura. Per quanto riguarda l'arco alpino, esistono sia numerose testimonianze in forma di diari di viaggio, registri parrocchiali, rappresentazioni grafiche sia altrettanto numerosi dati provenienti da ricerche di terreno, volte alla ricostruzione e datazione delle avanzate glaciali nei secoli passati.

Come è già stato descritto nell'introduzione, lo studio della storia glaciale di una determinata zona permette di ricostruire le variazioni ambientali e climatiche di quella zona. Nella ricerca che

viene presentata in questa relazione, questo obiettivo primario è stato raggiunto attraverso quelli che potremmo definire dei sub-obiettivi e precisamente:

- calcolo della riduzione areale dei ghiacciai,
- calcolo della riduzione volumetrica dei ghiacciai,
- calcolo delle variazioni di quota della Linea d'Equilibrio.

I metodi utilizzati in questa ricerca sono stati:

- I - fotointerpretazione,
- II - indagini di terreno,
- III - documenti storici,
- IV - GIS.

### **I Fotointerpretazione**

Il metodo più immediato e semplice per ricostruire la massima estensione olocenica dei ghiacciai quello di individuare e mappare tramite fotointerpretazione i depositi glaciali ed in particolare le morene, relativi a questa fase di espansione. A tale scopo sono state utilizzate le foto aeree alla scala 1:15000.

In generale le morene attribuibili alla massima fase di espansione olocenica, che sulle nostre Alpi si è verificata durante la Piccola Età Glaciale, sono facilmente riconoscibili in foto aerea. Esse presentano la caratteristica forma a lama di coltello, con versanti a notevole pendenza (particolarmente quello interno). Sono generalmente caratterizzate dall'assenza di suolo o dalla presenza di un suolo poco sviluppato e le associazioni vegetali eventualmente presenti sono caratterizzate da specie pioniere.

## **II Indagini di terreno**

Tramite il lavoro di campagna è stato possibile verificare e definire con maggior dettaglio la massima estensione olocenica dei ghiacciai oggetto di questa ricerca. Gli strumenti di lavoro erano rappresentati da Carte Topografiche Regionali della Regione Autonoma Valle d'Aosta alla scala 1:10.000 e da ingrandimenti di foto aeree, che hanno permesso di verificare con dettaglio la fase di espansione della Piccola Età Glaciale.

Nell'immagine di fig. 3 è riportata l'imponente morena della Piccola Età Glaciale del Ghiacciaio di Cherillon in Valtournenche, in fig. 4 è invece visibile l'alta Valpelline ormai abbandonata dal ghiacciaio di Tsa de Tsan la cui fronte si è ritirata a quota 2560 m mentre nella Piccola Età Glaciale giungeva fino all'Alpe Gorgié (Vanni, 1939) a quota 2150 m. Sul versante destro è ben visibile una diversa colorazione, che indica una netta separazione tra la porzione inferiore del versante più chiara e con scarsa vegetazione, evidentemente coperto dal ghiacciaio nel secolo scorso e la parte superiore di colore più scuro e ben inerbita non interessata dall'azione del ghiaccio; questa linea permette di demarcare la massima quota raggiunta dal ghiacciaio nella Valle. In fig. 5 invece riportato il Ghiacciaio Des Grandes Murailles sempre in Valpelline che fino al 1960 confluiva nel Ghiacciaio di Tsa de Tsan, in questa immagine è visibile in primo piano la morena laterale sinistra del Ghiacciaio di Tsa de Tsan e un po' più in alto la morena laterale destra del Ghiacciaio Des Grandes Murailles che ci permette di ricostruire l'estensione del ghiacciaio nel secolo scorso. Interessante la foto di fig. 6 gentilmente concessa dalla Collezione Q. Sella di Biella scattata tra la fine del 1800 e l'inizio del 1900 in cui è visibile la massa glaciale del Ghiacciaio Des Grandes Murailles che confluiva nel Ghiacciaio di Tsa de Tsan a costituire il Basso Ghiacciaio di Tsa de Tsan.

### **III Documenti storici**

Della Piccola Età Glaciale esistono numerose testimonianze, sia in forma di scritti, diari di viaggio, registri parrocchiali, che di materiali iconografici, disegni, acquarelli, carte topografiche. L'utilizzo diretto di queste fonti o di articoli più recenti che di esse riferiscono, permette un'ulteriore verifica di quanto dedotto da foto aerea e sul terreno.

Va comunque ricordato che a volte antiche carte o disegni mancano di elementi topografici o sono troppo imprecisi per permettere una ricostruzione sufficientemente fedele della posizione del ghiacciaio.

#### **Ricostruzione della topografia dei ghiacciai durante la Piccola Età Glaciale**

Una volta definita la massima espansione olocenica, tramite l'utilizzo di tutti i metodi sopra citati, questa informazione è stata riportata sulle Carte Tecniche Regionali della Valle d'Aosta alla scala 1:10.000.

Si è poi proceduto per ciascun ghiacciaio alla ricostruzione della topografia della porzione inferiore, relativa alla massima estensione olocenica.

### **IV Sistemi Informativi Geografici**

Le informazioni cartografiche ottenute sono state informatizzate ed elaborate attraverso un GIS (Sistema Informativo Geografico). In questo modo sono stati ottenuti i dati relativi alle variazioni areali, volumetriche e di oscillazione della ELA.

Per poter trasferire le informazioni cartografiche al Sistema Operativo Intergraph, disponibile presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università degli Studi di Milano, sono

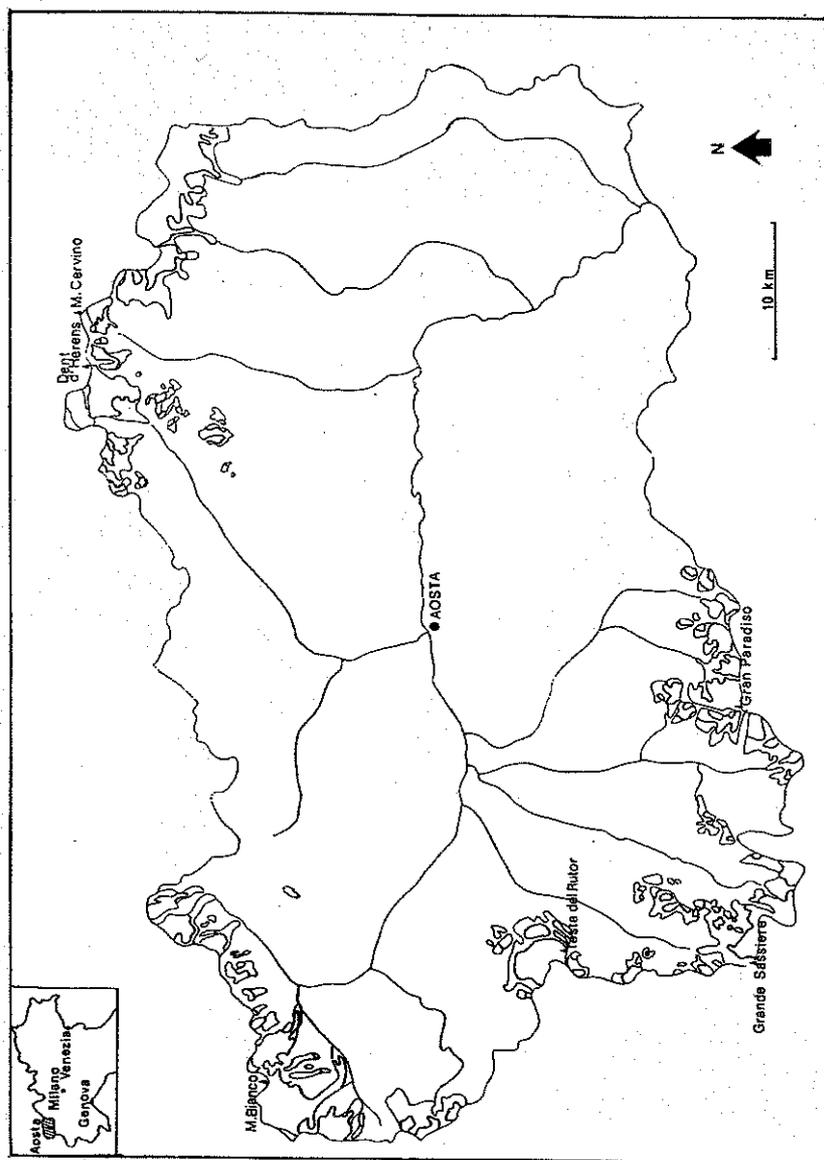


Fig. 2 - La Valle d'Aosta con i ghiacciai oggetto di questa ricerca. La linea spessa indica l'estensione dei ghiacciai nella seconda metà del XX secolo, la linea sottile la massima espansione raggiunta nella Piccola Età Glaciale.

stati riporati a china, su lucido indeformabile, i ghiacciai presenti su ciascuna carta topografica. I lucidi sono poi stati passati allo scanner, il risultato della lettura stato memorizzato in un file raster; successivamente è stata effettuata la vettorializzazione di ogni "file" raster ed infine la georeferenziazione di ogni "file".

In Ilwis è stata effettuata la poligonizzazione di ogni ghiacciaio, e successivamente ad ogni poligono compreso tra due curve di livello è stato attribuito un codice.

Al termine di questa operazione si è ottenuta una tabella di dati areali relativi ad ogni singola porzione di ghiacciaio compresa tra due successive curve di livello.

Questa tabella di dati areali è stata agevolmente gestita con semplici programmi di elaborazione statistica.

Sempre utilizzando Ilwis, disponendo della topografia attuale di ciascun ghiacciaio e di quella relativa alla Piccola Età Glaciale, è stata calcolata la differenza di volume di ghiaccio esistente tra la Piccola Età Glaciale e la situazione attuale. Ovviamente è stato possibile ottenere solo una informazione relativa alla differenza dei volumi poiché non si possiedono informazioni relative al substrato roccioso dei ghiacciai, che non ci permettono quindi di valutare il volume effettivamente occupato dai ghiacciai stessi.

### 3 Calcolo della Linea d'Equilibrio

La Linea d'Equilibrio di un ghiacciaio separa la zona d'accumulo da quella d'ablazione, in corrispondenza di tale linea quindi il bilancio di massa risulta uguale a zero.

L'altitudine a cui è localizzata tale linea è condizionata dalle precipitazioni nevose e dalla temperatura della stagione di ablazione.

Le oscillazioni di quota della Linea d'Equilibrio avvengono in

risposta alle variazioni del bilancio di massa di un ghiacciaio, che sono a loro volta funzione di variazioni meteorologiche (precipitazioni nevose e temperature estive).

Le condizioni climatiche esistenti in corrispondenza della ELA sono considerate quelle minime sufficienti per permettere l'esistenza dei ghiacciai, per questo motivo la conoscenza di tali condizioni è essenziale per comprendere le relazioni tra le variazioni climatiche e le oscillazioni glaciali. (Ohmura *et al.*, 1992).

Il metodo migliore per determinare la quota della Linea d'Equilibrio (ELA) attuale è quello di calcolare il bilancio di massa del ghiacciaio e individuare l'isoipsa in corrispondenza della quale tale bilancio risulta uguale a zero.

Tuttavia attualmente sono ancora pochi i ghiacciai per i quali sono disponibili dati sul bilancio di massa, e quindi sia per il calcolo della ELA attuale che per la sua ricostruzione nel passato, vengono utilizzati metodi indiretti. Quello che generalmente viene utilizzato è il metodo AAR. Questo metodo utilizza il rapporto tra l'area d'accumulo e l'area totale di un ghiacciaio che, per i ghiacciai alpini alle attuali condizioni climatiche, risulta essere uguale a 0.67 (AAR= Accumulation Area Ratio =  $A_{acc}/A_{tot} = 0.67$ ) (Braithwaite & Muller 1980).

Quindi anche per la realizzazione di questa ricerca per il calcolo della quota della Linea d'Equilibrio sia attuale sia relativa alla Piccola Età Glaciale è stato utilizzato il metodo AAR.

## 4 Risultati

### 4.1 Riduzione areale e volumetrica

I risultati ottenuti al termine delle indagini hanno evidenziato che i 143 ghiacciai studiati hanno subito un ritiro areale dalla Piccola Età Gla-

ciale ad oggi del 41,5%, si è infatti passati da una superficie complessiva di 270,6 km<sup>2</sup> durante la massima fase di espansione della Piccola Età Glaciale ai 158,4 km<sup>2</sup> attuali, con un ritiro complessivo di 112,2 km<sup>2</sup>.

Nell'istogramma di fig. 7 è riportato l'andamento della riduzione areale dei ghiacciai nei diversi gruppi montuosi della Valle d'Aosta.

La massima entità di ritiro si è avuta nel Gruppo del Grande Sassièrè con un valore pari al 56%, si passa poi al Gran Paradiso con un ritiro percentuale del 47%, al gruppo Cervino-Rosa con il 44%, al Rutor con il 39%, al gruppo del Dent d'Hérens con il 38% per giungere infine al Monte Bianco dove si è osservato il minimo valore di ritiro areale pari al 29%.

Per quanto riguarda nello specifico i ghiacciai posti alla Testata della Valpelline e della Valtournenche (fig. 8), i primi (Mont Braoule, Tsa de Tsan, Grandes Murailles, Petites Murailles, Château des Dames, Bella Tza, Solatset) hanno subito un ritiro complessivo del 29,21%, l'area glacializzata infatti è passata dai 20,13 km<sup>2</sup> durante la Piccola Età Glaciale ai 14,25 km<sup>2</sup> attuali, subendo una riduzione di 5,88 km<sup>2</sup>. I ghiacciai della Valtournenche (Mont Tabel, Cherillon, Alto del Leone, Basso del Leone, Pic Tyndall, Cervino, Forca, Teodulo, Valtournenche, Gran Sometta), hanno invece subito un ritiro complessivo maggiore rispetto dei ghiacciai della Valpelline. Complessivamente i 10 ghiacciai studiati ricoprivano nella massima fase di espansione della Piccola Età Glaciale un'area pari a 14,78 km<sup>2</sup>, mentre attualmente tale area si è ridotta a 5,88 km<sup>2</sup> con una riduzione quindi di 8,9 km<sup>2</sup> pari al 60,21%.

I ghiacciai che qui hanno maggiormente contribuito al ritiro sia in termini assoluti che in valore percentuale sono quelli di Valtournenche e del Teodulo. Questi due ghiacciai e quello della Gran Sometta, attualmente considerato estinto, durante la Piccola Età Glaciale costituivano un'unica ampia massa glaciale; anche oggi i due ghiacciai possono essere considerati come un unico corpo, anche se sono uniti solo nel bacino di accumulo e per una superficie assai limitata.

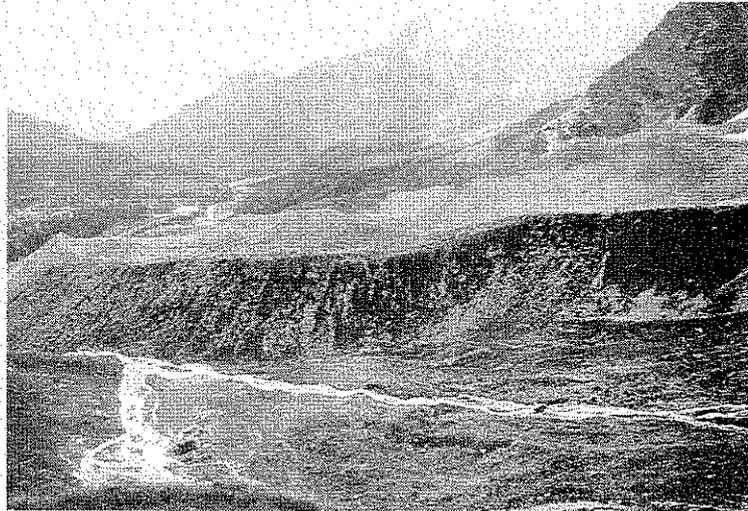


Fig. 3 - La morena ad andamento subcircolare della Piccola Età Glaciale del Ghiacciaio di Cherillon. In basso nella foto la morena di minori dimensioni della lingua sinistra, sempre del Ghiacciaio di Cherillon.



Fig. 4 - Alta Valpelline. Ben visibile sulla destra della foto il confine tra la la porzione superiore del versante vegetata e quella inferiore coperta da detriti ad indicare l'area occupata dal Ghiacciaio di Tsa de Tsan nella Piccola Età Glaciale.

In questo caso il controllo esercitato dalla topografia della porzione orientale della Conca di Cervinia, che si presenta a debole pendenza, è stato determinante nei confronti dell'entità del ritiro glaciale.

Per quanto riguarda invece la riduzione volumetrica dei 17 ghiacciai della Valpelline e della Valtournenche, essa risultata pari a 0,35 km<sup>3</sup> di ghiaccio. È importante ricordare a questo proposito che il valore di riduzione volumetrica è sicuramente sottostimato, poiché relativo essenzialmente alla perdita di volume nell'area di ablazione, infatti nella ricostruzione della topografia dei ghiacciai nella Piccola Età Glaciale si è ipotizzato che l'area d'accumulo sia rimasta invariata. Se ciò può essere vero per l'area, non lo è invece per quanto riguarda il volume; notevole infatti è la perdita di spessore che si è verificata nell'area di accumulo dei ghiacciai alpini.

#### **4.2 Variazioni di quota della Linea d'Equilibrio e brevi considerazioni paleoclimatiche**

Nella Piccola Età Glaciale la quota media della Linea d'Equilibrio, calcolata per i 143 studiati, era pari a 2845±165 m mentre la quota media attuale è di 3015±197 m.

I dati relativi alla risalita della ELA sono molto dispersi, la media di questi valori è pari a 139±106 m. Questo valore ha una deviazione standard molto elevata, ciò è dovuto alla grande variabilità delle modalità di ritiro dei ghiacciai e delle condizioni topografiche e di esposizione dei medesimi. Nello specifico si osserva che se si considerano solo i ghiacciai che nella fase di ritiro non si sono frazionati in tanti piccoli ghiacciai, ma hanno solo subito un ritiro frontale, si ottiene un valore di risalita della ELA pari a 129±69 m.

In Valpelline la quota media a cui era localizzata la Linea d'Equilibrio durante la Piccola Età Glaciale era 2869±160 m, mentre la

quota attuale è di 3004 $\pm$ 150 m; l'oscillazione media della ELA risulta essere stata pari a 135 $\pm$ 63 m.

Per quanto riguarda i ghiacciai dell'alta Valtournenche, la quota media della Linea d'Equilibrio nella Piccola Età Glaciale era pari a 2923 $\pm$ 152 m, mentre quella attuale è di 3132 $\pm$ 154 m, il valore medio di risalita della ELA è pari a 209 $\pm$ 80.

Poiché la ELA è funzione delle condizioni di temperatura e delle precipitazioni, il suo innalzamento di quota può in prima approssimazione dare informazioni sull'incremento di temperatura verificatosi nell'intervallo di tempo considerato.

Utilizzando il gradiente termico verticale medio annuo, il valore medio di risalita della ELA è stato trasformato in una variazione di temperatura, risultata pari a 0,7°C. Tale valore costituisce soltanto una prima approssimazione, poiché si deve assumere che il gradiente termico verticale medio annuo non sia variato e non si tiene conto dell'effetto dovuto alle precipitazioni, che viene comunque ritenuto secondario.

#### 4 Conclusioni

Lo studio dell'evoluzione dalla Piccola Età Glaciale ad oggi dei 143 ghiacciai studiati ha fornito ulteriori elementi per la comprensione della storia climatica e glaciale della Valle d'Aosta. I dati ottenuti hanno confermato il trend generale osservato su tutte le Alpi di una risalita della ELA, e una riduzione areale dei ghiacciai (Haeberli, 1995). La ricerca ha inoltre portato ulteriori evidenze della fase di riscaldamento globale, nella quale alla variabilità climatica naturale si sovrappone l'impatto antropico. Si ha quindi un'ulteriore conferma di come i ghiacciai siano degli strumenti essenziali per la ricostruzione della storia climatica passata, ma anche per il monitoraggio attuale del clima.



Fig. 5 - Il Ghiacciaio Des Grandes Murailles. In primo piano, in basso a sinistra, la morena laterale sinistra del Ghiacciaio di Tsa de Tsan, nel quale il Ghiacciaio Des Grandes Murailles confluiva fino al 1960. In secondo piano sempre sulla sinistra la morena laterale destra del Ghiacciaio Des Grandes Murailles.



Fig. 6 - Il Ghiacciaio Des Grandes Murailles tra la fine del 1800 e gli inizi del 1900, quando confluiva nel Ghiacciaio di Tsa de Tsan a formare il Basso Ghiacciaio di Tsa de Tsan (Collezione Q. Sella. Biella).

## BIBLIOGRAFIA

- Andrews J. T. (1975) - *Glacial Systems - an approach to glaciers and their environments*. Duxbury Press, Massachusetts.
- Braithwaite R. J. & Muller F. (1980) - *On the parametrization of glacier equilibrium line altitude*. Proceedings of the Riederlap Workshop, September 1978. IAHS - AISH Publ. 126, 263-271.
- Grove J. M. (1988) - *The Little Ice Age*. Methuen, London.
- Haeberli W. (1995) - *Glacier Fluctuations and Climate Change Detection-Operational Elements of a Worldwide Monitoring Strategy*. World Meteorological Organization Bulletin, 44, n. 1.
- Ohmura A., Kasser P., Funk M. (1992) - *Climate at the equilibrium line of glaciers*. Journal of Glaciology, 38, n. 130, 397-411.
- Porter S. C. (1981) - *Glaciological evidence of Holocene climatic change*. In Wigley, T. M. L., Ingram, M. J., and Farmer, G. (eds), "Climate and History". Cambridge, Cambridge Univ. Press.
- Porter S. C. (1986) - *Pattern and Forcing of Northern Hemisphere Glacier Variations during the Last Millennium*. Quaternary Research, 26, 27-48.
- Vanni M. (1939) - *Il ghiacciaio di Tsa-de-Tsan in Valpelline*. Bollettino Comitato Glaciologico Italiano, 19, 61-97.

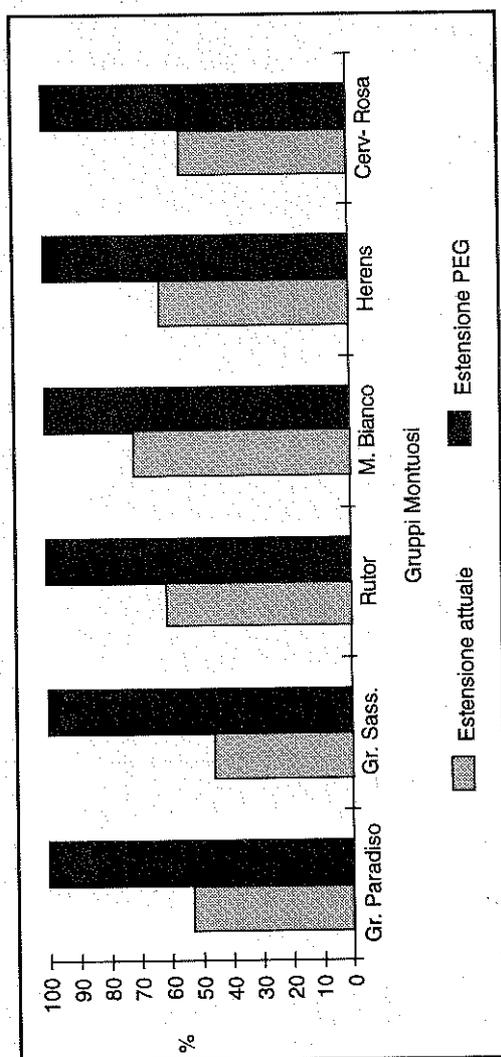


Fig. 7 - Istogramma dell'estensione areale attuale e nella Piccola Età Glaciale dei ghiacciai della Valle d'Aosta nei diversi Gruppi Montuosi.

