

RICCARDO RABAGLIATI (*) & ROSSANA SERANDREI BARBERO (*)

I GHIACCIAI DELLE ALPI PUSTERESI NELL'ULTIMO VENTENNIO: MODALITÀ E CAUSE DEL REGRESSO

ABSTRACT: RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R., *The Pusteresi Alps glaciers in the last twenty years: modality and cause of retreat*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

The Pusteresi Alps glaciers were identified and classified using Landsat TM images of September 1985, 1987, 1989 and 1991. The technique to identify glacier surfaces is based on a statistic classifier, which integrates remote sensed data with those from the digital terrain model. Surface values obtained concern all glaciers within the studied area independent of their dimension. They quantify the loss in glacier surface verified between 1985 and 1991 and indicate that in 1991, after the discordant trends evidenced in 1987 and 1989, the retreat was extended to all existing glaciers in the examined area. Frontal measurements made since 1977 till present show a prevailing retreat of the glacier snouts from 1983 and a more intensified retreating since 1991. The utilisation of results obtained by these different approaches and their comparison with the trend of temperature and precipitation data recorded at Predoi (1449 m) since 1977 allow to show temperature increases in 1986-87 as the main factor controlling snouts with a response time around 5 years; while the recent, progressive increase of glacier retreat is due to the scarcity of winter precipitations and their further decrease from 1988.

KEY WORDS: Glaciers, Snout variations, Remote sensing, Climate, Pusteresi Alps.

RIASSUNTO: RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R., *I ghiacciai delle Alpi Pusteresi nell'ultimo ventennio: modalità e cause del regresso*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

I ghiacciai delle Alpi Pusteresi sono stati individuati e classificati nelle immagini Landsat TM del Settembre 1985, 1987, 1989 e 1991. La tecnica utilizzata per riconoscere le superficie glacializzate si basa su un classificatore statistico che integra i dati telerilevati con quelli derivanti dal modello digitale del terreno. I valori di superficie ottenuti riguardano tutti i ghiacciai inclusi nell'area in esame indipendentemente dalle loro dimensioni. Essi quantificano la perdita di superficie glacializzata verificatasi tra il 1985 e il 1991 e indicano che nel 1991, dopo gli andamenti discordanti evidenziati nel 1987 e nel 1989, il regresso si è esteso alla totalità dei ghiacciai presenti nell'area in esame. Le misure effettuate dal 1977 ad oggi alle fronti mostrano ritiri frontali generalizzati dal 1983 e più accentuati dal 1991. L'utilizzo dei risultati ottenuti attraverso questi diversi approcci e il loro confronto con l'andamento dei dati

termopluviometrici registrati a Predoi (1449 m) dal 1977 permettono di indicare nell'aumento della temperatura, accentuatosi nel 1986 - 87, il principale fattore di controllo delle fronti con un tempo di risposta attorno ai 5 anni; mentre il progressivo, recente accentuarsi del regresso risulta imputabile alla scarsità delle precipitazioni invernali, in ulteriore calo dal 1988.

TERMINI CHIAVE: Ghiacciai, Variazioni fontali, Telerilevamento, Clima, Alpi Pusteresi.

INTRODUZIONE

Il gruppo delle Alpi Pusteresi (Alpi Noriche) comprende quei ghiacciai tributari del bacino idrografico del Torrente Aurino che, nel Catasto dei Ghiacciai Italiani (C.N.R.-C.G.I., 1962), corrispondono ai numeri dal 911 al 934. Si tratta complessivamente di 30 ghiacciai montani, di differente morfologia (circo, falda, pendio, vallone e versante) e di cui 4 considerati estinti, di superficie compresa tra 0,02 km² e 2,58 km².

I ghiacciai delle Alpi Pusteresi (fig. 1) coprono, complessivamente, una superficie glacializzata di circa 12 km² e fanno parte di quel complesso di ghiacciai delle Alpi Orientali descritto nelle immagini Landsat TM del Settembre 1985, 1987, 1989 e 1991 (Attardo & alii, 1989; Serandrei Barbero & alii, 1992, 1999a, 1999b).

Una precedente analisi sui ghiacciai delle Alpi Aurine e Pusteresi ne aveva analizzato i meccanismi di risposta alle variazioni dei parametri climatici (Serandrei Barbero & alii, 1995): le misure di spostamento frontale¹, disponibili dal 1929, indicavano una fase di regresso interrotta da una breve avanzata alla fine degli anni '70; i parametri climatici, registrati a Terme di Brennero dagli anni '20, mostravano che questa avanzata del 1977-83 era dovuta alle

(*) CNR, Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, San Polo 1364, 30125 Venezia (rose@isdgm.ve.cnr.it).

¹ Il termine «spostamento frontale» (cioè variazione della posizione della fronte) viene qui utilizzato al posto del meno preciso, anche se di uso corrente, «variazione frontale».

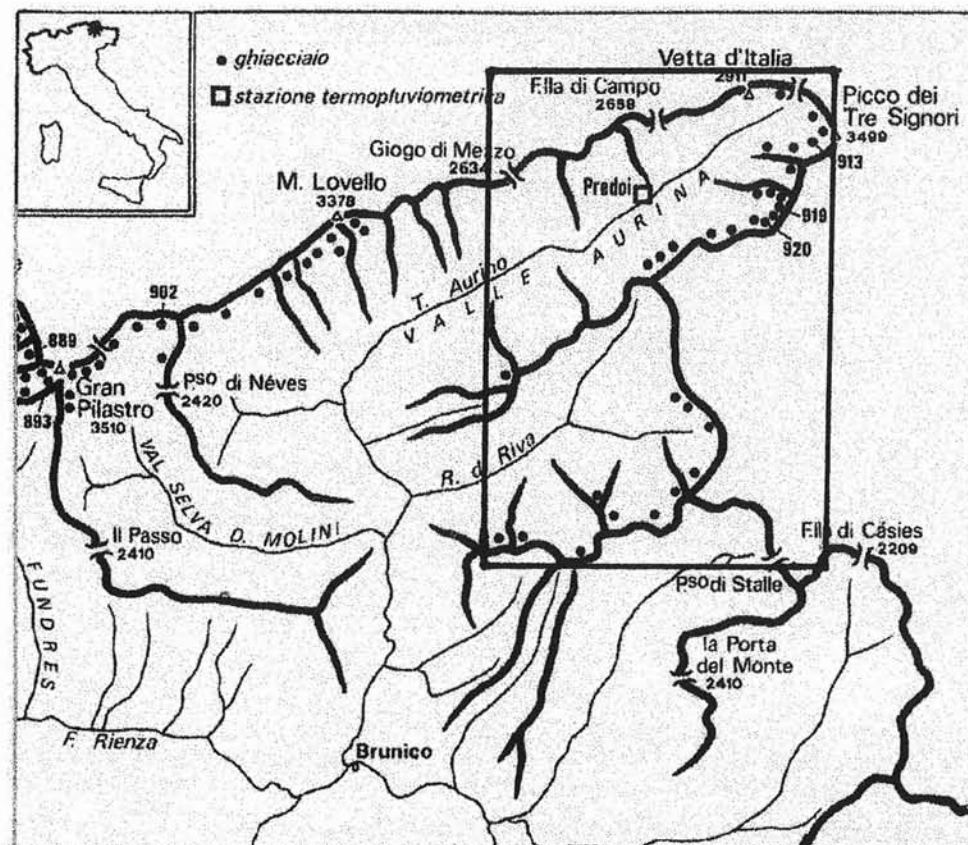


FIG. 1 - Ubicazione dei ghiacciai delle Alpi Pusteresi e della stazione termopluviometrica di Predoi (da: C.N.R.-C.G.I. 1959-1962, modificata).

FIG. 1 - Location of the Pusteres Glaciers and the temperature and rainfall recording station at Predoi, Italy (after C.N.R.-C.G.I. 1959-1962, modified).

concomitanti temperature estive inferiori alla media e precipitazioni invernali superiori alla media e suggerivano un persistere del ritiro visto il previsto perdurare del deficit di precipitazioni.

In questa stessa area, attraverso le immagini registrate da satellite nel periodo 1985-1991, sono state evidenziate tendenze evolutive diverse per l'incidenza delle dimensioni dei ghiacciai sul loro tempo di risposta (Serandrei Barbero & alii, 1999a).

La sequenza di dati telerilevati studiata cade all'interno del periodo 1977-1998 in cui sono disponibili i dati climatici registrati a Predoi (1449 m) e le osservazioni alle fronti secondo metodi tradizionali (C.G.I., 1978-1999).

Il sovrapporsi in questo ventennio di misure telerilevate, misure tradizionali e dati climatici offre l'opportunità di aggiornare le conclusioni raggiunte dalle precedenti indagini e di approfondire la comprensione dei meccanismi che controllano le fluttuazioni glaciali.

I DATI GLACIOLOGICI

a) I valori di superficie telerilevati

Tutti i ghiacciai delle Alpi Pusteresi sono stati identificati e classificati nelle immagini Landsat TM 192/27 ripre-

se nel Settembre del 1985, 1987 e 1989, in condizioni di massima ablazione. I ghiacciai delle Alpi Pusteresi meridionali (numeri dal 925a al 934) sono stati identificati anche nell'immagine Landsat TM del Settembre 1991 (fig. 2).

Le misure di superficie dei ghiacciai sono ottenute dai dati Landsat TM attraverso la metodologia descritta nei precedenti lavori. I ghiacciai sono classificati utilizzando le bande 1, 3 e 5 e un classificatore statistico che si avvale di procedure fuzzy (Wang, 1990; Binaghi and Rampini, 1993). Queste procedure, dato un insieme iniziale di pixel campione rappresentativi delle classi da individuare, hanno la capacità di associare caratteristiche fisiche diverse, come quote, valori di radianza o valutazioni qualitative, fornendo come risultato finale il grado di appartenenza di ciascun pixel ad ognuna delle classi previste. A causa delle particolari condizioni di illuminazione delle immagini in esame, caratterizzate da forti contrasti di luce per la ripidità e l'esposizione dei versanti, si è scelto di considerare tra le classi previste anche delle tipologie di copertura che tengano conto delle zone in ombra (Della Ventura & alii, 1987).

La classificazione ottenuta attraverso questa procedura viene successivamente affinata utilizzando i dati forniti dal modello digitale del terreno, dato che l'immagine da satellite è stata georeferenziata, sovrapposta cioè al modello digitale del terreno con un errore inferiore alla dimen-

TABELLA 1 - Superficie dei ghiacciai delle Alpi Pusteresi: i valori riportati (km²) si riferiscono al Catasto dei Ghiacciai Italiani (C.N.R.-C.G.I., 1959-1962), al Catasto dei Ghiacciai della Provincia di Bolzano (Provincia Autonoma di Bolzano - Ufficio Idrografico, 1982) e alle registrazioni Landsat TM del 9 Settembre 1985, 13 Settembre 1987, 18 Settembre 1989 e 24 Settembre 1991, elaborate presso l'Istituto per le Tecnologie Informatiche Multimediali del C.N.R., Milano

TABLE 1 - The surface of the Pusteresi Alps Glaciers: the listed values (km²) are from the Catasto dei Ghiacciai Italiani (C.N.R.-C.G.I., 1959-1962), from the Catasto dei Ghiacciai della Provincia di Bolzano (Provincia Autonoma di Bolzano - Ufficio Idrografico, 1982) and measured on the Landsat TM images of September 9th 1985, September 13th 1987, September 18th 1989 and September 24th 1991, processed at the Istituto per le Tecnologie Informatiche Multimediali del (C.N.R.) in Milan

Ghiacciaio		Superficie dei ghiacciai delle Alpi Pusteresi					
		cat	cat	tm	tm	tm	tm
		62	82	85	87	89	91
911	Orientale di Forcella del Picco	estinto					
1 912	di Predoi	0.560	0.910	0.811	0.758	0.717	
2 913	di Lana	1.320	1.690	1.640	1.350	1.459	
3		0.000	0.050	0.038	0.014	0.010	
4 914	Nord-Occidentale del Pié di Cavallo	0.170	0.360	0.286	0.189	0.151	
5		0.000	0.090	0.055			
6 915	Occidentale del Pié di Cavallo	0.024	0.070	0.049	0.041	0.018	
7 916	Sud-Occidentale del Pié di Cavallo	0.133	0.160	0.150	0.120	0.091	
8 917	Occidentale di Cima del Vento	0.022	0.100	0.094	0.088	0.046	
9 918	di Bocchetta del Vento di Fuor	0.058	0.170	0.155	0.060	0.024	
10 918a	a Destra del Ghiacciaio di Valle del Vento	0.025	0.060	0.033	0.036	0.036	
11 919	della Valle del Vento	0.273	0.360	0.364	0.212	0.192	
12 919a	di Monte Riva di Predoi	0.040	0.170	0.063			
13 920	Rosso Destro	0.718	1.000	0.962	0.899	0.873	
14 921	Rosso Sinistro	0.316	0.450	0.410	0.338	0.323	
15		0.000	0.080	0.058	0.014	0.014	
16 921a	Settentrionale di Bocchetta Caminata	0.045	0.100	0.088	0.025	0.025	
17 922	di Valle Rossa	0.524	0.740	0.626	0.492	0.565	
18 923	Settentrionale di Pizzo Lungo	0.158	0.230	0.221	0.096	0.110	
19 923a	Occidentale di Pizzo Lungo	0.038	0.080	0.074	0.051	0.028	
20 924	di Alprè	0.120	0.130	0.128	0.081	0.067	
21		0.000	0.100	0.057	0.046		
22 925	di Cima Dura	0.064	0.160	0.129	0.060		
23		0.000	0.060	0.058	0.035		
24		0.000	0.140	0.075			
1		0.000	0.050	0.015	0.016	0.011	
2		0.000	0.140	0.071	0.047	0.019	
3		0.000	0.070	0.065			
4		0.000	0.140	0.046	0.041	0.023	
5		0.000	0.050	0.020	0.015	0.010	
6		0.000	0.240	0.195	0.121	0.060	
7		0.000	0.310	0.250	0.245	0.248	
8 925a	Orientale di Sassolungo	0.190	0.260	0.226	0.175	0.198	0.198
9 925b	Centrale di Sassolungo	0.180	1.920	1.550	1.290	1.409	1.421 (0.150)
926	Occidentale di Sassolungo	1.300					(1.271)
10 927	di Collalto	0.470	0.830	0.749	0.660	0.654	0.568
11 928	Gigante Orientale	0.350	1.970	1.360	1.210	1.186	1.015 (0.175)
929	Gigante Centrale	1.430					(0.840)
12 930	Gigante Occidentale	2.590	2.570	2.490	2.400	2.472	2.340
13 931	di Monte Nevoso	0.480	0.900	0.691	0.604	0.540	0.498
14		0.000	0.370	0.228	0.175	0.131	
15 932	di Val Fredda	0.000	1.010	0.782	0.662	0.643	0.581
16 933	di Casavecchia	estinto					
934	di Cima Fumo Piccola	estinto					
perdita di superficie					- 2.643 -17.5%	-0.269 -2.2%	
perdita di superficie Pusteresi meridionali					- 0.847 -10.8%	+1.01 +1.4%	-0.481 -6.8%

sione del pixel (30 x 30 m). I risultati di questa classificazione (tab. 1) sono stati sottoposti ad una valutazione del livello di accuratezza, che è risultato superiore al 93 % (Serandrei Barbero & alii, 1999b). I dati del 1991, che, a differenza dei precedenti, utilizzano le bande 3, 4 e 5, si riferiscono ad una stagione di ablazione particolarmente

sfavorevole al glacialismo, in cui l'AAR è risultato pari a zero e il bilancio di massa marcatamente negativo: la totale mancanza di neve residua ha permesso per la prima volta di separare uno dall'altro gli apparati contigui (925b e 926, 928 e 929; cf. fig. 2) creando qualche difformità rispetto ai dati precedentemente registrati.

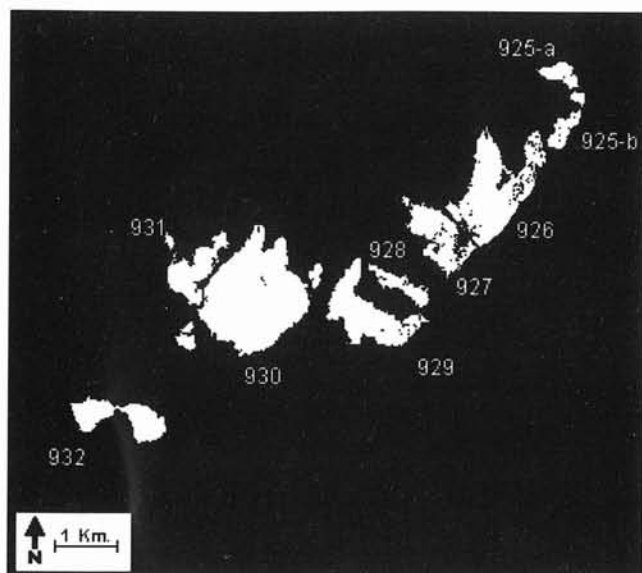


FIG. 2 - I ghiacciai delle Alpi Pusteresi meridionali (Vedrette di Ries) estratti dall'immagine Landsat TM del 24 Settembre 1991 (scala 1:100 000 circa): è osservabile la soluzione di continuità tra i ghiacciai Centrale di Sassolungo (925b) e Occidentale di Sassolungo (926) e tra Gigante Orientale (928) e Gigante Centrale (929). (Elaborazione effettuata da E. Binaghi e A. Rampini presso l'Istituto per le Tecnologie Informatiche Multimediali, C.N.R., Milano).

FIG. 2 - Southern Pusteresi Glaciers (Vedrette di Ries) extracted from Landsat TM images of 24 September 1991 (scale 1:100 000 about): the solution of continuity is observable between the Central (925b) and Western (926) Sassolungo Glaciers and between the Eastern (928) and Central (929) Gigante Glaciers. (Image processing by E. Binaghi and A. Rampini, CNR Istituto per le Tecnologie Informatiche Multimediali, Milano, Italy).

I ghiacciai delle Pusteresi mostrano un complessivo regresso dal 1985 al 1989 (tab. 1), all'interno del quale risaltano dei valori discordanti che attenuano in parte l'entità del ritiro areale complessivo, che risulta di 2,643 km² nel 1987 e di 0,269 km² nel 1989. Questi valori in opposizione di tendenza, nel 1987 interessano solo il ghiacciaio 918a, mentre nel 1989 riguardano sia alcuni apparati con superficie maggiore di 1 km² (ghiacciai 913, 925b + 926 e 930) sia i piccoli ghiacciai 922 e 923. I valori di superficie misurati nel 1991 (fig. 3) sui ghiacciai delle Alpi Pusteresi meridionali mostrano un regresso generalizzato con una perdita di superficie glacializzata (tab. 1) dello stesso ordine di grandezza della riduzione verificatasi nel 1987. Solo i ghiacciai 925b e 926, considerati nel loro insieme, mostrano una tendenza opposta.

b) Gli spostamenti frontali

Su 3 ghiacciai delle Pusteresi settentrionali (913, 919 e 920; cfr. Tab. 1 per i toponimi corrispondenti) e su 5 delle Pusteresi meridionali (926, 927, 929, 930 e 931) nell'ultimo ventennio sono stati sistematicamente misurati gli

spostamenti frontali (cf. Cibir, Giannoni e Serandrei Barbero in C.G.I., 1977-1998).

Sui ghiacciai delle Pusteresi nel periodo esaminato è in corso un regresso che si instaura dopo una breve oscillazione positiva che si può considerare conclusa nel 1983 (fig. 4). Le distanze misurate nei diversi anni rispetto ad alcuni segnali fissi indicano nel ventennio 1978-1998 ritiri frontali complessivi compresi tra 42 m (media del ritiro dei 2 segnali prospicienti il ghiacciaio 931) e 269 m (relativi al ghiacciaio 929). I regressi minori (rispettivamente 42 e 54 m) riguardano 2 ghiacciai inferiori a 0,5 km² (ghiacciaio 927 e 931). Il ghiacciaio di superficie compresa tra 0,5 e 1 km² (ghiacciaio 920) ha subito un regresso frontale di 130 m. I ghiacciai con superficie superiore ad 1 km² (ghiacciai 913, 926, 929 e 930) mostrano regressi frontali compresi tra 68 e 269 m.

La pendenza delle curve degli spostamenti frontali nei diversi anni li descrive in termini di velocità annua. Essa risulta massima per i ghiacciai 919, 920 e 929. Queste massime velocità di regresso osservate sembrano dovute allo scarso spessore dell'unghia frontale che, caratterizzata da una debole pendenza, ha registrato una continua perdita di volume per il succedersi di bilanci netti marcatamente negativi favorendo l'instaurarsi di discontinuità nella copertura glaciale che, a loro volta, accelerano i locali processi di ablazione con la perdita improvvisa di interi settori frontali (Serandrei Barbero in C.G.I., 1998).

Per rendere confrontabili tra loro le misure di spostamento frontale, indipendentemente dalla posizione iniziale della fronte e dalla frequenza delle osservazioni, è stato

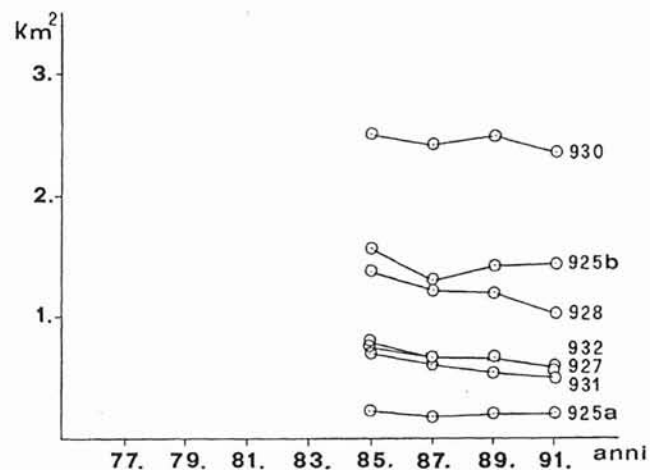


FIG. 3 - Alpi Pusteresi meridionali: valori di superficie dei singoli ghiacciai ottenuti dalle registrazioni Landsat TM del Settembre 1985, 1987, 1989, 1991. I ghiacciai sono identificati dal loro numero secondo il Catasto dei Ghiacciai Italiani (C.N.R.-C.G.I., 1959-1962).

FIG. 3 - Southern Pusteresi Alps: surface values of the single glaciers obtained from the Landsat TM registrations of September 1985, 1987, 1989, and 1991. Glaciers are identified according to their number in the Inventory of Italian Glaciers (*Catasto dei Ghiacciai Italiani*) (C.N.R.-C.G.I. 1959-1962).

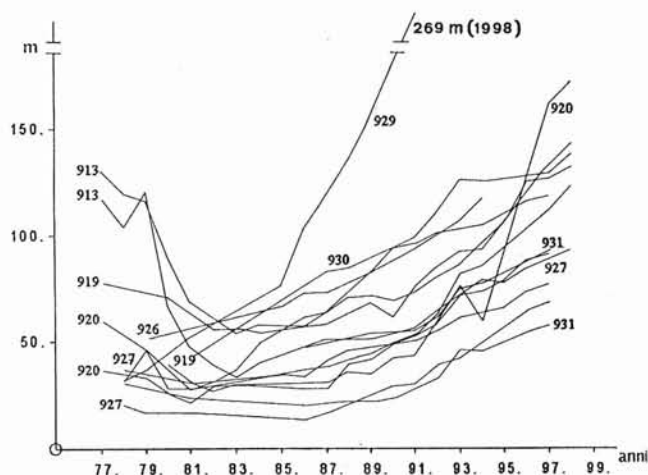


FIG. 4 - Alpi Pusteresi: distanza delle fronti dei ghiacciai dai segnali di riferimento dal 1977 al 1998 (misure approssimate a $\pm 0,5$ m). I ghiacciai sono identificati dal loro numero secondo il Catasto dei Ghiacciai Italiani (C.N.R.-C.G.I., 1959-1962): curve contrassegnate dallo stesso numero si riferiscono a segnali diversi di uno stesso ghiacciaio. L'insieme delle curve evidenzia una generale avanzata tra il 1977 e il 1983, più accentuata per il ghiacciaio 913, a cui segue il regresso tuttora in atto, con velocità massima per i ghiacciai 920 e 929.

FIG. 4 - Pusteresi Alps: distance of glacier snout from the reference signal from 1977 to 1998 (approximated ± 0.5 m). Glaciers are identified by their inventory number from the *Catasto dei Ghiacciai Italiani* (C.N.R.-C.G.I., 1959-1962): curves marked with the same number refer to the different signals of the same glacier. The whole of the curves shows a general glacial advance between 1977 and 1983, more marked in glacier 913, followed by a retreat currently occurring at a maximum rate for the glaciers 920 and 929.

utilizzato il valore ottenuto dalla differenza tra due misure successive divisa per il numero di anni che caratterizza l'intervallo tra le due misure; e attraverso la media annua di tutti questi valori si è ottenuta la curva della velocità media degli spostamenti frontali dal 1979 al 1998 (fig. 5), dove l'avanzata corrisponde ai valori positivi della velocità e il regresso ai valori negativi. Il grafico evidenzia l'avanzata verificatasi fino al 1983 con velocità massima nel 1980 e il regresso tutt'ora in corso che, instauratosi dopo il 1983, presenta una velocità media progressivamente crescente e un valore massimo nel 1993.

DATI CLIMATICI

Nel bacino idrografico del Torrente Aurino è operativa dal 1977 la stazione termopluviometrica di Predoi (1449 m) appartenente alla Provincia Autonoma di Bolzano. A Predoi l'anno medio 1978-1998 (tab. 2) ha temperatura minima in Gennaio ($-3,8^{\circ}\text{C}$) e massima in Luglio ($+14,3^{\circ}\text{C}$) e precipitazioni (tab. 3) minime in Febbraio (34,1 mm) e massime in Luglio (133,0 mm). L'anno medio 1978-1993 è caratterizzato da una temperatura minima in Gennaio di $-3,9^{\circ}\text{C}$ e da precipitazioni massime in Luglio corrispondenti a 136,5 mm. Il confronto tra i due

TABELLA 2 - Anno termometrico medio a Predoi (1449 m) per i periodi 1978-1993 e 1978-1998

TABLE 2 - Average yearly temperature in Predoi (1449 m) referred to the periods 1978-1993 and 1978-1998

mesi	anno medio 1978-1998 $^{\circ}\text{C}$	anno medio 1978-1993 $^{\circ}\text{C}$
1	-3.80	-3.90
2	-3.00	-3.20
3	0.36	0.40
4	3.29	3.30
5	8.04	7.80
6	11.35	11.30
7	14.28	14.30
8	13.80	13.90
9	10.62	10.90
10	6.15	6.00
11	0.76	0.60
12	-2.50	-2.40
media	4.95	4.92

TABELLA 3 - Anno pluviometrico medio a Predoi (1449 m) per i periodi 1980-1993 e 1980-1998

TABLE 3 - Average yearly rainfall in Predoi (1449 m) referred to the periods 1980-1993 and 1980-1998

mesi	anno medio 1980-1998 mm	anno medio 1980-1993 mm
1	37.3	38.3
2	34.1	42.3
3	38.8	42.5
4	57.5	56.5
5	93.0	92.9
6	124.3	118.7
7	133.0	140.8
8	119.0	126.8
9	89.3	87.6
10	80.5	79.1
11	59.1	54.9
12	58.5	62.8
totale	924.4	943.2

periodi esaminati, che differiscono solo di un quinquennio, indica che gli anni 90 sono caratterizzati da temperature più elevate e da precipitazioni più scarse, come dimostrano (tabb. 2 e 3) i valori della temperatura media annua (che sono rispettivamente di $4,92^{\circ}\text{C}$ nel periodo 1978-1993 e di $4,95^{\circ}\text{C}$ nel periodo 1978-1998) e delle precipitazioni medie annue (rispettivamente di 943,2 mm nel periodo 1980-1994 e di 924,4 mm nel 1980-1998). In particolare la temperatura media annua (fig. 6) dalla seconda metà degli anni '80 è prevalentemente superiore al valore medio del periodo mentre le precipitazioni totali annue (fig. 7) mostrano un brusco calo dal 1992.

Sull'arco alpino il gradiente medio annuo della temperatura risulta di $0,5^{\circ}\text{C}$ ogni 100 m di dislivello (Corbel, 1963; Ca' Zorzi & alii, 1984). A 2632 m (media approssimata della quota frontale dei ghiacciai nel Gruppo delle Pusteresi), la riduzione della temperatura rispetto a Pre-

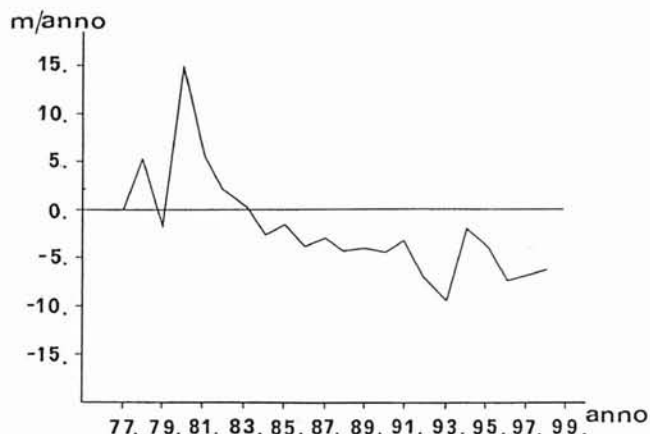


FIG. 5 - Velocità media annua degli spostamenti misurati alla fronte dei ghiacciai delle Alpi Pusteresi: l'avanzata e il regresso (m anno^{-1}) sono espressi, rispettivamente, da valori positivi o negativi risultanti dalla differenza tra la distanza media delle fronti dai segnali fissi in due anni successivi.

FIG. 5 - Yearly mean velocity of displacements measured at the snouts of the Pusteresi Glaciers: advance and retreat (m year^{-1}) are expressed by positive and negative values respectively resulting from the difference between the mean distance of the snouts from the reference signals measured over a two consecutive years.

doi risulta di circa 6°C e i conseguenti valori medi mensili della temperatura nei mesi da Novembre ad Aprile risultano (cf. tabella 2) nettamente inferiori a 0°C e definiscono la durata della stagione di accumulo e di ablazione.

Nel periodo esaminato la temperatura media del periodo di ablazione (fig. 6, in alto) presenta una lieve tendenza all'aumento, mentre la temperatura media del periodo di accumulo mostra un aumento di circa 2°C dal 1987. Le precipitazioni del periodo di accumulo (fig. 7, in basso), oltre a risultare stabilmente più basse di quelle in periodo di ablazione, mostrano una tendenza alla diminuzione dal 1988.

DISCUSSIONE

In accordo con il gradiente termico medio dell'arco alpino, i dati termometrici mensili registrati a Predoi (m 1449) sono in media di $1,3 \pm 0,9^{\circ}\text{C}$ inferiori a quelli di Terme di Brennero (m 1320), utilizzati nella precedente analisi (Serandrei Barbero & alii, 1995). La correlazione lineare tra le temperature medie mensili delle due stazioni per il decennio 1978-1988, in cui l'acquisizione dei dati è continua in entrambe le stazioni, risulta di $+0,99$, dove $+1$ indica una perfetta relazione diretta tra due variabili (Davis, 1986). Per quanto riguarda le precipitazioni mensili, che differiscono in media di $2 \pm 33,7$ mm, la correlazione lineare, calcolata per il solo periodo 1980-1983 date le frequenti lacune nei dati, risulta comunque apprezzabile ($+0,78$). E per questo motivo l'analisi delle cause del comportamento glaciale nel Gruppo delle Pusteresi può rife-

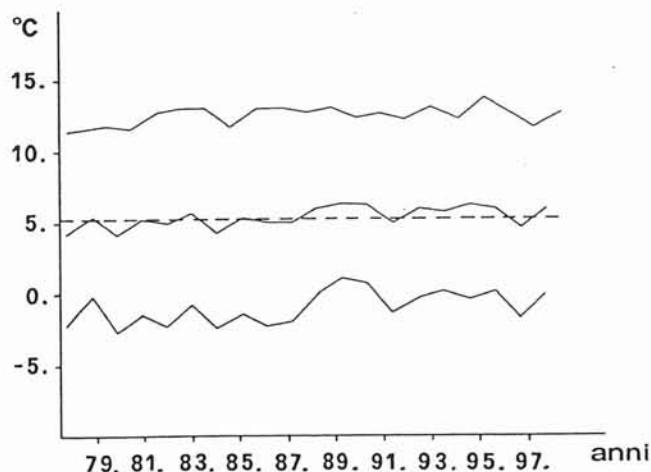


FIG. 6 - Predoi (1449 m): temperatura media annua (in centro), temperatura media del semestre Maggio-Ottobre (in alto) e del semestre Novembre-Aprile (in basso) dal 1978 al 1998; la linea tratteggiata al centro corrisponde alla media annua del periodo.

FIG. 6 - Predoi (1449 m): yearly mean temperature (center), mean temperature for May-October (upper) and November-April (lower) from 1978 to 1998; the dashed line in the central graph corresponds to the yearly mean of the period.

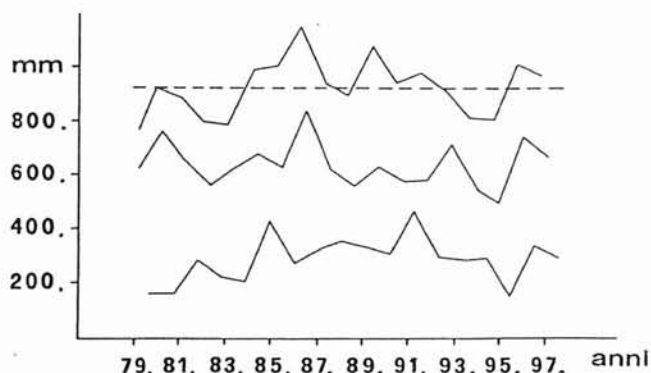


FIG. 7 - Predoi (1449 m): precipitazione totale annua (in alto) e dei semestri Maggio-Ottobre (in centro) e Novembre-Aprile (in basso) dal 1980 al 1998; la linea tratteggiata in alto corrisponde alla precipitazione annua media del periodo.

FIG. 7 - Predoi (1449 m): yearly total rainfall, May-October rainfall (upper) and November-April rainfall (lower) from 1980 to 1998; the dashed line in the upper graph corresponds to the yearly mean precipitation of the period.

rirsi sia alla stazione termopluviometrica di Predoi, come nella presente indagine, sia alla stazione di Terme di Brennero, precedentemente utilizzata.

Il confronto degli spostamenti frontali con i dati climatici registrati a Terme di Brennero dal 1929 aveva messo in relazione le due fasi di avanzata del secolo scorso, negli anni '20 e '70, con la debole periodicità cinquanten-

nale delle precipitazioni; il regresso, in atto dai primi anni '80, succedeva, con tempi di risposta diversi a seconda delle dimensioni dei ghiacciai, all'aumento della temperatura estiva, forzante principale dell'ablazione (Kuhn, 1993), superiore alla media dal 1980 circa e alla riduzione delle precipitazioni invernali, iniziata attorno al 1970. I tempi di risposta, strettamente legati alle dimensioni dei ghiacciai (Johannesson & alii, 1989), risultavano maggiori per i ghiacciai di maggiori dimensioni e valutabili attorno ai 5 anni per le temperature e almeno doppi per le precipitazioni; e permettevano di ipotizzare, nel 1994, il persistere del regresso, effettivamente verificatosi, per il deficit delle precipitazioni invernali ancora in atto.

La brevità del periodo utilizzato per lo studio dei ghiacciai delle Alpi Pusteresi impedisce una precisa valutazione dei tempi di risposta attraverso le usuali correlazioni statistiche (Belloni & alii, 1985, 1990; Rabagliati e Serandrei Barbero 1982; Smiraglia 1986; Serandrei Barbero & alii, 1989); ma la coincidenza dei risultati ottenuti dai dati telerilevati e dalle misure alle fronti concorre a mettere in luce i meccanismi che controllano il regresso, che avviene durante il persistere del deficit di precipitazioni invernali in atto durante il ventennio esaminato e che va accentuandosi dal 1988.

L'andamento della temperatura mostra un brusco aumento dei valori medi relativi alla stagione di accumulo a partire dal 1986-1987 (fig. 6); questo aumento di circa 2°C accorcia drasticamente i tempi di transizione tra la stagione di accumulo e quella di ablazione che ne risulta, da allora, enfatizzata.

L'effetto di questo aumento è avvertito dai ghiacciai delle Pusteresi attorno al 1990, con un brusco aumento della pendenza nelle curve relative agli spostamenti frontali (cf. fig. 3); mentre i dati rilevati da satellite confermano questo accentuarsi del regresso, con l'uniformarsi nel 1991 dei comportamenti glaciali e la sparizione di quelle tendenze discordanti presenti nel 1989. Solo sui ghiacciai 925b e 926, considerati nel loro insieme, sembra in atto un andamento opposto che non risulta confermato dalle misure alla fronte del ghiacciaio 926; ma la misura ottenuta dai dati Landsat risente dell'imprecisione dovuta al fatto che nel 1991, per la prima volta, questi ghiacciai risultano distinguibili e l'errore attribuibile ai pixel disposti lungo il loro contorno è diverso da quello effettuato nella valutazione globale dei due ghiacciai, considerati, nelle precedenti immagini classificate, come un'unica superficie.

CONCLUSIONI

Gli andamenti degli spostamenti frontali mostrano regressi massimi per i ghiacciai 920 e 929, entrambi superiori a 0,5 km², e valori minimi per i ghiacciai 927 e 931, entrambi di superficie inferiore a 0,5 km².

I dati di superficie ottenuti attraverso le immagini da satellite danno, per le Alpi Pusteresi, una perdita di superficie glacializzata di 2,643 km² nel 1987 e di 0,269 km² nel 1989. Sui ghiacciai delle Alpi Pusteresi meridionali il regresso misurato nel 1991 risulta di 0,481 km², delle stes-

so ordine di grandezza della perdita di 0,847 km² misurata nel 1987, e indica, dopo gli andamenti discordanti osservati nel 1989, un uniformarsi dei comportamenti glaciali malgrado le differenze di dimensioni e di morfologia.

Nel 1991 il regresso appare generalizzato per il perdurare delle forzanti ben oltre il tempo di risposta dei ghiacciai; e le misure effettuate alle fronti confermano questi risultati con l'aumento nel 1991 della pendenza delle curve relative alla distanza della fronte dei singoli ghiacciai dai segnali di riferimento.

Le immagini telerilevate, con la loro valutazione sincrona della superficie di tutti i ghiacciai di una data area, permettono quindi di cogliere, all'interno di una fase evolutiva, l'esistenza di opposte tendenze legate all'influenza dei tempi di risposta; queste tendenze discordanti sono solo parzialmente rilevate dalle misure tradizionali, che in genere escludono quell'insieme di ghiacciai minori (< 0,05 km²) che pure rappresentano sulle Alpi Orientali circa il 40% della superficie glacializzata (Serandrei Barbero & alii, 1999a).

L'approccio multidisciplinare qui utilizzato, accostando i risultati ottenuti con tecniche diverse, permette di trarre le seguenti conclusioni:

1) L'instaurarsi di una nuova fase evolutiva è graduale perchè controllata dai tempi di risposta di ciascun ghiacciaio; sui ghiacciai delle Pusteresi la durata del periodo di transizione tra avanzata e regresso è di circa un decennio e i comportamenti glaciali si uniformano solo nel 1991, con l'accentuarsi del regresso.

2) La causa principale dell'accentuarsi del regresso dopo il 1990 risulta essere l'aumento di circa 2°C della temperatura media della stagione di accumulo verificatosi a partire dal 1986-1987 e che da allora anticipa l'instaurarsi annuo dell'ablazione; il progressivo aumento della velocità di regresso appare anche legato alla scarsità delle precipitazioni invernali, accentuatasi dal 1988.

3) Per ghiacciai di dimensioni entro qualche km², quali quelli delle Alpi Pusteresi, i tempi di risposta delle fronti alle temperature estive si confermano attorno ai 5 anni mentre i tempi di risposta alle precipitazioni invernali risultano di entità almeno doppia.

4) Questi tempi di risposta, dato l'andamento termopluviometrico dell'ultimo decennio, non lasciano prevedere nei prossimi anni alcuna flessione nel regresso in corso.

BIBLIOGRAFIA

- ATTARDO C., DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1989) - *I ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nell'immagine Landsat TM del 7/9/85*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 12, 3-17.
- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1985) - *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950-1982*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 97-123.
- BELLONI S., PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (1990) - *Parametri climatici e variazioni glaciali*. In: *La Geologia degli anni '90*. Riassunti «Posters 75° Congr. Soc. Geol. It.», Milano 10-12 Settembre 1990, 14.

- BINAGHI E. & RAMPINI A. (1993) - *Fuzzy decision making in the classification of multisource remote sensing data*. Optical Engineering, 32, 6, 1193-1203.
- CA' ZORZI F., DALLA FONTANA G. & FATTORELLI S. (1984) - *Simulazione idrologica del bacino del Cordevole*. Regione Veneto, Dip. Foreste, Centro Sperimentale Valanghe, Arabba, Quaderni di Ricerca, 106 pp.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1978-1998) - *Relazioni delle campagne glaciologiche 1977-1997: Ghiacciai delle Pusteresi*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 1-21.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE-COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1962) - *Catasto dei Ghiacciai Italiani*, 4, Torino, 309 pp.
- CORBEL J. (1963) - *Glaciers et climats dans le Massif du Mont Blanc*. Rev. Geogr. Alp., 51, 321-360.
- DAVIS J.C. (1986) - *Statistics and data analysis in Geology*. Wiley, New York, 646 pp.
- DELLA VENTURA A., RAMPINI A., RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1987) - *Development of a satellite remote sensing technique for the study of alpine glaciers*. Int. Journ. Remote Sensing, 8, 203-215.
- JOHANNESSON T., RAYMOND C.F. & WADDINGTON E.D. (1989) - *A simple method for determining the response time of glaciers*. In: Oerlemans J. (ed), *Glacier Fluctuations and Climatic Change*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 343-352.
- KUHN M. (1993) - *Methods for assessing the effects of climatic changes on snow and glacier hydrology*. IAHS Publ. 218, Oxfordshire, 135-144.
- PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - UFFICIO IDROGRAFICO (1982) - *Catasto dei Ghiacciai della Provincia di Bolzano* (inedito).
- RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1982) - *I ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1979. Spostamenti delle fronti e variazioni climatiche*. St. Trent. Sc. Nat., 59, Acta Geologica, 105-126.
- SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R. & ZECCHETTO S. (1989) - *Analisi delle misure alle fronti dei ghiacciai delle Alpi Giulie e correlazioni con i dati climatici*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 12, 139-149.
- SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R., ATTARDO C., DELLA VENTURA A. & RAMPINI A. (1992) - *Le variazioni biennali di superficie dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nei dati Landsat TM del 13 Settembre 1987*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 15, 177-188.
- SERANDREI BARBERO R., MATTANA U. & ZECCHETTO S. (1995) - *Glacismo recente e variazioni climatiche nelle Alpi Aurine e Pusteresi (Alpi Orientali)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 18, 337-344.
- SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R., BINAGHI E. & RAMPINI A. (1999a) - *Glacial retreat in the 1980s in the Breonie, Aurine and Pusteresi Groups (Eastern Alps, Italy) in Landsat TM images*. Hydrol. Sc. Journ., 44, 2, 279-296.
- SERANDREI BARBERO R., BINAGHI E., GALLI C., RABAGLIATI R. & RAMPINI A. (1999b) - *Le Vedrette di Ries (Alpi Pusteresi) nell'immagine Landsat TM del 24 Settembre 1991*. In: *Scritti geografici e geologici in onore di Severino Belloni* (a cura di G. Orombelli), 569-580, Univ. di Milano, Brigati, Genova.
- SMIRAGLIA C. (1986) - *Il Ghiacciaio della Ventina (Val Malenco, Alpi Centrali): contributo alla conoscenza del tempo di risposta*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 9, 49-55.
- WANG F. (1990) - *Fuzzy supervised classification of remote sensing images*. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing 28,2, 194-200.