

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

I GHIACCIAI DELLE ALPI BREONIE, AURINE E PUSTERESI NELL'IMMAGINE LANDSAT TM DEL 7.9.85 (***)

Abstract: ATTARDO C., DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R., *The Breonie, Aurine and Pusteresi Alpine Glaciers through the 7 September 1985 Landsat TM Image* (ISSN 0084-8948, 1989).

Since the data relative to Italian glaciers are being updated, it was proposed to use the Landsat TM images simultaneously with conventional observational methods. For this purpose an interpretation procedure was developed through an algorithm of classification to compute the extent of glacier and snow cover surfaces.

The procedure was applied to glaciers included in the third quadrant of the Landsat TM 192/27 image of 7 September 1985, represented by the glaciers of the Breonie, Aurine and Pusteresi Alps, and the data obtained are compared with those of previous alpine glacier inventories. The comparison with the 1959-1962 data showed a positive evolution, more evident for the Pusteresi glaciers and less towards the glaciers of Breonie. The comparison with the 1982 data showed a tendency to regress. The more pronounced differences with respect to the previous inventories regard a few very small glaciers.

The comparison of results is difficult for these glaciers due to the different inaccuracies in the various measuring methods used to obtain glacier data. It is suggested to use the same methods to reduce the systematic errors implicit in all surveying techniques.

KEY WORDS: Satellite remote sensing, Glaciers, Breonie Aurine Pusteresi Alps.

Riassunto: ATTARDO C., DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R., *I ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nell'immagine Landsat TM del 7.9.85* (ISSN 0084-8948, 1989).

Essendo in corso l'aggiornamento dei dati relativi ai ghiacciai italiani, ci si è proposti di affiancare alle tecniche tradizionali di rilevamento, l'impiego delle registrazioni Landsat TM. A questo scopo è stata messa a punto una procedura di interpretazione che, attraverso un algoritmo di classificazione, calcola l'estensione delle superficie galcializzate e innevate.

La procedura è stata applicata ai ghiacciai compresi nel terzo quadrante dell'immagine Landsat TM 192/27 del 7 Settembre 1985, rappresentati dai ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi, e i dati ottenuti sono stati confrontati con quelli dei precedenti catasti. Il con-

fronto con i dati del 1959-1962, evidenzia una evoluzione positiva, più marcata per i ghiacciai delle Alpi Pusteresi e meno netta procedendo verso le Alpi Breonie. Il confronto con i dati del 1982 evidenzia una tendenza al regresso. Le differenze più rilevanti rispetto ai precedenti catasti riguardano alcuni ghiacciai molto piccoli.

Per questi ghiacciai, il confronto dei risultati è reso problematico dalle diverse imprecisioni da cui sono affetti i dati ottenuti con diversi sistemi di misura; si propone il reimpiego della stessa metodologia per ridurre gli errori sistematici impliciti in ogni tecnica di rilevamento.

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

INTRODUZIONE

La più recente rilevazione completa dei ghiacciai italiani è del 1959-62 (CNR-CGI) ed è quindi solo parzialmente utilizzabile per quanto riguarda i parametri soggetti a modifiche nel corso del tempo. Nel 1982 l'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano ha curato un nuovo catasto dei ghiacciai dell'Alto Adige (1), includendovi anche i glacionevati, in vista del suo inserimento nel *World Glacier Inventory* che è attualmente in corso di compilazione presso il Dipartimento di Geografia di Zurigo.

La stesura del *World Glacier Inventory* ha reso indispensabile la revisione dei dati del 1959-62 relativi all'intero arco alpino italiano, revisione che è stata curata dal Comitato Glaciologico Italiano tra il 1985 e il 1988. Nell'ambito di questo aggiornamento, ci siamo proposti di affiancare alle metodologie tradizionali le tecniche di telerilevamento che, con l'avvento del Thematic Mapper la cui risoluzione al suolo è di 30 x 30 m, ben si prestano alla descrizione di superficie e al controllo delle loro variazioni nel tempo.

Con questo obiettivo si è sviluppato (ATTARDO, 1987) un complesso di procedure software per il monitoraggio

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

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

(***) Ricerca eseguita con contributi del M.P.I. (Fondi 40%, 1987).

(1) I dati originali sono stati messi a disposizione degli autori per gentile concessione dell'Ing. P. Valentini.

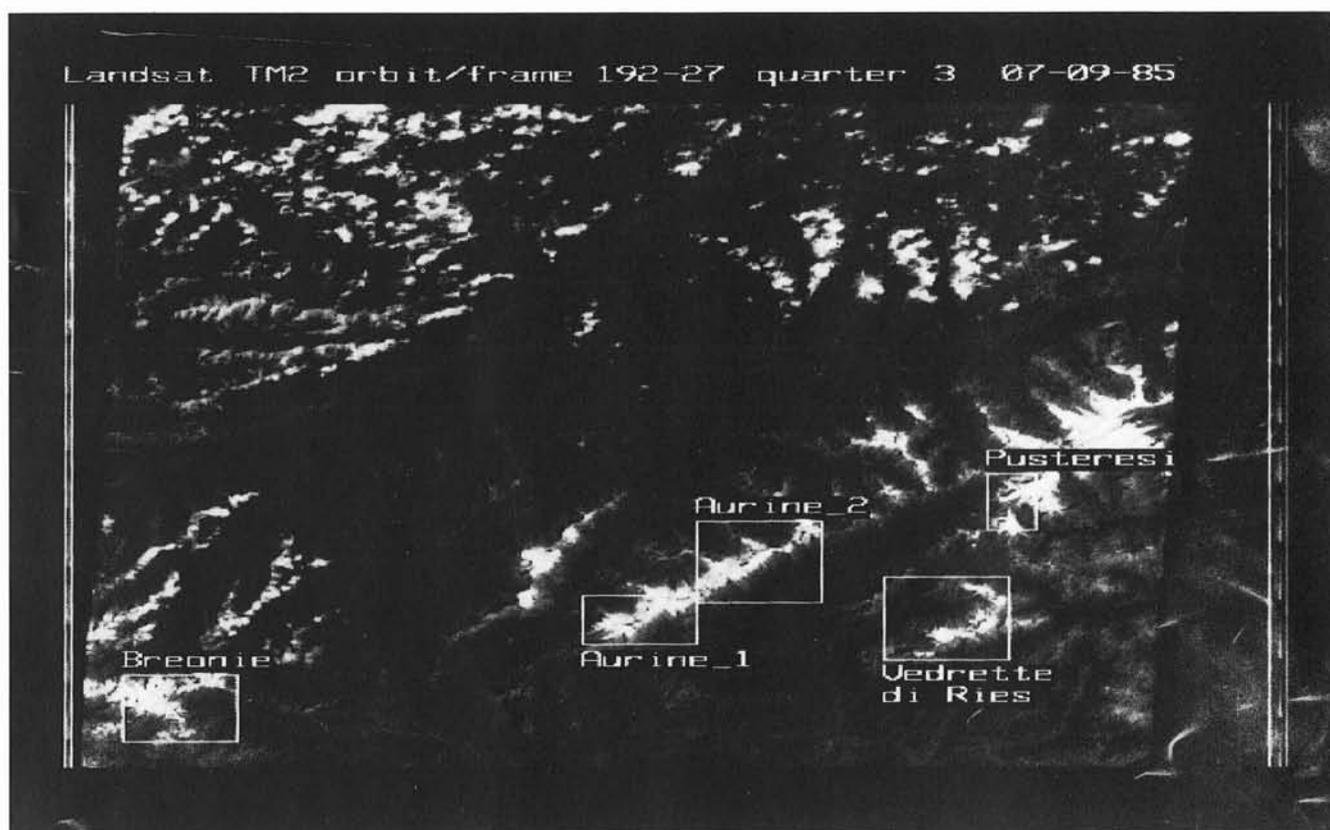


FIG. 1 - Rappresentazione in livelli di grigio della banda 2 dell'immagine Landsat TM 192/27 del 7.9.85, III quadrante (scala 1:750.000 circa). Nei riquadri le zone di interesse. Gli altri ghiacciai inclusi nell'immagine sono in territorio austriaco.

delle superficie dei ghiacciai alpini realizzando, sulla base di precedenti esperienze (DELLA VENTURA & *alii*, 1982; 1983; 1986; 1987), uno strumento fruibile da un utente non specializzato, in grado di integrare l'attuale quadro di osservazioni glaciologiche al suolo. Il progetto e la realizzazione di questo strumento hanno portato ad affrontare due problematiche differenti: da un lato l'implementazione di una interfaccia che renda trasparente per l'utente l'organizzazione interna dei dati e le operazioni di routine su di essi, dall'altro la definizione di una procedura di interpretazione e la realizzazione degli strumenti software per attuarla. La procedura è stata applicata ai ghiacciai compresi nel quadrante 3, SW (90 x 90 km) della scena TM 192/27 del 7 Settembre 1985 (fig. 1). Si tratta dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nelle loro totalità, rispettivamente dal n. 861 a) al n. 934 del Catasto dei Ghiacciai Italiani 1959-62.

METODOLOGIA UTILIZZATA

Le immagini in oggetto sono state rilevate per mezzo del Thematic Mapper (TM), un sensore a scansione meccanica posto sul satellite Landsat-D, che opera in 7 bande spettrali comprendenti le regioni del visibile, dell'infrarosso

vicino e dell'infrarosso termico. Dall'insieme di queste bande viene estratto un sottoinsieme rappresentativo delle classi oggetto di indagine, eliminando quelle con contenuto informativo ridondante. Tale insieme risulta essere formato dalle bande 1, 3 e 5. La messa a punto della procedura di interpretazione ha portato alla definizione di:

- strutture delle immagini ed attributi rilevanti
- classi di interesse
- un processo di decisione che valuta gli attributi scelti come indicatori di appartenenza alle classi predefinite.

Una prima distinzione è stata effettuata tra strutture di interesse (Ghiaccio, Neve) e di non interesse (indicate in modo generico con Altro). All'interno della prima è stata individuata la struttura ghiacciaio, a sua volta composta dalle sottostrutture bacino di accumulo e bacino di ablazione. Queste ultime insieme a Altro ammettono come sottostruttura l'elemento primitivo pixel.

La classificazione di pixel in «appartenente ad altro» (A), «appartenente a ghiaccio» (G) o «appartenente a neve» (N), realizzata mediante un'accurata valutazione dei valori assunti all'interno delle bande selezionate, permette di individuare la struttura bacino di accumulo come insieme connesso di pixel di tipo N, la struttura bacino di ablazione come insieme connesso di pixel di tipo G, la struttura ghiacciaio come insieme connesso di pixel di tipo G e/o N.



FIG. 2 - a) Alpi Breonie. Livelli di grigio nella banda 3 Landsat TM, 192/27 7.9.85, III quadrante (scala 1:100.000 circa). In grigio chiaro e bianco sono riprodotti i ghiacciai e le loro parti innevate. b) Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai.

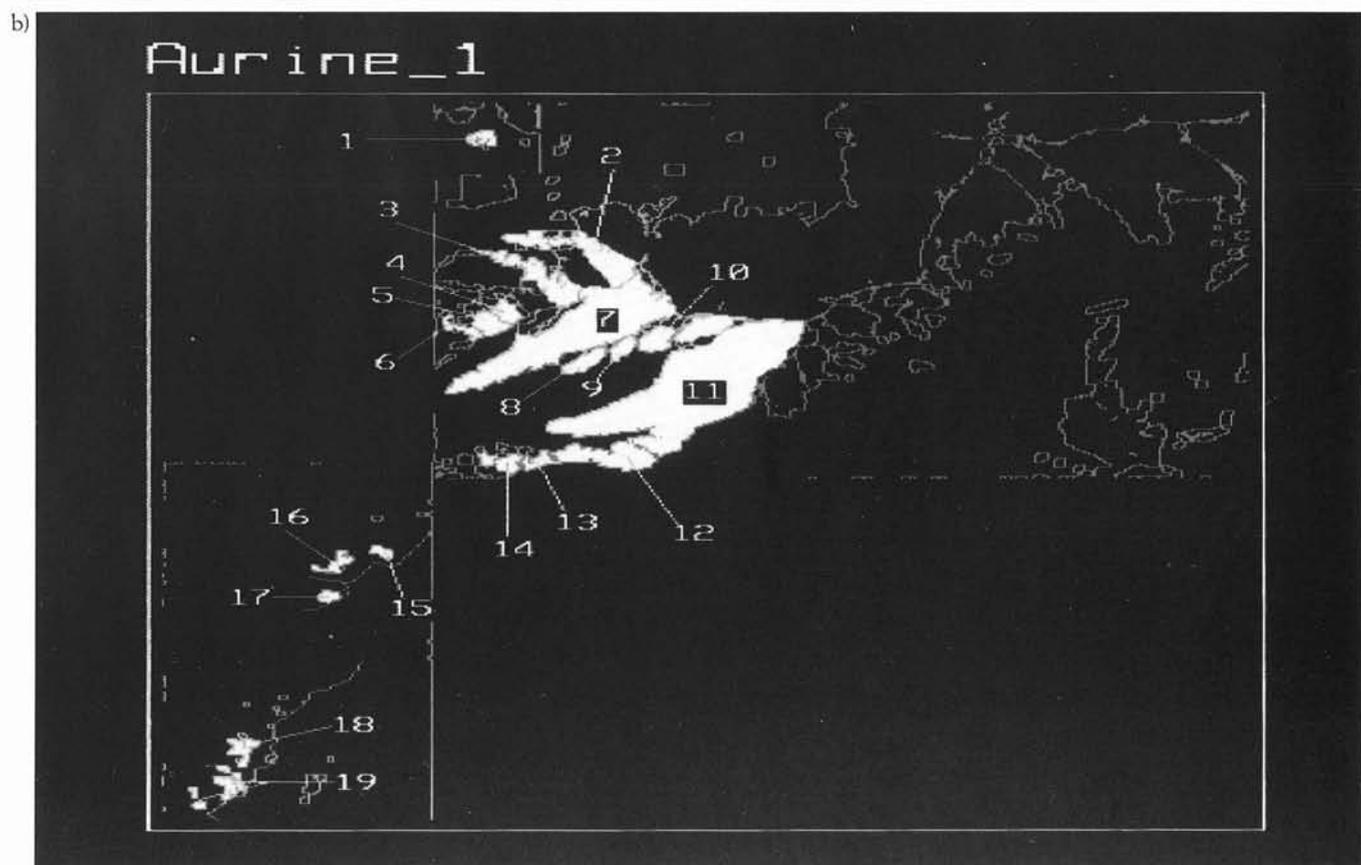


FIG. 3 - a) Alpi Aurine Ovest. Livelli di grigio nella banda 3 Landsat TM, 192/27, 7.9.85, III quadrante (scala 1:100.000 circa). In grigio chiaro e bianco sono riprodotti i ghiacciai e le loro parti innevate. b) Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai.

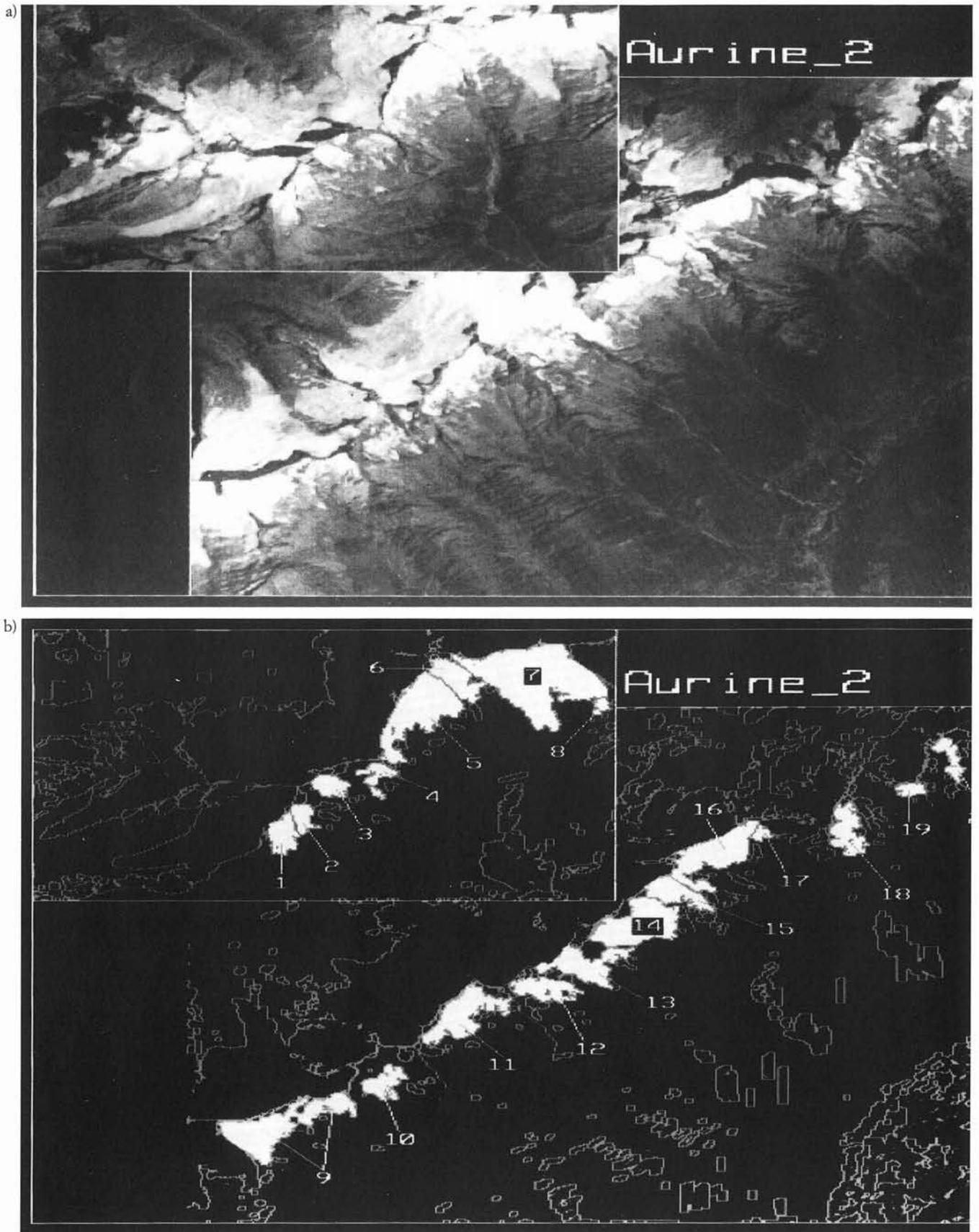


FIG. 4 - a) Alpi Aurine Est. Livelli di grigio nella banda 3 Landsat TM, 192/27, 7.9.85, III quadrante (scala 1:100.000 circa). In grigio chiaro e bianco sono riprodotti i ghiacciai e le loro parti innevate. b) Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai.

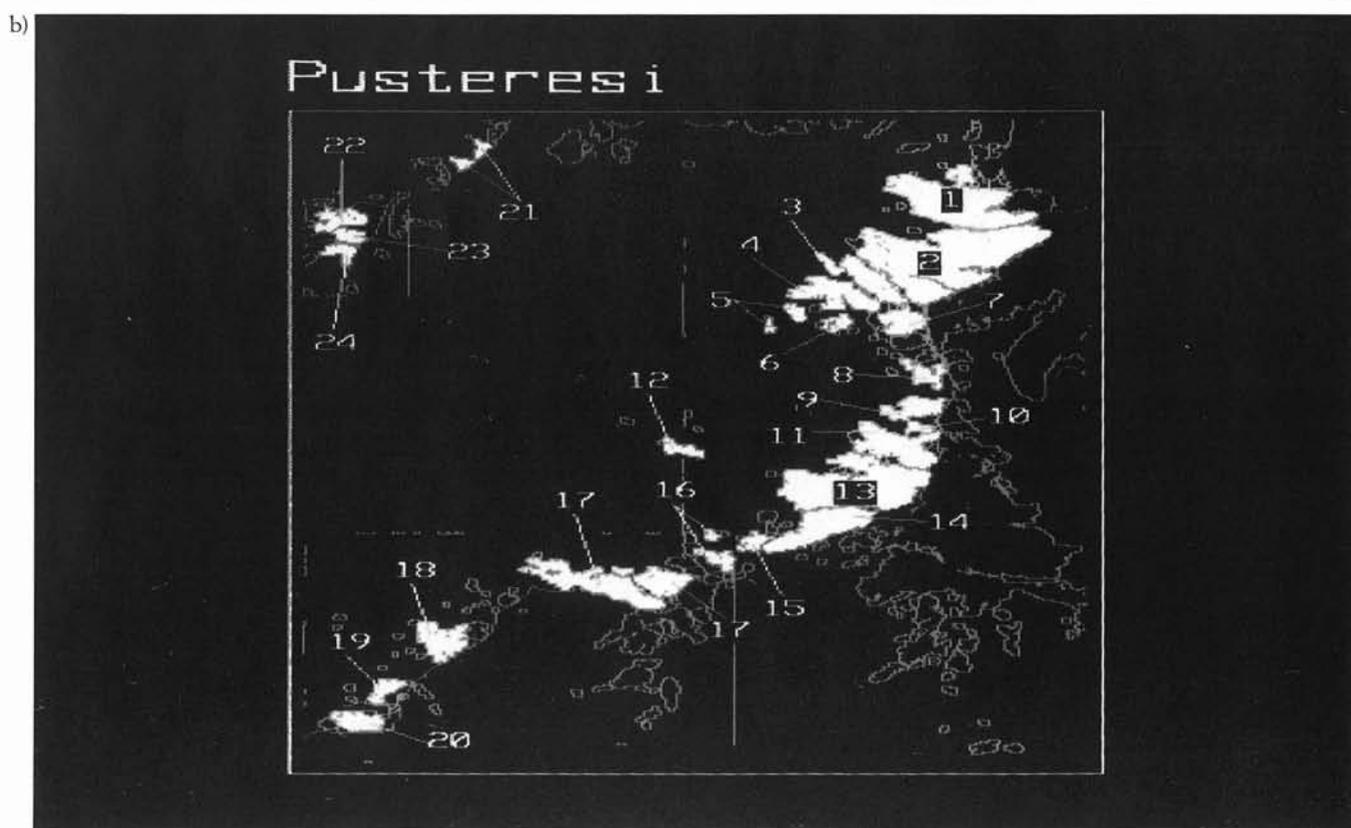


FIG. 5 - a) Alpi Pusteresi Nord. Livelli di grigio nella banda 3 Landsat TM, 192/27, 7.9.85, III quadrante (scala 1:100.000 circa). In grigio chiaro e bianco sono riprodotti i ghiacciai e le loro parti innevate. b) Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai.

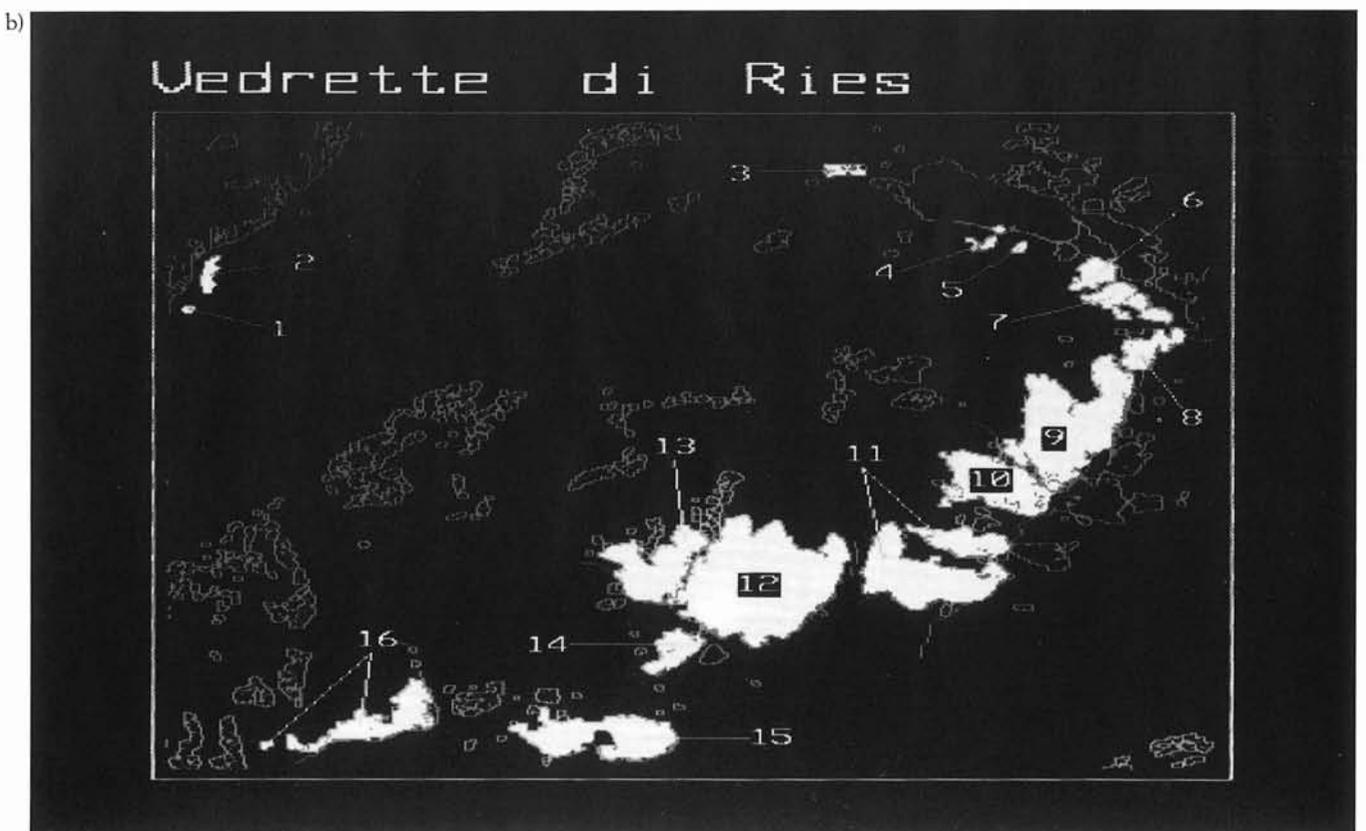
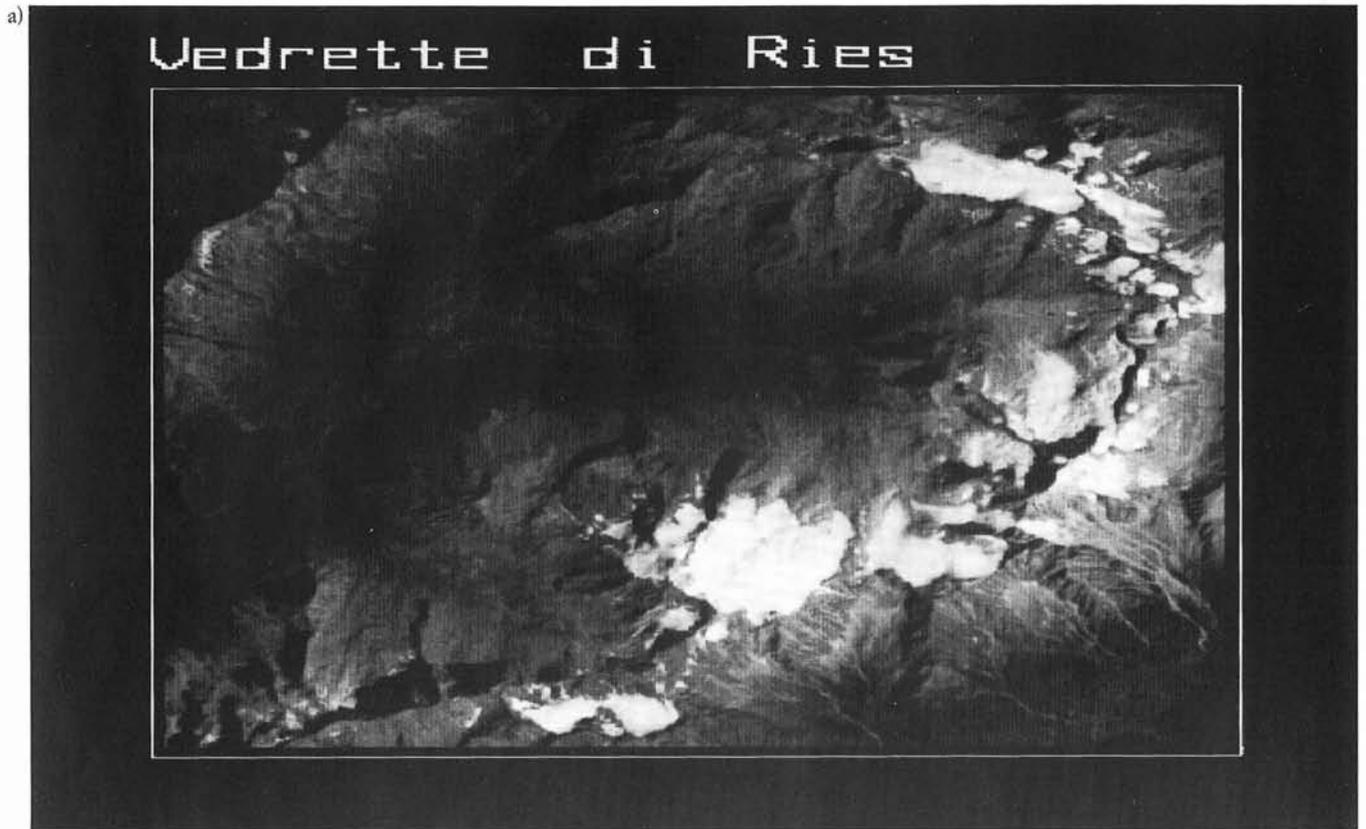


FIG. 6 - a) Alpi Pusteresi Sud (Vedrette di Ries). Livelli di grigio nella banda 3 Landsat TM, 192/27, 7.9.85, III quadrante (scala 1:100.000 circa). In grigio chiaro e bianco sono riprodotti i ghiacciai e le loro parti innevate. b) Risultato dell'estrazione del contorno dei ghiacciai.

TABELLA 1 - Alpi Breonie. Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dai dati Landsat TM del 7.9.85 e confronto con i catasti precedenti.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '62 (km ²)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '62 (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM	N. px. Cont.	Px. Tot.
1	862	I/4L00111307	35.0	0.042	0.050	0.045	+0.003	-0.005	2	-10	47	50
2	863	I/4L00111308	25.0	0.140	0.110	0.087	-0.053	-0.023	2	-20	49	97
3	864	I/4L00111309	20.0	0.000	0.050	0.018	+0.018	-0.032	2	-64	20	25
4	865	I/4L00111310	23.0	0.237	0.240	0.212	-0.025	-0.028	2	-11	99	235
5	866	I/4L00111311	30.0	0.120	0.090	0.077	-0.044	-0.014	2	-15	43	85
6	867	I/4L00111312	20.0	0.410	0.230	0.206	-0.204	-0.024	3	-10	99	229
7	868	I/4L00111313	30.0	0.390	0.360	0.280	-0.110	-0.080	3	-22	136	300
		I/4L00111314										
8	869	I/4L00121101	41.0	0.000	0.060	0.040	+0.040	-0.020	3	-34	39	44
9	870	I/4L00121102	32.0	0.054	0.060	0.048	-0.006	-0.012	2	-20	34	53
10	871	I/4L00121103	24.0	0.058	0.070	0.061	+0.003	-0.009	2	-12	43	68
11	872	I/4L00121104	23.0	0.057	0.080	0.068	+0.011	-0.013	2	-15	44	75
12	873	I/4L00121105	19.0	0.370	0.430	0.426	+0.056	-0.004	2	+0	132	474
13		I/4L00121106	30.0	0.000	0.050	0.036	+0.036	-0.014	2	-28	25	40
14	874	I/4L00121107	33.0	0.094	0.080	0.072	-0.022	-0.008	2	-10	43	80
15	875	I/4L00121108	13.0	8.710	9.420	9.170	+0.460	-0.250	2	-2	1501	10186
16		I/4L00121109	21.0	0.000	0.130	0.094	+0.094	-0.036	2	-27	45	105
17	876	I/4L00121110	25.0	1.330	1.380	1.370	+0.040	-0.010	2	+0	319	1520
18	877	I/4L00121201	28.0	0.152	0.130	0.103	-0.049	-0.027	2	-20	70	115
19	878	I/4L00121202	25.0	0.081	0.060	0.055	-0.026	-0.005	2	-8	43	61
20	879	I/4L00121203	30.0	0.040	0.080	0.067	+0.027	-0.013	2	-16	46	74
21	880	I/4L00121204	16.0	1.420	1.630	1.700	+0.280	+0.070	2	+4	348	1893
22		I/4L00121205	45.0	0.000	0.050	0.037	+0.037	-0.013	2	-26	36	41
23	881	I/4L00121206	21.0	0.515	0.540	0.522	+0.007	-0.018	3	-3	236	580
		I/4L00121207										
24	861a	I/4L00111306	36.0	0.000	0.110	0.066	+0.066	-0.044	3	-40	50	70
25		I/4L00121208	37.0	0.000	0.090	0.029	+0.029	-0.061	2	-68	25	29

Per le differenti proprietà di radianza che una superficie possiede secondo la sua esposizione, differenze facilmente riscontrabili nelle bande del visibile, il numero di classi di interesse è stato aumentato, distinguendo per ogni classe il grado di esposizione «ombra» (O) o «sole» (S).

La procedura di interpretazione prevede, in primo luogo, la registrazione manuale delle linee spartiacque, elementi a volte necessari per l'identificazione dei contorni dei singoli ghiacciai. Quindi, per ogni banda selezionata (1, 3,

5) e per ogni classe precedentemente definita (NS, NO, GS, GO, AS, AO), vengono estratte 3 finestre di zone campione in tutta l'immagine. Tali finestre vengono selezionate con l'ausilio di:

- informazioni topografiche quali l'elevazione e l'esposizione, ricavate dalle stesse mappe topografiche della zona
- l'ora di registrazione dell'immagine da parte del satellite, utile per stabilire l'incidenza dei raggi solari al suolo

che, insieme alle informazioni di carattere topografico, aiutano il riconoscimento di zone d'ombra.

Sulla base di questi campioni opera l'algoritmo di classificazione. I passi principali che realizzano tale algoritmo sono due: il primo opera una distinzione tra zone esposte al sole e zone in ombra, mentre il secondo distingue all'interno delle due zone i pixel appartenenti a neve, ghiaccio, o altro, oppure li classifica come dubbi tra ghiaccio e neve (D(G/N)) o dubbi tra ghiaccio/neve e altro (D(A/GN)).

Per il calcolo delle superficie dei ghiacciai è necessario infine individuarne i contorni. Questa operazione viene realizzata mediante:

- estrazione automatica dei contorni ottenuta dall'analisi dell'immagine classificata integrata dalle informazioni precedentemente registrate sulla posizione delle linee spartiacque
- correzione manuale, necessaria laddove risultino contorni aperti

Per quanto riguarda il calcolo vero e proprio delle aree delle strutture, i pixel vengono conteggiati nel seguente modo:

- per le superficie dei ghiacciai vengono considerati i pixel appartenenti alla classe N, alla classe G, alla classe D(G/N) ed il 50% di quelli appartenenti alla classe D(A/GN)
- per le superficie dei bacini di accumulo vengono considerati i pixel appartenenti alla classe N ed il 50% di quelli appartenenti alla classe D(G/N) e D(A/GN).

Il computo effettuato per i pixel dubbi è giustificato dall'ipotesi che, all'interno di queste aree, siano presenti in media il 50% di entrambi i tipi di copertura tra i quali sussiste l'incertezza. Il valore dell'area viene quindi calcolato moltiplicando il numero di pixel appartenenti alla struttura (determinato come descritto precedentemente) per la risoluzione superficiale del singolo pixel (corrispondente a 900 m²).

TABELLA 2a - Alpi Aurine Ovest. Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dai dati Landsat TM del 7.9.85 e confronto con i catasti precedenti.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '62 (km ²)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '62 (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM	N. px. Cont.	Px. Tot.
1	882	I/4L00121301	26.0	0.000	0.110	0.048	+0.048	-0.062	4	-56	48	53
2	883	I/4L00121302	32.0	0.320	0.420	0.360	+0.040	-0.060	3	-14	197	401
3	884	I/4L00121303	36.0	0.300	0.350	0.249	+0.051	-0.101	3	-28	172	277
4	885	I/4L00121304	29.0	0.060	0.090	0.092	+0.032	+0.002	3	+2	74	102
5	886	I/4L00121305	41.0	0.100	0.120	0.101	+0.001	-0.019	2	-15	53	110
6	887	I/4L00121306	43.0	0.080	0.060	0.045	-0.035	-0.015	2	-24	46	49
7	889	I/4L00121309	19.0	1.310	1.410	1.410	+0.100	+0.000	2	+0	339	1567
8	890	I/4L00121310	24.0	0.070	0.100	0.088	+0.018	-0.012	2	-11	59	98
9	891	I/4L00121311	27.0	0.060	0.080	0.060	+0.000	-0.020	3	-24	41	66
10	892	I/4L00121312	33.0	0.140	0.140	0.104	-0.036	-0.036	2	-25	52	116
11	893	I/4L00121313	14.0	2.500	2.620	2.570	+0.070	-0.050	3	-1	460	2861
12	893a	I/4L00121314	24.0	0.270	0.310	0.299	+0.029	-0.011	3	-3	129	331
13		I/4L00121315	24.0	0.000	0.050	0.050	+0.050	+0.000	3	+0	46	55
14		I/4L00121316	24.0	0.000	0.080	0.079	+0.079	-0.001	2	+0	70	87
15		I/4L00121318	40.0	0.000	0.060	0.029	+0.029	-0.031	2	-52	26	34
16	894	I/4L00121319	40.0	0.000	0.050	0.045	+0.045	-0.005	3	-9	46	50
17		I/4L00121320	40.0	0.000	0.070	0.031	+0.031	-0.039	4	-56	24	34
18		I/4L00121321	27.0	0.000	0.070	0.056	+0.056	-0.014	3	-20	53	62
19		I/4L00121322	30.0	0.000	0.080	0.067	+0.067	-0.013	3	-16	62	74

TABELLA 2b - Estensione dell'area innevata.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM
7	889	I/4L00121309	19.0	0.860	0.706	-0.154	2	-17
11	893	I/4L00121313	14.0	1.340	0.886	-0.454	2	-33

TABELLA 3a - Alpi Aurine Est. Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dai dati Landsat TM del 7.9.85 e confronto con i catasti precedenti.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '62 (km ²)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '62 (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM	N. px. Cont.	Px. Tot.
1	895	I/4L00123101	19.0	0.340	0.300	0.292	-0.048	-0.008	2	-2	117	325
2	896	I/4L00123102	34.0	0.100	0.230	0.163	+0.063	-0.067	3	-29	76	181
3	897	I/4L00123104	24.0	0.230	0.240	0.233	+0.003	-0.007	2	-2	77	228
	898											
4	899	I/4L00123105	45.0	0.350	0.260	0.174	-0.176	-0.086	3	-33	124	193
5	900	I/4L00123106	21.0	0.700	1.110	1.110	+0.410	+0.000	2	+0	311	1230
		I/4L00123107										
6	901	I/4L00123108	26.0	0.500	0.370	0.384	-0.116	+0.014	3	+3	142	426
7	902	I/4L00123109	18.0	2.100	2.270	2.190	+0.090	-0.080	2	-3	379	2430
8	903	I/4L00123110	18.0	0.100	0.050	0.059	-0.041	+0.009	2	+18	46	66
9	904	I/4L00123201	27.0	0.820	1.130	1.030	+0.210	-0.100	3	-8	373	1149
		I/4L00123202										
		I/4L00123203										
10	905	I/4L00123204	46.0	0.230	0.350	0.262	+0.032	-0.088	3	-25	147	291
11	906	I/4L00123205	28.0	0.560	0.810	0.701	+0.141	-0.109	3	-13	276	779
12	907	I/4L00123206	35.0	0.680	0.390	0.361	-0.319	-0.029	3	-7	177	401
		I/4L00123207										
		I/4L00123208										
13		I/4L00123209	23.0	0.000	0.420	0.435	+0.435	-0.015	3	+3	139	484
14	908	I/4L00123210	26.0	1.610	0.970	0.935	-0.675	-0.035	2	-3	196	1039
15	908a	I/4L00123211	26.0	0.380	0.450	0.374	-0.006	-0.076	2	-16	153	415
		I/4L00123212										
16	909	I/4L00123213	24.0	0.620	0.730	0.767	+0.147	+0.037	2	+5	272	856
		I/4L00123214										
17	909a	I/4L00123215	20.0	0.210	0.310	0.314	+0.104	+0.004	2	+1	157	349
		I/4L00123216										
18	910	I/4L00123217	31.0	0.020	0.270	0.272	+0.252	+0.002	3	+0	123	302
19	910a	I/4L00123218	21.0	0.020	0.130	0.095	+0.075	-0.035	2	-26	53	106
20	910b	I/4L00123219	27.0	0.110	0.210	0.200	+0.090	-0.010	2	-4	149	220

TABELLA 3b - Estensione dell'area innevata.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM
1	895	I/4L00123101	19.0	0.140	0.111	-0.029	3	-20
3	897	I/4L00123104	24.0	0.140	0.127	-0.013	3	-9
	898							
5	900	I/4L00123106	21.0	0.640	0.636	-0.004	3	-0
		I/4L00123107						
7	902	I/4L00123109	18.0	1.400	1.090	-0.310	3	-22
11	906	I/4L00123205	28.0	0.390	0.366	-0.024	4	-6
13		I/4L00123209	23.0	0.220	0.332	+0.112	3	+51
14	908	I/4L00123210	26.0	0.490	0.495	+0.005	3	+1
15	908a	I/4L00123211	26.0	0.310	0.321	+0.011	3	+3
		I/4L00123212						

TABELLA 4a - Alpi Pusteresi Nord. Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dai dati Landsat TM del 7.9.85 e confronto con i catasti precedenti.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '62 (km ²)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '62 (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM	N. px. Cont.	Px. Tot.
1	912	I/4L00123222	28.0	0.560	0.910	0.811	+0.251	-0.099	2	-10	267	901
2	913	I/4L00123223	23.0	1.320	1.690	1.640	+0.320	-0.050	2	-3	514	1822
3		I/4L00123224	29.0	0.000	0.050	0.038	+0.038	-0.012	2	-24	38	42
4	914	I/4L00123225	26.0	0.170	0.360	0.286	+0.116	-0.074	3	-20	144	318
5		I/4L00123226	40.0	0.000	0.090	0.055	+0.055	-0.035	2	-38	46	61
6	915	I/4L00123227	44.0	0.024	0.070	0.049	+0.025	-0.021	2	-30	44	54
7	916	I/4L00123228	25.0	0.133	0.160	0.150	+0.017	-0.010	2	-6	69	166
		I/4L00123229										
8	917	I/4L00123230	28.0	0.022	0.100	0.094	+0.072	-0.006	2	-5	77	105
9	918	I/4L00123231	24.0	0.058	0.170	0.155	+0.097	-0.015	2	-8	88	173
10	918a	I/4L00123232	34.0	0.025	0.060	0.033	+0.008	-0.027	2	-44	27	37
11	919	I/4L00123233	26.0	0.273	0.360	0.364	+0.091	+0.004	2	+1	159	405
12	919a	I/4L00123235	37.0	0.040	0.170	0.063	+0.063	-0.023	2	-62	50	70
13	920	I/4L00123234	27.0	0.718	1.000	0.962	+0.244	-0.038	2	-3	250	1071
		I/4L00123236										
14	921	I/4L00123237	29.0	0.316	0.450	0.410	+0.094	-0.040	2	-8	138	456
15		I/4L00123238	35.0	0.000	0.080	0.058	+0.058	-0.022	4	-28	52	64
16	921a	I/4L00123239	35.0	0.045	0.100	0.088	+0.043	-0.012	3	-12	76	97
17	922	I/4L00123240	26.0	0.524	0.740	0.626	+0.102	-0.114	3	-15	333	695
		I/4L00123241										
18	923	I/4L00123242	30.0	0.158	0.230	0.221	+0.063	-0.009	3	-3	119	245
19	923a	I/4L00123243	28.0	0.038	0.080	0.074	+0.036	-0.006	3	-7	55	82
20	924	I/4L00123244	27.0	0.120	0.130	0.128	+0.008	-0.002	3	-1	68	143
21		I/4L00123245	40.0	0.000	0.100	0.057	+0.057	-0.043	2	-43	56	63
22	925	I/4L00123247	45.0	0.064	0.160	0.129	+0.065	-0.031	3	-19	97	143
23		I/4L00123246	33.0	0.000	0.060	0.058	+0.058	-0.002	2	-3	38	64
24		I/4L00123248	45.0	0.000	0.140	0.075	+0.075	-0.065	3	-46	53	84

TABELLA 4b - Estensione dell'area innevata.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM
1	912	I/4L00123222	28.0	0.450	0.508	+0.058	3	+12
2	913	I/4L00123223	23.0	0.880	0.930	+0.050	3	+5
4	914	I/4L00123225	26.0	0.200	0.111	-0.089	3	-44
11	919	I/4L00123233	26.0	0.180	0.144	-0.036	3	-20
13	920	I/4L00123234	27.0	0.610	0.572	-0.038	3	-6
		I/4L00123236						
14	921	I/4L00123237	29.0	0.220	0.268	+0.048	3	+21

TABELLA 5 - Alpi Pusteresi Sud (Vedrette di Ries). Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dai dati Landsat TM del 7.9.85 e confronto con i catasti precedenti.

Num. TM	Num. Cat. 62	Num. Cat. 82	Pendenza (gradi)	Area '62 (km ²)	Area '82 (km ²)	Area TM (km ²)	Diff. '62 (km ²)	Diff. '82 (km ²)	Acc. Cat.	%82: TM	N. px. Cont.	Px. Tot.
1		I/4L00123301	39.0	0.000	0.050	0.015	+0.015	-0.035	2	-69	14	17
2		I/4L00123302	36.0	0.000	0.140	0.071	+0.071	-0.069	2	-49	59	79
3		I/4L00123303	30.0	0.000	0.070	0.065	+0.065	-0.005	2	-7	56	72
4		I/4L00123304	23.0	0.000	0.140	0.046	+0.046	-0.094	2	-67	49	51
5		I/4L00123305	25.0	0.000	0.050	0.020	+0.020	-0.030	2	-60	18	22
6		I/4L00123306	25.0	0.000	0.240	0.195	+0.195	-0.045	2	-18	75	217
7		I/4L00123307	25.0	0.000	0.310	0.250	+0.250	-0.060	3	-19	153	278
8	925a	I/4L00123308	33.0	0.190	0.260	0.226	+0.036	-0.034	2	-12	116	252
9	925b	I/4L00123309	18.0	1.480	1.920	1.550	+0.070	-0.370	2	-19	417	1725
	926											
10	927	I/4L00123310	27.0	0.470	0.830	0.749	+0.279	-0.081	2	-9	297	832
11	928	I/4L00123311	16.0	1.780	1.970	1.360	-0.420	-0.610	2	-31	403	1502
	929											
12	930	I/4L00123312	19.0	2.590	2.570	2.490	-0.100	-0.080	1	-3	372	2763
13	931	I/4L00123313	28.0	0.480	0.900	0.691	+0.211	-0.209	3	-23	229	767
		I/4L00123314										
14		I/4L00123315	23.0	0.000	0.370	0.228	+0.228	-0.142	2	-38	120	254
15	932	I/4L00123316	29.0	0.000	1.010	0.782	+0.782	-0.228	2	-22	259	869
16	933	I/4L00123317	40.0	0.000	0.700	0.512	+0.512	-0.188	2	-26	264	569
	934	I/4L00123318										
		I/4L00123319										

RISULTATI

Sono stati individuati e descritti i ghiacciai di ciascun gruppo compreso nell'immagine in esame (fig. 1) e i risultati sono riportati nelle figure 2-6 e nelle tabelle 1-5.

Ciascuna figura rappresenta, procedendo da Ovest verso Est, uno dei settori di catena alpina analizzati e consta di due parti. Nella *parte a* è riportata l'immagine ottenuta mediante livelli di grigio da una delle tre bande utilizzate per l'algoritmo di calcolo: le superficie dei ghiacciai vi sono riprodotte utilizzando il bianco e il grigio chiaro rispettivamente per le aree innevate e di ghiaccio scoperto (zone a più intensa radianza); il terreno circostante (a più bassa radianza) è riprodotto in grigio scuro, le zone d'ombra in nero. L'area innevata risulta ben osservabile sui ghiacciai sufficientemente estesi a monte e a valle della linea del nevato.

La *parte b* di ciascuna figura mostra il risultato dell'operazione «estrazione dei contorni», necessaria per il calcolo delle superficie. I ghiacciai in esame vi sono riprodotti in bianco su fondo scuro ed a ciascuno è stato associato il numero di identificazione; degli altri è stato tracciato solo il contorno.

I valori di superficie ottenuti attraverso questa proce-

dura per i vari settori dell'arco alpino sono riportati, nello stesso ordine seguito per le figure, nelle tabelle 1-5.

Nella *parte a* di ciascuna tabella, la prima colonna riportata il numero di identificazione; settori appartenenti ad uno stesso ghiacciaio senza soluzione di continuità sono stati inclusi nello stesso numero anche se appartenenti a bacini idrografici diversi.

La seconda colonna riporta la numerazione del catasto 1959-62 (CNR-CGI); la terza, la numerazione seguita dal catasto 1982 (Provincia Autonoma di Bolzano - Ufficio Idrografico). Quest'ultimo riporta un numero molto maggiore di unità rispetto al vecchio catasto, sia perché, privilegiando le suddivisioni per bacini idrografici, talora smembra in più unità uno stesso ghiacciaio (es.: n. 920 in tabella 4a).

La pendenza (colonna 4) è stata calcolata utilizzando le quote massima e minima e la lunghezza del ghiacciaio.

La colonna «area TM» indica la superficie ottenuta dall'immagine analizzata (cfr. metodologie utilizzate) e le due successive riportano la differenza tra il dato calcolato e i due precedenti catasti.

La decima colonna riporta il codice di accuratezza delle misure di superficie del catasto 1982 (2) secondo la convenzione: 1 = 0-5% dell'area; 2 = 5-10%; 3 = 10-15%; 4 = 15-25%.

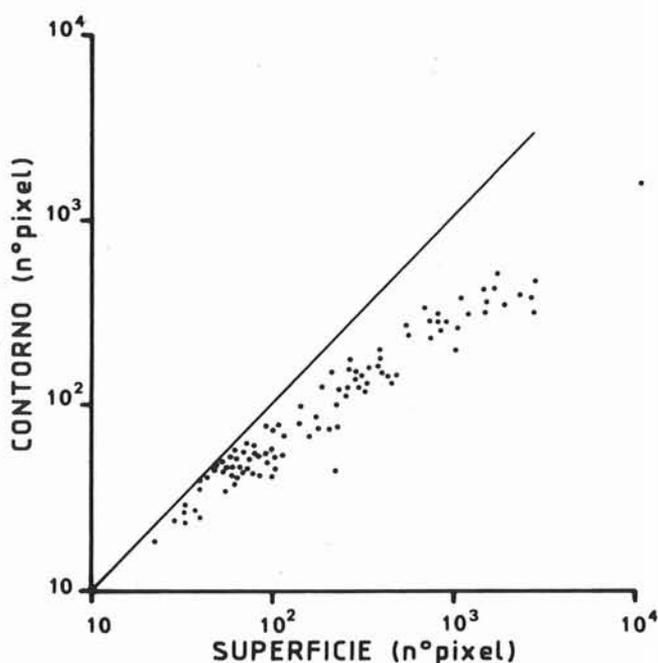


Fig. 7 - Numero di pixel che descrive il contorno dei ghiacciai inclusi nell'immagine Landsat TM 192/27 del 7.9.85, III quadrante (in ordinata), rispetto al numero di pixel che ne descrive l'intera superficie.

L'undicesima colonna riporta la differenza percentuale tra i valori di superficie del 1982 e quelli calcolati nel 1985.

Infine nelle ultime due colonne è riportato il numero dei pixel che descrivono rispettivamente il contorno e l'intera superficie di ciascun ghiacciaio.

La parte b di ciascuna tabella è dedicata ai dati di innevamento; la porzione di superficie innevata misurata nel 1985 quella riportata dal catasto 1982, la differenza tra le due e il codice dell'accuratezza con cui è stata quotata nel 1982 la linea del nevato, secondo la convenzione: 2 = 25-50 m; 3 = 50-100 m; 4 = 100-200 m.

DISCUSSIONE

La precisione delle misure ottenute attraverso la metodologia illustrata è diversa secondo la dimensione e la forma dei ghiacciai. Gli errori si verificano infatti lungo il contorno per la presenza di pixel dubbi (cfr. la metodologia utilizzata) e sono quindi attesi errori maggiori per i

(?) Le misure sono, in genere, riferite al 1982, anno in cui sono stati effettuati i rilievi al suolo nelle Alpi Breonie e Aurine e in parte delle Pusteresi; solo per i ghiacciai delle Vedrette di Ries (Alpi Pusteresi), e per qualche singolo ghiacciaio delle Alpi Aurine Occidentali, i rilievi al suolo sono del 1980.

ghiacciai con un rapporto pixel al contorno/pixel totali prossimo a 1. Tuttavia, per la maggior parte dei ghiacciai esaminati questo rapporto (fig. 7) è nettamente inferiore a 1 e si avvicina a questo valore solo per alcuni ghiacciai molto piccoli.

Nel catasto del 1982 l'indice di accuratezza utilizzato per le misure di superficie indica, per la maggior parte dei ghiacciai, una tolleranza nella precisione della misura fino al 15% dell'area (indici 2 e 3) e raramente fino al 25% (indice 4).

Per questi motivi, legati ai diversi metodi e alle diverse imprecisioni, esiste un ragionevole dubbio su quanta parte della differenza di superficie 1982-1985 sia imputabile al diverso sistema di acquisizione dei dati e alle approssimazioni implicite nell'uno o nell'altro metodo e verranno quindi discusse solo le differenze più rilevanti.

Per quanto riguarda, infine, i dati del catasto 1959-62, il livello di accuratezza non è riportato e i dati sembrano talora essere il risultato di una stima di massima. Perciò essi sono stati utilizzati per evidenziare la tendenza evolutiva più che l'entità delle variazioni.

Il confronto dei valori ottenuti dall'immagine TM del 7.9.85 con quelli del 1982 indica (fig. 8) una tendenza al regresso e differenze contenute, per il 73% dei ghiacciai, entro $\pm 25\%$ dell'area. Sia nelle Alpi Breonie (tab. 1, ghiacciai 3 e 25) che nelle Aurine (tab. 2, ghiacciai 1, 15 e 17) e Pusteresi (tab. 4, ghiacciaio 12; tab. 5, ghiacciai 1, 4 e 5) le variazioni di superficie più rilevanti riguardano, in genere, ghiacciai piccoli con alto numero di pixel al contorno rispetto al numero totale e per i quali non esistono misure sul terreno. La riduzione del 31% del ghiacciaio 11 delle Vedrette di Ries nelle Alpi Pusteresi (tab. 5) appare in accordo con il marcato regresso indicato nella relazione della Campagna glaciologica 1985 (CGI, 1986, p. 134).

Il confronto dei valori ottenuti dall'immagine TM 7.9.85 con quelli del catasto 1959-62 mostra (fig. 9) una evoluzione positiva molto netta; più marcata per le Alpi Pusteresi (tab. 4a) con tutti i ghiacciai in espansione, e via via meno marcata verso le Alpi Breonie (tab. 1) con il 64% dei ghiacciai in espansione e il 36% in regresso.

Il confronto tra i dati di estensione dell'innevamento ottenuti dall'analisi dei dati Landsat TM 1985 e dalla quota della linea del nevato nel 1982 (parte b delle tabelle 2, 3 e 4) risente anch'esso della difficoltà di affiancare dati ottenuti con metodi diversi.

La quota dell'innevamento residuo era 2750-2800 m nel 1982 e attorno ai 2850 m nel 1985 (CGI, 1983, pp. 95-96; 1986, pp. 132-134). Si tratta di una differenza di quota piuttosto piccola e le discordanti differenze 1982-85 nell'estensione dell'innevamento residuo delle tabelle 3 b e 4 b possono essere imputate a diverse cause tra cui la variabilità della quota dell'innevamento residuo da ghiacciaio a ghiacciaio, l'approssimazione con cui è quotata la linea del nevato nel 1982 (in genere 100 m), il fatto che i rilievi del 1982 siano dispersi nell'arco di 2 mesi anziché fotografati nello stesso istante come quelli del 1985, la presenza, infine, di pixel dubbi al limite ghiaccio-neve nel-

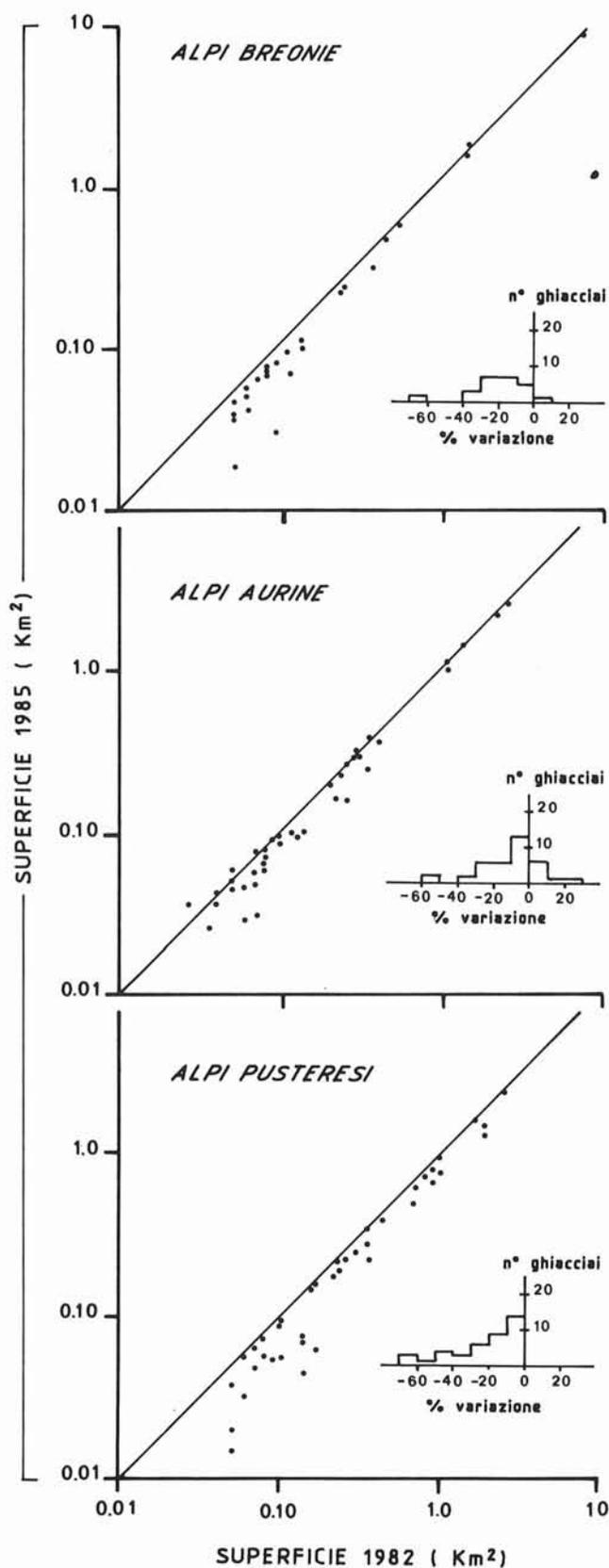


FIG. 8 - Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dall'immagine Landsat TM 192/27 del 7.9.85, III quadrante (in ordinata) rispetto a quelli del 1982 (Provincia Autonoma di Bolzano). Sotto la retta di variazione nulla (a 45°) si hanno i ghiacciai in regresso; sopra, quelli in avanzata. In istogramma è riportato il numero dei ghiacciai rispetto alla variazione percentuale di superficie 1982-1985.

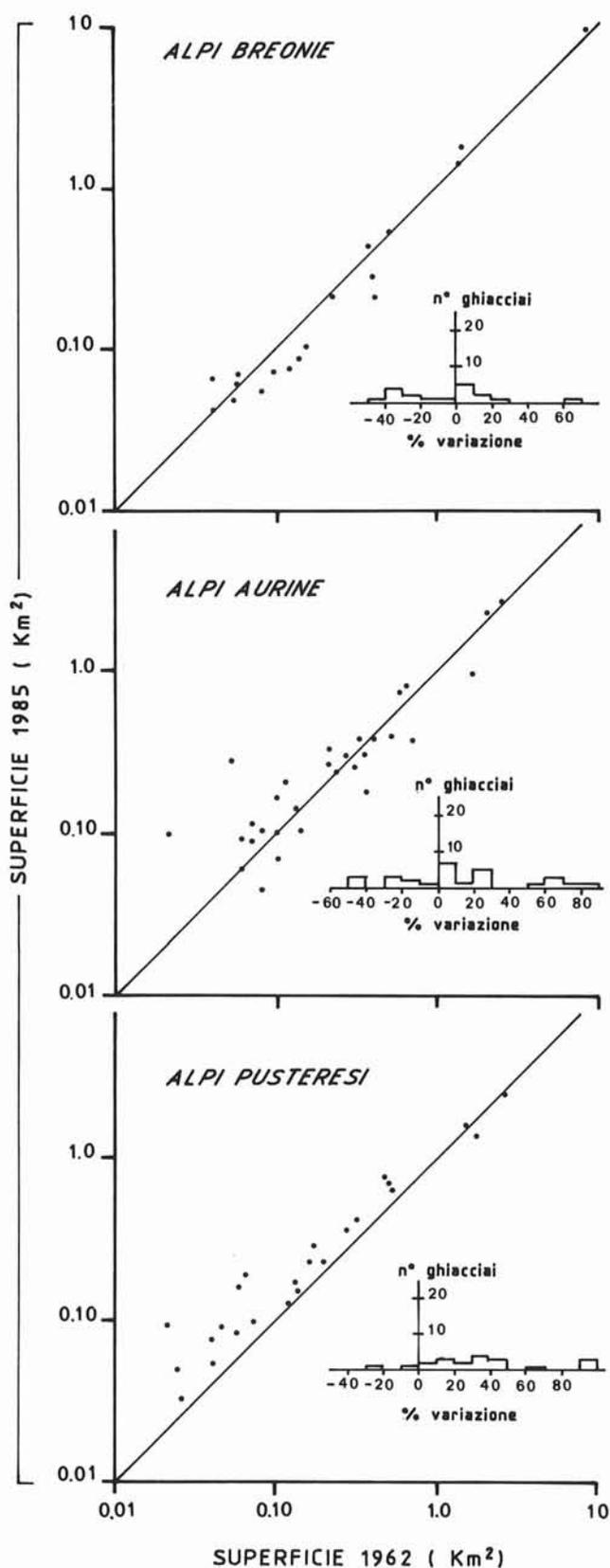


FIG. 9 - Valori di superficie dei ghiacciai ottenuti dall'immagine Landsat TM 192/27 del 7.9.85, III quadrante (in ordinata) rispetto a quelli del 1959-62 (Comitato Glaciologico Italiano). Sotto la retta di variazione nulla (a 45°) si hanno i ghiacciai in regresso; sopra, quelli in avanzata. In istogramma è riportato il numero dei ghiacciai rispetto alla variazione percentuale di superficie fra 1959-62 e 1985.

l'immagine 1985. La sensibile riduzione dell'innevamento tra il 1982 e il 1985 per i ghiacciai della tabella 2 b sembra invece reale perché il dato 1982 di confronto è, in realtà, per questi due ghiacciai (cfr. nota 2), riferito al 1980, anno in cui l'innevamento residuo scendeva a quota 2600 m e numerose fronti erano innevate.

Attraverso un confronto estensivo di dati ottenuti con metodologie diverse è possibile evidenziare la tendenza evolutiva dei ghiacciai dell'arco alpino, ma si è dimostrato problematico quantificare queste tendenze, data la diversa qualità e provenienza dei dati.

Il problema del confronto di dati ibridi si presenta ogni volta che un'operazione estensiva di acquisizione dati, come un catasto dei ghiacciai, sia ripetuta utilizzando tecnologie diverse. Riteniamo che il solo modo di ottenere dati confrontabili nel tempo sia quello di reimpiegare la stessa tecnica. Nel caso della tecnica qui descritta, l'errore legato ai pixel dubbi e ai pixel ghiaccio-neve di contorno, che effettivamente incide sulla valutazione dell'area, viene infatti ridotto quando l'obiettivo sia di ottenere una differenza di superficie dal confronto di dati ottenuti con la stessa metodologia. Per questo motivo è prevista la verifica dell'evoluzione degli stessi ghiacciai attraverso immagini Landsat TM scelte con intervalli di 2 o 3 anni.

BIBLIOGRAFIA

- ATTARDO C. (1987) - *Uno strumento per l'utilizzo operativo di immagini da telerilevamento per il controllo delle superfici dei ghiacciai alpini*. Tesi di laurea, Università degli Studi di Milano, Fac. Sc. M.F.N., A.A. 1986-87 (Inedito), 121 pp.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1983-1986) - *Relazioni delle campagne glaciologiche 1982-1985*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 6, 95-96; 7, 83-84; 9, 35 e 132-134.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1959-62) - *Catasto dei Ghiacciai Italiani*. Torino, 4 voll.
- DELLA VENTURA A., RAMPINI A., RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1982) - *Remote-Sensing Observation of Glaciers towards their Monitoring*. In: Papers approved for presentation at the Sixteenth Symposium on Remote Sensing of Environment. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 2, 723-733.
- DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1983) - *Glacier Monitoring by Satellite*. Il Nuovo Cimento, 6 C (2), 211-222.
- DELLA VENTURA A., RAMPINI A., RABAGLIATI R. & 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.
- PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - UFFICIO IDROGRAFICO (1982) - *Catasto dei Ghiacciai della Provincia di Bolzano* (Inedito).

ALLEGATO

Per uno dei gruppi di ghiacciai rappresentati nella figura 1 è stata realizzata, a titolo di esempio, l'immagine risultante dall'intero algoritmo di classificazione dei ghiacciai.

Per le Alpi Breonie, su un fondo verde che rappresenta le zone di non interesse, sono stati rappresentati:

- a) i contorni dei ghiacciai utilizzando pixel colorati di rosso;
- b) le zone del ghiacciaio senza neve residua con pixel colorati di azzurro;
- c) le zone del ghiacciaio coperte da neve residua con pixel colorati di bianco;
- d) le zone di incertezza tra ghiaccio e terreno con pixel colorati di blu;
- e) le zone di incertezza tra ghiaccio e neve con pixel colorati di giallo.

Le coordinate dei pixel che delimitano queste diverse zone, costituiscono (DELLA VENTURA & *alii*, 1987) la base di dati per la ripetizione delle misure di estensione dei ghiacciai in immagini Landsat TM successive a quella analizzata.

Breonie

