

MARCO GIADA (*) & GIORGIO ZANON (**)

CARATTERI DELLE MODIFICAZIONI AREALI, DI LIVELLO E VOLUMETRICHE PER IL GHIACCIAIO DEL CARESÈR (ALPI CENTRALI, GRUPPO ORTLES-CEVEDALE), 1990-1997

ABSTRACT: GIADA M. & ZANON G., *Characteristics of area, elevation, and volume changes in the Caresèr Glacier (Central Alps, Ortles-Cevedale Group)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

An aerial survey carried out in September 1997 on the Caresèr Glacier allowed comparison with the previous survey of 1990 and also evaluation of area, elevation, and volume changes during this period. In addition, computerized 1:5000 thematic map with isolines representing elevation variations was prepared.

Elevation variations for 1990-1997 were negative at all altitudes between 2860 and 3330 m a.s.l., with a mean value of -7.75 m, corresponding to a volume of -29.8975×10^6 m³. In the same interval, the overall surface area reduction was nearly 13%.

The distribution of area and altitude changes are analysed on the glacier surface and compared with their behaviour in previous periods, beginning from 1967. Results confirm a good fit with contemporaneous glaciological measurements on mass balance, and may be considered indicative of the dynamics of the present phase of accelerated glacier shrinkage in the Alps.

KEY WORDS: Glacial fluctuations, Glacier mass balance, Aerial surveys, Careser Glacier (Central Alps).

RIASSUNTO: GIADA M. & ZANON G., *Caratteri delle modificazioni areali, di livello e volumetriche per il Ghiacciaio del Caresèr (Alpi Centrali, Gruppo Ortles-Cevedale) 1990-1997*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

Un rilievo aerofotogrammetrico effettuato nel Settembre 1997 sul Ghiacciaio del Caresèr, ha reso possibile il confronto con il precedente rilievo del 1990 e la valutazione delle variazioni areali, di livello e volumetriche per questo intervallo. È stata inoltre realizzata al computer una carta tematica alla scala 1:5000, con isolinee delle variazioni di livello.

Le variazioni di livello sono apparse negative a tutte le altitudini comprese tra 2860 e 3330 m s.m., con un valore medio di -7.75 m, pari ad un volume di -29.8975×10^6 m³; nello stesso periodo si è avuta una riduzione areale complessiva di circa il 13% rispetto alla situazione 1990.

Le variazioni areali e di livello vengono analizzate nella loro distribuzione sulla superficie glaciale e poste a confronto con il loro andamento in altri periodi, a partire dal 1967. I risultati hanno confermato una

buona corrispondenza con le contemporanee misure glaciologiche sul bilancio di massa e possono considerarsi indicativi della dinamica dell'attuale fase di deglaciazione sulle Alpi.

TERMINI CHIAVE: Fluttuazioni glaciali, Bilancio glaciale, Fotogrammetria, Ghiacciaio del Careser.

INTRODUZIONE

Rilievi aerofotogrammetrici sul Ghiacciaio del Caresèr (Gruppo Ortles-Cevedale), effettuati congiuntamente dal Comitato Glaciologico Italiano e dal Dipartimento di Geografia dell'Università di Padova, con il contributo finanziario dell'ENEL S.p.A., nel 1967, 1980 e nel 1990, hanno consentito di valutarne globalmente le modificazioni intercorse rispettivamente per i periodi 1967-1980, 1980-1990 e 1967-1990 (Giada & Zanon, 1985; 1991; 1995). La disponibilità di un nuovo rilievo, effettuato nel 1997 nell'ambito del programma di ricerca MURST «Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali», e il confronto con quello del 1990, ha lo scopo, mediante l'utilizzo simultaneo di programmi di calcolo già largamente sperimentati e di dati derivanti da misure glaciologiche dirette, di analizzare la dinamica e di fornire una base quantitativa alle recenti modificazioni di questo sistema glaciale rappresentativo, in una fase di particolare interesse per l'evoluzione del glacialismo alpino e per le sue prospettive future.

METODOLOGIA DI CONFRONTO

La metodologia utilizzata per il confronto dei rilievi 1990 e 1997 ricalca a grandi linee quella adottata nelle ricerche precedenti (Giada & Zanon, 1985; 1991; 1995). La determinazione delle variazioni di livello e volumetriche si è basata sui rilievi aerofotogrammetrici eseguiti dallo Stu-

(*) Morgan S.r.l., Viale S. Marco 23/B - 30170 Venezia - Mestre.

(**) Dipartimento di Geografia «G. Morandini», Via del Santo 26 - 35123 Padova.

dio Cartografico Mastore (SCM) - Milano, alla fine delle annate idrologiche 1990 e 1997. La fotogrammetria aerea ha fornito i modelli digitali della superficie glaciale riferiti ad un sistema locale di coordinate, avente origine sul vertice trigonometrico del Piz Cavajòn (3129 m); entrambi i DTM sono stati ottenuti direttamente dalla stereorestituzione. Sono stati quindi prodotti due insiemi di dati, organizzati in forma di matrici di valori di quota, aventi un comune sistema di riferimento locale ed eguale interdistanza tra i valori nodali, pari a 50 m; nei due DTM sono pertanto identiche le coordinate piane dei nodi omologhi del reticolo. Il confronto delle due matrici (somma algebrica dei valori nodali, riferiti a nodi omologhi) ha fornito una terza matrice che esprime le variazioni di livello verificatesi nel periodo 1990-1997. Da quest'ultima sono stati calcolati i volumi di incremento (*accumulo netto*, come *firn*) e di perdita (*ablazione netta* di ghiaccio e di *firn*) relativi ai prismi retti aventi come base un'intera maglia quadrata di 50 m di lato ed altezza pari alla media dei quattro valori nodali, se dello stesso segno. Nel caso di prismi con valori nodali di segno discorde, l'assegnazione dei valori parziali è stata effettuata proporzionalmente alla ripartizione delle superfici di base e, rispettivamente, in una porzione relativa ad un incremento volumetrico ed una relativa ad una perdita. La matrice relativa alle differenze di quota tra il rilievo del 1990 e quello del 1997 è stata utilizzata direttamente per la costruzione di una carta tematica a grande scala (tav. f.t.), tramite la determinazione delle isolinee delle differenze di quota corrispondenti alle variazioni 0, ± 2 , ± 5 , -10, -15, -20 m e la successiva campitura, per mezzo di programmi CAD, delle zone comprese tra due isolinee consecutive e delle aree scoperte tra il 1990 e il 1997.

I dati glaciologici utilizzati per la comparazione con quelli forniti dalla fotogrammetria consistono nei valori cumulati dei bilanci netti di massa per le annate dal 1990-91 al 1996-97 (Zanon, 1992, 1998 a, 1998 b). Essi sono il risultato di misure dirette di superficie e sono ricavati dalla differenza tra accumulo netto e ablazione netta, valutabili alla fine di ciascun ciclo annuale di bilancio, con inizio e chiusura a data fissa (annata idrologica); sono espressi in equivalenti in acqua e si riferiscono ad intervalli verticali di 50 metri.

VARIAZIONI AREALI E MORFOMETRICHE

Il confronto dei DTM ricavati dai rilievi aerofotogrammetrici SCM 1990 e 1997 ha prodotto la carta tematica alla scala 1: 5 000 (tav. f.t.), con isolinee indicanti le variazioni di livello della superficie glaciale tra il 1990 ed il 1997, secondo le classi in *legenda*; nella carta sono evidenziate anche le modificazioni della superficie verificatesi nello stesso intervallo. Nella tab. 1 sono riportate le variazioni di area, in assoluto e come percentuali dell'area 1990, ricavate dalla sovrapposizione delle situazioni topografiche 1990 e 1997, per intervalli verticali di 50 metri.

TABELLA 1 - Ghiacciaio del Caresèr, 1990-1997. Distribuzione areale (S) sulla base dei rilievi aerofotogrammetrici SCM 1990 e 1997, per intervalli altimetrici di 50 metri; variazioni (ΔS) in assoluto e come percentuali delle aree 1990.

TABLE 1 - Area distribution (S) according to SCM 1990 and 1997 aerial surveys, in vertical intervals of 50 m.

Altitudine m s.m.	S 1990 km ²	S 1997 km ²	ΔS	
			km ²	%
2860-2900	0.0990	0.0650	-0.0340	-34.34
2900-2950	0.1985	0.2225	0.0245	12.09
2950-3000	0.3710	0.3575	-0.0135	- 3.64
3000-3050	0.6560	0.6050	-0.0510	- 7.77
3050-3100	0.9645	0.8525	-0.1120	-11.61
3100-3150	1.0440	0.8700	-0.1740	-16.67
3150-3200	0.3005	0.2400	-0.0605	-20.13
3200-3330	0.2240	0.1500	-0.0740	-33.04
2860-3330	3.8575	3.3625	-0.4950	-12.83

A differenza del confronto 1967-1990 (Giada & Zanon, 1995), nel quale la regione frontale (2860-2900) era apparsa, nel 1990, in notevole incremento areale (73% rispetto alla situazione iniziale 1967), come effetto dell'abbassamento di livello del segmento inferiore del ghiacciaio e della migrazione verso valle delle curve di livello, nel 1997 essa è risultata, invece, in riduzione rispetto al 1990; nella fascia altimetrica immediatamente superiore, 2900-2950 m, si è invece verificata, per analogo fenomeno, l'unica, ridotta variazione positiva, mentre, a partire dai 2950 m, le variazioni areali sono nuovamente di segno negativo, che si mantiene sino alle zone sommitali. La riduzione che si riscontra per la fascia altimetrica superiore ai 3200 m, è percentualmente la seconda in entità, con un valore del -33% rispetto all'area 1990; da rilevare, altresì, come la superficie compresa tra 3100 e 3330 m, corrispondente a gran parte dell'antica zona di alimentazione, faccia registrare globalmente una riduzione del 70% rispetto al 1990, come effetto dell'ingente innalzamento della linea di equilibrio (per il periodo 1990-1997 quest'ultima ha raggiunto una quota media di 3363 m) e della conseguente deglaciazione che ha interessato anche le aree più elevate del bacino.

Complessivamente, tra il 1990 e il 1997 la superficie del ghiacciaio si è ridotta ulteriormente di circa 0.5 km², vale a dire quasi il 13% della sua estensione nel 1990, con una sensibile accelerazione del processo rispetto ai precedenti confronti. Dal 1967 la riduzione complessiva è stata di 1.3545 km², pari ad oltre il 31% dell'area 1967; se si considera il rilievo terrestre UIMA del 1933, la riduzione sino ad oggi è stata del 61.8%. La quota frontale, date le attuali condizioni topografiche del *bedrock*, è variata molto limitatamente (ora a 2857 m), mentre l'altitudine massima si è abbassata a 3313 m; l'altitudine mediana (3074 m) è scesa di una decina di m rispetto al 1990 e di soli 16 m rispetto al 1967, ad indicare che l'evoluzione negativa, essendo avvenuta anche a spese del bacino di alimentazione, non ha alterato in maniera rilevante i reciproci rapporti altimetrici tra i vari settori dell'apparato glaciale (Zanon, 1992).

VARIAZIONI DI LIVELLO E VOLUMETRICHE

La carta tematica a curve di isovariazione del livello della superficie del ghiacciaio (tav. f.t.), pur tenendo conto del relativamente breve intervallo considerato, denota un intensificarsi della tendenza alla riduzione, con modalità già evidenziate nelle loro grandi linee per i periodi precedentemente analizzati. In base alle variazioni espresse dalle classi in *legenda*, valori di abbassamento di livello compresi tra 20 e 15 m interessano quasi esclusivamente una fascia della larghezza massima di 200-250 m, che si estende lungo l'asse mediano, in corrispondenza della convergenza delle due principali correnti di flusso provenienti dai settori orientale e occidentale del ghiacciaio; tale fascia si sviluppa tra la fronte e il grande isolotto roccioso centrale di quota 3051, contornando parzialmente quest'ultimo verso Est, sino ad un'altitudine di 3070 metri. Valori negativi tra 20 e 15 m costituiscono a loro volta la classe di maggiore estensione sulla superficie glaciale: essa copre una doppia fascia che, per una larghezza complessiva di oltre 1 km, si estende dal margine meridionale sino ad un'altitudine massima di 3125 metri. La sua configurazione appare nettamente dissimmetrica; infatti, mentre si allarga a coprire gran parte del settore occidentale, dalla fronte sino a quote sui 3100 m, per una lunghezza di 1250 m e una larghezza di 700, sul lato orientale essa appare alquanto più ristretta. All'opposto, la successiva classe negativa 10 -5 m ricopre estesamente il settore orientale e gran parte di ciò che resta di quello occidentale, dove, tuttavia, essa appare dislocata e largamente condizionata dall'andamento topografico e morfologico, oltre che dalla presenza degli affioramenti rocciosi. Nel settore orientale assume ancora ampio sviluppo, in esposizione Nord-Ovest, la classe negativa 5-2 m, seguita da quella 2-0 m; su quello occidentale, invece, entrambe sono rappresentate soltanto da frange più o meno marginali. Infine, le variazioni positive (classi 0-2 e 2-5 m) si riscontrano molto sporadicamente, in definite situazioni di riparo orografico e di favorevole esposizione topografica, oppure in ben identificabili aree di sovraccumuli nevosi semipermanenti, dovuti all'azione eolica.

Per quanto si riferisce alla distribuzione delle superfici rocciose e detritiche, emerse dal ghiaccio tra il 1990 e il 1997 (cfr. in *legenda*), essa risulta fortemente differenziata. In particolare, tali superfici costituiscono una fascia continua lungo tutto il perimetro meridionale, proseguendo ed ampliandosi verso Ovest e completando quindi il processo di totale scomparsa del ghiaccio nell'estremo settore Sud-occidentale, sino ad oltre 3100 m di quota. Si è inoltre allargata con regolarità l'estensione degli affioramenti isolati preesistenti e, in generale, la base del recinto roccioso settentrionale, tra cui l'intero vallone posto a Sud-Est di quota 3357 m (C.^{ma} Gina); come si è visto in tab. 1, infatti, la riduzione dell'area glacializzata posta al di sopra dei 3200 m è valutabile in un terzo di quella presente nel 1990. Sul settore orientale gli affioramenti rocciosi recenti sono invece relativamente limitati e circoscritti ad una ristretta frangia del contorno di Nord-Est, oltre che alle pendici meridionali di quota 3347 m (C.^{ma} Rossa di Saènt).

Le variazioni di livello e volumetriche, determinate con la metodologia descritta in precedenza, sono riportate nella tab. 2; come già per i periodi posti precedentemente a confronto, le variazioni volumetriche sono state calcolate moltiplicando le variazioni di livello della superficie glaciale (in m) per l'area di ciascuna zona altimetrica di 50 m, in base alla situazione topografica 1990. I valori calcolati risultano tutti negativi e sono compresi tra -15.31 m per la zona inferiore (2860-2900 m) e -4.20 m per quella più elevata (oltre i 3200 m), con una variazione media, per l'intera superficie, di -7.75 m, corrispondente a -1.10 m/anno; il valore annuo coincide con quello precedentemente calcolato per l'intervallo 1980-1990 (Giada & Zanon, 1991) mentre è di quasi 5 volte superiore a quello del periodo 1967-1980 (Giada & Zanon, 1985). In termini volumetrici, sempre con riferimento alla situazione iniziale 1990, la riduzione massima si è verificata per la zona 3050-3100 m (-6.6745 x 10⁶ m³, pari al 22.32% del totale), valore di poco superiore a quanto riscontrato per la zona immediatamente sottostante 3000-3050 m (-6.4420 x 10⁶ m³, il 21.55% del totale); da rilevare come l'intervallo compreso tra 3000 e 3150 m di altitudine abbia totalizzato da solo il 62% della complessiva perdita di volume tra il 1990 e il 1997. Per i periodi precedentemente analizzati, 1980-1990 e 1967-1990, la variazione volumetrica negativa per queste stesse zone era stata pari rispettivamente al 67% e al 68% della perdita totale.

TABELLA 2 - Ghiacciaio del Caresèr, 1990-1997. Variazioni di livello della superficie (m) e di volume (10⁶ m³ e come percentuali del valore totale), per intervalli altimetrici di 50 metri. Dal confronto dei rilievi aerofotogrammetrici SCM 1990 e 1997

TABLE 2 - Elevation (in m) and volume variations (in 10⁶ m³ and as percentage of total value) for 50-m vertical zones, obtained by comparison of SCM 1990 and 1997 aerial surveys

Altitudine m s.m.	Area 1990 km ²	Δ Livello m	Δ Volume 10 ⁶ m ³	%
2860-2900	0.0990	-15.31	- 1.5155	5.07
2900-2950	0.1985	-14.36	- 2.8505	9.53
2950-3000	0.3710	-12.11	- 4.4930	15.03
3000-3050	0.6560	- 9.82	- 6.4420	21.55
3050-3100	0.9645	- 6.92	- 6.6745	22.32
3100-3150	1.0440	- 5.17	- 5.3975	18.05
3150-3200	0.3005	- 5.27	- 1.5835	5.30
3200-3330	0.2240	- 4.20	- 0.9410	3.15
2860-3330	3.8575	- 7.75	-29.8975	100.00

VARIAZIONI COME EQUIVALENTI IN ACQUA E CONFRONTO CON LE MISURE GLACIOLOGICHE DI SUPERFICIE

Nella tab. 3 sono riportati, per intervalli altimetrici di 50 m, i dati ricavati dal confronto dei rilievi aerofotogrammetrici SCM 1990 e 1997, insieme con quelli forniti dalle misure glaciologiche per la valutazione del bilancio netto di massa delle singole annate dal 1989-90 al 1996-97. I dati che esprimono le variazioni di livello e volumetriche, ottenuti dalla fotogrammetria e dalle misure glaciologiche,

TABELLA 3 - Ghiacciaio del Caresèr, 1990-1997. Variazioni ricavate dal confronto dei rilievi aerofotogrammetrici SCM 1990 e 1997 (A), e bilanci netti (Bn) cumulati per le annate 1990-91/1996-97 (B), per intervalli altimetrici di 50 metri. Dati espressi come spessori (m) e come volumi (10^6 m^3) di equivalente in acqua (WE). Differenze (Δ) tra i valori di bilancio e quelli ricavati dalla fotogrammetria (B-A) in m e in 10^6 m^3 di equivalente in acqua. Distribuzione areale 1990

TABLE 3 - Variations obtained by comparison of SCM 1990 and 1997 aerial surveys (A), and net mass balance for 1990-91/1996-97 (B), in vertical intervals of 50 m. Data expressed as depth (m) and volumes (10^6 m^3) of water equivalent (WE). Differences (Δ) between balances values and aerophotogrammetric values (B-A) in m and in $\text{m}^3 \times 10^6$ water equivalent. Area distribution 1990

Altitudine ms.m.	Area km ²	SCM 97/90 (WE)		Bn (WE)		Δ (WE)	
		m	10^6 m^3	m	10^6 m^3	m	10^6 m^3
		A		B		B-A	
2860-2900	0.0990	-13.78	-1.3640	-14.01	-1.3870	-0.23	-0.0230
2900-2950	0.1985	-12.92	-2.5645	-12.47	-2.4755	0.45	0.0900
2950-3000	0.3710	-10.90	-4.0440	-10.93	-4.0550	-0.03	-0.0115
3000-3050	0.6560	-8.84	-5.7990	-9.38	-6.1535	-0.54	-0.3555
3050-3100	0.9645	-6.23	-6.0090	-7.85	-7.5715	-1.62	-1.5645
3100-3150	1.0440	-4.65	-4.8545	-6.32	-6.5980	-1.67	-1.7400
3150-3200	0.3005	-4.74	-1.4245	-4.76	-1.4305	-0.02	-0.0055
3200-3330	0.2240	-3.78	-0.8465	-1.78	-0.3985	2.00	0.4485
2860-3330	3.8575	-6.98	-26.9060	-7.80	-30.0695	-0.82	-3.1615

risultano praticamente coincidenti (rispettivamente -7.75 e -7.96 m, pari a -29.7985 e $-30.0695 \times 10^6 \text{ m}^3$, come media per l'intera superficie del ghiacciaio). Poiché, tuttavia, i dati sul bilancio glaciale tengono conto dei vari materiali (neve, ghiaccio e *firm*) a diverso peso specifico, coinvolti nelle misure annuali, e sono pertanto calcolati in equivalenti in acqua, per maggior rigore e per omogeneità entrambe le serie sono state espresse in tale maniera. Quanto ai dati ricavati dalla fotogrammetria (tab. 2), considerando che per l'intero periodo di confronto l'Altitudine della Linea di Equilibrio (ELA) si è mantenuta mediamente al di sopra della quota massima del ghiacciaio, è stato per semplicità applicato il peso specifico del ghiaccio (900 kg m^{-3}).

La comparazione si può considerare ancora una volta soddisfacente e i valori cumulati di bilancio differiscono dell'8,9% rispetto a quelli ottenuti dalla fotogrammetria aerea; in precedenza, le corrispondenti differenze percentuali erano state del 13% per il periodo 1967-1980, del 6% per il 1980-1990, del 2,7% per il 1967-1990. Nella presente ricerca, tuttavia, risultano alquanto minori le differenze riscontrabili per singole zone altimetriche, differenze che

nei precedenti confronti mostravano una maggiore variabilità e, in certi casi, anche differenze di segno; ciò può essere attribuito al sempre maggiore affinamento della metodologia utilizzata, ma anche alla progressiva riduzione delle aree glacializzate ad alta quota, dove le condizioni morfologiche e topografiche sono causa di maggiori imprecisioni, sia per le misure dirette che per il confronto dei DTM.

Con riferimento alle variazioni come equivalente in acqua e alla loro distribuzione verticale, di particolare interesse risulta quanto avvenuto per la fascia altimetrica 3050-3100 m (sede dell'altitudine media, mediana e dell'ELA a bilancio zero). Qui le variazioni negative, determinate con entrambe le metodologie, sono state le massime riscontrate per l'intero apparato glaciale, segnale di una situazione di pesante squilibrio che ha avuto inizio con la prima metà degli anni Ottanta e si è progressivamente accentuata nel successivo decennio Novanta. Essa è da considerarsi una significativa espressione della fase di eccezionale deglaciazione che ha caratterizzato la fine del millennio nella regione alpina, probabilmente senza riscontro nella storia della glaciologia scientifica.

BIBLIOGRAFIA

- GIADA M. & ZANON G. (1985) - *Modificazioni volumetriche sul Ghiacciaio del Caresèr (Alpi Centrali, Gruppo Ortles-Cevedale) tra il 1967 e il 1980*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 10-13.
- GIADA M. & ZANON G. (1991) - *Variazioni di livello e volumetriche sulla Vedretta del Caresèr (Gruppo Ortles-Cevedale) tra il 1980 e il 1990*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 14, 221-228.
- GIADA M. & ZANON G. (1995) - *Elevation and Volume Changes in the Caresèr Glacier (Ortles-Cevedale Group, Central Alps), 1967-1990*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 31, 143-147.
- GIADA M. & ZANON G. (1998) - *Caresèr Glacier 1967-1990, Italy, 1:5000 (thematic map)*. In: IAHS (ICSU) - UNEP - UNESCO, Fluct. Glaciers 1990-95, VII (Haerberli W. & Hoelzle M., eds.), 93-95.
- ZANON G. (1992) - *Venticinque anni di bilancio di massa del Ghiacciaio del Caresèr (Alpi Centrali), 1966-67/1990-91*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 15, 215-219.
- ZANON G. (1998 a) - *Caresèr*. In: IAHS (ICSU) - UNEP - UNESCO, Fluct. Glaciers 1990-95, VII (Haerberli W. & Hoelzle M., eds.), 247-248.
- ZANON G. (1998 b) - *Caresèr*. In: IAHS (ICSU) - UNEP - UNESCO, Glacier Mass Balance Bull., 5 (Haerberli W., Hoelzle M., & Frauenfelder R., eds.), 7, 18.