

ROSSANA SERANDREI BARBERO (*), RICCARDO RABAGLIATI (*),
CARMELO ATTARDO (**), ANNA DELLA VENTURA (**), ANNA RAMPINI (**)

LE VARIAZIONI BIENNALI DI SUPERFICIE DEI GHIACCIAI DELLE ALPI BREONIE, AURINE E PUSTERESI NEI DATI LANDSAT TM DEL 13 SETTEMBRE 1987

Abstract: SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R., ATTARDO C., DELLA VENTURA A. & RAMPINI A. - *Biennial Surface Variations of the Breonie, Aurine and Pusteresi Glaciers (Eastern Alps) in Landsat TM data of 13 September 1987.* (IT ISSN 0391-9838, 1992).

With the aim of making a temporal comparison among data acquired using the same technique, the glacier surfaces of the Breonie, Aurine and Pusteresi Alps were obtained from the Landsat TM data of 13 September 1987.

Of the one hundred Italian glaciers included in the considered image, 15% of them do not appear in the image because of cloud cover or due to a slipping of the image towards the East. For 74 glaciers it was possible to compare the extension of their surfaces with the 1985 values. The comparison clearly shows a marked decrease in glacierized or snow-covered areas. This is in agreement with the ground data collected which indicate 1987 as a year of exceptional ablation and such to bring about the disappearance of numerous glacierets; 15 of these, in fact, do not appear in the image of 13 September, 1987.

The results are discussed for the different Alpine sectors and, where possible, the data obtained are compared with field observations or analyzed in detail by extraction of glacier boundaries in the two years considered. The decreasing is less for the larger glaciers; decreases sometimes very pronounced regard either small glaciers located below the yearly snow line or snow glacierets first described in the 1982 Inventory.

Due to the extension of the considered area, the analysis used a low cost methodology which, even if not using the digital elevation model, gave quantitative synoptic data for 89 Alpine glaciers.

KEY WORDS: Remote sensing, Glaciers, Breonie, Aurine, Pusteresi Alps.

Riassunto: SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R., ATTARDO C., DELLA VENTURA A. & RAMPINI A. - *Le variazioni biennali di superficie dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nei dati Landsat TM del 13 Settembre 1987.* (IT ISSN 0391-9838, 1992).

Allo scopo di effettuare un confronto temporale tra dati acquisiti con la stessa tecnica, dall'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 sono state estratte le superficie dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi, oggetto di una precedente analisi su dati Landsat TM del 1985.

(*) C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, S. Polo 1364, 30124 Venezia.

(**) C.N.R., Istituto di Fisica Cosmica, Via Ampère 56, 20133 Milano.

Ricerca eseguita con contributi del M.P.I. (Fondi 40% 1989, resp. prof. S. Belloni).

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).

Del centinaio di ghiacciai appartenenti al territorio italiano inclusi nell'immagine considerata, il 15% è risultato mancante o perché nascosto dalla sia pur esigua copertura nuvolosa, o perché fuori scena per un lieve slittamento dell'immagine verso Est. Per 74 ghiacciai è stato possibile confrontare l'estensione della superficie con i valori del 1985, evidenziando un'accentuata diminuzione delle aree glacializzate o innevate, in accordo con i dati raccolti sul terreno che indicano il 1987 come un anno di ablazione eccezionale e tale da portare alla scomparsa di numerosi glacionevati; 15 di essi non compaiono nell'immagine del 13 Settembre 1987.

I risultati vengono discussi per i diversi settori delle Alpi e i dati ottenuti confrontati, dove possibile, con le osservazioni di campagna o analizzati in dettaglio attraverso l'estrazione del contorno nei due anni considerati. Le riduzioni areali sono risultate relativamente contenute per i ghiacciai più estesi; riduzioni talora molto accentuate riguardano o ghiacciai di piccole dimensioni ubicate al di sotto del limite delle nevi dell'anno o glacionevati segnalati per la prima volta nel Catasto del 1982.

Data l'estensione dell'area considerata, l'analisi ha utilizzato una metodologia a basso costo che, pur non disponendo del modello digitale del terreno, ha fornito informazioni quantitative sinottiche per 89 ghiacciai dell'arco alpino.

TERMINI CHIAVE: Telerilevamento, Ghiacciai, Alpi Breonie, Aurine, Pusteresi.

INTRODUZIONE

Un primo approccio (RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1979) aveva indicato la confrontabilità tra entità delle variazioni di superficie dei ghiacciai dell'arco alpino e risoluzione al suolo delle registrazioni Landsat. Erano quindi stati analizzati i ghiacciai della Valle Aurina in immagini Landsat MSS riprese in 3 anni diversi (DELLA VENTURA & *alii*, 1986) misurandone le variazioni di superficie e di innevamento residuo e risolvendo i problemi connessi con le zone in ombra e la ripidità dei versanti mediante un approccio semistatistico (DELLA VENTURA & *alii*, 1987).

La stessa tecnica è stata successivamente applicata alle registrazioni Landsat TM che, per la loro maggior risoluzione, meglio si accordano con le variazioni di superficie dei ghiacciai alpini. L'indagine (ATTARDO & *alii*, 1989), utilizzava l'immagine Landsat TM 192/27 del 7 settembre 1985 comprendente le Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nella loro totalità e i risultati indicavano una generica fase

di progresso rispetto al 1962 e condizioni di regresso rispetto al 1982, pur risultando difficile quantificarne l'entità dato che venivano confrontati valori di superficie acquisiti con tecniche diverse: sistemi cartografici per il Catasto dei Ghiacciai Italiani (C.N.R. - C.G.I., 1959-62), aerofotogrammetrici per il Catasto dei Ghiacciai della Provincia di Bolzano (PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - UFFICIO IDROGRAFICO, 1982) ⁽¹⁾ e di registrazioni da satellite per il 1985.

È stata quindi analizzata, a distanza di 2 anni dalla prima, una nuova immagine TM 192/27 per verificare, dal confronto di valori ottenuti con la stessa tecnica, la reale entità delle fluttuazioni di superficie a breve termine dei ghiacciai e l'effettiva operatività delle attuali registrazioni da satellite. L'indagine utilizza una metodologia a basso costo (ATTARDO & *alii*, 1988) che, prescindendo dal modello digitale del terreno (che valuta la pendenza di ogni frazione di suolo rispettivamente di 57 × 79 m nelle immagini MSS e di 30 × 30 m nelle immagini TM) calcola la superficie reale di ogni ghiacciaio utilizzando il valore della pendenza media.

I DATI

Nel biennio 1987-88 l'unica registrazione Landsat TM 192/27 disponibile ⁽²⁾ ed utilizzabile in termini di copertura nuvolosa all'interno del periodo utile, cioè tra metà Agosto e la fine di Settembre, è risultata quella del 13 settembre 1987 (fig. 1), malgrado la presenza di qualche nuvola nel settore meridionale dell'immagine.

Rispetto al centinaio di ghiacciai identificati nella registrazione del 1985, 15 sono risultati mancanti o perché nascosti dalla sia pur esigua copertura nuvolosa (7 ghiacciai) o perché fuori scena (8 ghiacciai) per un lieve slittamento verso Est dell'immagine registrata, con la perdita di alcuni ghiacciai delle Alpi Breonie (tab. 1), prossime al limite sud-occidentale dell'immagine. Altri 15 ghiacciai non sono stati identificati. Complessivamente dall'immagine del 1987 sono stati estratti 74 ghiacciai.

ANALISI DEI DATI

Alpi Breonie. Sulle Alpi Breonie (fig. 2) nel 1985 erano stati identificati 25 ghiacciai; nel 1987 ne sono stati identificati 9 (tab. 1), 3 sono risultati non identificati, 8 fuori scena e 5 coperti da nuvole.

La campagna glaciologica con metodi tradizionali interessa 2 di essi, il Ghiacciaio di Malavalle (n. 15 nella presente classificazione), risultato fuori scena, e il Ghiacciaio Pendente (n° 17). Per entrambi viene segnalata (FRANCHI in COM. GLAC. IT., 1988, pag. 164) una notevole riduzione

ne dovuta, per il primo, oltre che all'arretramento frontale, anche alle numerose zone rocciose lasciate scoperte; per il secondo, alla completa sparizione del lobo sinistro della fronte. Il confronto dei contorni del Ghiacciaio Pendente ricavati dalle immagini TM del 1987 e del 1985 (fig. 3) evidenzia la contrazione di superficie e la sparizione della propaggine frontale sinistra.

Nelle Alpi Breonie le riduzioni percentuali minori (-7,65; -10,95; -19,35) riguardano gli apparati più estesi (rispettivamente n° 21, 17, 23). Le riduzioni maggiori riguardano invece o ghiacciai di piccole dimensioni ubicati interamente al di sotto del limite delle nevi dell'anno (n° 6, 14) o piccoli glacionevati (n° 13, 16, 22, 15) non riportati nel Catasto del 1959-62, segnalati per la prima volta nel Catasto del 1982 e ubicati anch'essi interamente al disotto del limite delle nevi dell'anno. A questa categoria appartengono anche i 3 ghiacciai non identificati (n° 18, 19 e 20). Sulle Alpi Breonie, la perdita totale di superficie glacializzata o innevata tra il 1985 e il 1987 è di 0,818 km², includendo i 3 glacionevati non identificati.

Alpi Aurine Occidentali. Sulle Alpi Aurine Occidentali (fig. 4) nel 1985 erano stati identificati 19 ghiacciai; nel 1987 ne sono stati classificati 12 (tab. 2) e 7 sono risultati non identificati. Per il 1987 non sono disponibili in questo settore delle Alpi dati raccolti con misure di campagna, ma nel 1988 per il Ghiacciaio della Quaira Bianca (n° 7 della presente classificazione) e per il Ghiacciaio del Gran Pilastro (n° 11) viene segnalata (MATTANA in COM. GLAC. IT., 1989, pag. 200) una fase di accentuato regresso in atto da qualche anno.

La riduzione di superficie misurata per questi due ghiacciai nell'immagine Landsat TM del 1987 è rispettivamente del 4,96 e del 7,78 per cento. Riduzioni talora molto accentuate riguardano invece i ghiacciai di piccole dimensioni; in particolare il Ghiacciaio Occidentale del Gran Pilastro (n° 8) e il Ghiacciaio Centrale del Gran Pilastro (n° 9), che sono considerati glacionevati nel catasto del 1982, e il Ghiacciaio della Guardia Alta (n° 12), interamente ubicato al disotto del limite delle nevi dell'anno.

La perdita totale di superficie per i ghiacciai delle Alpi Aurine Occidentali tra il 1985 e il 1987 risulta di 0,997 km², includendo la superficie dei 7 glacionevati non identificabili; di essi, i n° 13, 14, 15, 17, 18 comparivano per la prima volta nel Catasto del 1982, il n° 16 era indicato estinto nel Catasto del 1959-62 e tutti, meno il n° 6, erano ubicati a quote inferiori al limite delle nevi dell'anno 1987.

Alpi Aurine Orientali. Sulle Alpi Aurine Orientali (fig. 5) nel 1985 erano stati identificati 20 ghiacciai; nel 1987 ne sono stati identificati 18 (tab. 3) e 2 sono risultati coperti da nuvole.

In questo settore delle Alpi nel 1987 non sono state effettuate misure alle fronti; ma le osservazioni di campagna del 1988 (MATTANA in COM. GLAC. IT., 1989, pag. 200) segnalano per il Ghiacciaio Orientale di Neves (n° 7 della presente classificazione) l'accentuarsi della fase di regresso in atto dal 1985. La riduzione totale di superficie rispetto al 1985 misurata per questo ghiacciaio nei dati

⁽¹⁾ D'ora in poi indicati rispettivamente come Catasto del 1959-62 e Catasto del 1982.

⁽²⁾ Il passaggio del satellite Landsat su di una data porzione di territorio avviene ogni 16 giorni, ma non sempre il sistema di registrazione è operativo.

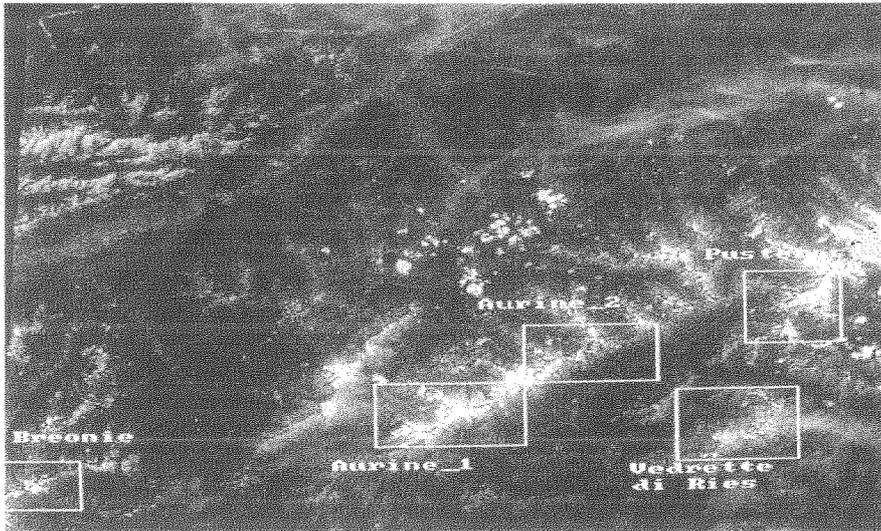


FIG. 1 - Rappresentazione in livelli di grigio della banda 2 dell'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987, III° quadrante (scala 1:1.000.000 circa).

FIG. 1 - Band 2 grey levels representation of Landsat TM 192/27 image of 13 Settembre 1987, III quadrant (scale of 1:1,000,000 approx.).

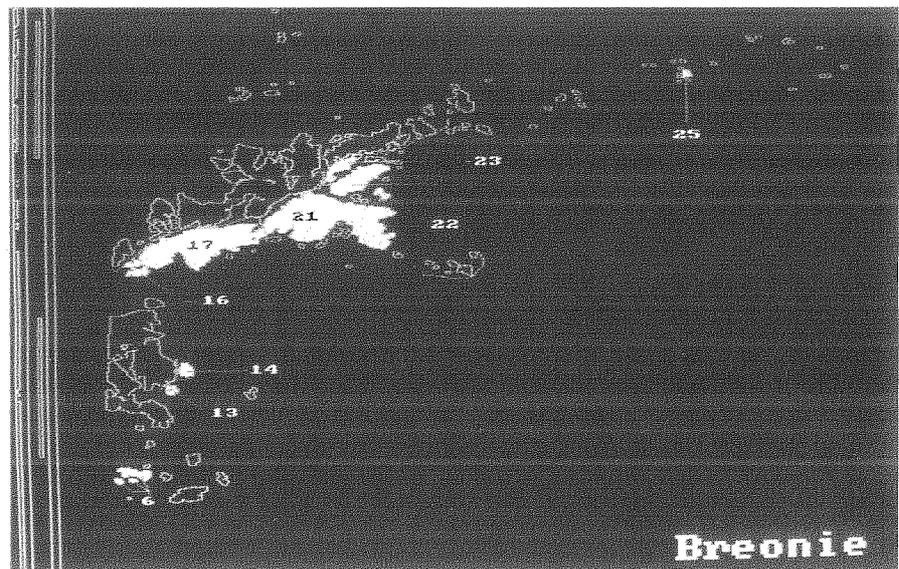


FIG. 2 - Alpi Breonie - Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai dall'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 (scala 1:200.000 circa).

FIG. 2 - Breonie Alps. Result of extraction of the boundary of glaciers from Landsat TM 192/27 image of 13 Settembre 1987 (scale of 1:200,000 approx.).

Landsat TM del 1987 è del 7,96 per cento, probabilmente in parte da addebitare all'attiguo Ghiacciaio del Prete (n° 8), indicato come glacionevato nei dati del 1982, interamente ubicato al disotto del limite delle nevi dell'anno 1987 e non distinguibile dal Ghiacciaio Orientale di Neves nell'immagine TM di quell'anno.

Le riduzioni percentuali di superficie misurate in questo settore delle Alpi sono contenute entro il 10 per cento tranne che per il Ghiacciaio del Dosso Largo (n° 4), il Ghiacciaio Sud Orientale di Giogo del Conio (n° 19) e il Ghiacciaio di Punta di Valle (n° 20). Di essi, il 19 è considerato nei dati del 1982 di tipo incerto data la copertura di neve vecchia sull'intera superficie, il 20 è indicato come glacionevato e tutti e 2, piccoli e di esiguo spessore, sono interamente ubicati al di sotto della quota delle nevi dell'anno 1987. Per il Ghiacciaio del Dosso Largo (n° 4)

si è proceduto al confronto (fig. 6) del contorno estratto dall'immagine del 1987 con quello del 1985, evidenziando la sparizione del settore frontale, in parte probabilmente solo apparente e legato all'aumentata copertura di materiale morenico.

La perdita totale di superficie tra il 1985 e il 1987 per i ghiacciai delle Alpi Aurine Orientali, esclusi i due ghiacciai coperti da nuvole, è di 0,64 km².

Alpi Pusteresi Settentrionali. Sulle Alpi Pusteresi Settentrionali (fig. 7) nel 1985 erano stati identificati 24 ghiacciai; nel 1987 ne sono stati classificati 21 (tab. 4) e 3 sono risultati non identificati.

La campagna glaciologica con metodi tradizionali interessa 3 di essi, il Ghiacciaio di Lana (n° 2 della presente classificazione), il Ghiacciaio della Valle del Vento (n° 11) e il Ghiacciaio Rosso Destro (n° 13). Per tutti viene se-

TABELLA 1 - Ghiacciai delle Alpi Breonie - Risultato della classificazione dell'immagine Landsat TM del 13 Settembre 1987; valori di superficie e differenze rispetto ai valori del 1985 (in ultima colonna le differenze percentuali).

TABLE 1 - Breonie Alps glaciers. Result of the classification by the Landsat TM image of 13 September 1987: surface values and differences with respect to 1985 values (last column gives percentage differences).

Numero TM	Numero Cat. 62	Numero Cat. 82	Area '82 (km ²)	AreaTM85 (km ²)	AreaTM87 (km ²)	Pixel contorno	Pixel totali	Dif85/87 (km ²)	Dif85/87 (%)
6	867	I/4L00111312	0.230	0.206	0.092	72	229	-0.114	-55.44
13		I/4L00121106	0.050	0.036	0.024	26	40	-0.012	-32.50
14	874	I/4L00121107	0.080	0.072	0.053	34	80	-0.019	-26.25
16		I/4L00121109	0.130	0.094	0.048	36	105	-0.047	-49.42
17	876	I/4L00121110	1.380	1.370	1.220	311	1520	-0.150	-10.95
21	880	I/4L00121204	1.630	1.700	1.570	351	1893	-0.130	-7.65
22		I/4L00121205	0.050	0.037	0.024	25	41	-0.013	-34.15
23	881	I/4L00121206 I/4L00121207	0.540	0.522	0.421	207	580	-0.101	-19.35
25		I/4L00121208	0.090	0.029	0.022	22	29	-0.007	-25.00

Num	Cat.62	Cat.82	Note				
1	867	I/4L00111307	fuori scena	10	871	I/4L00121103	coperto da nuvole
2	863	I/4L00111308	fuori scena	11	872	I/4L00121104	coperto da nuvole
3	864	I/4L00111309	fuori scena	12	873	I/4L00121105	coperto da nuvole
4	865	I/4L00111310	fuori scena	15	875	I/4L00121108	fuori scena
5	866	I/4L00111311	fuori scena	18	877	I/4L00121201	non identificato
7	868	I/4L00111313 I/4L00111314	fuori scena	19	878	I/4L00121202	non identificato
8	869	I/4L00121101	coperto da nuvole	20	879	I/4L00121203	non identificato
9	870	I/4L00121102	coperto da nuvole	24	861a	I/4L00111306	fuori scena

gnalata (SERANDREI BARBERO in COM. GLAC. IT., 1988, pag. 165) una riduzione di pochi metri per quanto concerne la posizione della fronte, ma, in generale, una riduzione di spessore, la sparizione di placche di nevato e l'aumento di materiale morenico di superficie.

In questo settore delle Alpi le riduzioni di superficie glacializzata misurate tra il 1985 e il 1987 nei dati Landsat TM risultano particolarmente rilevanti sia per i piccoli ghiacciai che per quelli estesi. Tuttavia tutti i ghiacciai che presentano riduzioni maggiori del 50% (n° 3, 9, 15, 16, 18 e 22) e i 3 non identificati (5, 12 e 24) sono formazioni classificate come glacionevati nel catasto del 1982 e la cui quota più alta è al di sotto del limite delle nevi dell'anno. In questa tipologia rientrano anche il n° 19 e il n° 20; mentre per il n° 4 e il n° 11, la marcata riduzione sembra da attribuire anche all'aumento della copertura detritica, che si traduce in una apparente riduzione di superficie nelle immagini telerilevate.

Sulle Alpi Pusteresi Settentrionali la perdita totale di superficie glacializzata o innevata misurata tra il 1985 e il 1987 è di 1,622 km², includendo i 3 glacionevati non identificati.

Alpi Pusteresi Meridionali (Vedrette di Ries). Sulle Alpi Pusteresi Meridionali (fig. 8) nel 1985 erano stati identificati 16 ghiacciai; nel 1987 ne sono stati classificati 14 (tab. 5) e 2 sono risultati non identificati.

La campagna glaciologica con metodi tradizionali ha interessato, nel 1987, 6 di essi, rispettivamente il Ghiacciaio Occidentale di Sassolungo (n° 9 della presente classificazione), il Ghiacciaio di Collalto (n° 10), il Ghiacciaio Gigante Orientale e Centrale (raggruppati insieme sotto il n° 11, perché non separabili nell'immagine da satellite), il Ghiacciaio Gigante Occidentale (n° 12) e il Ghiacciaio Occidentale di Monte Nevoso (che insieme al Ghiacciaio Orientale di Monte Nevoso costituisce l'unità n° 13). Per essi viene in genere segnalato (CIBIN in COM. GLAC. IT., 1988, pp. 166-167) un ritiro più o meno marcato; solo il Ghiacciaio Occidentale di Sassolungo viene indicato stazionario: la riduzione di superficie tra il 1985 e il 1987 registrata nell'immagine Landsat sembra da addebitare almeno in parte al fatto che nel suo valore di superficie è incluso (come anche nel Catasto del 1982) il Ghiacciaio Centrale di Sassolungo, piccola placca di pendio posta quasi interamente al di sotto del limite delle nevi.

TABELLA 2 - Ghiacciai delle Alpi Aurine Occidentali - Risultato della classificazione dell'immagine Landsat TM del 13 Settembre 1987; valori di superficie e differenze rispetto ai valori del 1985 (in ultima colonna le differenze percentuali).

TABLE 2 - West Aurine Alps glaciers. Result of the classification by the Landsat TM image of 13 September 1987: surface values and differences with respect to 1985 values (last column gives percentage differences).

Numero TM	Numero Cat. 62	Numero Cat. 82	Area '82 (km ²)	AreaTM85 (km ²)	AreaTM87 (km ²)	Pixel contorno	Pixel totali	Dif85/87 (km ²)	Dif85/87 (%)
1	882	I/4L00121301	0.110	0.048	0.044	44	53	-0.004	- 7.55
2	883	I/4L00121302	0.420	0.360	0.348	135	401	-0.012	- 3.33
3	884	I/4L00121303	0.350	0.249	0.191	97	277	-0.058	-23.29
5	885	I/4L00121304	0.210	0.193	0.140	77	110	-0.053	-27.46
	886	I/4L00121305							
7	889	I/4L00121309	1.410	1.410	1.340	352	1567	-0.070	- 4.96
8	890	I/4L00121310	0.100	0.088	0.031	30	98	-0.058	-65.31
9	891	I/4L00121311	0.080	0.060	0.023	25	66	-0.037	-61.19
10	892	I/4L00121312	0.140	0.104	0.104	47	116	0.000	+ 0.00
11	893	I/4L00121313	2.620	2.570	2.370	427	2861	-0.200	- 7.78
12	893a	I/4L00121314	0.310	0.299	0.139	92	331	-0.160	-53.51
19		I/4L00121322	0.080	0.067	0.057	42	74	-0.010	-14.86

Num	Cat.62	Cat.82	Note
6	887	I/4L00121306	non identificato
13		I/4L00121315	non identificato
14		I/4L00121316	non identificato
15		I/4L00121318	non identificato

Il confronto ottenuto per il Ghiacciaio di Collalto (n° 10) tra i contorni estratti dalle immagini del 1987 e del 1985 (fig. 9) evidenzia la contrazione della fronte e il denudamento di numerose aree rocciose nella zona di ablazione del ghiacciaio e lungo il confine con il Ghiacciaio Occidentale di Sassolungo (n° 9).

Un analogo confronto per il Ghiacciaio Gigante Occidentale (n° 12), il più esteso e insieme quello che presenta la minor riduzione di superficie (3,6 per cento), evidenzia (fig. 10) la marcata contrazione del settore frontale e delle parti confinanti con la vicina unità n° 13.

I ghiacciai più estesi presentano riduzioni di superfi-

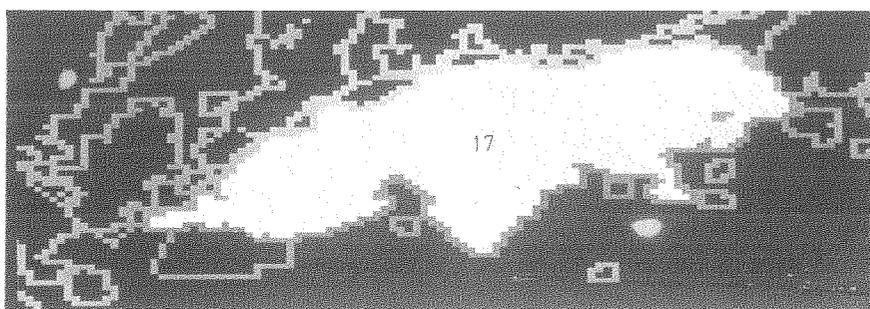
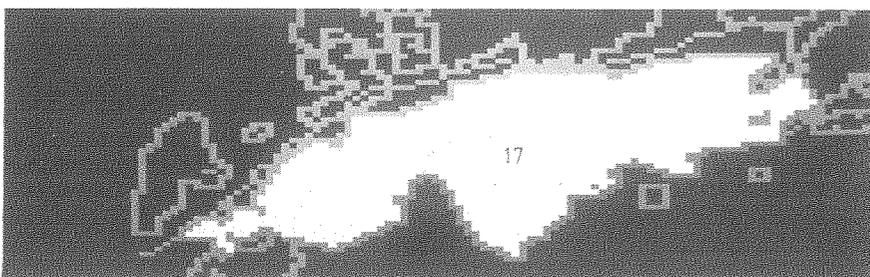


FIG. 3 - Ghiacciaio Pendente (Alpi Breonie) - Risultati dell'estrazione del contorno del ghiacciaio dalle immagini TM del 13 Settembre 1987 (in basso) e del 7 Settembre 1985 (scala 1:25.000 circa; esposizione Sud).

FIG. 3 - Ghiacciaio Pendente (Breonie Alps). Results of the extraction of the glacier boundary from the TM image of 13 September 1987 (bottom) and 7 September 1985 (scale of 1:25,000 approx.; southern exposure).



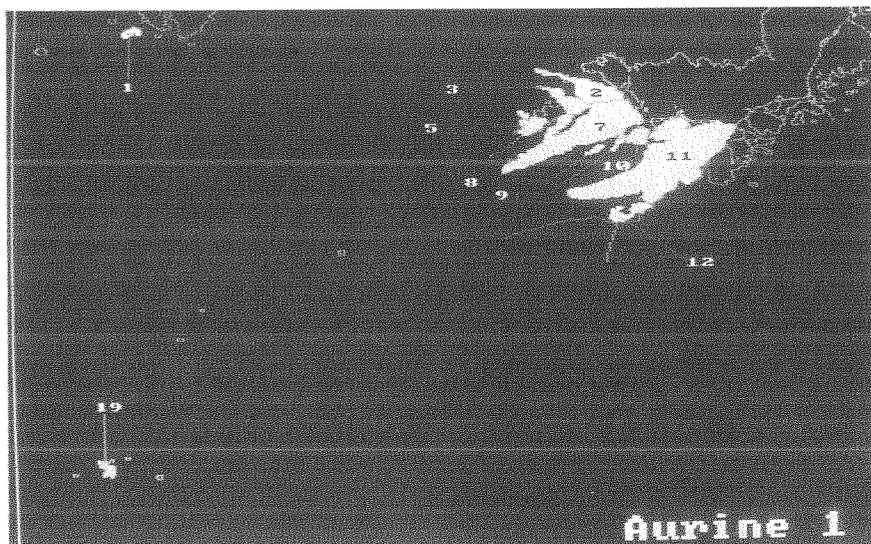


FIG. 4 - Alpi Aurine Occidentali - Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai dall'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 (scala 1:200.000 circa).

FIG. 4 - West Aurine Alps. Result of the extraction of the glacier boundary from the Landsat TM 192/27 image of 13 September 1987 (scale of 1:200,000 approx.).

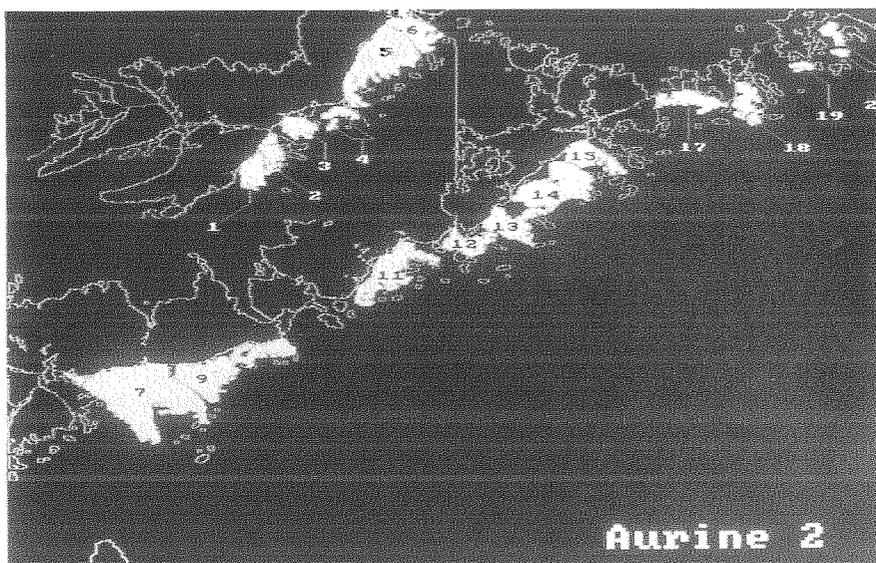


FIG. 5 - Alpi Aurine Orientali - Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai dall'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 (scala 1:200.000 circa).

FIG. 5 - East Aurine Alps. Result of the extraction of the boundary of glaciers from the Landsat TM 192/27 image of 13 September 1987 (scale of 1:200,000 approx.).

cie comprese tra 3,6 e 16,7 per cento. Le unità che presentano riduzioni maggiori del 20 per cento (n° 2, 5, 6, 8, 14) sono classificate, escluso il n° 8 che è un piccolo ghiacciaio di pendio, come glacionevati nel Catasto del 1982 e sono interamente ubicate (escluso il n° 6) a quota inferiore al limite delle nevi dell'anno 1987; anche i 2 glacionevati non identificati (n° 3 e 16) presentano queste caratteristiche.

Nelle Alpi Pusteresi Meridionali la perdita totale di superficie glacializzata o innevata tra il 1985 e il 1987 è di 1,589 km² includendo i due glacionevati non identificati.

RISULTATI

Il confronto delle superfici estratte dall'immagine del 13 Settembre 1987 con quelle del 7 Settembre 1985 indi-

ca una diminuzione di superficie glacializzata di 4,336 km² per il settanta per cento dei ghiacciai inclusi nell'area analizzata. Inoltre, essendo il 1987 un anno di ablazione eccezionale, abbiamo considerato effettivamente scomparsi i 15 glacionevati non identificati nell'immagine TM del 1987; scomparsa, peraltro, direttamente osservata, in quell'anno, anche in altri settori delle Alpi (MERCALLI in COM. GLAC. IT., 1988, pag. 131). La loro area era, nei dati Landsat TM del 1985, di 1,33 km². Di questi, 0,77 km² appartengono a piccole formazioni classificate come glacionevati nel Catasto del 1982, compilato al termine di un periodo di ripresa dell'attività glaciale, e spesso non menzionate nel precedente Catasto del 1959-62; e 0,56 km² appartengono a piccoli ghiacciai indicati come estinti nel Catasto del 1959-62 e classificati come glacionevati nel Catasto del 1982.

La perdita di superficie glacializzata o innevata tra il 1985 e il 1987 risulta quindi, per l'ottantacinque per cen-

TABELLA 3 - Ghiacciai delle Alpi Aurine Orientali - Risultato della classificazione dell'immagine Landsat TM del 13 Settembre 1987; valori di superficie e differenze rispetto ai valori del 1985 (in ultima colonna le differenze percentuali).

TABLE 3 - East Aurine Alps glaciers. Result of the classification by the Landsat TM Image of 13 September 1987: surface values and differences with respect to 1985 values (last column gives percentage differences).

Numero TM	Numero Cat. 62	Numero Cat. 82	Area '82 (km ²)	AreaTM85 (km ²)	AreaTM87 (km ²)	Pixel contorno	Pixel totali	Dif85/87 (km ²)	Dif85/87 (%)
1	895	I/4L00123101	0.300	0.292	0.266	99	325	-0.026	- 8.90
2	896	I/4L00123102	0.230	0.163	0.160	104	181	-0.003	- 1.84
3	897 898	I/4L00123104	0.240	0.233	0.215	79	228	-0.018	- 7.73
4	899	I/4L00123105	0.260	0.174	0.119	89	193	-0.055	- 31.61
5	900	I/4L00123106 I/4L00123107	1.110	1.110	1.120	303	1230	0.010	+ 0.90
6	901	I/4L00123108	0.370	0.384	0.384	178	426	0.000	+ 0.00
7	902 903	I/4L00123109 I/4L00123110	2.320	2.249	2.070	403	2430	-0.179	- 7.96
9	904	I/4L00123201 I/4L00123202 I/4L00123203	1.130	1.030	0.950	366	1149	-0.080	- 7.77
11	906	I/4L00123205	0.810	0.701	0.692	297	779	-0.009	- 1.28
12	907	I/4L00123206 I/4L00123207 I/4L00123208	0.390	0.361	0.325	187	401	-0.036	- 9.97
13		I/4L00123209	0.420	0.435	0.438	184	484	0.003	+ 0.69
14	908	I/4L00123210	0.970	0.935	0.863	230	1039	-0.072	- 7.70
15	908a	I/4L00123211 I/4L00123212	0.450	0.374	0.355	161	415	-0.019	- 5.08
17	909a	I/4L00123215 I/4L00123216	0.310	0.314	0.308	155	349	-0.006	- 1.91
18	910	I/4L00123217	0.270	0.272	0.289	167	302	0.017	+ 6.25
19	910a	I/4L00123218	0.130	0.095	0.058	42	106	-0.038	- 39.51
20	910b	I/4L00123219	0.210	0.200	0.131	97	220	-0.069	- 34.50

Num	Cat.62	Cat.82	Note
10	905	I/4L00123204	coperto da nuvole
16	909	I/4L00123213	coperto da nuvole

to dei ghiacci, di complessivi 5,666 km²; dalla valutazione sono esclusi i 15 ghiacciai coperti da nuvole o fuori scena.

Nell'immagine del 1987 non è stata calcolata l'estensione della area innevata per la quasi totale scomparsa (ZANON in COM. GLAC. IT., 1988, pag. 161) delle nevi dell'anno; nelle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi il 13 Settembre 1987 il limite delle nevi era al di sopra dei 3 000 m e quindi spesso superiore alla quota massima dei ghiacciai.

CONCLUSIONI

Dall'immagine Landsat TM 192/27 del 1987 si sono ottenute informazioni sinottiche per 89 ghiacciai (l'ottantacinque per cento dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Auri-

ne e Pusteresi) malgrado i limiti imposti dalla copertura nuvolosa e dallo slittamento dell'immagine.

Per 11 di essi sono disponibili le misure effettuate alla fronte con metodi tradizionali. Esse sono qualitativamente in accordo con i risultati del confronto tra i dati Landsat TM del 1987 e quelli del 1985, rispetto ai quali si registra un marcato regresso.

Per i ghiacciai più estesi le riduzioni areali sono risultate relativamente contenute. Le riduzioni areali maggiori riguardano o ghiacciai di piccole dimensioni, ubicati interamente al di sotto del limite delle nevi dell'anno 1987, o glacionevati segnalati per la prima volta nel catasto del 1982; formazioni il cui esiguo spessore facilita il denudamento di vaste aree rocciose anche in presenza di modesti ritiri frontali.

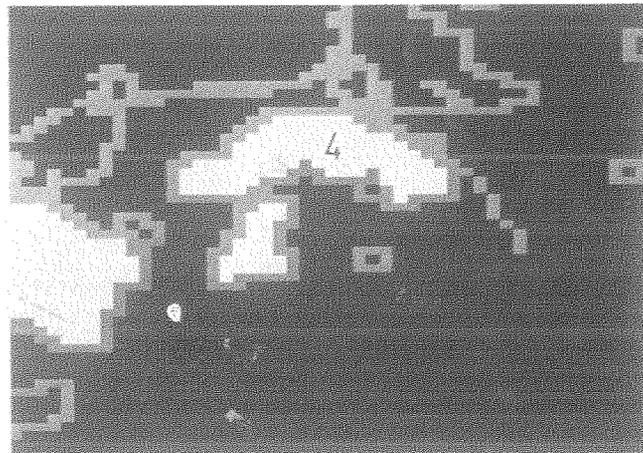
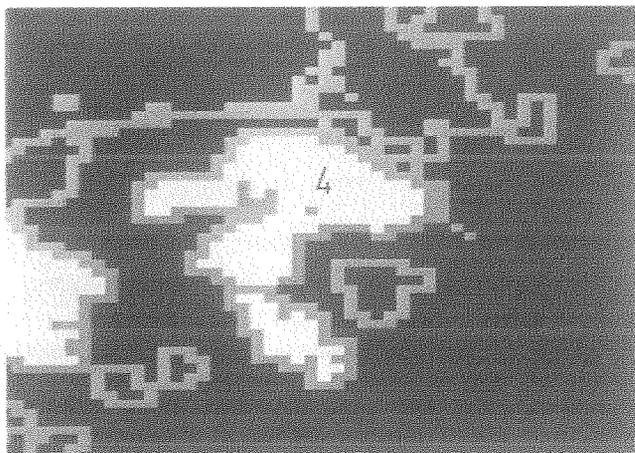


FIG. 6 - Ghiacciaio del Dosso Largo (Alpi Aurine Orientali) - Risultati dell'estrazione del contorno del ghiacciaio dalle immagini TM del 13 Settembre 1987 (a destra) e del 7 Settembre 1985 (scala 1:25.000 circa; esposizione Sud).

FIG. 6 - Ghiacciaio del Dosso Largo (East Aurine Alps). Results of the extraction of the glaciers boundary from the TM Image of 13 September 1987 (right) and 7 September 1985 (scale of 1:25,000 approx.; southern exposure).

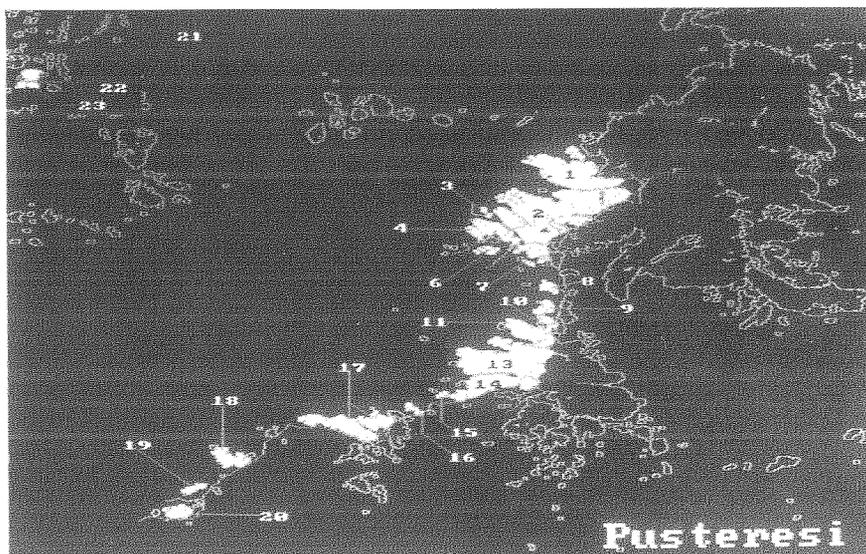


FIG. 7 - Alpi Pusteresi Settentrionali - Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai dall'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 (scala 1:200.000 circa).

FIG. 7 - North Pusteresi Alps. Result of the extraction of the boundary of glaciers from the Landsat TM 192/27 image of 13 September 1987 (scale of 1:200,000 approx.).

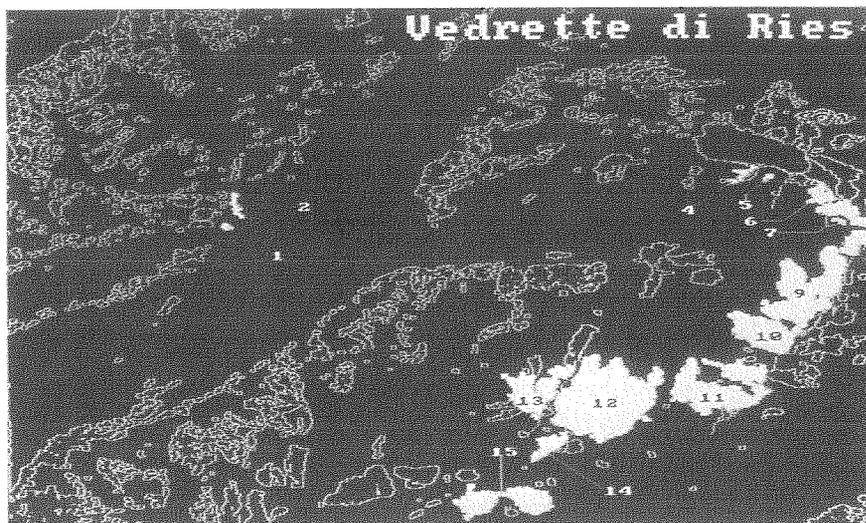


FIG. 8 - Alpi Pusteresi Meridionali (Vedrette di Ries) - Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai dall'immagine Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 (scala 1:200.000 circa).

FIG. 8 - South Pusteresi Alps (Vedrette di Ries). Result of the extraction of the boundary of glaciers from Landsat TM 192/27 image of 13 September 1987 (scale of 1:200,000 approx.).

TABELLA 4 - Ghiacciai delle Alpi Pusteresi Settentrionali - Risultato della classificazione dell'immagine Landsat TM del 13 Settembre 1987; valori di superficie e differenze rispetto ai valori del 1985 (in ultima colonna le differenze percentuali).

TABLE 4 - North Pusteresi Alps glaciers. Result of the classification by the Landsat TM image of 13 September 1987: surface values and differences with respect to 1985 values (last column gives percentage differences).

Numero TM	Numero Cat. 62	Numero Cat. 82	Area '82 (km ²)	AreaTM85 (km ²)	AreaTM87 (km ²)	Pixel contorno	Pixel totali	Dif85/87 (km ²)	Dif85/87 (%)
1	912	I/4L00123222	0.910	0.811	0.758	289	901	-0.053	- 6.54
2	913	I/4L00123223	1.690	1.640	1.350	575	1822	-0.290	- 17.68
3		I/4L00123224	0.050	0.038	0.014	15	42	-0.024	- 64.29
4	914	I/4L00123225	0.360	0.286	0.189	108	318	-0.097	- 33.92
6	915	I/4L00123227	0.070	0.049	0.041	36	54	-0.007	- 14.81
7	916	I/4L00123228 I/4L00123229	0.160	0.150	0.120	57	166	-0.030	- 20.00
8	917	I/4L00123230	0.100	0.094	0.088	76	105	-0.006	- 6.66
9	918	I/4L00123231	0.170	0.155	0.060	51	173	-0.095	- 61.10
10	918a	I/4L00123232	0.060	0.033	0.036	31	37	0.003	+ 8.11
11	919	I/4L00123233	0.360	0.364	0.212	106	405	-0.152	- 41.76
13	920	I/4L00123234 I/4L00123236	1.000	0.962	0.899	251	1071	-0.063	- 6.55
14	921	I/4L00123237	0.450	0.410	0.338	129	456	-0.072	- 17.56
15		I/4L00123238	0.080	0.058	0.014	15	64	-0.043	- 75.00
16	921a	I/4L00123239	0.100	0.088	0.025	25	97	-0.062	- 71.26
17	922	I/4L00123240 I/4L00123241	0.740	0.626	0.492	292	695	-0.134	- 21.41
18	923	I/4L00123242	0.230	0.221	0.096	86	245	-0.125	- 56.43
19	923a	I/4L00123243	0.080	0.074	0.051	46	82	-0.023	- 30.49
20	924	I/4L00123244	0.130	0.128	0.081	57	143	-0.047	- 36.72
21		I/4L00123245	0.100	0.057	0.046	49	63	-0.011	- 19.05
22	925	I/4L00123247	0.160	0.129	0.060	40	143	-0.069	- 53.26
23		I/4L00123246	0.060	0.058	0.035	31	64	-0.023	- 39.06

Num	Cat.62	Cat.82	Note
5		I/4L00123226	non identificato
12	919a	I/4L00123235	non identificato
			24 I/4L00123248 non identificato

Per talune unità classificate come glacionevati nel Catasto del 1982 o per piccoli ghiacciai classificati come estinti nel Catasto del 1959-62, si è registrata la completa sparizione.

Le riduzioni di superficie appaiono complessivamente rilevanti e sembrano testimoniare una situazione oggettiva dato che corrispondono, qualitativamente, ad una precisa e ben documentata fase di regresso; mentre, nella loro entità, esse sembrano in gran parte imputabili alla quasi totale scomparsa delle nevi dell'anno 1987 che, specialmente nel caso di ghiacciai interamente ubicati nell'area di ablazione di quell'anno, ha portato ad una contrazione di superficie anche lungo il contorno del bacino alimentatore.

La fig. 11 riporta in istogramma a titolo di esempio i valori di superficie ottenuti per i ghiacciai delle Alpi Breonie nel 1987 e nel 1985 e insieme, come termine di confronto, i valori riportati nel Catasto del 1982, anche se ottenuti con una metodologia diversa.

Data l'ampiezza dell'area considerata, l'indagine è stata svolta utilizzando una metodologia semiautomatica a basso costo e a bassa complessità operativa (ATTARDO & alii, 1988) e, come si è detto, in assenza del modello digitale del terreno. Il modello digitale di alcuni ghiacciai delle Alpi Pusteresi (Rizzi, 1985) ha permesso di valutare nell'immagine Landsat MSS del 1980 le differenze percentuali (tab. 6) tra i valori di superficie ottenuti dal modello e quelli calcolati utilizzando la pendenza media; le diffe-

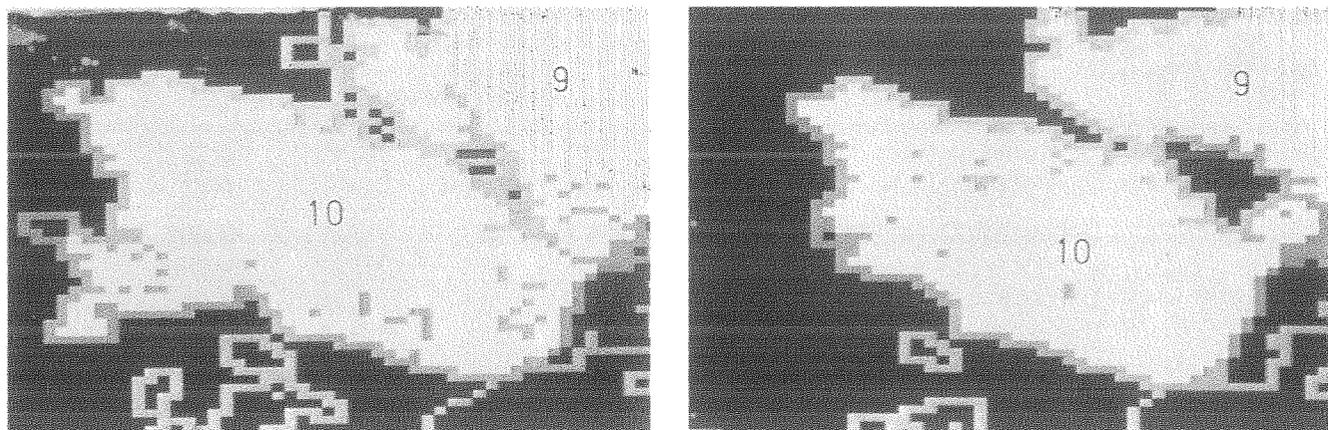


FIG. 9 - Ghiacciaio di Collalto (Alpi Pusteresi Meridionali) - Risultati dell'estrazione del contorno del ghiacciaio dalle immagini TM del 13 Settembre 1987 (a destra) e del 7 Settembre 1985 (scala 1:25.000 circa; esposizione Nord Ovest).

FIG. 9 - Ghiacciaio di Collalto (South Pusteresi Alps). Results of extraction of the glacier boundary from TM images of 13 September 1987 (right) and 7 September 1985 (scale of 1:25,000 approx.; northwest exposure).

renze sono risultate entro il 17,2% in valore assoluto, in accordo con le indicazioni fornite da GRATTON & *alii* (1990) per cui utilizzando il modello digitale del terreno si ottiene un aumento dell'accuratezza del 24% nelle immagini Landsat MSS e del 13% in quelle Landsat TM.

Nell'immagine Landsat MSS del 1980 gli scarti percentuali tra le superficie calcolate con il modello digitale e quelle calcolate con la pendenza media erano, in valore assoluto, generalmente inferiori alla percentuale dei pixel dubbi (tab. 6). Nelle immagine Landsat TM 1985 e 1987,

TABELLA 5 - Ghiacciai delle Alpi Pusteresi Meridionali (Vedrette di Ries) - Risultato della classificazione dell'immagine Landsat TM del 13 Settembre 1987; valori di superficie e differenze rispetto ai valori del 1985 (in ultima colonna le differenze percentuali).

TABLE 5 - South Pusteresi Alps glaciers. Result of the classification by the Landsat TM image of 13 September 1987: surface values and differences with respect to 1985 values (last column gives percentage differences).

Numero TM	Numero Cat. 62	Numero Cat. 82	Area '82 (km ²)	AreaTM85 (km ²)	AreaTM87 (km ²)	Pixel contorno	Pixel totali	Dif85/87 (km ²)	Dif85/87 (%)
1		I/4L00123301	0.050	0.015	0.016	17	17	0.001	+ 5.88
2		I/4L00123302	0.140	0.071	0.047	51	79	-0.024	- 34.18
4		I/4L00123304	0.140	0.046	0.041	44	51	-0.005	- 11.76
5		I/4L00123305	0.050	0.020	0.015	16	22	-0.005	- 22.73
6		I/4L00123306	0.240	0.195	0.121	74	217	-0.074	- 37.95
7		I/4L00123307	0.310	0.250	0.245	140	278	-0.005	- 2.00
8	925a	I/4L00123308	0.260	0.226	0.175	90	252	-0.051	- 22.57
9	925b 926	I/4L00123309	1.920	1.550	1.290	372	1725	-0.260	- 16.77
10	927	I/4L00123310	0.830	0.749	0.660	249	832	-0.089	- 11.88
11	928 929	I/4L00123311	1.970	1.360	1.210	393	1502	-0.150	- 11.03
12	930	I/4L00123312	2.570	2.490	2.400	400	2763	-0.090	- 3.61
13	931	I/4L00123313 I/4L00123314	0.900	0.691	0.604	249	767	-0.087	- 12.59
14		I/4L00123315	0.370	0.228	0.175	90	254	-0.053	- 23.25
15	932	I/4L00123316	1.010	0.782	0.662	258	869	-0.120	- 15.35

Num	Cat.62	Cat.82	Note				
3		I/4L00123303	non identificato	16	933	I/4L00123317	non identificato

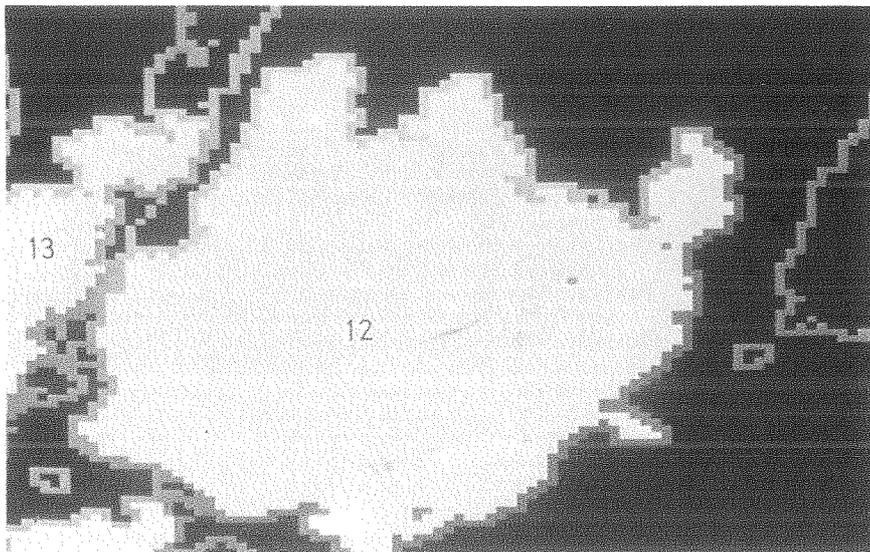
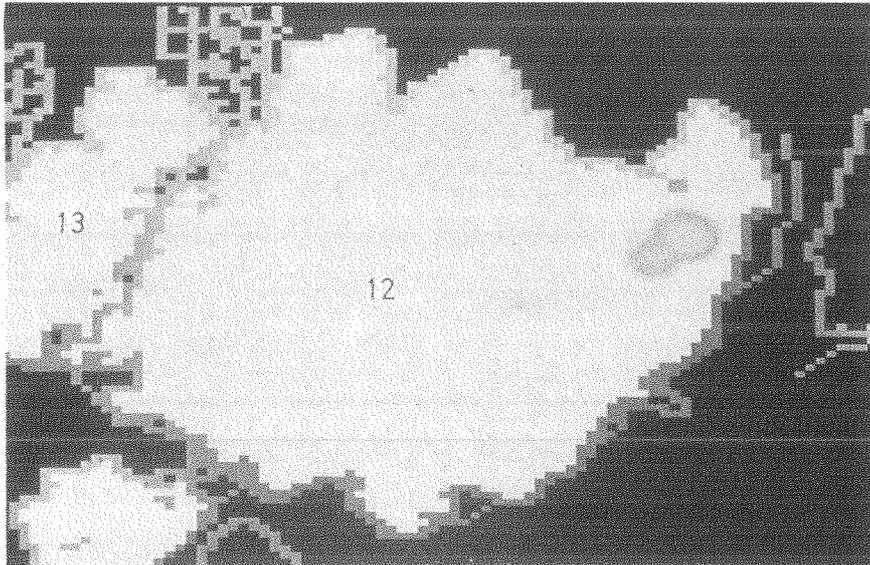


FIG. 10 - Ghiacciaio Gigante Occidentale (Alpi Pusteresi Meridionali) - Risultati dell'estrazione del contorno del ghiacciaio dalle immagini TM del 13 Settembre 1987 (in basso) e del 7 Settembre 1985 (scala 1:25.000 circa; esposizione Nord).

FIG. 10 - Ghiacciaio Gigante Occidentale (South Pusteresi Alps). Results of the extraction of the glacier boundary from the TM images of 13 September 1987 (lower) and 7 September 1985 (scale of 1:25,000 approx.; north exposure).

FIG. 11 - Ghiacciai delle Alpi Breonie - Confronto tra i valori di superficie riportati nel Catasto del 1982 e quelli ottenuti dalle immagini Landsat TM 192/27 del 13 Settembre 1987 e del 7 Settembre 1985.

FIG. 11 - Breonie Alps Glaciers. Comparison between the values of areal extent reported in the 1982 Glacier Inventory and those obtained from the Landsat TM 192/27 images of 13 September 1987 and 7 September 1985.

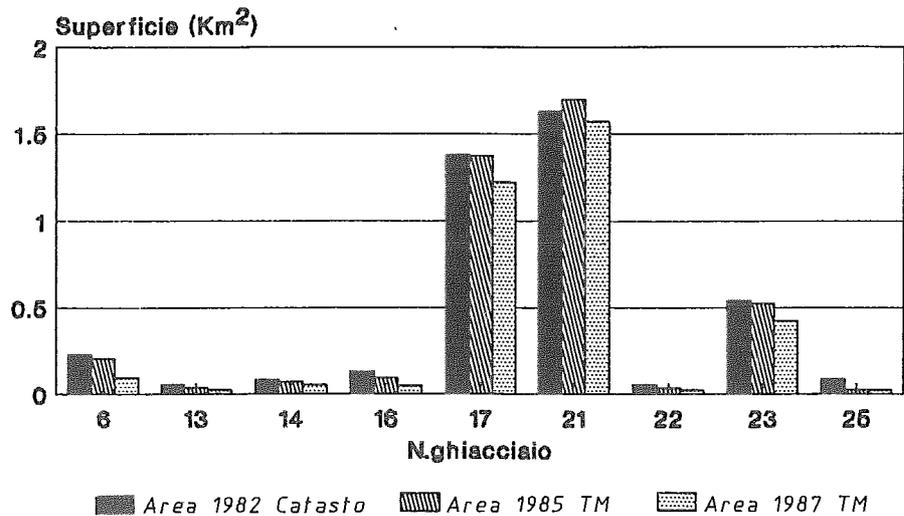


TABELLA 6 - Valori di superficie di alcuni ghiacciai delle Alpi Pusteresi Settentrionali ottenuti utilizzando il modello digitale del terreno e il valore della pendenza media. Le differenze percentuali (colonna a destra) tra i valori di superficie così ottenuti sono entro il 17,2 per cento in valore assoluto (immagine Landsat MSS 207/27 del 2 Settembre 1980).

TABLE 6 - Surface values of some glaciers of the North Pusteresi Alps obtained using the digital elevation model (second column from left) and the mean slope (fourth column). Percentage differences (last column) between surface values obtained with these methods are within the 17.2% absolute value (Landsat MSS 207/27 image of 2 September 1980).

numero ghiacc. cat. 62	Area 1980 Mod. Dig. (km ²)	Pixel Dubbi (%)	Area 1980 Pend. Med. (km ²)	Mod. Dig./ Pend. Med. (%)
912	0,799	1,3	0,733	9,0
913	1,463	5	1,373	5,8
914	0,246	17	0,236	4,2
915	0,135	20	0,163	- 17,2
916	0,289	0	0,296	- 2,4
917	0,118	25	0,132	- 10,5
918	0,202	0	0,226	- 10,7
918a e 919	0,367	20	0,361	1,5
920	0,833	7,7	0,776	7,3
921	0,282	15	0,250	12,5

il pixel di 30 × 30 m ha ridotto di circa l'80 per cento il peso dell'errore dovuto ai pixel dubbi e l'utilizzo di un diverso algoritmo di classificazione (ATTARDO & alii, 1988) ne ha ulteriormente ridotto il numero, per cui l'errore dominante appare quello legato all'utilizzo della pendenza media.

Va tuttavia tenuto presente, nel considerare le approssimazioni implicite nei valori di superficie del 1985 e del 1987, che, nei dati del Catasto del 1982, le superficie dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi sono stimate con una approssimazione che, in genere, è contenuta entro il 15 per cento e, in rari casi, arriva al 25 per cento; che è la normale imprecisione da cui sono affetti i dati in un sistema di informazioni geografiche.

BIBLIOGRAFIA

- ATTARDO C., DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1980) - *Verso una metodologia automatica per il controllo dei ghiacciai alpini*. Atti 2° Conv. Naz. Ass. It. Telerilevamento, Bolzano 9-11 Novembre 1988, 147-156.
- 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, 3-19.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1988) - *Relazione della campagna glaciologica 1987*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 11, 123-169.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1989) - *Relazioni della campagna glaciologica 1988*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 12, 162-206.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1959-62) - *Catasto dei ghiacciai Italiani*, Torino, 4 voll.
- DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1986) - *L'evoluzione recente del glacialismo in Valle Aurina (Alpi Pusteresi) nelle immagini Landsat MSS*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 9, 39-48.
- DELLA VENTURA A., RAMPINI A., RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1987) - *Development of a Satellite Remote Sensing Technique for the study of Alpine Glaciers*. Intern. Journ. Rem. Sensing, 8, 203-215.
- GRATTON D.J., HOWARTH P.J. & MARCEAU D.J. (1990) - *Combining DEM Parameters with Landsat Mss and TM Imagery in a GIS for Mountain Glacier Characterization*. IEEE Trans. Geos. Remote Sensing 28, 766-769.
- PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - UFFICIO IDROGRAFICO (1982) - *Catasto dei Ghiacciai della Provincia di Bolzano* (Inedito).
- RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1979) - *Possibilità di impiego del remote sensing da satellite per il controllo annuale dei ghiacciai*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 2, 35-40.
- RIZZI C. (1985) - *Interpretazione di dati tradizionali e immagini telerilevate nello studio temporale dei ghiacciai*. Tesi di laurea - Università degli Studi di Milano, Fac. Sc. M.F.N., A.A. 1984-85 (Inedito), 98 pp.