

SEVERINO BELLONI (*)

OSCILLAZIONI FRONTALI DEI GHIACCIAI ITALIANI E CLIMA: UN SESSANTENNIO DI RICERCHE

Abstract: BELLONI S., *Fluctuations of the termini of some Italian glaciers and climate: Sixty years of research.* (IT ISSN 0391-9838, 1992).

Here, studies about the relationships between glacier termini fluctuations and climatic factors, which were carried out in Italy from 1932 to 1990, are considered. The first works here described are those by MONTERIN (1932) and LOVERA (1948), regarding fluctuations of Lys Glacier terminus and climatic variations as observed at Gran San Bernardo from 1818 to 1931. Others studies considered at first are those by TONINI (1963), about fluctuations of Calderone Glacier terminus from 1925/26 to 1959/60 in relation to glaciation index variations as deduced from thermic and pluvial parameters, and BELLONI (1967) on termini fluctuations, as observed in ten glaciers of the Ortler-Cevedale group from 1921 to 1963, on annual precipitations as well as mean summer temperature variations at Bormio, and on elevation of the snow cover at Santa Caterina di Valfurva. Then the following studies are described: JANIN (1970), who reexamined the comparison between Lys Glacier terminus fluctuations and climate at Colle del Gran San Bernardo by MONTERIN (1932) and extended the study up to the period from 1931 to 1964. CERUTTI (1971, 1975, 1977), who related the advance of Monte Bianco glaciers from 1963 to 1970 with fluctuations of the mean elevation of the 0 °C isothermal line and with increasing precipitations. Furthermore, the Autor examines the duration of ablation in catchment basins of the glaciers on the basis of the monthly elevation of the 0 °C isothermal line and observed that the time of response of the glaciers to climatic changes is connected with the amount of precipitation. RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO (1982) took into consideration termini fluctuations of the glaciers of the Julian Alps from 1920 to 1979 and related these changes to mean annual and summer temperatures as well as to annual precipitations at Cave del Predil, in order to define response times. BELLONI & alii (1985, 1986) examined termini fluctuations of about twenty alpine glaciers and related them with thermal and pluvial parameters as observed in two groups of weather stations in Northern Italy, thus obtaining the time of delay between cause and effect for thermal and pluviometric parameters analyzed both separately and simultaneously. CERUTTI (1986) considered termini fluctuations of some glaciers of Monte Bianco and Monte Rosa and observed that the variations occurred in the two mountain groups are related with their geographic setting and climate. SMIRAGLIA (1987) examined terminus fluctuations of Ventina Glacier and the time of response between climate variations and their effects from 1924 to 1983. SERANDREI BARBERO & alii (1990) analyzed termini fluctuations of the glaciers of the Eastern Alps from 1921 up to the present time and related these variations both with summer temperature and winter precipita-

tions. Furthermore, the Authors measured times of response. BELLONI & alii (1991) related termini fluctuations of two glaciers of Upper Valtellina from 1926 to 1989 with parameters derived from mean monthly temperatures measured in the period May-September and from precipitations occurred from October to September at Sondrio; then the Authors calculated times of response both for thermal and pluviometric causes. SMIRAGLIA & VEGGETTI (1991) extended the method of study for the relationship between Calderone Glacier terminus fluctuations and glaciation index of TONINI (1963). Finally, an unpublished study relates data of mass-balance for Sforzellina Glacier from 1986/87 to 1989/90 with thermal and pluviometric parameters.

KEY WORDS: Climatology, Glaciology, Statistics, Italian Alps, Apennines.

Riassunto: BELLONI S., *Oscillazioni frontali dei ghiacciai italiani e clima: un sessantennio di ricerche.* (IT ISSN 0391-9838, 1992).

Sono analizzati gli studi del periodo 1932-1990 sulle relazioni fra le variazioni frontali dei ghiacciai italiani ed i parametri climatici. Dapprima vengono descritti i lavori di MONTERIN (1932) e di LOVERA (1948) sulle oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Lys e le variazioni del clima del Gran San Bernardo dal 1818 al 1931, il lavoro di TONINI (1963) sulle oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Calderone dal 1925/26 al 1959/60 e le variazioni dell'indice di glaciazione, dedotto da parametri termici e pluviometrici ed il lavoro di BELLONI (1967) sulle oscillazioni frontali di dieci ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedale dal 1921 al 1963 e le variazioni delle precipitazioni annue e della temperatura media estiva a Bormio e dell'altezza del manto nevoso a Santa Caterina Valfurva. Sono poi descritti i seguenti studi. JANIN (1970) riprende il confronto, già effettuato da MONTERIN (1932), fra le oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Lys e il clima del Colle del Gran San Bernardo e lo estende dal 1931 al 1964. CERUTTI (1971, 1975, 1977) mette in relazione l'avanzata dei ghiacciai del Monte Bianco dal 1963 al 1970 con la variazione della quota media stagionale dell'isoterma di 0 °C e con l'aumento delle precipitazioni, esamina la durata dell'ablatione nei bacini collettori dei ghiacciai sulla base dell'altitudine mensile dell'isoterma di 0 °C ed osserva come i tempi di risposta dei ghiacciai ai cambiamenti climatici siano in relazione con gli importi delle precipitazioni. RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO (1982) esaminano le oscillazioni frontali dei ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1979 e le correlano con le temperature medie annue ed estive e con le precipitazioni annue a Cave del Predil, per definire i tempi di risposta relativi. BELLONI & alii (1985, 1986) esaminano le variazioni frontali di una ventina di ghiacciai alpini e le correlano con i parametri termici e pluviometrici di due gruppi di stazioni meteorologiche dell'Italia Settentrionale ricavando il ritardo fra causa ed effetto per i parametri termici e pluviometrici analizzati singolarmente e simultaneamente. CERUTTI (1986) esamina le oscillazioni frontali di alcuni ghiacciai del Monte Bianco e del Monte Rosa e osserva come le variazioni nei due gruppi montuosi siano connesse con la posizione geografica e col clima degli stessi. SMIRAGLIA (1987) esamina le variazioni frontali del Ghiacciaio della Ventina ed il tempo di risposta fra cause climatiche ed effetto nel periodo 1924-1983. SERANDREI BARBERO & alii (1990) analizzano le va-

(*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano Sezione di Geologia e Paleontologia, via Mangiagalli, 33 - 20133 Milano. Lavoro eseguito con il contributo M.U.R.S.T., fondi 40% anno 1989. L'autore ringrazia la Sig.ra M. Vergnano Minoli che ha disegnato le figure e composto le tabelle che illustrano il lavoro.

Comunicazione presentata al VI Convegno Glaciologico Italiano, Gressoney, 26-28 Settembre 1991 (Communication presented at the 6th Italian Glaciological Meeting, Gressoney, 26-28 September, 1991).

riazioni frontali dei ghiacciai delle Alpi Orientali dal 1921 ad oggi, le mettono in relazione con la temperatura estiva e con le precipitazioni invernali e ne misurano il tempo di risposta. BELLONI & *alii* (1991) mettono in relazione le variazioni frontali di due ghiacciai dell'Alta Valtellina dal 1926 al 1989 con parametri derivati dalle temperature medie mensili da Maggio a Settembre e dalle precipitazioni dei mesi da Ottobre a Settembre a Sondrio e ne calcolano i tempi di risposta per cause termiche e pluviometriche. SMIRAGLIA & VEGGETTI (1991) estendono dal 1962 al 1979 il metodo proposto da TONINI (1963) per lo studio delle relazioni fra variazioni frontali del Ghiacciaio del Calderone e indice di glaciazione. Infine, in un lavoro non pubblicato, sono correlati i dati del bilancio di massa del Ghiacciaio della Sforzellina dal 1986/87 al 1989/90 con i parametri termici e pluviometrici.

TERMINI CHIAVE: Climatologia, Glaciologia, Statistica, Alpi Italiane, Appennini.

INTRODUZIONE

La presente comunicazione ha per argomento lo studio delle correlazioni fra parametri climatici e posizioni delle fronti dei ghiacciai italiani. Il tema delle relazioni fra clima e dinamica dei ghiacciai è stato trattato in Italia da vari autori a partire dal 1932 ed è tuttora argomento di studio e di ricerca.

In questa comunicazione verranno passati in rassegna ed analizzati in primo luogo i lavori italiani sull'argomento e, successivamente, saranno fornite notizie su studi non ancora pubblicati o a carattere sperimentale e perciò suscettibili di un maggiore approfondimento.

GLI STUDI NEL PERIODO 1932-1967

Gli autori che hanno affrontato nel periodo in esame, con diverse metodologie, il tema delle relazioni fra oscillazioni frontali dei ghiacciai e clima furono MONTERIN (1932), LOVERA (1948), TONINI (1963) e BELLONI (1967).

MONTERIN (1932) mette in relazione le variazioni secolari del clima del Gran San Bernardo, alla stazione meteorologica dell'Ospizio all'altitudine di 2 467 m s.m., dal 1818 al 1931 con le oscillazioni del Ghiacciaio del Lys, sul versante meridionale del M. Rosa, dal 1789 al 1931. Il lavoro inizia con la descrizione dei periodi di ritiro e di avanzata della fronte del Ghiacciaio del Lys. Quindi l'autore esamina gli scarti fra la temperatura media annua di ogni singolo anno idrologico (con inizio al 1° novembre di ogni anno e termine al 31 Ottobre dell'anno seguente) dal 1818 al 1931 e la temperatura media annua normale dell'intero periodo di 113 anni. Sempre con riferimento alle temperature medie annue sono stati poi esaminati gli scarti fra i valori della media mobile di ordine cinque e la temperatura media annua normale. Lo stesso esame è stato successivamente eseguito per le temperature medie del semestre estivo da Maggio a Ottobre e del semestre invernale da Novembre ad Aprile. Sempre con riferimento all'anno idrologico, sono stati esaminati sia gli scarti fra gli importi totali delle precipitazioni di ogni singolo anno dal 1818 al 1931 e l'importo medio annuo normale dell'intero periodo, sia gli scarti fra i valori delle medie mo-

bili d'ordine cinque degli importi annui delle precipitazioni e l'importo annuo normale. Gli stessi esami sono stati poi eseguiti per le precipitazioni del semestre estivo da Maggio a Ottobre e del semestre invernale da Novembre ad Aprile. Infine sono state esaminate le precipitazioni nevose calcolando gli scarti fra l'altezza totale della neve caduta durante ogni singolo anno idrologico e l'altezza media annua normale nel periodo 1845-1931, nonché gli scarti fra i valori delle medie mobili d'ordine cinque e l'altezza media annua normale.

Al termine del lavoro l'autore esamina anche le oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Trient dal 1878 al 1930 che mostrano notevoli analogie con quelle del Ghiacciaio del Lys.

Nella successione degli scarti termici, pluviometrici e nivometrici annuali dal 1818 al 1931, l'autore riconobbe una serie di periodi pluriennali freddo-umidi e caldo-asciutti, caratterizzati da condizioni climatiche opposte ed ai quali corrisposero periodi di avanzata e di ritiro del Ghiacciaio del Lys e del Ghiacciaio del Trient, che si manifestarono in modo quasi immediato, cioè nel giro di pochissimi anni, rispetto alle cause climatiche. L'autore osservò inoltre come i periodi delle massime precipitazioni nevose corrisposero ai periodi delle temperature estive minime e degli inverni tiepidi, mentre ai periodi delle massime temperature estive corrisposero, in genere, quelli di minima nevosità. Assume perciò grande importanza la corrispondenza dei periodi delle massime precipitazioni nevose con quello delle minime temperature estive, poiché nello stesso periodo di anni si presentano i due fattori essenziali allo sviluppo delle masse glaciali, cioè il massimo contributo nivale in concomitanza con il minimo dissipamento estivo. Nella fig. 1 sono stati riportati sette diagrammi che hanno in ascissa gli anni dal 1818 al 1931 e, in ordinata, gli scarti dai valori normali dei valori annuali e delle medie mobili d'ordine cinque dei valori della temperatura media annuale da Novembre a Ottobre, della temperatura media del semestre estivo da Maggio a Ottobre, della temperatura media del semestre invernale da Novembre ad Aprile, dell'importo annuo delle precipitazioni da Novembre a Ottobre, dell'altezza della neve caduta da Novembre a Ottobre, delle oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Trient e del Ghiacciaio del Lys. Questi diagrammi evidenziano quanto è stato osservato da MONTERIN (1932) sulle relazioni fra clima e oscillazioni del Ghiacciaio del Lys.

LOVERA (1948) confronta le oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Lys e del Ghiacciaio di Trient con le precipitazioni nevose annue e le temperature medie estive all'osservatorio del Gran San Bernardo, mediante l'analisi periodale delle curve proposte da MONTERIN (1932). L'autore ha messo in evidenza come le oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Lys hanno presentato una successione di onde di periodo diverso; fra queste l'onda di maggior ampiezza o fondamentale presenta un periodo di 33,7 anni. L'analoga onda fondamentale delle precipitazioni nevose ha un periodo di 34 anni e l'onda fondamentale delle temperature medie estive ha un periodo di 30 anni, come si può vedere nella fig. 2, che riporta quattro diagrammi, che

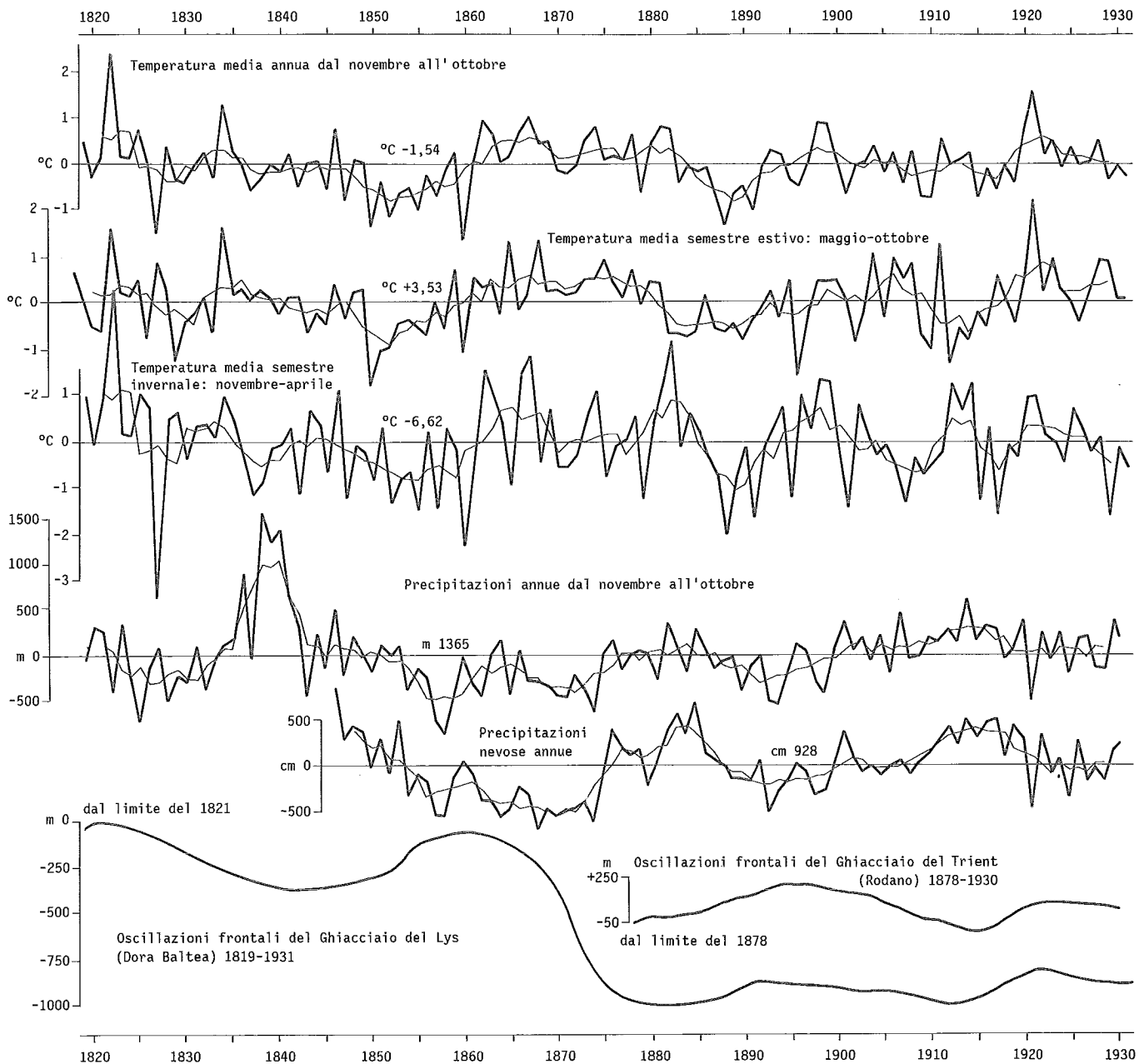


FIG. 1 - Temperature media annua, media estiva, media invernale, precipitazioni annue, precipitazioni nevose annue al Gran San Bernardo e oscillazioni frontali dei Ghiacciai del Lys e di Trient (da MONTERIN, 1932, ridisegnata).

FIG. 1 - Annual mean temperature, summer mean temperature, winter mean temperature, annual precipitations, annual snow precipitations at Gran San Bernardo and termini fluctuations for Lys and Trient Glaciers (after MONTERIN, 1932).

hanno in ascissa gli anni dal 1812 al 1931 e, in ordinata sia la curva del Ghiacciaio del Lys, sia le ampiezze delle onde fondamentali delle oscillazioni glaciali, delle precipitazioni nevose e della temperatura media estiva. L'esame comparato delle tre onde fondamentali ha messo in evidenza gli sfasamenti fra i massimi ed i minimi delle stesse. L'autore ha osservato come i massimi e i minimi dell'onda delle precipitazioni nevose precedano di circa un ottavo di periodo rispettivamente i minimi e i massimi dell'onda

delle temperature medie estive, per cui, chiamando anni con estati calde o fredde quelli nei quali l'onda fondamentale delle temperature è al di sopra oppure al di sotto della media ed anni nevosi oppure secchi quelli nei quali l'onda fondamentale delle precipitazioni nevose è rispettivamente al di sopra oppure al di sotto della media, sono possibili le combinazioni dei quattro attributi presi a due a due. L'autore osserva inoltre come l'onda fondamentale della curva del ghiacciaio sia in quadratura con quella della tempera-

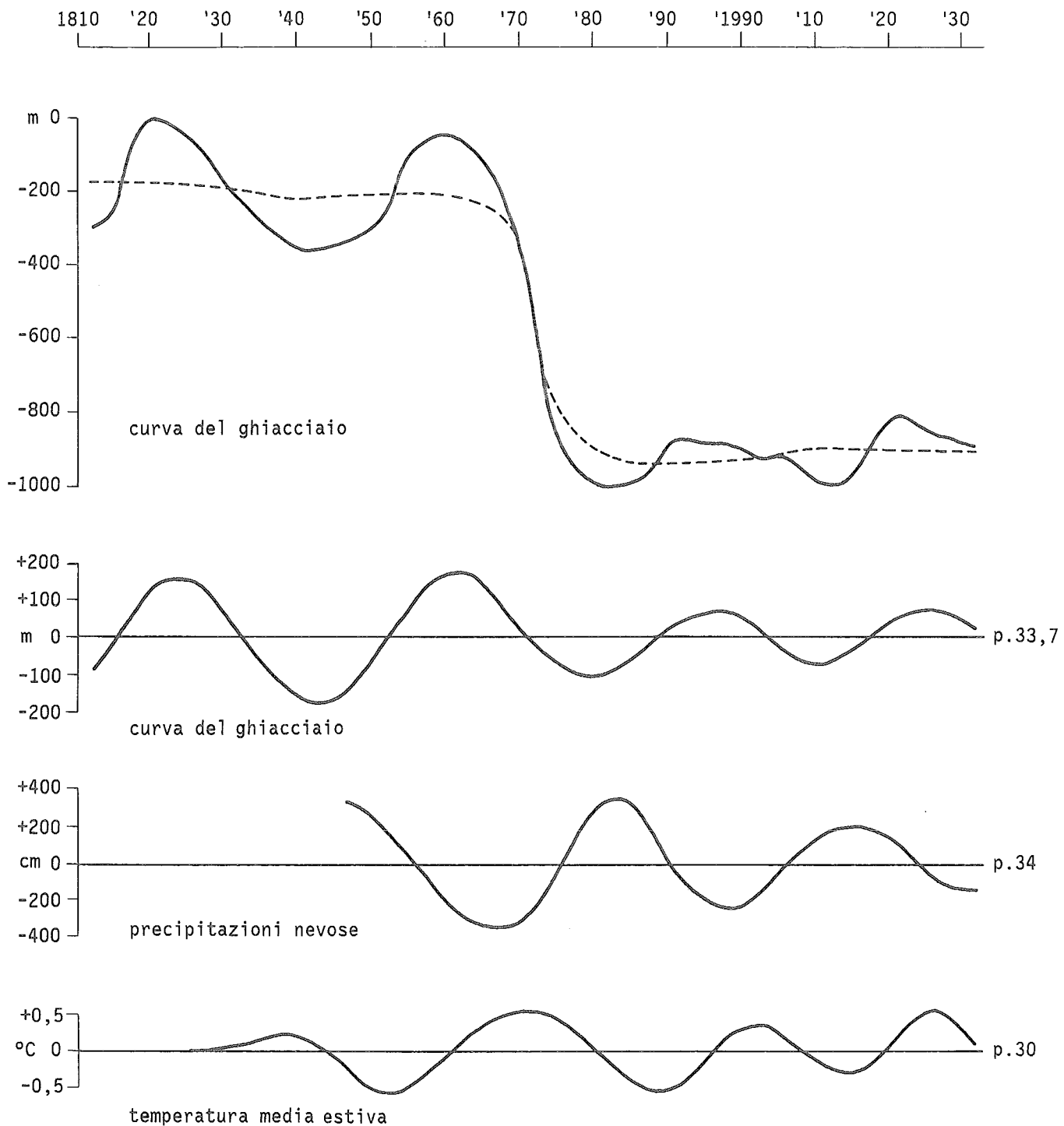


FIG. 2 - Analisi periodale delle oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Lys, delle precipitazioni nevose e della temperatura media estiva al Gran San Bernardo (da LOVERA, 1948, ridisegnata).

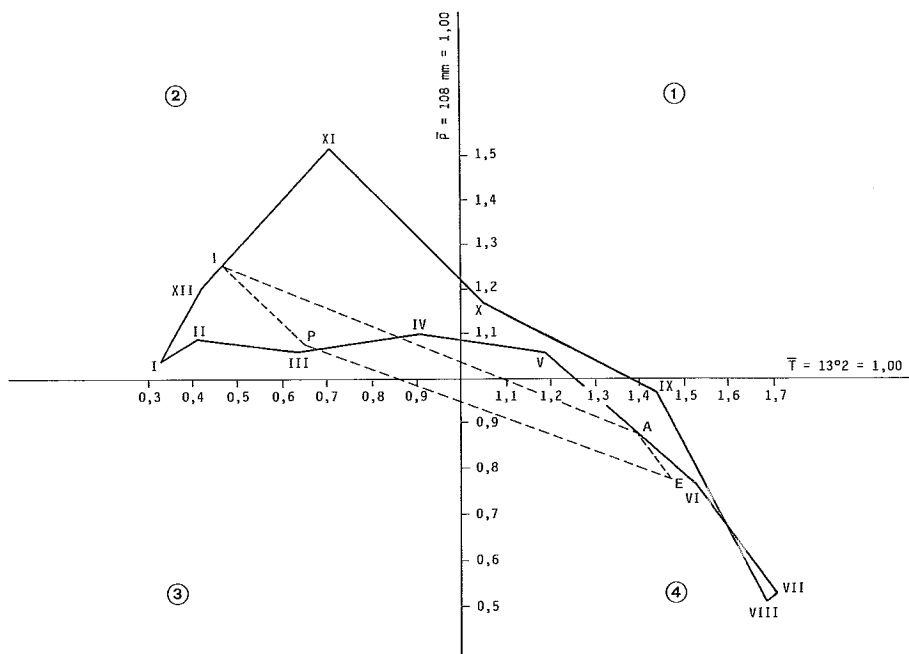
FIG. 2 - Periodic analysis of the: terminus fluctuation of Ghiacciaio del Lys, snow precipitations and summer mean temperature at Gran San Bernardo (modified after LOVERA, 1948).

tura estiva, poiché alle massime ed alle minime temperature medie estive corrispondono le massime velocità di ritiro o di avanzata del ghiacciaio. Esaminando la curva del ghiacciaio o confrontandola con quelle delle precipitazioni

nevose e della temperatura media estiva, l'autore osserva come i passaggi per lo zero della curva del ghiacciaio, cioè gli anni della massima velocità di ritiro o di avanzata, cadono entro gli intervalli caldi e secchi o, rispettivamente

FIG. 3 - Climogrammi medi mensile e stagionale alla stazione meteorologica di Isola del Gran Sasso (419 m s.m.) nel periodo 1925/26-1959/60 (da TONINI, 1963, ridisegnata).

FIG. 3 - Monthly and seasonal mean climate-grams at the meteorologic station of Isola del Gran Sasso (419 m a.s.l.) in the period 1925/26-1959/60 (after TONINI, 1963).



te, freddi ed umidi, che sono caratterizzati entrambi dalla concomitanza di due situazioni favorevoli in un caso al ritiro e, nell'altro, all'avanzata del ghiacciaio. Infine il fatto che i massimi e i minimi dell'onda delle temperature estive coincidano con le massime velocità delle oscillazioni del ghiacciaio, mostra come la temperatura abbia un'azione immediata sull'estensione del ghiacciaio, mentre il fatto che i termini delle singole semionde dell'onda delle precipitazioni nevose precedano di un certo numero di anni (da quattro a cinque) i massimi ed i minimi dell'estensione del ghiacciaio, mostra come queste abbiano un'azione ritardata sul ghiacciaio stesso.

TONINI (1963) analizza dapprima i dati termometrici giornalieri di otto stazioni ed i dati pluviometrici di ventiquattro stazioni del SERVIZIO IDROGRAFICO DEL MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (Sezione di Pescara), che hanno funzionato nel periodo 1919-1960, ricavandone i regimi termici e pluviometrici medi annui e le carte delle isoterme e delle isoiete medie annue. Esamina quindi la stazione di Isola del Gran Sasso (419 m) per sapere se nel periodo studiato si sono verificate variazioni climatiche, utilizzando sia le temperature e le precipitazioni medie annue, sia le medie mobili di ordine cinque e di ordine undici delle stesse. Propone infine l'impiego di un indice di glaciazione, ottenuto come rapporto fra le precipitazioni P di un dato periodo e la temperatura T dello stesso periodo, entrambe a loro volta espresse come rapporto fra il valore assoluto del periodo esaminato e il valore medio di un periodo pluriennale di osservazione (trentacinquennio 1925/26-1959/60). Con i valori delle precipitazioni P e delle temperature T mensili e stagionali si possono costruire i climogrammi relativi. Come esempio, in fig. 3 sono stati riportati i climogrammi mensile e stagionale medi, relativi al trentacinquennio studiato. L'esame dei climogrammi sta-

gionali di ogni anno e dei rispettivi indici di glaciazione può fornire elementi utili per correlare le variazioni climatiche con quelle glaciali. È stato così possibile osservare, per esempio, come siano favorevoli alla fase di progresso di un ghiacciaio i climogrammi con periodo di glaciazione freddo-umido e periodo di fusione caldo-secco, che si possono esprimere con la successione 2, 2, 4, 4 in relazione al quadrante nel quale vengono a trovarsi successivamente nell'ordine i vertici stagionali inverno, primavera, estate, autunno, mentre sono risultati favorevoli alla fase di regresso climogrammi del tipo 3, 3, 1, 1 caratterizzati da periodi di glaciazione freddo-seccchi e periodi di fusione caldo-umidi. Inoltre la successione di anni con indici di glaciazione annui (ottenuti dalla media aritmetica degli indici di glaciazione stagionali) elevati, quindi favorevoli all'accumulo glaciale, produrrà fasi di avanzata della fronte e viceversa per la successione degli anni con indici di glaciazione sfavorevoli.

BELLONI (1967) confronta le variazioni medie annue delle posizioni frontali di dieci ghiacciai del Gruppo dell'Ortles-Cevedale, dall'inizio degli anni '20 al 1966, con la variazione delle precipitazioni annue alla stazione meteorologica di Bormio (1 225 m) dal 1921 al 1963, la variazione della temperatura media estiva alla stessa stazione dal 1930 al 1963 e la variazione dell'altezza media del manto nevoso alle stazioni di Santa Caterina Valfurva (1 740 m) e di Caresèr Diga (2 600 m) dal 1930 al 1963. È così possibile vedere quando si sono verificate, durante il periodo dal 1920 al 1963, condizioni climatiche favorevoli oppure sfavorevoli all'accumulo nivale ed alla sua permanenza al suolo. Tali condizioni si ottengono applicando il principio della sovrapposizione degli effetti degli scarti degli importi delle precipitazioni annue rispetto agli importi medi annui del periodo esaminato e degli scarti delle

temperature medie estive di ogni anno rispetto alla media del periodo esaminato, considerando come favorevoli agli accumuli nivali gli scarti positivi delle precipitazioni e gli scarti negativi delle temperature. I risultati del confronto fra variazioni frontali dei ghiacciai studiati e clima hanno fornito le seguenti conclusioni: a) esiste sempre un ritardo fra causa climatica e variazione frontale di un ghiacciaio e questo ritardo è maggiore nei ghiacciai vallivi rispetto agli altri tipi morfologici ed è maggiore nei ghiacciai più estesi, b) la sensibilità alle variazioni climatiche, cioè l'intervallo di variazione fra la massima avanzata ed il massimo ritiro annuo sembra massima nei ghiacciai più estesi ed in quelli più piccoli.

GLI STUDI NEL PERIODO 1970-1990

Gli autori che hanno affrontato nel periodo in esame, con differenti metodologie di ricerca, l'argomento delle relazioni fra oscillazioni frontali dei ghiacciai e clima furono JANIN (1970), CERUTTI (1971, 1975, 1977), RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO (1982), BELLONI & *alii* (1985, 1986), CERUTTI (1986), SMIRAGLIA (1987), SERANDREI BARBERO & *alii* (1990), BELLONI & *alii* (1991) e SMIRAGLIA & VEGGETTI (1991).

JANIN (1970) nel suo lavoro sul clima e sulle variazioni climatiche del Colle del Gran San Bernardo esamina l'argomento delle oscillazioni frontali dei ghiacciai. Inizia affermando che i ghiacciai di circo, ad altitudine elevata, risentono più rapidamente gli effetti della nevosità degli effetti delle temperature, mentre avviene l'opposto per i ghiacciai vallivi che hanno le lingue che scendono in basso. Prosegue mostrando lo stesso sincronismo, già osservato da MONTERIN (1932) fra il clima del Gran San Bernardo e le variazioni frontali del Ghiacciaio del Lys, estendendo il confronto fra parametri climatici ed oscillazioni frontali del ghiacciaio dal 1931 al 1964.

CERUTTI (1971) descrive dapprima l'avanzata delle fronti dei ghiacciai di Pré de Bar, di Toula, della Lex Blanche e della Brenva nel Gruppo del Monte Bianco dal 1963 al 1970. Prosegue con l'esame delle temperature medie annue dei decenni compresi fra il 1945 e il 1969, dell'oscillazione della quota media stagionale dell'isoterma di 0 °C dal 1931 al 1962 e delle precipitazioni medie annue nei decenni compresi fra il 1931 e il 1970 nella stazione meteorologica del Gran San Bernardo e in alcune stazioni del gruppo del Monte Bianco. Conclude osservando come l'avanzata dei ghiacciai del Monte Bianco sia stata la conseguenza del forte aumento delle precipitazioni portate dai venti atlantici, unito alla diminuzione della temperatura annua ed al conseguente abbassamento dell'isoterma di 0 °C.

CERUTTI (1975) esamina dapprima i dati termometrici e pluviometrici delle stazioni meteorologiche di Courmayeur (1 220 m) dal 1936 al 1970 e del Colle del Gigante (3 370 m) dal 1961 al 1970 e i dati termometrici di Entrèves Traforo del M. Bianco (1 361 m) dal 1966 al 1975. Determina quindi l'altitudine media quinquennale, durante i mesi da Maggio a Ottobre, dell'isoterma di 0 °C dal 1936

al 1970 per i mesi da Giugno a Settembre, allo scopo di poter valutare, sulla base della sua altitudine media mensile, la durata dell'ablazione alle diverse altitudini dei bacini collettori e l'altezza media quinquennale in millimetri dell'equivalente in acqua delle precipitazioni nevose, ricavata dagli importi annui delle precipitazioni di provenienza atlantica. Sulla base di questi dati sono stati calcolati i volumi delle precipitazioni nevose alle diverse altitudini, deducendone che fra le quote di 3 200 m e 3 500 m si formi il volano che regola le espansioni e le contrazioni dei ghiacciai del Monte Bianco. Studiando le variazioni dei volumi delle precipitazioni nevose vengono individuati i

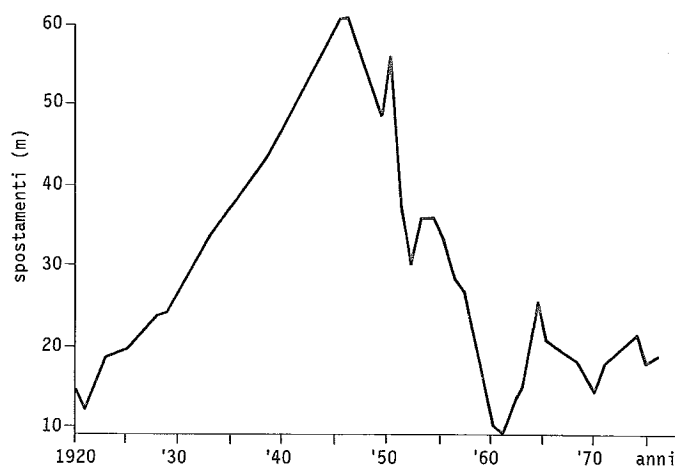


FIG. 4 - Curva media dello spostamento delle fronti dei ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1976 (da RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982, ridisegnata).

FIG. 4 - Mean curve of the glacier termini shifts in the Julian Alps from 1920 to 1976 (after RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982).

due periodi dal 1936 al 1940 e dal 1951 al 1955 con condizioni climatiche favorevoli al glacialismo. Vengono poi calcolati i volumi dei sovraccarichi di alimentazione nei due periodi, rispetto alla media generale delle precipitazioni nevose nel trentacinquennio 1936-1970, che risultò uguale a +9,3% dal 1936 al 1940 e +18,2% dal 1951 al 1955. Infine viene messa in correlazione l'entità di questi sovraccarichi con la diversa proporzione dell'espansione frontale dei ghiacciai del Monte Bianco negli anni '40 e quella più grandiosa che ebbe inizio verso il 1956.

CERUTTI (1977) fa l'analisi quantitativa dell'alimentazione dei Ghiacciai della Lex Blanche, di Pré de Bar e di Toula durante il periodo 1936-1973 e studia le correlazioni fra le variazioni dell'alimentazione e le variazioni frontali di questi ghiacciai. A tale scopo esegue lo studio comparato delle variazioni frontali utilizzando le posizioni degli archi morenici frontali, che indicano il limite massimo raggiunto dalle fronti dei ghiacciai in fase di avanzata. Riconosce così le grandi morene esterne del 19° secolo, riferibili alle espansioni glaciali culminate nei periodi 1818-1820 e 1860-1862, all'interno delle quali si trovano gli archi mo-

renici del 20° secolo, riferibili alle espansioni glaciali culminate nel periodo 1921-1925, 1941-1942 e 1973-1975. Costata infine come le espansioni glaciali del 20° secolo si siano verificate in periodi sfavorevoli, dal punto di vista climatico, per la glaciazione, deducendone quindi che sia le espansioni che le contrazioni frontali siano da mettere in relazione col clima dei bacini collettori al momento della costituzione degli accumuli nivali e non col clima delle valli ove si trovano le fronti dei ghiacciai. Inoltre i tempi di risposta degli apparati glaciali al mutamento delle fasi climatiche sono in relazione con la quantità di precipitazioni che ricevono i ghiacciai, risultando più brevi per gli accumuli maggiori e viceversa.

RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO (1982) esaminano le oscillazioni frontali dei ghiacciai delle Alpi Giulie (Ghiacciaio del Montasio Occidentale, Ghiacciaio del Canin Occidentale, Ghiacciaio del Canin Orientale) dal 1920 al 1979, ricavando la curva media dello spostamento frontale dei

nato un'inversione di tendenza nel movimento delle fronti. La precipitazione nevosa viene registrata a Cave del Pre-

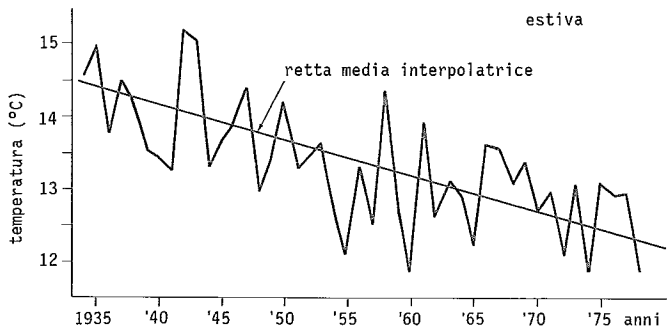


FIG. 5 - Temperatura media estiva alla stazione meteorologica di Cave del Predil dal 1934 al 1978 (da RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982, ridisegnata).

FIG. 5 - Summer mean temperature at Cave del Predil from 1934 to 1978 (after RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982).

tre ghiacciai (fig. 4) in regresso dal 1921 al 1945, in avanzata dal 1946 al 1961 e, successivamente, con modeste oscillazioni attorno alla posizione del 1961. Analizzano quindi la temperatura media annua a Cave del Predil, all'altitudine di 901 m s.m., in diminuzione dal 1934 al 1978 e dal 1951 più bassa della temperatura media del periodo 1934-1978. La temperatura media dei mesi estivi (Maggio-Ottobre) presenta una diminuzione maggiore della temperatura media annua con un valore totale di 2,025 °C dal 1934 al 1978 ed un valore medio annuo di -0,045 °C (fig. 5). Sono poi esaminati i dati pluviometrici della stessa stazione, che evidenziano precipitazioni inferiori alla media del periodo 1921-1978 dal 1939 al 1948 e superiori dal 1959 al 1978. L'esame simultaneo delle temperature e delle precipitazioni medie quinquennali è riportato in fig. 6; dall'esame di questa si osserva come le condizioni pluviometriche favorevoli al glacialismo si instaurino a partire dal quinquennio 1954-1958, quando la temperatura è in diminuzione da alcuni quinquenni ed ha già determi-

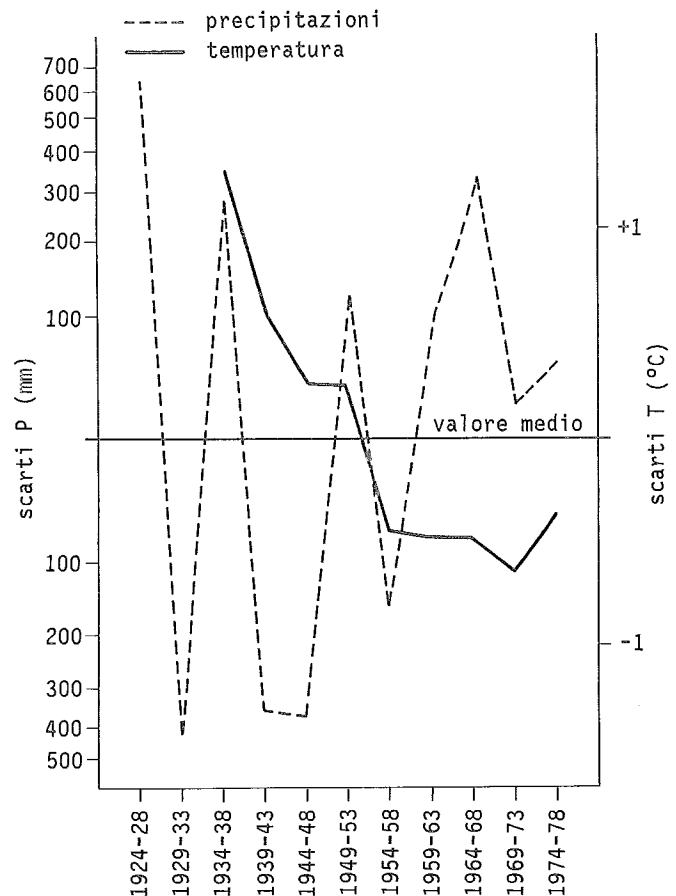


FIG. 6 - Scarti dei valori quinquennali delle precipitazioni e della temperatura dal valore medio alla stazione meteorologica di Cave del Predil (da RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982, ridisegnata).

FIG. 6 - Differences of the five-year precipitation and temperature values from the mean value observed at Cave del Predil (RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982).

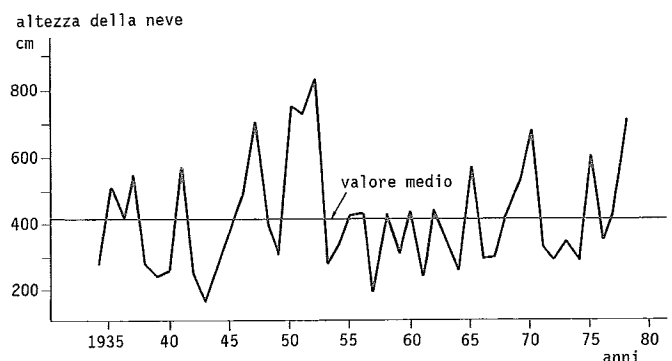


FIG. 7 - Altezza totale annua della neve caduta alla stazione meteorologica di cave del Predil dal 1934 al 1978 (da RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982, ridisegnata).

FIG. 7 - Annual total altitude of the snowfall at Cave del Predil from 1934 to 1978 (after RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982).

dil come altezza totale mensile della neve caduta, dall'anno 1934; la curva di fig. 7 evidenzia una tendenza all'aumento dal 1934 con precipitazioni ingenti nel 1947 e nel periodo 1950-1952 e con tendenza all'aumento dal 1957. Vengono poi analizzate le ciclicità delle serie storiche termometriche, pluviometriche e nivometriche mediante il calcolo dello spettro di potenza.

I risultati dei calcoli dell'analisi spettrale delle variabili meteorologiche esaminate mostrano ciclicità fondamentali con periodo annuale e secondariamente semestrale. Per gli spostamenti dei ghiacciai è stata esaminata la curva media di fig. 4 che rappresenta un fenomeno con caratteristiche di periodicità ben maggiori di quelle individuate nelle variabili meteorologiche già analizzate; si tratta infatti di una funzione con periodicità variabile da alcuni anni a qualche decina di anni. Per correlare gli spostamenti annui delle fronti dei ghiacciai con le variabili meteorologiche, sono stati calcolati i valori annui di queste ultime e ne sono state analizzate le correlazioni mediante le regressioni lineari, allo scopo di individuare il fattore climatico che influenza più direttamente le oscillazioni delle fronti dei ghiacciai

in esame e di definire i tempi del loro meccanismo di risposta alle variazioni dei parametri climatici noti. Si è così potuto osservare come gli spostamenti medi delle fronti dei ghiacciai non siano correlabili con i dati annuali delle variazioni meteorologiche, né con i valori estivi della temperatura e con i valori invernali di pioggia e neve. Correlazioni migliori sono state invece ottenute con i valori delle variabili meteorologiche degli anni passati, presi con pesi diversi e dedotti dalle medie o dai totali annuali, unitamente alla temperatura media estiva ed agli importi delle precipitazioni invernali.

BELLONI & alii (1986), in un lavoro presentato al 5° Convegno Glaciologico Italiano il 30 Settembre 1983, esaminano dapprima le serie temporali delle variazioni frontali annue di un campione di cinquantotto ghiacciai, fra i centotrentuno misurati in media ogni anno nel periodo 1950-1982, ricavandone le regressioni lineari delle variazioni frontali annue rispetto al tempo, ottenute dalle medie mobili d'ordine cinque delle misure annuali. Per effettuare il confronto con i parametri climatici il numero dei ghiacciai è stato ridotto a venti, sulla base dei livelli di si-

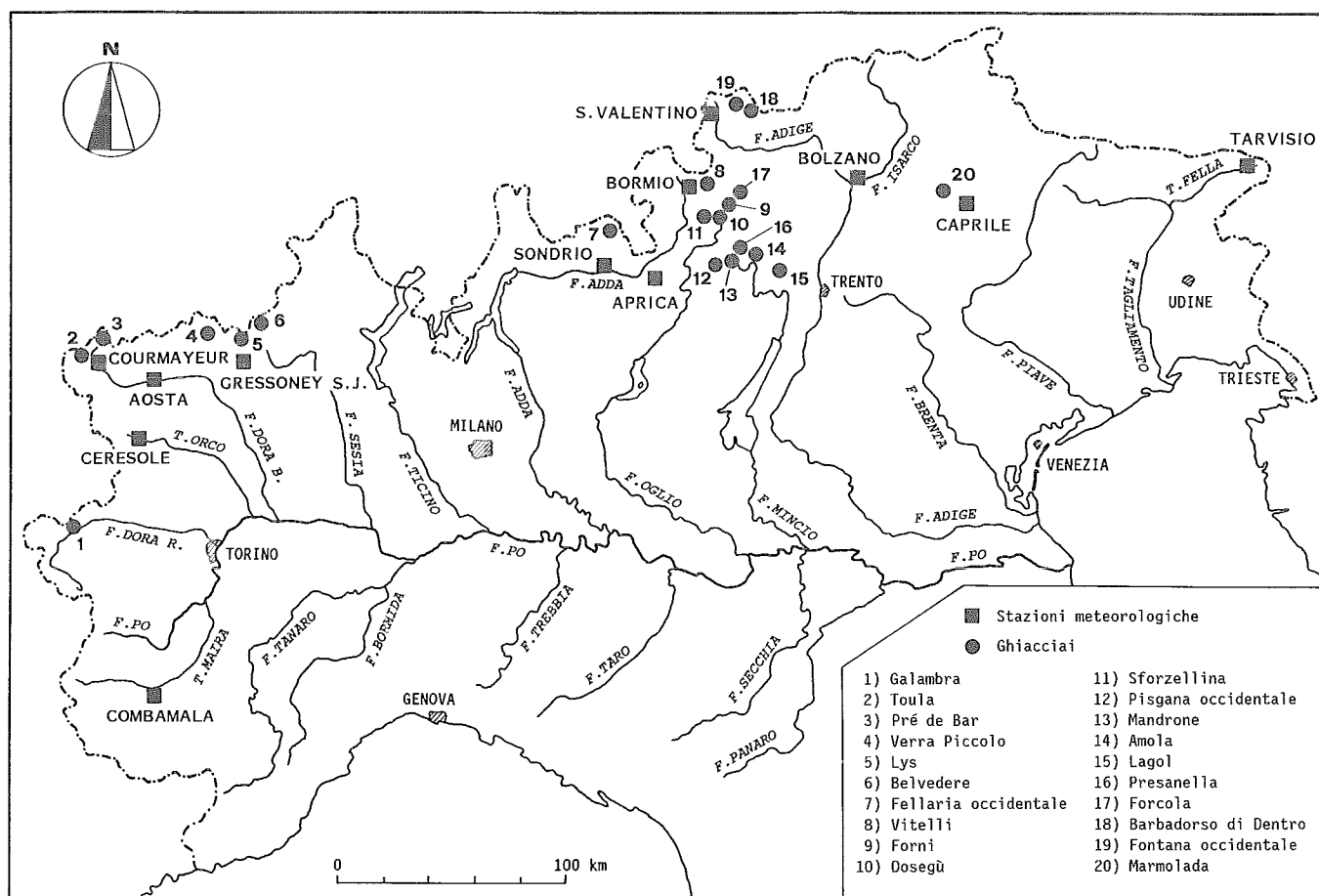


FIG. 8 - Ubicazione delle dodici stazioni meteorologiche e dei venti ghiacciai dell'arco alpino utilizzati per le correlazioni fra parametri climatici e oscillazioni frontali (da BELLONI, CATASTA & SMIRAGLIA, 1986, ridisegnata).

FIG. 8 - Location of the 12 stations and 20 glaciers of the alpine area used to correlate climatic parameters and glacier termini fluctuations (after BELLONI, CATASTA & SMIRAGLIA, 1986).

gnificatività delle correlazioni delle loro variazioni frontali. Il lavoro prosegue con l'analisi numerica in dodici stazioni meteorologiche, ben distribuite nell'arco alpino, degli scarti della temperatura media del periodo da Maggio a Settembre di ogni anno, rispetto al valore medio del trentennio 1921-1950 e con l'analisi degli scarti dell'importo delle precipitazioni del periodo da Ottobre a Maggio di ogni biennio, rispetto al valore medio del trentennio 1921-1950. Sono state poi calcolate le medie mobili d'ordine cinque sia degli scarti termici, sia degli scarti pluviometrici.

La fig. 8 mostra l'ubicazione dei ghiacciai e delle stazioni meteorologiche. Sulla base dell'ubicazione sia dei ghiacciai, sia delle stazioni meteorologiche sono state calcolate le regressioni multiple a tre variabili delle variazioni frontali rispetto sia agli scarti termici, sia agli scarti pluviometrici con sfasamenti temporali da zero anni a venti anni. I risultati dell'analisi numerica sono riportati nella tab. 1. Si è potuto così determinare il ritardo fra cause climatiche contemporanee e variazioni frontali, che è risultato in media di otto anni. Si è inoltre osservato che l'a-

TABELLA 1 - Regressioni lineari multiple degli spostamenti frontali dei ghiacciai rispetto agli scarti termici e pluviometrici.

TABLE 1 - Multiple linear regressions of the glacier termini shifts with respect to temperature and precipitations shifts.

Ghiacciaio	Stazione	Sfasam. anni	r ² temp.	r ² prec.	Equazione regressione multipla
Galambra	Combamala	0	0,11	0,07	$t = - 1,2193 - 1,1050x + 0,0105y$
Galambra	Ceresole	11	0,73	0,91	$t = - 4,7252 - 2,0207x + 0,0141y$
Toula	Ceresole	12	0,71	0,71	$t = + 0,4621 - 4,4271x + 0,0056y$
Pré de Bar	Ceresole	12	0,65	0,67	$t = - 5,1072 - 7,0538x + 0,0153y$
Toula	Courmayeur	15	0,52	0,53	$t = + 5,6047 - 10,3419x + 0,0204y$
Pré de Bar	Courmayeur	11	0,65	0,81	$t = + 2,5178 - 6,5585x + 0,0296y$
Toula	Aosta	3	0,27	0,31	$t = + 9,1709 - 4,7216x + 0,0253y$
Pré de Bar	Aosta				non ci sono correlazioni multiple valide
Verra picc.	Aosta	2	0,55	0,56	$t = - 5,0187 - 14,1560x + 0,0281y$
Lys	Aosta	1	0,46	0,86	$t = - 2,6014 - 7,7188x + 0,0758y$
Verra picc.	Gressoney S.J.	0	0,72	0,74	$t = + 10,1249 - 10,7086x + 0,0164y$
Lys	Gressoney S.J.	1	0,36	0,30	$t = - 3,7935 - 1,4188x + 0,0437y$
Belvedere	Gressoney S.J.	0	0,01	0,25	$t = + 6,7416 - 8,2440x + 0,0365y$
Fellaria W	Sondrio	9	0,70	0,73	$t = - 17,9426 - 9,9423x + 0,0204y$
Vitelli	Sondrio	13	0,39	0,47	$t = - 16,5666 - 8,4723x + 0,0287y$
Forni	Sondrio	13	0,63	0,45	$t = + 7,9917 - 16,0059x + 0,2012y$
Dosegù	Sondrio	9	0,77	0,83	$t = - 11,0715 - 15,8752x + 0,0416y$
Sforzellina	Sondrio	14	0,51	0,34	$t = + 5,1512 - 8,5021x + 0,0894y$
Fellaria W	Aprica	11	0,35	0,35	$t = - 15,4788 - 0,3682x + 0,0331y$
Pisgana W	Aprica	10	0,01	0,18	$t = - 12,8883 - 5,6472x + 0,0140y$
Mandrone	Aprica	7	0,45	0,57	$t = - 12,6165 - 13,3633x + 0,0294y$
Amola	Aprica	8	0,61	0,57	$t = - 13,5265 - 2,5924x + 0,0369y$
Lagol	Aprica	17	0,57	0,46	$t = - 7,9867 - 3,3117x + 0,0321y$
Presanella	Aprica	7	0,08	0,30	$t = - 7,8392 - 1,7691x + 0,0204y$
Vitelli	Bormio	15	0,68	0,67	$t = - 16,3814 - 3,5498x + 0,0881y$
Forni	Bormio	5	0,32	0,40	$t = - 30,0440 - 35,8364x + 0,0933y$
Dosegù	Bormio	10	0,75	0,75	$t = - 7,8823 - 3,4343x + 0,1133y$
Sforzellina	Bormio	5	0,33	0,45	$t = - 13,6178 - 20,0054x + 0,0676y$
Forcola	S. Valentino				non ci sono correlazioni multiple valide
Barbadorso D.	S. Valentino				non ci sono correlazioni multiple valide
Fontana W	S. Valentino				non ci sono correlazioni multiple valide
Mandrone	Bolzano	5	0,46	0,04	$t = - 10,6026 - 14,6185x + 0,0323y$
Amola	Bolzano	4	0,68	0,76	$t = - 13,9905 - 12,1579x + 0,0315y$
Lagol	Bolzano	8	0,10	0,19	$t = - 6,8614 - 6,7412x + 0,0437y$
Presanella	Bolzano	4	0,77	0,77	$t = - 9,0389 - 10,1059x + 0,0076y$
Forcola	Bolzano	7	0,84	0,88	$t = - 31,6271 - 48,7895x + 0,0998y$
Barbadorso D.	Bolzano	3	0,76	0,81	$t = - 9,3567 - 28,6046x + 0,0570y$
Fontana W	Bolzano	9	0,85	0,74	$t = - 16,9565 - 18,9954x + 0,2041y$
Marmolada	Bolzano	11	0,64	0,66	$t = - 8,9568 - 11,2492x + 0,0102y$
Marmolada	Caprile	0	0,77	0,78	$t = - 2,9042 - 26,0235x + 0,0057y$
Marmolada	Tarvisio	10	0,14	0,14	$t = - 8,7498 - 0,2315x + 0,0112y$

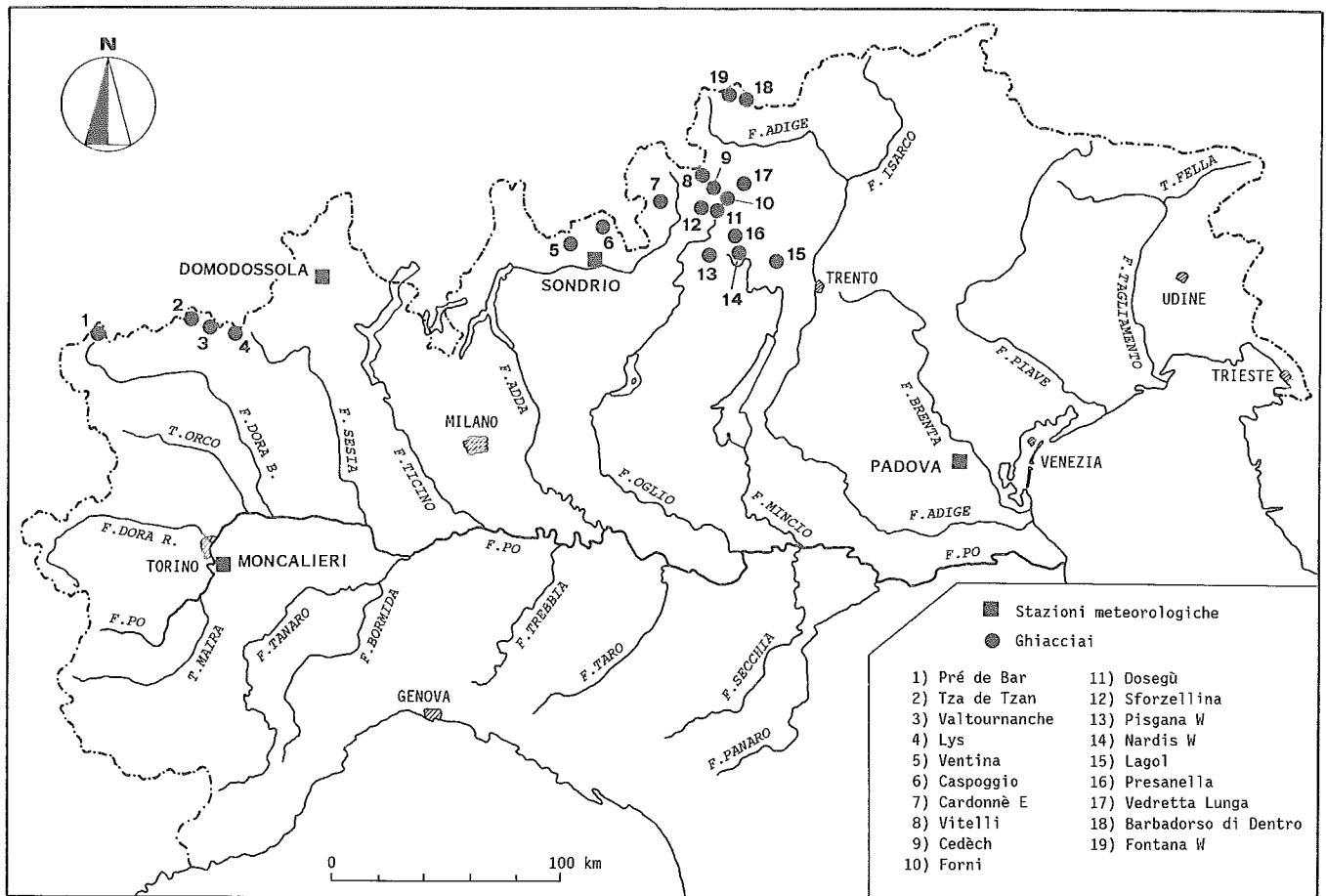


FIG. 9 - Ubicazione delle quattro stazioni meteorologiche e dei diciannove ghiacciai utilizzati per le correlazioni fra parametri climatici e oscillazioni frontali (da BELLONI, CATASTA & SMIRAGLIA, 1985, ridisegnata).

FIG. 9 - Location of the 4 meteorologic stations and 19 glaciers used to correlate climatic parameters and glacier termini fluctuations (after BELLONI, CATASTA & SMIRAGLIA, 1986).

vanzamento frontale per cause climatiche è funzione dell'area dei ghiacciai ed è tanto più grande quanto più il ghiacciaio è esteso.

BELLONI & *alii* (1985), utilizzando l'esperienza del lavoro precedente, analizzano tutte le serie storiche dei dati annuali delle variazioni frontali dei ghiacciai del versante italiano delle Alpi dal 1920 al 1983 e studiano diciannove di queste, che coprono un intervallo di tempo compreso fra un minimo di cinquantun anni (1933-1983) e un massimo di sessantadue (1922-1983). Per attenuare i picchi delle serie temporali e limitare le eventuali imprecisioni delle osservazioni sono state calcolate le medie mobili di ordine cinque delle variazioni frontali annuali. I dati termici e pluviometrici pubblicati hanno permesso di scegliere quattro stazioni meteorologiche a Nord del Fiume Po con serie temporali complete a partire dal secondo decennio di questo secolo e in posizione opportuna rispetto all'ubicazione dei diciannove ghiacciai, come si può osservare nella carta di fig. 9. Per poter verificare l'esistenza di correlazioni fra dati climatologici e variazioni frontali dei ghiacciai, è stato scelto come parametro termico lo scarto fra la tempera-

tura media da Maggio a Settembre di ogni anno e la temperatura media dello stesso periodo dell'anno durante l'intero periodo di osservazione; con gli scarti annuali sono state poi calcolate, per ognuna delle quattro stazioni, le medie mobili di ordine cinque. L'altro parametro climatologico utilizzato per le correlazioni è stato lo scarto fra l'importo annuo delle precipitazioni e l'importo medio annuo delle precipitazioni durante l'intero periodo di osservazione. Anche di questo parametro sono state calcolate le medie mobili di ordine cinque.

Infine per poter analizzare le relazioni fra i dati climatici e le oscillazioni frontali dei ghiacciai si è proceduto all'accostamento delle stazioni e dei ghiacciai in relazione alla loro distanza, come si osserva nella tab. 2. Successivamente sono state confrontate le medie mobili delle oscillazioni frontali con le medie mobili degli scarti termici, con le medie mobili degli scarti pluviometrici e con le medie mobili degli scarti termici e degli scarti pluviometrici, esaminati contemporaneamente. Le regressioni lineari relative, semplici e multiple, sono state calcolate per gli sfasamenti da zero a venti anni fra cause climatiche e variazioni frontali. Dal-

TABELLA 2 - Relazioni fra variazioni frontali dei ghiacciai e cause climatiche.
 TABLE 2 - Relationships between glacier termini fluctuations and climatic variations.

Ghiacciaio	Stazione	r_t	sf.t	r_p	sf.p	r^2	sf.m
Pré de Bar	Moncalieri	—	—	0,31	6	—	—
Tza de Tzan	Moncalieri	-0,13	7	0,50	15	—	—
Valtournanche	Moncalieri	-0,11	7	0,36	16	0,19	16
Valtournanche	Domodossola	-0,12	11	0,36	14	0,02	11
Lys	Moncalieri	-0,12	0	0,67	16	—	—
Lys	Domodossola	—	—	—	—	—	—
Ventina	Sondrio	-0,56	10	—	—	0,37	10
Caspoggio	Sondrio	-0,61	5	—	—	0,41	5
Cardonnè	Sondrio	-0,77	16	—	—	0,62	16
Vitelli	Sondrio	-0,24	4	0,16	8	0,14	7
Cedèch	Sondrio	-0,77	6	—	—	0,59	7
Forni	Sondrio	-0,88	5	—	—	0,59	5
Dosegù	Sondrio	-0,87	4	—	—	0,78	4
Sforzellina	Sondrio	-0,63	9	—	—	0,38	6
Pisgana W	Sondrio	-0,86	18	—	—	0,73	18
Nardis W	Sondrio	-0,89	13	—	—	0,85	14
Lagol	Sondrio	-0,27	6	0,12	7	0,19	7
Lagol	Padova	-0,58	3	0,59	9	0,37	3
Presanella	Sondrio	-0,88	6	—	—	—	—
Vedretta Lunga	Sondrio	-0,33	16	0,64	4	0,40	3
Vedretta Lunga	Padova	-0,60	0	0,77	3	0,63	1
Barbadorso D.	Sondrio	-0,86	7	—	—	0,77	8
Barbadorso D.	Padova	-0,27	5	0,45	10	0,11	8
Fontana W	Sondrio	-0,68	8	—	—	0,61	9
Fontana W	Padova	-0,38	6	0,48	10	0,23	9

l'esame della tab. 2 risulta che lo sfasamento fra variazioni frontali e cause termiche è compreso fra 0 e 18 anni con valore medio di 7,48 anni, quello dovuto a cause pluviometriche è compreso fra 3 e 16 anni con valore medio di 9,83 anni, mentre lo sfasamento per cause termiche e pluviometriche simultanee è compreso fra 1 e 18 anni con valore medio di 8,35 anni. È stato inoltre osservato come lo sfasamento per cause termiche e pluviometriche simultanee per i ghiacciai di primo ordine è risultato minore rispetto ai ghiacciai di secondo ordine ed è risultato minore per i ghiacciai più estesi rispetto a quelli meno estesi. Infine, fra le quattro stazioni meteorologiche esaminate, si sono ottenute le migliori correlazioni clima-ghiacciai per la stazione di Padova, la stazione più lontana dai ghiacciai stessi, situata in pianura, a minor altitudine.

CERUTTI (1986) esamina le variazioni frontali di quattro ghiacciai del Monte Bianco (Lex Blanche, Brenva, Toulà e Pré de Bar) e di tre ghiacciai del Monte Rosa (Grande di Verra, Piccolo di Verra e Lys) con osservazioni comprese fra il 1810 e il 1983 e constata come le variazioni di fase (avanzata-ritiro e ritiro-avanzata) non sono state contemporanee nei due gruppi montuosi, ma ebbero inizio prima sul Monte Bianco e, soltanto venti anni più tardi, sul Monte Rosa. Per cercare le cause di questo fenomeno esamina il limite delle nevi persistenti nei due gruppi montuosi ed i fattori che ne determinano l'altitudine. Eviden-

zia così una netta differenza fra il clima del Monte Bianco rispetto al Monte Rosa, dovuta alla diversa posizione geografica dei due massicci montuosi. Infatti il massiccio del Monte Bianco risulta direttamente investito dai venti occidentali che provengono dall'Oceano Atlantico, ricchi di vapore acqueo e con temperatura relativamente costante, mentre il massiccio del Monte Rosa risente l'influenza dei venti settentrionali e nord-orientali, venti continentali, apportatori di precipitazioni più scarse e di temperature più estreme. Perciò se i venti di provenienza occidentale portano condizioni climatiche favorevoli all'avanzata dei ghiacciai, queste condizioni possono ritardare ad instaurarsi nel Gruppo del Monte Rosa a causa della circolazione dei venti locali che può contrastare la circolazione generale dell'atmosfera. L'esame dei parametri climatici delle stazioni meteorologiche del Monte Bianco e del Monte Rosa ha mostrato come ogni espansione glaciale sia stata preceduta da un aumento delle precipitazioni e da un abbassamento della quota dello zero termico durante il mese di Luglio, verificatisi non più di cinque anni prima dell'inizio del progresso frontale. Il ritardo presentato dalle variazioni frontali dei ghiacciai del Monte Rosa rispetto alle analoghe variazioni frontali dei ghiacciai del Monte Bianco deriva dalle diverse condizioni climatiche delle due aree.

SMIRAGLIA (1987) esamina le fluttuazioni frontali del Ghiacciaio della Ventina (Gruppo del Monte Disgrazia) fra

il 1924 e il 1983 con la fronte in continuo regresso fino al 1970, in stasi fino al 1973 e in avanzata successivamente. Prende poi in considerazione i parametri termici e pluviometrici della stazione meteorologica di Sondrio dal 1915 al 1980, ricavandone gli scarti termici annuali della temperatura media da Maggio a Settembre di ogni anno rispetto alla temperatura media dello stesso periodo dell'anno dell'intero arco di sessantasei anni. Analogamente prende in esame gli scarti annuali dell'importo annuo delle precipitazioni rispetto all'importo medio annuo dello stesso periodo. Successivamente correla i dati termici e quelli pluviometrici con le variazioni frontali del Ghiacciaio della Ventina mediante un programma di calcolo che ha permesso di individuare il «tempo di risposta» del ghiacciaio rispetto ai parametri climatici. Per i dati termici è stato riscontrato uno sfasamento di dieci anni, mentre con i dati pluviometrici non sono state individuate correlazioni significative.

SERANDREI BARBERO & *alii* (1990) analizzano le misure annuali alle fronti dei Ghiacciai Occidentale di Montasio, Occidentale del Canin e Orientale del Canin, in corso dal 1921, ne studiano la distribuzione di frequenza, lo scarto quadratico medio e il coefficiente rappresentativo della funzione di distribuzione e rendono i dati statisticamente omogenei sottraendo alle misure annuali il loro valore medio. Con i dati termici di stazioni meteorologiche a diverse altitudini, calcolano i gradienti termici estivo e invernale per estrapolare i dati climatici alle quote dei ghiacciai e per verificare la durata dei periodi di ablazione e di accumulo. I parametri climatici esaminati sono le temperature media annua ed estiva, gli importi annuo ed invernale delle precipitazioni e l'altezza delle precipitazioni nevose. La tendenza a lungo termine di questi parametri è rappresentata da una curva di regressione polinomiale. Le variabili climatiche temperatura estiva e precipitazioni invernali, normalizzate e filtrate, sono state correlate con le curve delle variazioni frontali di ciascun ghiacciaio e della variazione frontale media dei tre ghiacciai. Le correlazioni con la curva media dei ghiacciai allungano i tempi di risposta, mentre le correlazioni tra clima e variazioni frontali, rispetto ai singoli punti di misura, evidenziano un tempo di risposta medio di un anno, controllato più spesso dalla temperatura estiva e, talvolta, dalle precipitazioni invernali, in relazione al settore frontale.

BELLONI & *alii* (1991), sulla base di un lavoro di LETREGUILLY (1988), che studia le relazioni fra parametri climatici termici e pluviometrici di alcune stazioni meteorologiche poste nel raggio di 200 km dai tre ghiacciai canadesi esaminati ed i relativi bilanci di massa e l'altitudine della linea di equilibrio, applicano questo metodo di confronto degli stessi parametri termici e pluviometrici alle variazioni frontali dei Ghiacciai della Sforzellina e del Dosegù in Alta Valtellina, dall'anno 1926 all'anno 1989, effettuando le correlazioni sia in sincronismo fra parametri climatologici e variazioni frontali sia con ritardi tra causa ed effetto via via crescenti da un anno a dieci anni. I parametri termici utilizzati, relativi alla stazione di Sondrio, sono le temperature medie mensili dei mesi da Maggio a Settembre sommate

per gruppi da due a cinque mesi, partendo da Maggio, da Giugno, ecc. I parametri pluviometrici, relativi alla stessa stazione, sono le somme degli importi mensili delle precipitazioni da Ottobre a Maggio per gruppi da tre ad otto mesi partendo da Ottobre, da Novembre e da Dicembre e per la sequenza Ottobre-Settembre di dodici mesi. L'ipotesi della risposta simultanea fra parametri termici e oscillazioni frontali ha mostrato come più significativa la sequenza Maggio-Agosto per il Ghiacciaio della Sforzellina e la sequenza Maggio-Settembre per il Ghiacciaio del Dosegù. L'ipotesi della risposta ritardata fra parametri termici e oscillazioni frontali ha mostrato come più significative le sequenze Maggio-Agosto al 10° anno e Giugno-Settembre all'8° anno per il Ghiacciaio della Sforzellina e Giugno-Settembre al 10° anno e negli anni precedenti fino al 7° anno per il Ghiacciaio del Dosegù. L'ipotesi della risposta simultanea fra parametri pluviometrici e oscillazioni frontali ha mostrato una significatività maggiore per l'importo annuo rispetto alle sequenze mensili per il Ghiacciaio della Sforzellina, mentre per il Ghiacciaio del Dosegù la sequenza più significativa è stata Ottobre-Marzo. L'ipotesi della risposta ritardata fra parametri pluviometrici e oscillazioni frontali ha mostrato come più significative le sequenze Ottobre-Febbraio e Novembre-Febbraio al 7° anno per il Ghiacciaio della Sforzellina e la sequenza Dicembre-Aprile al 2° anno per il Ghiacciaio del Dosegù.

SMIRAGLIA & VEGGETTI (1991), dopo una breve descrizione delle fasi di progresso, di stazionarietà e di regresso del Ghiacciaio del Calderone dal Settembre 1962 al Settembre 1979, analizzano i rapporti fra il regime del clima e le variazioni del ghiacciaio seguendo il metodo dei climogrammi e degli indici di glaciazione, proposto da TONINI (1963) ed applicandolo al periodo 1960/61-1984/85. I parametri utilizzati, relativi alla stazione meteorologica di Isola del Gran Sasso, sono le temperature medie e gli importi delle precipitazioni totali stagionali, sia in valore assoluto, sia in rapporto alla media del venticinquennio (per le precipitazioni stagionali il rapporto è con la media trimestrale). Nella fig. 10 sono stati riportati cinque diagrammi, aventi in ascissa gli anni dal 1923 al 1985, e, in ordinata, rispettivamente: le temperature medie annue, gli importi totali annui delle precipitazioni, gli indici di glaciazione annuali, le tendenze dei climogrammi e delle osservazioni sul terreno. Per le tre serie numeriche sopra indicate sono state riportate le medie mobili di ordine cinque allo scopo di attenuare i picchi presenti nelle serie stesse. Dall'esame del diagramma delle temperature medie annue si osservano, a partire dal 1950, alcune oscillazioni regolari con tendenza al raffreddamento. Nel diagramma delle precipitazioni si osserva un picco principale fra il 1960 e il 1965, che precede di poco l'abbassamento termico del 1966, mentre i due picchi successivi, fra il 1975 e il 1980, coincidono con la fase termica fredda corrispondente. Nel diagramma degli indici di glaciazione si osserva un periodo particolarmente sfavorevole al glacialismo fra il 1945 e il 1956, mentre la fase più favorevole ha inizio con l'anno 1975 e termina nel 1983. Infine i climogrammi e le osservazioni sul terreno mostrano una buona concordanza

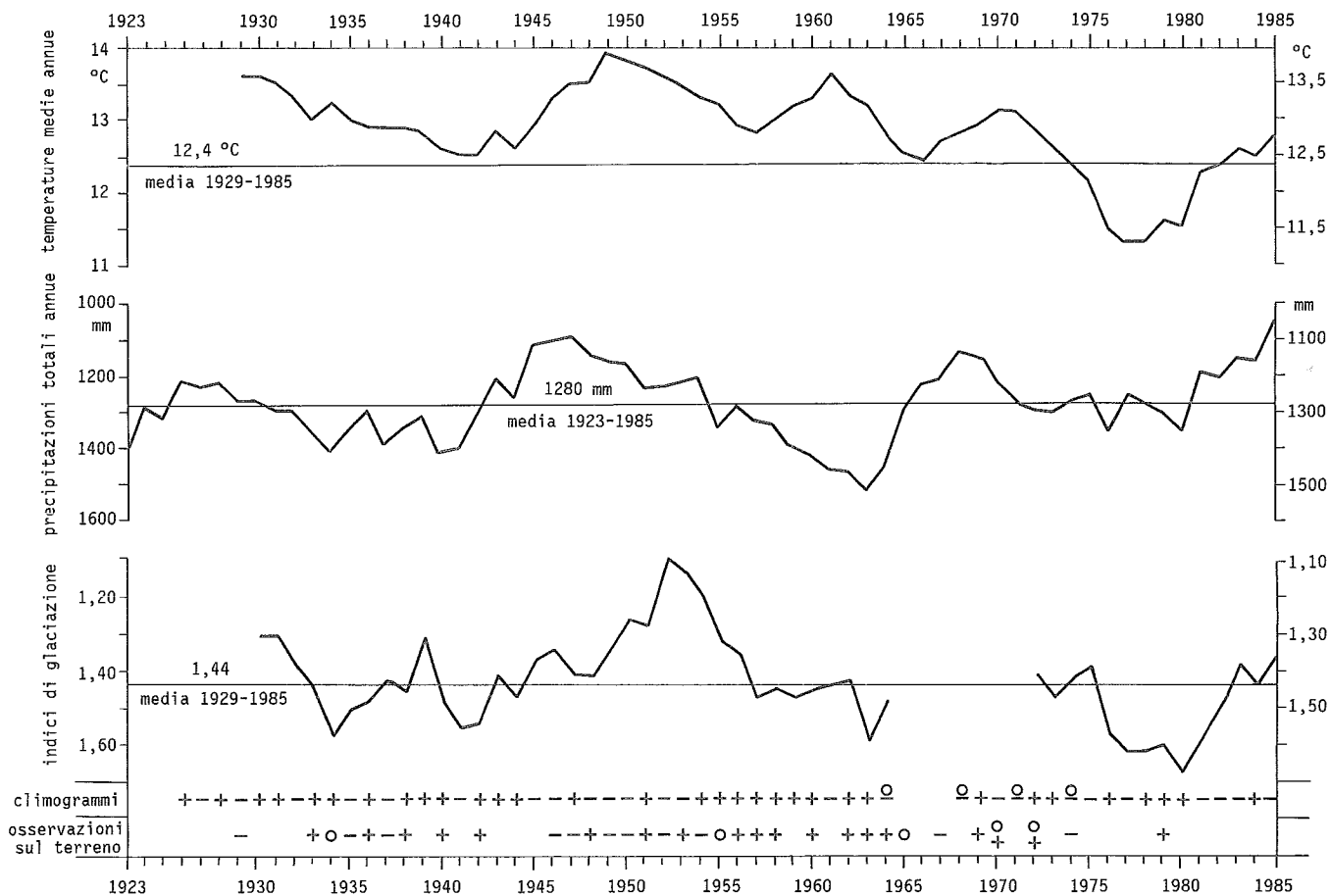


FIG. 10 - Temperature medie annue, precipitazioni totali annue, indici di glaciazione, climogrammi alla stazione meteorologica di Isola del Gran Sasso ed osservazioni sul terreno al Ghiacciaio del Calderone nel periodo 1923-1985 (da SMIRAGLIA & VEGGETTI, 1991, ridisegnata).

FIG. 10 - Annual mean temperatures, annual total precipitations, glaciation indexes, climategrams at Isola del Gran Sasso, and field observations at Ghiacciaio del Calderone from 1923 to 1985 (after SMIRAGLIA & VEGGETTI, 1991).

con le fasi climatiche sopra descritte. In conclusione, le variazioni del Ghiacciaio del Calderone mostrano un buon accordo con l'evoluzione dei parametri climatici, sia nel periodo 1925-1960, sia nel periodo 1961-1985, per cui questo ghiacciaio può essere considerato un buon indicatore dei cambiamenti climatici a breve periodo.

F'in qui sono stati analizzati e descritti i lavori aventi per argomento le relazioni fra le variazioni frontali dei ghiacciai delle Alpi e il clima. Non è possibile chiudere questa rassegna di studi senza ricordare il *Symposium on Ice and Climate*, tenuto a Seattle, Washington, dal 21 al 25 Agosto 1989, nel quale fra i settantadue contributi pubblicati da MAC AYEL (1990) e i sessantadue lavori, dei quali è stato pubblicato l'abstract, merita di essere ricordato, perché pertinente al tema della presente comunicazione, un gruppo di lavori, relativo a diverse regioni della Terra.

BRATHWAITE & OLESEN (1990) stimano, in un modello di bilancio energetico, l'aumento dell'ablazione glaciale per effetto serra in due località ai margini dell'inlandsis groenlandese ottenendo rispettivamente valori di 0,47 e 0,53 m di equivalente in acqua all'anno al grado centigrado.

HAEBERLI (1990) esamina l'aumento della temperatura dell'aria da 0,5 °C a 1,0 °C verificatosi nel 20° secolo e lo mette in relazione con la perdita di massa dei ghiacciai delle medie e basse latitudini e con la diminuzione della lunghezza dei ghiacciai vallivi delle Alpi.

JACKA (1990) descrive un progetto di monitoraggio del clima basato sulle temperature superficiali medie mensili e medie annuali e sulla pressione atmosferica di stazioni dell'Antartide e delle zone meridionali degli oceani, nonché sull'estensione dei ghiacci marini. L'analisi statistica dei dati ha messo in evidenza un riscaldamento medio di 0,15 °C al decennio dal 1950 per le stazioni antartiche e di 0,04 °C al decennio dal 1940 per le stazioni oceaniche. La registrazione dei ghiacci marini dal 1973 al 1978 ha rivelato una diminuzione dell'estensione in Latitudine di 0,23 °C al decennio.

KASER & alii (1990) correlano l'altitudine della linea di equilibrio di due ghiacciai della Cordigliera Bianca in Perù con la temperatura media e le precipitazioni della stagione umida nel decennio 1977/78-1986/87 e mostrano come i recenti periodi di avanzata o di minore ritiro delle

fronti siano da mettere in relazione con una diminuzione della temperatura media annua e con un notevole aumento degli importi annui delle precipitazioni.

LEFAUCONNIER & HAGEN (1990) esaminano la lunga serie di dati dei bilanci di massa ottenuti sul Brøggerbreen (Svalbard) per il periodo 1977-1988 e la correlano con le temperature estive e autunnali e con le precipitazioni invernali. Sulla base di queste correlazioni ricostruiscono il bilancio di massa dal 1912 al 1988, bilancio che mostra la tendenza ad una continua riduzione del deficit annuale.

TABELLA 3 - Bilancio di massa equivalente in metri cubi d'acqua e in centimetri di lama d'acqua del Ghiacciaio della Sforzellina negli anni 1986/87-1989/90.

TABLE 3 - Mass balance in water-equivalent cubic meters and in cm of water column for Ghiacciaio della Sforzellina during the period 1986/87-1989/90.

Anno	AAR	Bilancio netto	
		m ³	cm
1986-87	8	-384155	-91
1987-88	5	-405680	-97
1988-89	32	-240860	-57
1989-90	9	-490430	-117

MAYO & MARCH (1990) notano come l'aumento della temperatura dell'aria durante la stagione invernale e l'aumento dell'importo annuo delle precipitazioni al Ghiacciaio Wolverine in Alaska, dall'inizio degli anni '70 hanno reso positivo il bilancio di massa annuale dall'anno 1976.

TABELLA 4 - Coefficienti di correlazione del bilancio di massa del Ghiacciaio della Sforzellina rispetto alle temperature estive.

TABLE 4 - Correlation coefficients between Ghiacciaio della Sforzellina terminus fluctuations and temperature.

					Max	Min	Medie
mag	giu	lug	ago	set	-0.16	+0.25	+0.07
mag	giu	lug	ago	set	-0.16	-0.16	-0.21
mag	giu	lug	ago	set	-0.46	+0.29	+0.01
mag	giu	lug	ago	set	-0.50	-0.08	-0.38
mag	giu	lug	ago	set	-0.55	+0.09	-0.14
mag	giu	lug	ago	set	+0.13	-0.71	-0.43
mag	giu	lug	ago	set	-0.69	+0.12	-0.07
mag	giu	lug	ago	set	-0.71	-0.07	-0.51
mag	giu	lug	ago	set	-0.29	+0.07	-0.13
mag	giu	lug	ago	set	-0.49	+0.55	+0.24
mag	giu	lug	ago	set	-0.52	+0.31	-0.41
mag	giu	lug	ago	set	-0.40	+0.16	-0.05
mag	giu	lug	ago	set	-0.57	-0.96*	-0.96**
mag	giu	lug	ago	set	-0.16	-0.15	-0.16
mag	giu	lug	ago	set	-0.02	+0.20	+0.09

* $y = -33.2544x + 103.7053$

** $y = -47.8948x + 476.5648$

YAFENG & JIAVEN (1990) mettono in relazione il grande deficit nel bilancio di massa degli anni '80 rispetto alle decadi precedenti di due ghiacciai della regione di Tian Shan con la riduzione dell'invaso di alcuni laghi della regione e con la tendenza al riscaldamento dell'atmosfera e all'aridità, attualmente in atto.

Fra gli studi a carattere sperimentale, non pubblicati, (LUGARESÌ, inedito) ricordo la correlazione del bilancio specifico di massa del Ghiacciaio della Sforzellina, espresso in centimetri di equivalente in acqua (tab. 3), relativo agli anni 1986/87-1989/90, con le medie delle temperature massime diurne, medie diurne e minime diurne del periodo caldo dell'anno da Maggio a Settembre e con le precipitazioni invernali da Ottobre a Maggio, della stazione meteorologica di Santa Caterina Valfurva, relative ad ogni anno del bilancio di massa. In questo studio è stato applicato il metodo proposto da LETREGUILLY (1988) e già utilizzato con modifiche da BELLONI & alii (1991) per le correlazioni del clima con le variazioni frontali dei Ghiacciai della Sforzellina e del Dosegù. Le tabb. 4 e 5 evidenziano i risultati, che mostrano 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.

TABELLA 5 - Coefficienti di correlazione del bilancio di massa del Ghiacciaio della Sforzellina rispetto alle precipitazioni invernali.

TABLE 5 - Correlation coefficients between Ghiacciaio della Sforzellina terminus fluctuations and precipitations.

ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.32
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.28
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	-0.19
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	-0.31
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.99*
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.96**
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.47
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.56
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.91***
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.83
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.14
ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	+0.12

* $y = 4.7816x - 138.614$

** $y = 6.8416x - 146.509$

*** $y = 4.4006x - 164.003$

BIBLIOGRAFIA

- BELLONI S. (1967) - in DESIO A. (1967) - *I ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedale (Alpi Centrali)*. C.N.R. - Com. Glac. It., Tamburini Ed., Torino, 874 pp., 130 ff., 207 tabb.
- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1985) - *Parametri climatici e oscillazioni frontali dei ghiacciai italiani nell'ultimo sessantennio*. Mem. Soc. Geogr. It., 39, 169-193.

- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1986) - *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950-1982*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 97-123.
- BELLONI S., PELFINI M., SMIRAGLIA C. (1991) - *Oscillazioni frontali recenti dei ghiacciai e variazioni climatiche: Valtellina, un approccio metodologico*. In: «Le variazioni recenti del clima (1800-1900) e le prospettive per il XXI secolo». Mem. Soc. Geogr. It., 46, 167-182.
- BRATHWAITE R.I. & OLESEN O.B. (1990) - *Increased ablation at the margin of the Greenland ice sheet under a green house-effect climate*. Ann. Glaciology, 14, 20-22.
- CERUTTI A.V. (1971) - *Osservazioni sul progresso dei ghiacciai del Monte Bianco nell'ultimo decennio*. Boll. Com. Glac. It., ser. 2, 19, 251-271.
- CERUTTI A.V. (1975) - *Le condizioni termometriche e nivometriche nel periodo 1936-1970 sul versante meridionale del Monte Bianco e le variazioni di volume delle precipitazioni nevose nei bacini glaciali*. Boll. Com. Glac. It., ser. 2, 23, 31-50.
- CERUTTI A.V. (1977) - *Variazioni climatiche, alimentazione ed oscillazioni glaciali sul massiccio del Monte Bianco*. Boll. Com. Glac. It., ser. 2, 25, 53-88.
- CERUTTI A.V. (1986) - *Le variazioni glaciali e climatiche durante l'ultimo secolo nei Gruppi del Monte Bianco e del Monte Rosa*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 1985, 124-136.
- HAEBERLI W. (1990) - *Glacier and permafrost signals of 20th-century warming*. Ann. Glaciology, 14, 99-101.
- JACKA T.H. (1990) - *Antarctic and southern ocean sea-ice and climate trends*. Ann. Glaciology, 14, 127-130, 3 ff.
- JANIN B. (1970) - *Le Col du Grand-Saint Bernard Climat et Variations Climatiques*. Imprimerie Marguerettaz-Musumeci, Aoste, 112 pp.
- KASER G., AMES A. & ZAMORA M. (1990) - *Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca Peru*. Ann. Glaciology, 14, 136-144.
- LEFAUCONNIER B. & HAGEN J.O. (1990) - *Glaciers and climate in Svalbard: statistical analysis and reconstruction of the Brøggerbreen mass balance for the last 77 years*. Ann. Glaciology, 14, 1990, 148-152.
- LETREGUILLY A. (1988) - *Relation between the mass balance of western Canadian mountain glaciers and meteorological data*. Journ. Glaciology, 116, 11-18.
- LOVERA G. (1948) - *Analisi periodale delle oscillazioni del Ghiacciaio del Lys e dell'andamento di alcuni elementi meteorologici connessi*. Boll. Com. Glac. It., ser. 1, 25, 5-12.
- LUGARESTI C. (s.d.) - *Il bilancio di massa del Ghiacciaio della Sforzella nel periodo 1986/87-1989/90*. (Sottotesi di laurea inedita, Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano), 1-46, 11 ff., 10 tabb., A.A. 1989-90.
- MAC AYEL D.R. (1990) - *Proceeding of the Symposium on Ice and Climate held at Seattle, Washington, USA, 21-25 August 1989*. Ann. Glaciology, 14, 1990, I-XI + 1-377.
- MAYO L.R. & MARCH R.S. (1990) - *Air temperature and precipitation at Wolverine glacier, Alaska; glacier growth in a warmer, wetter climate*. Ann. Glaciology, 14, 1990, 191-194.
- MONTERIN U. (1932) - *Le variazioni secolari del clima del Gran San Bernardo: 1818-1931 e le oscillazioni del Ghiacciaio del Lys al Monte Rosa: 1789-1931*. Boll. Com. Glac. It., ser. 1, 12, 59-188.
- RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1982) - *I ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1979 Spostamenti delle fronti e variazioni climatiche*. Studi Trentini Sc. Nat., Acta Geologica, 59, 105-126.
- SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R. & ZECCHETTO S. (1990) - *Analisi delle misure alle fronti dei ghiacciai delle Alpi Giulie e correlazioni con i dati climatici*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 12, 1989, 139-149.
- SMIRAGLIA C. (1987) - *Il Ghiacciaio della Ventina (Val Malenco, Alpi Centrali): contributo alla conoscenza del «tempo di risposta»*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 9, 1986, 49-55.
- SMIRAGLIA C. & VEGGETTI O. (1991) - *Il Ghiacciaio del Calderone al Gran Sasso d'Italia. Variazioni recenti e relazioni con il clima*. In: «Le variazioni recenti del clima (1800-1990) e le prospettive per il XXI secolo». Mem. Soc. Geogr. It., 46, 183-198.
- TONINI D. (1963) - *Il ghiacciaio del Calderone del Gran Sasso d'Italia*. Boll. Com. Glac. It., ser. 2, 10, 71-135.
- YAFENG S. & JIAWEN R. (1990) - *Glacial recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and drying trend in central Asia*. Ann. Glaciol., 14, 261-265.