

SEVERINO BELLONI (*) & MANUELA PELFINI (**)

I GHIACCIAI ALPINI COME INDICATORI CLIMATICI

ABSTRACT: BELLONI S. & PELFINI M., *Glaciers as climatic indicators*. (IT ISSN 0391-9838, 1995).

In this work at first a short introduction shows the climatic elements which can be related to glacier physical parameters. Then the parameters related to the mass balance and the frontal movements are analyzed. Subsequently the relations between climate and mass balance and between cumulated frontal variations and cumulated mass balance are studied. Some indications about the response time of the glaciers to the climatic fluctuations are reported. These indications are obtained from physical and morphological parameters of the same studied glaciers. The studies about the relations between climatic variations and glacier frontal fluctuations published since 1932 are summarized. Finally a recent work showing the possibility to correlate time series of glacier frontal fluctuations to the dendrochronological series in order to obtain another evaluation of the response time of the glaciers is analyzed.

KEY WORDS: Glacier, Climatic indicators, Alps.

RIASSUNTO: BELLONI S. & PELFINI M., *I ghiacciai alpini come indicatori climatici*. (IT ISSN 0391-9838, 1995).

Dopo una breve introduzione sugli elementi del clima che possono essere messi in relazione con i parametri fisici dei ghiacciai, vengono analizzati i parametri connessi con il bilancio di massa e con le oscillazioni frontali dei ghiacciai. Sono poi analizzate le correlazioni fra clima e bilanci di massa e fra variazioni frontali cumulate e bilanci di massa cumulati.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Via Mangiagalli 34, 20133, Milano.

(**) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Via Emanueli 15, 20126, Milano.

Relazione presentata al Convegno «Cento anni di ricerca glaciologica in Italia», Torino 19-20 Ottobre 1995 (Lecture presented at the Meeting «100 years of glaciological research in Italy», Turin, 19-20 October 1995).

Lavoro realizzato e pubblicato con il contributo M.U.R.S.T. 60% anno 1993 e con il contributo C.N.R. (anno 1993) nell'ambito dei Programmi del Centro Studi per la Geodinamica alpina e la Geologia del Quaternario. Per quanto si riferisce alla ricerca, all'analisi dei dati ed alla stesura del testo, queste sono state eseguite in comune dai due autori; in particolare S. Belloni ha redatto i paragrafi relativi al clima e bilanci di massa, agli studi sulle correlazioni fra variazioni climatiche ed oscillazioni frontali, alle conclusioni e prospettive per il futuro, mentre M. Pelfini ha redatto i paragrafi relativi all'introduzione, ai bilanci di massa ed oscillazioni frontali, alla ricostruzione della superficie dei ghiacciai durante l'Olocene ed in epoca storica, alle correlazioni tra oscillazioni frontali dei ghiacciai e serie dendrochronologiche.

Seguono alcune indicazioni sulla valutazione del tempo di risposta dei ghiacciai alle variazioni climatiche, dedotte da parametri fisici e morfologici dei ghiacciai stessi. Vengono poi esaminati gli studi delle correlazioni fra variazioni climatiche ed oscillazioni frontali pubblicati dall'anno 1932 ad oggi. Infine viene analizzato un recente lavoro che mostra la possibilità di correlare le serie temporali delle oscillazioni frontali dei ghiacciai con le serie dendrochronologiche e di ottenere un'ulteriore valutazione del tempo di risposta.

TERMINI CHIAVE: Ghiacciaio, Indicatori climatici, Alpi.

INTRODUZIONE

È ben noto che per l'esistenza di un ghiacciaio occorre che, almeno durante alcuni mesi del periodo freddo dell'anno, le precipitazioni atmosferiche siano solide e che la neve caduta non fonda totalmente durante i mesi dell'estate, in modo da potersi accumulare sul terreno e trasformarsi dapprima in firn e quindi in ghiaccio. Dal punto di vista climatico l'esistenza di un ghiacciaio dipende quindi sia dalle condizioni termiche dell'atmosfera, che determinano il carattere delle precipitazioni e la permanenza di queste, se solide, sul terreno, sia dall'importo delle precipitazioni solide. Occorre inoltre una morfologia del terreno adatta all'accumulo ed al movimento.

Se si verificano le condizioni climatiche e morfologiche adatte al formarsi di un ghiacciaio, questo risulta costituito da un bacino di alimentazione o bacino collettore a monte e da un bacino dissipatore o lingua di ablazione a valle, separati dalla linea di equilibrio del ghiacciaio. La posizione estrema della lingua (fronte del ghiacciaio) varia sia nel corso dell'anno, sia di anno in anno a causa dell'accumulo a monte, dell'ablazione e della velocità del movimento del ghiacciaio. Per controllare se un ghiacciaio è in fase di avanzata o di ritiro è necessario misurare ogni anno alla stessa data la distanza della fronte rispetto ad uno o più capisaldi disposti in precedenza davanti alla fronte stessa. Altre tecniche di indagine prevedono confronti tra fotografie aeree o immagini da satellite per valutare le variazioni areali dei ghiacciai stessi.

Le condizioni climatiche favorevoli all'avanzata di un ghiacciaio sono date da un forte accumulo dovuto all'au-

mento delle precipitazioni nevose nei mesi freddi dell'anno ed alla presenza di basse temperature durante i mesi estivi che aumentano la durata del periodo di permanenza della neve sul terreno. Le condizioni favorevoli al ritiro sono invece costituite da scarse precipitazioni invernali e da temperature estive elevate. Fra queste due condizioni estreme, esistono tutte le possibili condizioni intermedie che determinano via via le risposte del ghiacciaio. I ghiacciai sono quindi, con l'avanzata o il ritiro delle loro fronti, ottimi indicatori climatici da un punto di vista qualitativo, ma è difficile valutare il momento dell'avanzata o del ritiro sotto la sollecitazione dei cambiamenti climatici, cioè il ritardo fra causa ed effetto o tempo di risposta, così come difficile è valutare l'entità dell'avanzata o del ritiro o sensibilità del ghiacciaio in funzione dell'entità dei cambiamenti climatici (maggiore o minore importo delle precipitazioni e minore o maggiore temperatura dei mesi estivi).

I parametri fisici di un ghiacciaio che possono essere messi in relazione con il clima sono il bilancio di massa e le oscillazioni frontali con i loro parametri derivati.

I parametri connessi con il bilancio di massa sono il bilancio di massa cumulato, l'altitudine della linea di equilibrio (ELA), le variazioni interannuali della ELA, il rapporto fra l'area di accumulo e l'area totale o fattore AAR, le variazioni interannuali del fattore AAR. I parametri connessi con le oscillazioni frontali sono le oscillazioni frontali cumulate, l'altitudine della fronte, l'area e le loro variazioni interannuali.

Gli studi sui bilanci di massa dei ghiacciai alpini hanno permesso di individuare la linea di separazione fra il bacino di accumulo di un ghiacciaio ed il bacino di ablazione. Lungo questa linea il bilancio accumulato-ablazione è uguale a zero; questa linea viene quindi chiamata linea di equilibrio. La ELA rimane costante nel tempo se il bilancio di massa annuale è uguale a zero (in un ghiacciaio in equilibrio dinamico); l'altitudine aumenta se il bilancio di massa è negativo e diminuisce se il bilancio di massa è positivo. Gli studi sui bilanci di massa hanno inoltre permesso di vedere come in un ghiacciaio alpino, in condizioni di equilibrio, il rapporto fra l'area di accumulo e l'area totale (fattore AAR) sia uguale a $0,67 \pm 0,05$ e come questo rapporto aumenti se il bilancio di massa risulta positivo e diminuisca nel caso contrario.

CLIMA E BILANCI DI MASSA

In merito alle correlazioni fra bilancio di massa di un ghiacciaio alpino e parametri climatici, ricordiamo il lavoro inedito di LUGARESI (1990) che mette in relazione il bilancio specifico di massa del Ghiacciaio della Sforzellina, relativo al quadriennio 1986/87-1989/90 con le somme delle temperature massime, medie e minime diurne del periodo caldo dell'anno da Maggio a Settembre e con le somme degli importi delle precipitazioni da Ottobre a Maggio della stazione meteorologica di Santa Caterina Valfurva, relative ad ogni anno del bilancio di massa. I risultati di questo studio hanno mostrato come significative la media delle temperature minime del mese di Agosto, la temperatura media

del mese di Agosto e le somme degli importi delle precipitazioni delle successioni dei mesi da Novembre a Febbraio, da Novembre a Marzo e da Dicembre a Febbraio. In questo lavoro è stata verificata la simultaneità fra causa ed effetto, cioè il tempo di risposta del bilancio di massa alle variazioni climatiche è risultato uguale a zero.

In un nostro studio sui parametri fisici dei ghiacciai alpini e sulla loro correlazione, sulla base dei dati relativi ai bilanci di massa, ai parametri connessi con questi ed alle oscillazioni frontali di venti ghiacciai delle Alpi nel periodo 1959-1990, è stato possibile verificare le elevate correlazioni della ELA rispetto al bilancio di massa, del fattore AAR rispetto al bilancio di massa, dei valori annuali della ELA rispetto al valore del fattore AAR e delle variazioni interannuali della ELA rispetto alle variazioni interannuali del fattore AAR. Tutte queste correlazioni hanno fornito i massimi valori del coefficiente di correlazione per i due parametri dell'anno o del biennio in corso.

I parametri finora esaminati sono strettamente connessi con il bilancio di massa, quindi il ritardo fra causa ed effetto è nullo, così come nullo è il ritardo fra cause climatiche e bilancio di massa. Si può quindi concludere che le cause climatiche agiscono immediatamente sia sul bilancio di massa di un ghiacciaio, sia sui parametri derivati, strettamente connessi con quest'ultimo.

A conferma di quanto sopra, ricordiamo il lavoro di OHMURA & *alii* (1992) sul clima all'altitudine della linea di equilibrio dei ghiacciai, nel quale, sulla base dei dati climatologici all'altitudine di questa e dei dati relativi ai bilanci di massa di settanta ghiacciai, a diverse latitudini, viene affermato quanto segue. Il clima all'altitudine della linea di equilibrio può essere definito dalla temperatura media dei mesi di Giugno, Luglio ed Agosto in atmosfera libera (T) all'altitudine di questa, dall'importo totale annuo delle precipitazioni (P) e dalla somma della radiazione globale e della radiazione netta ad onda lunga, entrambe all'altitudine della linea di equilibrio. Gli autori ritengono che esista una funzione di P e di T all'altitudine della linea di equilibrio, che soddisfi le condizioni per creare la linea di equilibrio dei ghiacciai. La migliore funzione delle condizioni climatiche della linea di equilibrio è la regressione polinomiale $P = a + bT + cT^2$, dove $a = 645$, $b = 296$, $c = 9$, P è espressa in millimetri e T è espressa in gradi centigradi. Inoltre il lavoro mostra come lo spostamento in altitudine della linea di equilibrio sia il risultato di un cambiamento climatico e come sia possibile valutare le variazioni del bilancio di massa come risultato di cambiamenti climatici.

BILANCI DI MASSA ED OSCILLAZIONI FRONTALI

Nel nostro lavoro è stata studiata anche la correlazione fra oscillazioni frontali cumulate (curva tempo-distanza) e bilancio di massa cumulato, che presenta il massimo valore del coefficiente di correlazione con un ritardo fra causa (bilancio di massa cumulato) ed effetto (variazione frontale cumulata) compreso fra tre e quindici anni, concentrato entro il quinto anno, oppure attorno al decimo anno o

più tardi. Questo lavoro ha quindi messo in evidenza un ritardo o tempo di risposta fra bilancio di massa cumulato e variazioni frontali cumulate.

In un recente lavoro sulle fluttuazioni dei ghiacciai e sui cambiamenti climatici, HAEBERLI (1995) afferma che la complessa catena di processi dinamici che mette in relazione i bilanci di massa con i cambiamenti di lunghezza dei ghiacciai è attualmente simulata numericamente soltanto per pochi individui glaciali, che sono stati studiati con grande dettaglio. Dopo un certo tempo di reazione che segue il cambiamento del bilancio di massa di un ghiacciaio, la sua lunghezza L inizierà a cambiare e raggiungerà una nuova condizione di equilibrio $L + \delta L$ dopo il tempo di risposta t_r . Successivamente, la continuità richiede che sia $\delta L = L \times \delta b/bt$, dove bt è l'ablazione annua alla fronte del ghiacciaio in metri e δb è la corrispondente variazione del bilancio di massa in metri. Il tempo di risposta t_r , espresso in anni, è definito dalla relazione $t_r = h_{max} / bt$, dove h_{max} è il massimo spessore del ghiacciaio in metri. Nello stesso lavoro è riportato un diagramma che mette in relazione il tempo di risposta con l'inclinazione media della superficie del ghiacciaio, valido per ghiacciai lunghi più di 2 km, dal quale risulta che il tempo di risposta aumenta con legge non lineare al diminuire dell'inclinazione media.

RICOSTRUZIONE DELLA SUPERFICIE DEI GHIACCIAI DURANTE L'OLOCENE IN EPOCA STORICA

Per poter mettere in relazione le variazioni della massa di un ghiacciaio con le variazioni climatiche è necessario conoscere il valore della ELA poiché le variazioni di questa sono sincrone con le variazioni climatiche. È già stato detto come in un ghiacciaio alpino, in condizioni di equilibrio o di stazionarietà, la linea di equilibrio sia ubicata ad un'altitudine tale che i 2/3 della superficie del ghiacciaio si trovino in area di accumulo ed 1/3 in area di ablazione ($AAR = 0.67 \pm 0.05$). Per valutare l'innalzamento della linea di equilibrio dalla massima espansione olocenica ad oggi, occorre innanzitutto ricostruire la superficie topografica precedente del ghiacciaio esaminando le evidenze geomorfologiche (morene laterali e frontali). Realizzando il lavoro sulla cartografia ufficiale, è possibile calcolare l'area attuale del ghiacciaio, le aree parziali comprese tra le isoipse equidistanti 100 m e costruire la corrispondente curva ipsografica necessaria per calcolare l'attuale altitudine della linea di equilibrio. Mediante la medesima tecnica è possibile ricostruire la massima espansione olocenica, che per la maggior parte dei ghiacciai italiani si è verificata durante la Piccola Glaciazione, le isoipse con equidistanza di 100 m della passata superficie glaciale utilizzando come punti di riferimento le quote sulle morene frontali più esterne e calcolare infine la ELA durante il massimo della Piccola Glaciazione. Ne deriva immediatamente, per differenza, l'innalzamento della quota della linea di equilibrio per l'intervallo di tempo considerato. Analogamente si può procedere per calcolare le variazioni dell'altitudine della linea di equilibrio in intervalli di tempo diversi, purché le morene

utilizzate siano datate. I metodi più utilizzati a tale proposito sono la lichenometria, la dendrocronologia, la datazione al radiocarbonio dei suoli sepolti, la documentazione storica. Ad esempio nel settore lombardo del Gruppo Ortles-Cevedale, dal culmine della Piccola Glaciazione (PELFINI, 1992, 1994) la linea di equilibrio si è innalzata di circa 100 m, corrispondenti ad un aumento della temperatura media annua di 0,5 °C.

CORRELAZIONI FRA VARIAZIONI CLIMATICHE ED OSCILLAZIONI FRONTALI

DESIO (1973) ricorda che la fronte di un ghiacciaio è la parte più sensibile alle variazioni dell'alimentazione e dell'ablazione, poiché essa segna il livello altimetrico nel quale alimentazione ed ablazione si fanno equilibrio. Un aumento dell'alimentazione provoca un abbassamento della fronte, ossia un allungamento del ghiacciaio che scende verso quote più basse e quindi a temperature medie atmosferiche più elevate, sino a quel livello in cui l'aumentata ablazione sarà in grado di eliminare tutto il ghiaccio che affluisce dall'alto. Viceversa, quando aumenta l'ablazione l'estremità inferiore del ghiacciaio viene consunta, trovandosi ad un livello altimetrico troppo basso e la fronte deve arretrare sino ad un livello in cui sia ristabilito l'equilibrio fra alimentazione ed ablazione. Le variazioni dell'alimentazione e dell'ablazione dipendono essenzialmente da fattori climatici come la temperatura e le precipitazioni atmosferiche, per cui anche le variazioni di volume e le oscillazioni delle fronti sono il riflesso di variazioni climatiche. Occorre tenere presente che gli effetti di una variazione climatica che si manifesta contemporaneamente su tutti i ghiacciai del territorio, soggetto a tale variazione, non si propagano contemporaneamente alle fronti dei ghiacciai e questi non ne risentono tutti nella stessa misura, a causa delle dimensioni differenti, della diversa configurazione dell'alveo, della diversa esposizione, cioè delle condizioni fisiche e morfologiche del ghiacciaio stesso. Per esempio, un periodo di incremento delle precipitazioni annue o di diminuzione della temperatura media si manifesta inizialmente col progresso di alcune fronti glaciali, mentre altre sono stazionarie ed altre sono ancora in ritiro. Poi a poco a poco tutte le fronti si mettono in fase e, se il periodo della variazione climatica è sufficientemente lungo, ad un certo momento tutte le fronti sono in fase di progresso. Invece se il periodo è breve, mentre i ghiacciai meno sensibili entrano in fase di avanzata, i più sensibili sono già in fase di ritiro.

Il tema delle relazioni fra oscillazioni frontali e clima è stato trattato in Italia in una serie di lavori apparsi nel periodo 1932-1991 (BELLONI, 1993). Fra questi lavori, ricordiamo qui i più importanti.

MONTERIN (1932) mette in relazione le oscillazioni frontali dei ghiacciai del Lys e del Trient con il clima all'Osservatorio del Gran San Bernardo nel periodo 1818-1931 e riconosce una serie di periodi pluriennali freddumidi e caldo-asciutti, favorevoli rispettivamente all'avanzata ed al ritiro dei ghiacciai studiati, che si sono verificati con modestissimi ritardi rispetto alle cause climatiche.

LOVERA (1948) mette in relazione le oscillazioni frontali dei ghiacciai studiati da MONTERIN col clima all'osservatorio del Gran San Bernardo ed effettua l'analisi periodale delle oscillazioni frontali e dei parametri climatici, ricavandone periodi compresi fra trenta e trentaquattro anni. L'Autore osserva come gli anni delle massime velocità di ritiro e di avanzata dei ghiacciai cadano rispettivamente entro gli intervalli caldo-seccchi e freddo-umidi.

TONINI (1963), per studiare le oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Calderone, propone l'impiego di un indice di glaciazione, connesso con le precipitazioni e con la temperatura di un determinato periodo e ne costruisce i climogrammi mensili e stagionali. L'Autore ritiene favorevoli alla fase di progresso di un ghiacciaio i climogrammi con periodo di accumulo (inverno, primavera) freddo-umido e periodo di fusione (estate, autunno) caldo-secco e viceversa per la fase di ritiro.

BELLONI (1967) confronta le oscillazioni frontali di dieci ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedale nel periodo 1920-1966 con i parametri climatici di alcune stazioni meteorologiche del gruppo montuoso ed applica il principio della sovrapposizione degli effetti delle condizioni climatiche favorevoli o sfavorevoli all'accumulo nivale ed alla sua permanenza sul terreno. I risultati del confronto fra oscillazioni frontali dei ghiacciai studiati e clima sono stati i seguenti: esistenza di un ritardo fra causa climatica ed oscillazione frontale e diversa sensibilità dei ghiacciai alle stesse cause climatiche.

CERRUTI (1971, 1975, 1977) mette in relazione le avanzate delle fronti di alcuni ghiacciai del Gruppo del Monte Bianco dal 1963 al 1970 con le precipitazioni annue e con le variazioni dell'altitudine dell'isoterma di 0°C, valuta la durata dell'ablazione glaciale in funzione dell'altitudine dei bacini collettori e dell'equivalente in acqua delle precipitazioni nevose e riconosce i periodi 1936-1940 e 1951-1955 come favorevoli al glacialismo, studia le correlazioni fra le variazioni dell'alimentazione e le oscillazioni frontali nel periodo 1936-1973 sulla base della posizione degli archi morenici frontali ed osserva come gli avanzamenti delle fronti si siano verificati in periodi favorevoli al ritiro, dal punto di vista climatico, a causa dell'utilizzo dei dati climatici di stazioni meteorologiche ubicate nel fondovalle e non all'altitudine dei bacini collettori.

RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO (1982) correlano le oscillazioni frontali di tre ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1979 con la temperatura media da Maggio ad Ottobre e con le precipitazioni annue nello stesso periodo ed analizzano la ciclicità delle serie temporali studiate riconoscendo come più significative le correlazioni con le temperature medie estive e con le precipitazioni invernali con un ritardo fra causa ed effetto di alcuni anni.

BELLONI & alii (1985, 1986) in due lavori, il primo relativo al periodo 1950-1982 ed il secondo al periodo 1920-1983, mettono in relazione le serie temporali delle oscillazioni frontali di venti ghiacciai alpini nel primo lavoro e di diciannove nel secondo con parametri termici e pluviometrici di stazioni meteorologiche dell'Italia Settentrionale opportunamente scelte. Gli sfasamenti fra cause climatiche ed oscillazioni frontali sono risultati in media di sette anni per le cause termiche e di nove anni per le cause

pluviometriche e le migliori correlazioni sono state ottenute per le stazioni più lontane dai ghiacciai.

CERUTTI (1986) esamina le variazioni frontali di quattro ghiacciai del Gruppo del Monte Bianco e le confronta con le variazioni frontali di tre ghiacciai del Gruppo del Monte Rosa nel periodo 1810-1983 e constata come le variazioni di fase (avanzata-ritiro e ritiro-avanzata) non siano contemporanee nei due gruppi montuosi a causa delle differenti altitudini del limite delle nevi persistenti e della diversa posizione geografica. L'esame dei parametri climatici delle stazioni meteorologiche dei due gruppi montuosi ha mostrato inoltre come ogni espansione glaciale sia stata preceduta da un aumento delle precipitazioni e da un abbassamento dello zero termico durante il mese di Luglio, verificatosi non più di cinque anni prima dell'inizio del progresso frontale.

SERANDREI BARBERO & alii (1990) analizzano le misure annuali alle fronti di ghiacciai delle Alpi Giulie, in corso dal 1921 e le correlano con i parametri climatologici di alcune stazioni meteorologiche locali e ricavano il corrispondente tempo di risposta.

BELLONI & alii (1991) correlano le fluttuazioni frontali dei Ghiacciai della Sforzellina e del Dosegù dal 1926 al 1989 con le somme delle temperature medie mensili da Maggio ad Ottobre e con le somme degli importi delle precipitazioni mensili da Ottobre a Maggio della stazione meteorologica di Sondrio e ne ricavano le successioni di mesi più significative con i relativi tempi di risposta.

CORRELAZIONI FRA OSCILLAZIONI FRONTALI E SERIE DENDROCRONOLOGICHE

In Italia mancano stazioni meteorologiche ubicate all'altitudine dei ghiacciai, oppure le poche stazioni di alta quota funzionano soltanto in alcuni periodi dell'anno, durante parte del periodo di permanenza del manto nevoso o nei mesi estivi. Le stazioni di fondovalle sono più frequenti, ma presentano spesso condizioni climatiche molto diverse da quelle delle stazioni in quota a causa della loro ubicazione topografica che è condizionata dall'altitudine, dalla morfologia della valle, dalla sua esposizione, dal dislivello rispetto allo spartiacque. Inoltre le serie storiche delle stazioni di fondovalle sono spesso molto brevi e talora discontinue; pertanto le risposte più significative si ottengono utilizzando stazioni che sono spesso lontane dai ghiacciai. Una possibile soluzione del problema può venire dall'utilizzazione di dati biologici, come le serie dendrocronologiche. Gli anelli di accrescimento arboreo hanno infatti uno spessore che è anche funzione delle condizioni climatiche al contorno e la risposta della vegetazione alle condizioni climatiche è pressoché immediata. È quindi possibile, attraverso la correlazione dei dati delle oscillazioni frontali dei ghiacciai con le curve dendrocronologiche, costruite per la stessa regione, valutare il tempo di risposta dei ghiacciai vicini anche in assenza dei dati strumentali. PELFINI & alii per il Ghiacciaio del Lys, attraverso un'indagine dendrogeomorfologica eseguita su oltre 200 larici campionati nell'alta Valle di Gressoney, hanno calcolato il tempo di risposta, ottenendo un valore di cinque anni. Tale va-

lore è confermato dal risultato ottenuto correlando le variazioni frontali con le variazioni di temperatura della stazione del Lago Gabiet.

Gli alberi che meglio si prestano ad indagini di questo tipo sono quelli ubicati all'esterno della massima espansione olocenica dei ghiacciai. Tali alberi probabilmente risentono del clima che interessa la testata valliva senza tuttavia essere disturbati dall'eccessiva vicinanza della massa glaciale. L'utilizzo di una serie dendrocronologica come serie di riferimento rappresenta quindi un buon punto di partenza poichè il tempo di risposta viene calcolato rispetto alla sintesi delle variabili climatiche, operata dall'albero stesso. Numerosi ghiacciai vallivi inoltre hanno raggiunto le zone boscate durante le loro fasi di avanzata dalla Piccola Glaciazione in poi pertanto la registrazione arborea degli eventi è disponibile ovunque, a patto di trovare alberi sufficientemente vecchi e serie di misure delle variazioni frontali.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Da quanto scritto fin qui, si può concludere che la ricerca delle relazioni fra variazioni climatiche ed oscillazioni frontali dei ghiacciai, in corso da quasi un secolo, non può considerarsi ultimata, ma merita ulteriori approfondimenti in tutti i settori descritti nel presente lavoro. In particolare, la valutazione del tempo di risposta, messa in luce dall'analisi numerica della migliore correlazione fra serie temporali glaciologiche e climatiche non in fase, potrebbe essere valutata con maggiore precisione mediante l'analisi periodale delle serie temporali stesse. La stima dello spessore massimo dei ghiacciai, la misura dell'ablazione annua

alla fronte e la misura dell'inclinazione della loro superficie permetteranno di avere un'altra valutazione del tempo di risposta e di confrontarla con le stime ottenute con altri metodi. Ulteriori studi sulle correlazioni fra serie temporali delle oscillazioni frontali dei ghiacciai e serie dendrocronologiche forniranno un'altra stima del tempo di risposta. Infine la ricostruzione delle superfici topografiche dei ghiacciai in tempi storici, ottenuta mediante la datazione assoluta delle morene laterali e frontali e la ricostruzione della relativa linea di equilibrio e della sua altitudine, potranno permettere di risalire alle condizioni climatiche storiche alla quota della linea di equilibrio stessa.

BIBLIOGRAFIA

- BELLONI S. (1993) - *Oscillazioni frontali dei ghiacciai italiani e clima: un sessantennio di ricerche*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 15, 43-57.
- DESIO A. (1973) - *Geologia applicata all'ingegneria*. Hoepli, Milano, 1193 pp.
- HAEBERLI W. (1995) - *Glacier fluctuations and climate change detection - operational elements of a worldwide monitoring strategy*. World Meteor. Organiz. Bull., 44, 1, 23-31.
- LUGARESI C. (1990) - *Il bilancio di massa del Ghiacciaio della Sforzellina nel periodo 1986/87-1989/90*. Sottotesi di laurea inedita a.a. 1989-90, Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano, 1-46.
- OHMURA A., KASSER P & FUNK M. (1992) - *Climate at the equilibrium line of glaciers*. Journ. Glaciol., 38, 130, 397-411.
- PELFINI M. (1992) - *Le fluttuazioni glaciali oloceniche nel Gruppo Ortles-Cevedale (settore lombardo)*. Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra, Tesi di Dottorato IV ciclo, 1988-1991, 1-211.
- PELFINI M. (1994) - *Equilibrium Line Altitude (ELA) variations recorded by Ortles-Cevedale glaciers (Lombardy, Italy) from the Little Ice Age to present*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 17, 197-206.