

IMPIEGO DELLA FOTOGRAMMETRIA PER IL RILIEVO DI AREE GLACIALI *

Comunicazione presentata al XIV Convegno Nazionale della SIFET

*Corrado Lesca ***

1. Generalità

Lo studio dei ghiacciai su basi scientifiche si sviluppò verso il 1840 essenzialmente per merito del FORBES [1] e dell'AGASSIZ [2], che gettarono le prime basi valide della teoria sui fenomeni glaciali. Naturalmente, loro prima cura fu di ottenere delle carte attendibili delle formazioni glaciali da loro studiate: il Forbes rilevò quindi tutta la Mer de Glace e ne ricavò una carta in scala 1:10 000, Agassiz diede incarico all'Ing. Wild di stabilire una carta disegnata pure in scala 1:10 000 del ghiacciaio inferiore dell'Aar.

Ambedue queste carte si basarono su lunghi e penosi lavori di triangolazione, unico metodo di rilievo allora conosciuto ed il cui inconveniente principale era di lasciare all'occhio (o alla fantasia) del rilevatore il completamento delle vaste zone inquadrature dai pochi punti noti.

Con l'introduzione della celerimensura, alcuni decenni dopo, fu possibile procedere con maggior facilità al raffittimento dei punti ed al rilievo di dettaglio.

Ma restavano sempre insolute le difficoltà di base: necessità di lavorare per lungo tempo in zone soggette a variazioni meteorologiche spesso imprevedibili, impossibilità di eseguire rilievi particolareggiati in zone seraccate o fortemente crepacciate o in corrispondenza di fronti sospese.

2. I rilievi fotogrammetrici

La fotogrammetria classica, quale fu realizzata e applicata dall'Ing. PRO PAGANINI dell'I.G.M. [3] nell'intorno del 1870 costituì un primo notevole progresso nel rilievo di zone difficilmente accessibili e percorribili: furono rilevati con tale metodo il Gruppo del Gran Paradiso (dal 1880 al 1885) in scala 1:50 000, il Passo dello Spluga, le Alpi Apuane. Comunque non si poteva sperare per questa via di raggiungere una grande precisione: in effetti il rilievo era ancora effettuato per punti e richiedeva una eccessiva integrazione da parte dei disegnatori cartografi. Inoltre risultava spesso difficile e laborioso riconoscere su fotogrammi fatti da due punti di vista diversi e in condizioni differenti di illuminazione lo stesso particolare del terreno.

Quando fu introdotta la stereofotogrammetria questo inconveniente fondamentale fu eliminato, ma permaneva l'imprecisione conseguente al rilevamento per punti ed il pesante lavoro di calcolo ad esso legato.

Fu la geniale intuizione del VON OREL, che è stato giustamente celebrato nell'ultimo Congresso S.I.F.E.T. a Bolzano, a permettere finalmente un integrale, completo sfruttamento del metodo stereofotogrammetrico, grazie al tracciamento semiautomatico e continuo della planimetria e delle curve di livello mediante lo stereoautografo.

E' qui opportuno ricordare che proprio a Vienna nel 1913, sotto la direzione del Von Orel, fu eseguita la restituzione del ghiacciaio del Miage in scala 1:5 000, rilevato con apparecchiature Zeiss da F. PORRO e che costituì

* Studio promosso dalla Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL.

** Istituto di Topografia del Politecnico di Torino.

la prima applicazione italiana di tale sistema. La carta relativa fu pubblicata (ridotta in scala 1:10 000) nel primo numero del Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano (1914) e costituisce un interessantissimo e notevole esempio dell'applicazione della fotogrammetria al rilievo di ghiacciai [6].



Fig. 1 - Ghiacciaio della Tribolazione (Gruppo del Gran Paradiso) dalla stazione fotogrammetrica dell'Alpe di Money



Fig. 2 - Il Ghiacciaio della Tribolazione - Ripresa aerofotogrammetrica della stessa zona inquadrata nella fig. 1

Però, anche se restituita con grande ricchezza di dettagli, la carta suddetta dal punto di vista glaciologico è piuttosto scarsa di informazioni: non riporta punti quotati né sulle morene né sul corpo del ghiacciaio, non riporta i limiti tra ghiaccio e morena e inoltre risulta un po' deformata in certe zone in conseguenza del fatto che, in quelle prime applicazioni, non era ancora apparsa necessaria la utilizzazione di punti di controllo per l'aggiustaggio dell'orientamento esterno dei fotogrammi.

L'impiego dell'aerofotogrammetria, sviluppatosi dopo la seconda guerra mondiale, è risultato oltremodo vantaggioso rispetto ai rilievi terrestri.

Anzitutto il lavoro a terra è stato notevolmente ridotto; inoltre, nello spazio di poche decine di minuti l'area rilevata può risultare dell'ordine di molte decine di km² e, quel che più conta, la visione nadirale permette di discernere dettagli che la fotografia da terra, legata alla morfologia della zona e alle difficoltà pratiche di trasporto e sistemazione delle apparecchiature, non consente.

Si confrontino a questo proposito le figg. 1 e 2, che non richiedono ulteriori commenti.

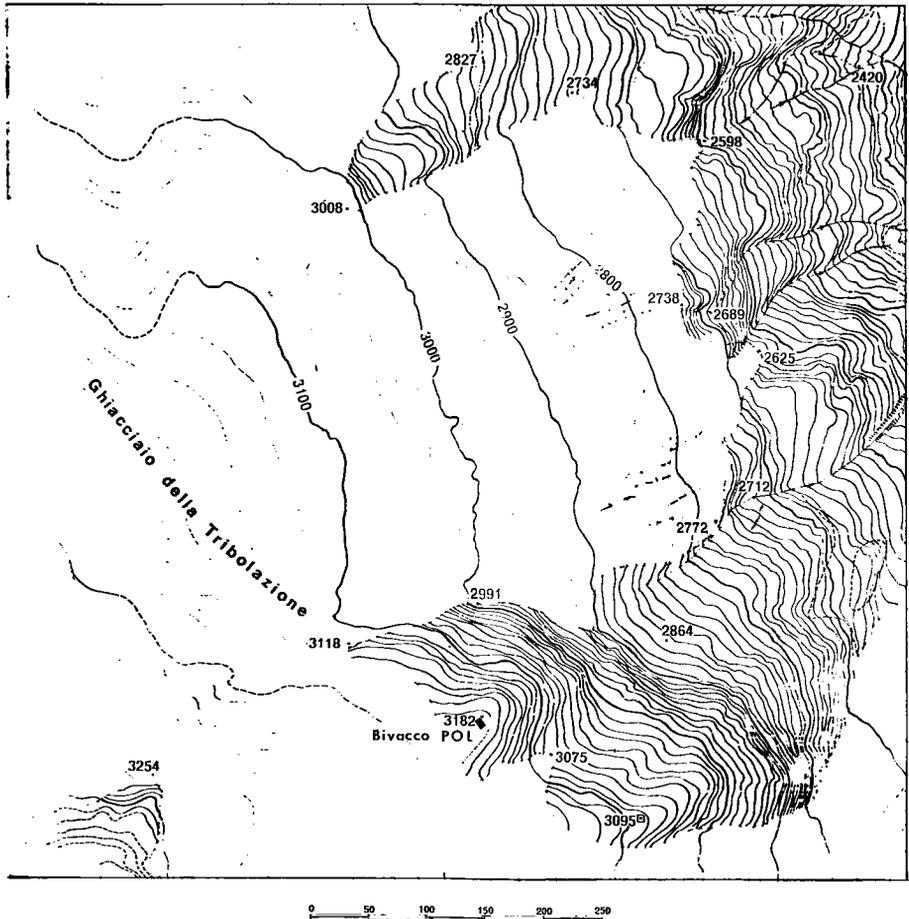


Fig. 1 - Rilievo fotogrammetrico del Ghiacciaio della Tribolazione. Equidistanza 10 m. - Anno 1953 (Scala dell'originale 1 : 8 000)

Recentemente in Alaska [17, 787 e segg.] si è usato con successo un sistema aereo, rilevando dall'aereo la zona d'ablazione e con la fotogrammetria terrestre la zona di accumulo: le superfici nevose viste sui fotogrammi terrestri appaiono molto più ricche di dettagli e più contrastate di quanto risultino sui fotogrammi aerei ed è perciò possibile procedere alla restituzione senza eccessiva difficoltà e con sufficiente precisione.

Evidentemente l'impiego di questo sistema deve essere basato su attente considerazioni economiche, che tengano conto dei costi del rilievo a terra e dei costi della segnalazione su neve (v. 2.2), in modo da scegliere di volta in volta la soluzione più vantaggiosa, senza trascurare le altre considerazioni relative ai tempi, alle difficoltà logistiche e di esecuzione, ecc.

2.1. Il volo fotogrammetrico

Poiché le scale delle carte usate a scopo glaciologico sono in genere comprese fra 1:5 000 e 1:10.000 si possono adottare scale medie dei fotogrammi da 1:10 000 a 1:20 000.

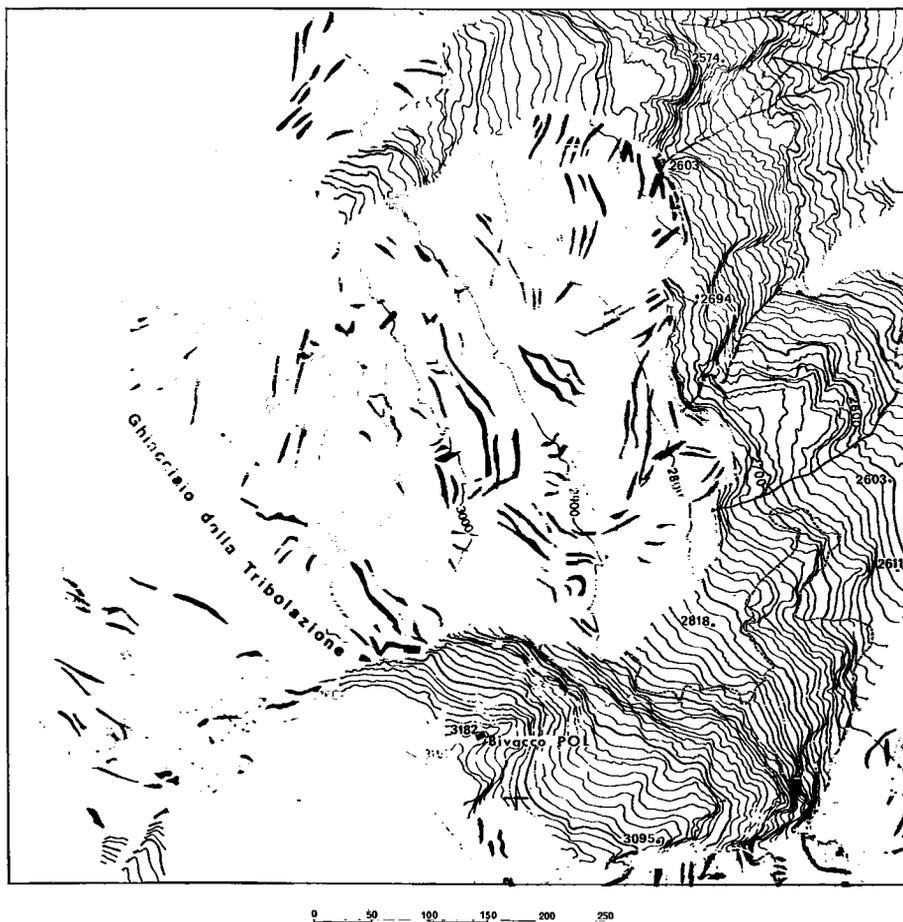


Fig. 4 - Rilievo fotogrammetrico del Ghiacciaio della Tribolazione. Equidistanza 10 m. - Anno 1959 (Scala dell'originale 1:8 000)

Di norma però non conviene superare il primo valore per rendere sicura la interpretazione dei dettagli morfologici del terreno: trattandosi quasi sempre di aree relativamente piccole (dell'ordine delle centinaia di ettari) il maggior lavoro per l'appoggio sul terreno ed in fase di restituzione, non è tale da variare l'ordine di grandezza del costo.

Normalmente si usano obiettivi grandangolari con angoli di campo di 100g, con potere risolutivo di circa 80 linee/mm in centro e 20 linee/mm agli angoli del formato; se fosse possibile converrebbe però usare obiettivi a focale normale (240 mm), i quali presentano un potere risolutivo sensibilmente più elevato dei precedenti (almeno 80-100 linee/mm su tutto il formato), ma richiedono però una quota relativa di volo alquanto maggiore (si passa infatti dai 1500 m con obiettivo grandangolare ai 2400 m circa con obiettivo normale, per una scala dei fotogrammi di 1 : 10 000).

Non sono in genere consigliabili i supergrandangolari a causa degli eccessivi angoli morti che ne risulterebbero.

Il ricoprimento, nelle zone con notevoli dislivelli, deve essere in genere dell'ordine del 70-80 % il che ovviamente nuoce un po' alla precisione dei rilievi a causa della conseguente riduzione della lunghezza della base.

Il periodo utile per i voli, nella regione alpina, è normalmente compreso fra il 15 settembre ed il 15 ottobre: alle quote (superiori a 2000 m) che interessano i rilievi glaciali si può contare in tale periodo su almeno dieci giorni di tempo bello stabile con il vantaggio in più di avere una atmosfera particolarmente limpida e priva di turbolenze.

Inoltre, dati i ridotti gradienti termici, non vi è praticamente il rischio che si formino nubi orografiche, che invece sono così frequenti in primavera-estate e che disturbano e spesso impediscono l'effettuazione delle riprese.

2.2. *Caratteristiche delle fotografie*

Il materiale sensibile che normalmente deve essere usato per le riprese aerofotogrammetriche è il negativo bianco-nero con sensibilità dell'ordine di 50÷100 ASA, con potere risolutivo non inferiore a 60 linee/mm. Tuttavia sarebbe auspicabile l'impiego del materiale a colori invertibile, con sensibilità e potere risolutivo analoghi al bianco-nero, che permetterebbe una interpretazione molto più facile e più dettagliata di tutti i particolari morfologici del ghiaccio e delle morene, e di differenziare nettamente in fase interpretativa e durante la restituzione i vari tipi di roccia, di terra, di neve e di ghiaccio.

Il materiale a colori all'infrarosso (Kodak Aero Infrared), in base a riprese sperimentali da me effettuate sul ghiacciaio del Miage, non sembra invece offrire maggiori informazioni rispetto ai consueti materiali in bianco-nero o a colori: le zone di vegetazione rossastre risaltano chiaramente sui toni azzurri del ghiaccio e delle morene, le acque torbide e limose dei laghi epiglaciali e periglaciali sono riprodotte in tono azzurro e risaltano quindi con netta evidenza. Ma questi particolari non sono di grande interesse per il glaciologo.

Per le riprese in bianco-nero è da evitarsi per quanto possibile l'impiego dei filtri gialli che accentuano inutilmente i contrasti rendendo illeggibili i particolari nelle zone in ombra. I fortissimi contrasti (rapporti di illuminamento dell'ordine anche di 1/10 000) delle riprese di aree glaciali richiedono trattamenti spaciali in fase di sviluppo in modo da ridurre il gamma a valori compresi fra 0,6 e 0,7 *.

Per ridurre ulteriormente i contrasti è bene procedere alla stampa delle copie su carta e delle diapositive mediante stampatrici a compensazione automatica del contrasto, tipo Logetronic. In tal modo è possibile ridurre i rapporti di illuminamento sulla diapositiva usata per la restituzione a 1 : 50 o ÷ 1 : 100.

In sensitometria fotografica si definisce come « gamma » o fattore di contrasto la pendenza del tratto rettilineo della curva caratteristica d'annerimento.

La riproduzione fotografica si considera corretta quando il fattore di contrasto è uguale a uno. Però i negativi conviene siano sviluppati a una gamma alquanto inferiore per potere ridurre i contrasti conseguenti a eccessive differenze d'illuminamento del soggetto.

Tuttavia, particolarmente nel caso di nevicata recenti, nei bacini di accumulo non è possibile ottenere sulle superfici nevose dettagli sufficienti a permettere la visione in rilievo: per ovviare a questo inconveniente piuttosto grave gli svizzeri per il recente rilievo del ghiacciaio dell'Aletsch [12] hanno cosparso i nevati di segnali ottenuti lanciando dall'aereo sacchetti contenenti una miscela di segatura (97%) e nerofumo (3%).

2.4. I rilievi topografici sul terreno

Come è noto i punti di controllo necessari per l'orientamento assoluto dei fotogrammi devono essere almeno tre per ogni coppia di fotogrammi.

Per il posizionamento di tali punti si ricorre alle ormai consuete operazioni di triangolazione, trilaterazione. Particolarmente interessante è l'impiego dei nuovi distanziometri ottico-elettronici che permettono un rapido collegamento dei punti di controllo mediante poligonazione o, per piccole estensioni, con rilievo per irraggiamento.

I segnali fotografici, su rocce in posto o su massi delle morene laterali o frontali, possono essere costituiti da croci bianche (rosse per riprese a colori) con fondo formato da un quadrato nero o viceversa.

Si sono adottate anche con esito positivo [12, 800] lastre di alluminio di $1 \times 1 \text{ m}^2$, di colore bianco o nero, per segnali disposti rispettivamente su rocce o sul ghiacciaio: in quest'ultimo caso la lastra era circondata da un anello scuro ottenuto spargendo segatura e nerofumo su un cerchio con circa 3 m di diametro.

Un metodo molto pratico e sicuro per garantire la durata dei segnali relativi ai vertici trigonometrici, da me sperimentato con esito favorevole, consiste nell'adottare dei chiodi in ferro o bronzo a testa cilindrica (diametro 3-4 cm) e gambo conico lungo circa 15 mm, analogo a quelli dei chiodi da roccia a pressione.

Mediante lo scalpello apposito si effettua un foro nella roccia di lunghezza appena superiore a quella del gambo e si pianta il chiodo, il cui gambo deformandosi si adatta alle pareti del foro impedendone la fuoriuscita.

Con questo sistema si elimina la necessità di dover eseguire, in condizioni spesso molto disagiate, gli usuali impasti di cemento a pronta presa, che col tempo tendono a sgretolarsi sotto l'effetto degli agenti atmosferici e delle alteranze termiche. In certi casi però la segnalazione, data l'estensione e la morfologia dell'area glacializzata non può essere effettuata convenientemente; in casi del genere conviene ricorrere alle triangolazioni aeree analitiche o semianalitiche che permettono l'orientamento dei vari modelli servendosi di pochi punti noti disposti sulla periferia del ghiacciaio.

Un'interessante applicazione di questo procedimento è stata eseguita per il Ghiacciaio di Pian di Neve, restituito in scala 1:5 000 [11, 13]; la compensazione ha dato i seguenti scarti sui punti noti: sulla coordinata $x \pm 1 \text{ m}$, su $y \pm 0,2 \div 0,4 \text{ m}$, su $z \pm 0,3 \div 0,4 \text{ m}$.

Questi valori sono da considerarsi senz'altro accettabili.

Per poter disporre di punti di passaggio ben riconoscibili anche sulle aree glacializzate si può ricorrere al sistema adottato da G. Østrem [16, 877 e segg.] sul ghiacciaio di Jostedalbreen (Norvegia). Secondo le esperienze ivi effettuate, buoni risultati si ottengono lanciando da un aereo che vola ad una quota relativa di 50-100 m, a velocità di $100 \div 150 \text{ km/h}$, dei sacchetti di carta contenenti 3-5 kg di ocra in polvere; il costo di tale operazione si aggira sul 25% del costo totale del volo fotogrammetrico.

2.5. La restituzione

La restituzione alle scale consuete (1:5 000-1:10 000) non presenta particolari difficoltà, purché si abbiano diapositive ben leggibili e accuratamente stampate.

Di norma non è possibile usare restitutori a proiezione ottica con visione anaglifica, in quanto i dislivelli del modello superano in genere i limiti strumentali.

Occorre servirsi quindi di restitutori di I o II ordine a seconda della precisione che si vuole ottenere, a proiezione meccanica o meccanico-ottica, i quali devono però essere manovrati da operatori abituati ad un lavoro preciso ed accurato e possibilmente in possesso di una discreta conoscenza dell'ambiente d'alta montagna.

Su un rilievo eseguito a scopo glaciologico dovrebbero possibilmente essere contenuti e segnalati i seguenti elementi speciali:

- distinzione fra superfici del ghiacciaio con ghiacciaio scoperto e ghiacciaio stagnante o neve e nevali;
- crepacci, seracchi, fenditure e stratificazioni;
- idrologia sulla superficie glaciale;
- distinzione fra morene storiche e recenti;
- morene superficiali;
- blocchi morenici singoli di grandi dimensioni della morena superficiale e delle morene recenti e storiche latero-frontali;
- laghi periglaciali ed epiglaciali.

La precisione ottenibile è stata oggetto di ricerche sul ghiacciaio Athabasca (Canada), restituito in scala 1:4800 con equidistanza di 10 ft., partendo da fotogrammi in scala 1:12 000 circa [15, 912-913]. Dal confronto dei valori delle



Fig. 5 - Ghiacciaio della Tribolazione - Spezzone di restituzione in scala 1:8000 (sull'originale) da una minuta in scala 1:2000 (in nero: operatore E. Morselli, in rosso: operatore C. De Bernardi)

coordinate ricavate da rilievi diretti sul terreno e dal rilievo fotogrammetrico e relativi a 59 punti segnalizzati sul ghiacciaio si è determinato un errore planimetrico medio della restituzione di $\pm 0,5$ mm (che corrisponde sul terreno a $\pm 2,4$ m). L'errore altimetrico medio è risultato di $\pm 0,5$ m.

Tuttavia questi dati richiedono ulteriori controlli e conferme: in effetti le misure a terra non sono state effettuate nello stesso giorno del volo, ma le coordinate dei vari punti hanno dovuto essere riportate alla data del volo mediante interpolazione lineare dei dati ottenuti da due successivi rilievi: uno effettuato dieci giorni prima del volo, l'altro eseguito circa quindici giorni dopo. Inoltre le quote dei punti segnalizzati sono state determinate per interpolazione fra due isoipse contigue e non direttamente al restitutore.

In questo campo quindi sarebbe necessario effettuare altre più precise ricerche: i distanziometri ottico-elettronici con calcolatore incorporato (Distomat e simili) permettono di fare numerose misure in poco tempo e si presterebbero particolarmente per rilevare i punti a terra nello stesso giorno del volo, riducendo così gli errori conseguenti a interpolazioni fra osservazioni molto intervallate nel tempo. E' interessante inoltre determinare qual è l'errore intrinseco di restituzione, conseguente ad errori sistematici del restitutore e conseguente agli errori accidentali dovuti all'operatore.

Per accertare qual è l'effettivo grado di precisione raggiungibile nel tracciamento delle curve di livello ho fatto eseguire a scala 1:2000 due restituzioni di una fascia del ghiacciaio della Tribolazione, in una zona seraccata e molto tormentata, rispettivamente da due diversi operatori, che hanno lavorato indipendentemente: i risultati (fig. 5) dimostrano che se si procede con cura e attenzione si ottengono precisioni ben superiori a quelle normalmente ammesse.

In effetti i due tracciati, salvo che in pochissimi punti, sono praticamente sovrapposti: e gli spostamenti delle isoipse al massimo raggiungono la metà della equidistanza, sempre però su tratti di lunghezza molto ridotta.

I fotogrammi usati per tali prove hanno una scala media di 1:10 000, sono stati ripresi con camera Galileo Santoni formato 23x23 cm², con distanza principale nominale di 152 mm.

La restituzione è stata effettuata mediante lo Stereocartografo Galileo IV.

Gli errori planialtimetrici conseguenti alle imprecisioni della restituzione e del disegno sono di difficile valutazione. Sulla carta in scala 1:10 000 del White Glacier [14, 751] desunta da fotogrammi alla stessa scala con ricoprimento del 60%, l'errore planimetrico m_p e altimetrico m_a delle curve di livello è espresso dalle seguenti formule empiriche

$$m_a = \pm (0,2 + 1 \operatorname{tg} \alpha) \quad (\text{in m})$$

$$m_p = \pm (1 + 0,2 \operatorname{ctg} \alpha) \quad (\text{in m})$$

dove α è l'angolo che il terreno forma con l'orizzontale. Per il ghiacciaio dell'Aletsch [12, 800], rilevato da fotogrammi in scala non inferiore a 1:13 000, la precisione altimetrica della carta è esprimibile con le seguenti relazioni:

$$m_a = \pm (0,5 + 3 \operatorname{tg} \alpha) \quad (\text{sul ghiacciaio e sul terreno, in m})$$

$$m_a = \pm (1 + 3 \operatorname{tg} \alpha) \quad (\text{su neve, in m}).$$

Ancorché si tratti di due rilievi di tipo analogo eseguiti con la massima cura e per specifico uso glaciologico gli errori altimetrici nei due casi sono piuttosto discosti fra loro: evidentemente tali errori sono stati determinati in base a criteri alquanto diversi. Anche in questo campo ci troviamo comunque di fronte ad una notevole scarsità di dati, per cui non è possibile attualmente stabilire norme di riferimento precise ed attendibili.

L'uso di ortoproiettori di tipo semplificato, di prossima realizzazione, potrebbe offrire utili elementi di confronto particolarmente per operazioni di catasto glaciale come quella effettuata in Italia, per opera del Comitato Glaciologico, in occasione dell'Anno Geofisico Internazionale (22).

In effetti fotogrammi ortoproiettati a scala opportuna (1:25 000) permetterebbero un rapidissimo aggiornamento mediante l'impiego della camera chiara delle aree glaciali sulle carte topografiche esistenti.

Se si desiderano rilievi più precisi occorre lavorare con ortoproiettori sia a proiezione ottica che elettronica che permettono di costruire ortofotocarte, opportunamente integrate con curve di livello. Queste darebbero certo una buona visione complessiva delle aree glaciali e ne descriverebbero con discreta esattezza la morfologia superficiale, ma per ora il costo e la difficoltà di avere a disposizione le necessarie apparecchiature ne rendono l'uso problematico.

Non si può nemmeno per il momento prevedere l'impiego della restituzione automatica a scopi glaciologici in quanto gli strumenti fino ad ora realizzati non sono ancora in grado di fornire le informazioni planialtimetriche necessarie con sufficiente precisione e completezza (vedi 3.5.).

Però su questi particolari metodi mancano per ora dati sperimentali, da cui poter trarre attendibili indicazioni.

3. *La cartografia*

La cartografia glaciale a grande e media scala è stata ormai oggetto di numerose realizzazioni di ogni tipo che permettono di trarre utili conclusioni.

3.1. *Sistema di rappresentazione*

Il sistema generalmente adottato è quello U.T.M. Per l'Italia però, essendo attualmente considerato l'U.T.M. di pertinenza esclusivamente militare, si impiega ancora il sistema Gauss-Boaga.

Per qualche rilievo di area limitata si usano anche sistemi di coordinate ortogonali locali.

Questi ultimi è bene che siano orientati rispetto al Nord geografico: in zone prive di vertici trigonometrici ciò si può ottenere con relativa facilità mediante osservazioni astronomiche.

Qualunque sistema venga usato, l'essenziale è che i vertici usati per l'appoggio del rilievo siano ben segnalizzati e sicuramente reperibili a distanza di tempo, sia sul terreno che sui fotogrammi.

3.2. *Scale ed equidistanza*

Di norma le scale adottate per le carte glaciologiche variano da 1:20 000 a 1:50 000 per ghiacciai extraeuropei o europei di grandi estensioni (5÷10 000 ha e più), a 1:10 000 e 1:5000 per i ghiacciai extraeuropei o europei di piccola e media estensione (fino a 1000÷2000 ha).

E' chiaro che dal punto di vista degli studi glaciologici le carte più utili sono quelle a piccolo denominatore sulle quali quasi tutti i particolari più importanti del corpo glaciale e delle zone circostanti possono essere rappresentati.

L'equidistanza è generalmente uguale a 1/1000 del denominatore di scala: nelle zone pianeggianti conviene intercalare isoipse ausiliarie che danno una più chiara idea dell'andamento della superficie rappresentata.

3.3. *I colori*

L'impiego dei colori sulla produzione delle carte presenta certamente un indubbio vantaggio dal punto di vista dei segni convenzionali e dell'effetto artistico: sulla già più volte citata carta dell'Aletsch sono stati usati ben undici colori [12, 801].

E' chiaro però che questi sono casi limite e che ben scarse sarebbero le possibilità di produrre carte di aree glaciali se fosse richiesto obbligatoriamente tale dovizia di mezzi grafici. Ma fortunatamente anche l'impiego di pochissimi colori è già sufficiente per offrire tutti gli elementi cartografici essenziali. Un monocromo nero corrispondente alle zone di terreno scoperto (roccia, morena) ed un monocromo blu delle zone glaciali e periglaciali (ghiacciaio, nevaio, torrenti, laghi) sono da considerarsi un minimo indispensabile per offrire

una rappresentazione chiara e priva di ambiguità; l'effetto estetico può essere migliorato eventualmente eseguendo il monocromo blu a retino dopo aver aggiunto una adeguata ombreggiatura sul corpo del ghiacciaio.

Disponendo di un terzo monocromo grigio destinato alle morene ed al disegno imitativo delle rocce è possibile differenziare con notevole evidenza il terreno (vedi ad esempio [7]), realizzando nello stesso tempo una discreta imitazione di quelli che sono i colori naturali della zona rilevata.

In certe carte (vedi ad esempio [11]) sono stati adottati i tre monocromi seguenti: nero per i punti quotati, ocra per le linee di livello e la morfologia del terreno, blu per il ghiacciaio.

3.4. Segni convenzionali

Occorre distinguere i segni convenzionali fra quelli che descrivono un particolare morfologico completando le informazioni date dalle curve di livello e conservando, nel rapporto di scala, le dimensioni dell'originale e quelli essenzialmente simbolici che invece rappresentano un dettaglio con dimensioni opportunamente ampliate (ad es. pozzi glaciali, coni d'ablazione e simili): l'uso di questi ultimi deve essere limitato per quanto possibile ma forzatamente aumenta con l'aumentare del denominatore di scala.

aperto (b)		fenditure (b)	
crepaccio terminale chiuso (b)			
piccolo (b)		galleria subglaciale (b)	
crepaccio largo, aperto (b)			
largo, chiuso (b)		gradino di ghiaccio (b)	
torrente glaciale con cascata, direzione, pozzo o mulino (b)		(n, se coperto di detrito)	
canale di drenaggio, bacino epiglaciale (privi d'acqua) (b)		scarpata, liscione di ghiaccio (b)	
stratificazioni longitudinali e trasversali (b)		cono d'ablazione (n)	
faglia (b)		cordone morenico (n)	

Fig. 6a - Tabella dei principali segni convenzionali relativi alla morfologia glaciale e periglaciale per carte a due colori: nero (n) e blu (b)

Purtroppo, e particolarmente nel caso delle carte a molti colori, la fantasia degli autori dimostra una fertilità spesso eccessiva, che non giova certo alla chiarezza ed alla comprensione facile ed immediata del disegno.

Al Simposio di Ottawa del 1965 sulla Cartografia dei ghiacciai è stata proposta la adozione dei segni convenzionali fondamentali [14, 755-756], previsti per l'impiego su carte a due colori (blu e nero) in scale 1:5000 e 1:10000, e qui riportati in fig. 6. Ad essi ho però aggiunto il segno distintivo di caverna

glaciale; in più ho modificato leggermente e completato la serie delle delimitazioni fra aree morfologicamente differenziate.

3.5. I crepacci, le stratificazioni

La rappresentazione il più possibile minuziosa dei crepacci e delle stratificazioni riveste grande importanza nella cartografia glaciale, sia dal punto di vista morfologico sia dal punto di vista dello studio delle deformazioni dei corpi glaciali.

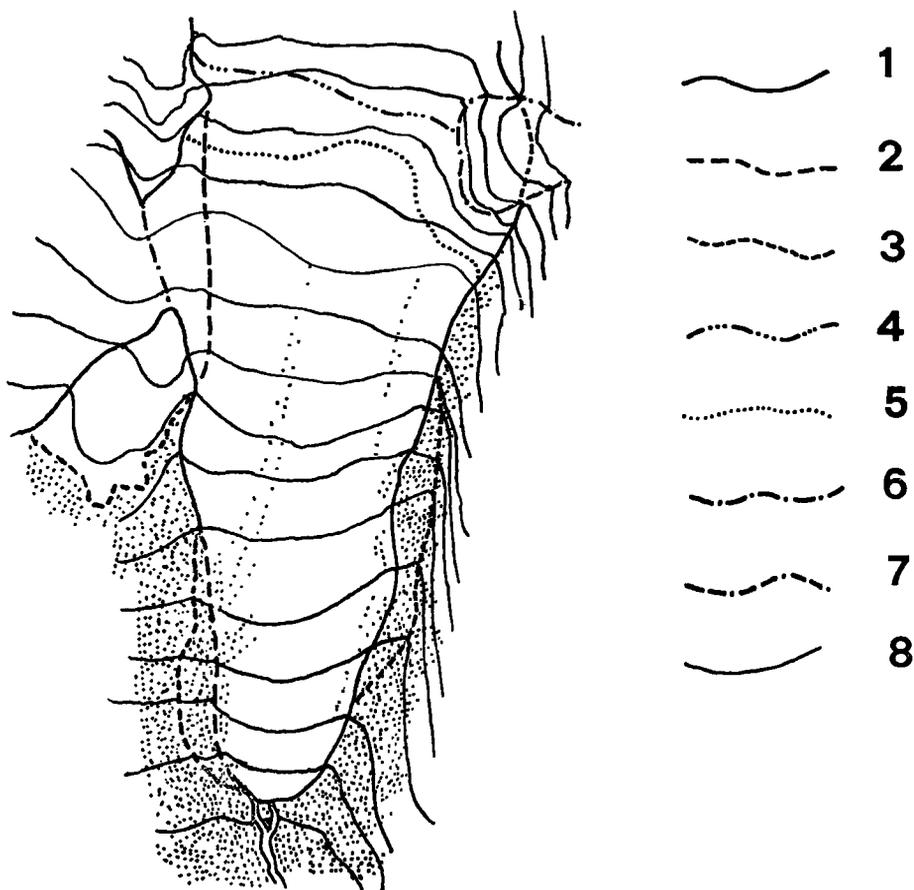


Fig. 6b - Tabella delle delimitazioni e contorni per carte a due colori: nero (n) e blu (b)

- 1 - Limite fra ghiaccio scoperto, nevati, neve e terreno (b),
- 2 - Limite fra ghiacciaio attivo e ghiaccio stagnante (b),
- 3 - Limite fra soccia e morena (n) - Limite dell'area glaciale (b),
- 4 - Linea di nevato media (b),
- 5 - Linea di nevato istantanea, contorno di nevai isolati (b),
- 6 - Linea di separazione fra ghiacciai (n),
- 7 - Limite di valanga (b) o frana (n),
- 8 - Curve di livello su ghiacciaio o nevaio (b) e su roccia o morena (n).

In particolare, da successivi rilievi eseguiti con molta precisione si possono ricavare dati di notevole interesse relativi alla velocità ed alla direzione di spostamento dei crepacci [10], alla loro distribuzione in funzione delle variazioni di pendenza e di potenza, alla velocità di apertura.

A questo riguardo ritengo che potrebbero essere utilizzati ortopiani i quali rispetto alle carte convenzionali presentano due notevoli vantaggi: rapidità e facilità di esecuzione, esclusione di errori interpretativi e di graficismo.

In fase di esecuzione delle prove per la determinazione della precisione intrinseca della restituzione fotogrammetrica (v. 2.4.) ho ritenuto opportuno eseguire delle prove atte a stabilire l'optimum di scala per la restituzione di zone crepacciate nella regione alpina.

Dai fotogrammi a scala 1:10 000 dai quali era già stata ricavata la carta in scala 1:8 000 (fig. 4) è stata ricavata una carta in scala 1:2 000, contenente una dettagliata raffigurazione dei crepacci, nella zona più sconvolta del ghiacciaio. Questo disegno è stato ridotto successivamente a scala 1:8 000 per via fotomeccanica (fig. 5). Il vantaggio di tale procedimento appare evidente se si confrontano le figure 3, 4 e 5; i crepacci risultano molto più dettagliati e numerosi con un evidente guadagno della precisione e della fedeltà cartografica.

In base alle prove illustrate sopra ritengo che per le aree glaciali molto tormentate (e sempreché non si ritenga opportuno e conveniente ricorrere a rilievi in scala maggiore) il procedimento da seguire dovrebbe essere il seguente:

- a) restituzione in scala compresa fra 1:4000 e 1:1000 (per scale della carta finale compresa fra 1:10 000 e 1:5000);
- b) disegno cartografico della minuta così ottenuta;
- c) riduzione alla scala della carta per via fotomeccanica;
- d) mosaicatura dello spezzone sul disegno cartografico definitivo.

In tal modo non si aggraverebbero in modo sensibile i costi di produzione, pur ottenendo un risultato di alta qualità.

3.6. *Le rocce*

La rappresentazione delle rocce presenta problemi grafici piuttosto complessi. I sistemi normalmente adottati sono i seguenti:

- a) curve di livello,
- b) disegno imitativo,
- c) curve di livello e disegno imitativo.

Il sistema a), usato ad esempio dall'I.G.N. francese per le carte 1:20 000, risulta molto preciso ma di difficile esecuzione a causa del raffittimento notevole delle isoipse che, sulle pareti di roccia, sono vicinissime o addirittura a contatto.

Il sistema b), adottato dall'I.G.M. per le tavolette 1:25 000 e dalla Svizzera per le carte 1:25 000 e 1:50 000, è più gradevole all'occhio ma evidentemente la rappresentazione più o meno fedele del terreno è affidata all'abilità grafica ed alla capacità interpretativa del disegnatore.

Il sistema c), adottato peraltro raramente (ad esempio [7]), permette di unire i vantaggi dei due sistemi, ma è adatto solo per carte a grande scala (1:5000): su denominatori maggiori l'adozione di tale sistema rischierebbe di rendere la lettura della carta faticosa e malsicura.

Sarebbe comunque consigliabile che carte a scopo glaciologico, che devono soddisfare generalmente a rigidi criteri di economia, dato il ristretto campo d'utilizzazione, si limitassero ad utilizzare il sistema a), che offre il vantaggio di una rappresentazione rigorosa del terreno e che consente quindi di ricavare tutti i dati topografici necessari per il geomorfologo, il glaciologo ed il geofisico.

4. *Le misure di velocità e di ablazione*

Le misure di velocità possono essere effettuate mediante due rilievi aerofotogrammetrici successivi, rilevando le posizioni di segnali opportunamente disposti.

Il sistema offre una discreta precisione purché la scala dei fotogrammi sia dell'ordine di 1:5000 e sempreché i segnali non siano soggetti a scivolamenti sulla superficie del ghiacciaio. Per misure più grossolane si possono anche assumere, come segnali superficiali, massi della morena viaggiante, ben riconoscibili per forma e dimensione.

L'intervallo minimo fra due rilievi è funzione ovviamente della velocità superficiale del ghiacciaio: per ghiacciai alpini con velocità superficiale dell'ordine di 0,4-0,5 m/giorno, l'intervallo deve essere almeno di 5-6 giorni.

Un metodo più economico e sufficientemente preciso è quello delle pseudo parallassi, proposto dal BAUSSART, e adottato ancora recentemente dai russi per i ghiacciai dell'Elbruz [19]: questo metodo è basato su riprese fotogrammetriche terrestri successive eseguite da una stessa stazione e con camera orientata in una direzione prefissata e con asse ottico all'incirca ortogonale all'asse del ghiacciaio.

Con un comparatore si misurano sulle lastre le pseudoparallassi, ovvero le componenti secondo i due assi principali degli spostamenti subiti dai segnali.

Semplici formule permettono di risalire da queste pseudoparallassi agli spostamenti effettivi.

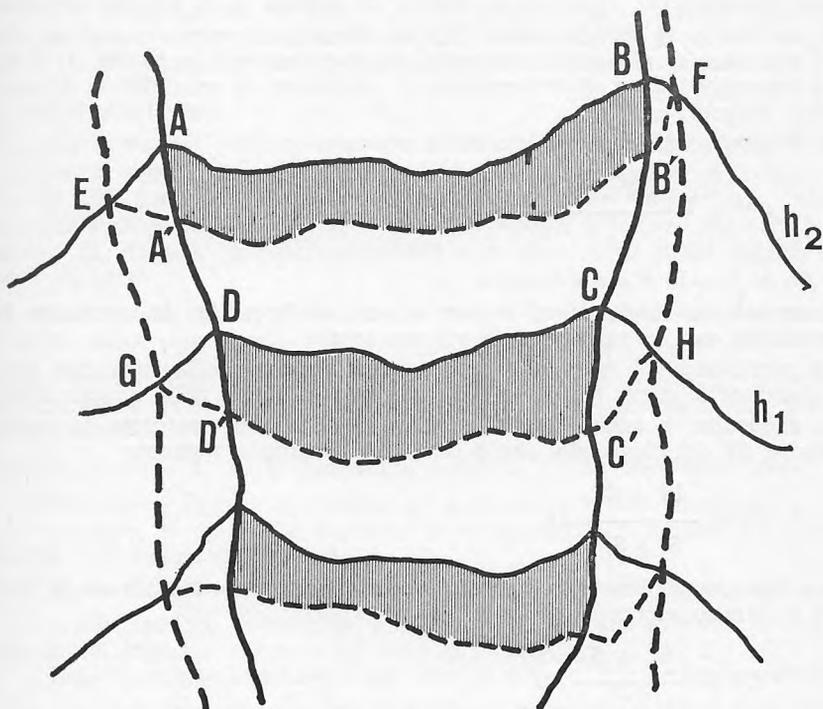


Fig. 7 - Schema relativo ai calcoli approssimati delle variazioni di volume:
 S_1 = area A'B'C'D', S_2 = area ABCD, S_3 = area EABFHCDG
 dS_1 = area DCD'C', dS_2 = area ABA'B', dS_1 = area DCHG, dS_2 = area ABFE

Più laboriosamente ma con precisione un po' maggiore si può operare effettuando un vero e proprio rilievo stereofotogrammetrico terrestre da una base situata lateralmente al ghiacciaio e disposta all'incirca parallela al suo asse (4, 310).

L'inconveniente principale dei metodi basati sulla fotogrammetria terrestre è che la precisione non è uniforme, ma diminuisce con l'aumentare della distanza dei punti rilevati.

Per quanto riguarda le misure di ablazione i rilievi fotogrammetrici non offrono in genere dati sufficientemente attendibili: l'errore che si commette nella determinazione delle quote è dello stesso ordine di grandezza, infatti, delle variazioni di spessore che si vogliono misurare, se l'intervallo fra i due rilievi è di pochi giorni.

Per intervalli maggiori d'altra parte le misure di ablazione si prestano ad interpretazioni dubbie in quanto gli effetti di ablazione (o di accumulo eventuale) interferiscono con gli spostamenti del ghiacciaio e con le relative variazioni di portata.

5. *Le misure delle variazioni superficiali e volumetriche*

Per poter stabilire i bilanci idrologici è di basilare interesse disporre di dati relativi alle variazioni superficiali e volumetriche di un ghiacciaio.

Per la misura delle superfici il metodo comunemente usato consiste nell'utilizzare un planimetro polare, eventualmente a disco.

Per la determinazione delle variazioni volumetriche ci si trova di fronte a notevoli difficoltà: un ghiacciaio ha infatti forma e superfici irregolari e perciò bisogna forzatamente ricorrere a sistemi di misura e di calcolo approssimati.

A suo tempo il FINSTERWALDER [4] ha proposto il seguente metodo. Si considera una zona di ghiacciaio compresa fra due isopse h_1 e h_2 (fig. 7) e in base a due successivi rilievi si determinano le variazioni di area dS'_1 e dS'_2 relative alle due isopse.

Il volume parziale dV è dato dalla relazione

$$dV = \frac{dS'_1 + dS'_2}{3} \Delta h$$

dove $\Delta h = h_2 - h_1$ è l'equidistanza.

Operando nel modo descritto per le zone comprese fra le successive isopse si determina così la variazione di volume totale.

La precisione del metodo dipende essenzialmente dalla cura con cui sono state tracciate le curve di livello e dal sistema utilizzato nella misura delle aree.

In subordine è anche possibile ricavare dalle aree misurate la variazione di potenza dh del ghiacciaio, che è data dalla relazione seguente:

$$dh = \frac{dS_1 + dS_2}{S_1 + S_2} \Delta h$$

La formula del Finsterwalder è stata successivamente modificata da HAUMANN (1960) in questo modo:

$$dV = \frac{S'_1 + S_2}{2} dh$$

DAVEY [21] ha proposto la seguente relazione:

$$dV = S_3 \cdot dh$$

S_1 , S_2 , S_3 , dS_1 , dS_2 , dS'_1 , dS'_2 , dh hanno i significati illustrati in fig. 7.

Un sistema basato su criteri completamente diversi, consiste nel delimitare in base a due successivi rilievi opportunamente sovrapposti le aree di uguale variazione di spessore [20].

Una volta effettuata, con i consueti accorgimenti, la planimetrazione di tali aree (che costituiscono la cosiddetta « isometapach map ») è immediato risalire ai volumi corrispondenti, in quanto basta moltiplicare i risultati delle misure per il dh prescelto e relativo ad ogni singola area.

Da prove comparative effettuate ancora da Davey, le formule di Finsterwalder e Haumann danno risultati poco diversi, ambedue però approssimati per difetto (—10% circa), mentre la formula di Davey dà risultati in eccesso (+4% circa): i risultati più attendibili (e presi dal suddetto autore come riferimento) sarebbero tuttavia quelli ottenuti col metodo della « isometapach map » prima descritto.

Un altro sistema di notevole interesse è stato adottato da CUNIETTI e MAZZIO [9, 14 e 15]: da due rilievi successivi del ghiacciaio opportunamente sovrapposti sono state ricavate delle sezioni trasversali a intervalli costanti di 100 m.

Con il metodo delle sezioni ragguagliate (normalmente usato per il calcolo dei volumi stradali) si è quindi determinata la variazione di volume.

Mancano per ora dati circa il grado di approssimazione ottenibile con il metodo esposto, rispetto a quelli visti prima.

Sto attualmente mettendo a punto un programma in Fortran, in collaborazione con la collega A. De Michelis, atto al calcolo delle variazioni volumetriche, in base al rilievo delle coordinate dei punti delle sezioni, in modo da generalizzare e rendere più facilmente applicabile il metodo ora esaminato.

6. Considerazioni finali

In base a quanto abbiamo esposto si deduce che l'impiego della fotogrammetria per i rilievi glaciali costituisce un utilissimo mezzo di ricerca e di studio ed una fonte ricchissima di informazioni geomorfologiche e morfometriche, purché si ricorra ad una serie di accorgimenti e di cure che sole possono consentire di ottenere risultati attendibili e precisi entro limiti ragionevoli di tempo e di costo.

Si tratta di una catena di lavori che devono essere accuratamente progettati ed eseguiti dalla ripresa alla restituzione, dal rilievo al disegno finale.

Ogni manchevolezza in una di queste fasi rischia di compromettere irrimediabilmente il risultato e di rendere il rilievo di ben scarsa utilità dal punto di vista scientifico.

Sommariamente le varie operazioni possono essere così sintetizzate:

- a) volo per la ripresa di fotogrammi aerei in scala non inferiore a 1 : 10 000; impiego di materiale negativo in bianco-nero (o meglio a colori) con sensibilità non superiore a 100 ASA; trattamenti di sviluppo e stampa atti a ridurre il contrasto del soggetto.
- b) segnalizzazione fotografica e topografica che dia garanzie di durata e di reperibilità anche a notevole distanza di tempo; segnalizzazione eventuale sulle zone di nevato, con procedimenti speciali.
- c) collegamento dei punti di controllo e dei trigonometrici con triangolazioni o trilaterazioni; ove possibile rilievo per coordinate cilindriche con distanzimetri ottico-elettronici e teodoliti.
- d) restituzione eseguita da operatori specializzati, eventualmente a scala più grande di quella della carta finale per le zone seraccate e fittamente crepacciate.
- e) disegno cartografico con un minimo di due monocromi e con impiego dei segni convenzionali proposti in sede internazionale.

f) determinazione di velocità superficiale e delle variazioni di superficie, di volume e di potenza, se esiste un precedente rilievo di pari precisione.

* * *

Desidero esprimere il mio ringraziamento al Prof. Ardito Desio, Presidente del Comitato Glaciologico Italiano, per avermi affidato l'incarico di questo studio, svolto con il patrocinio della Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL; al Prof. Giuseppe Inghilleri, Direttore dell'Istituto di Topografia del Politecnico di Torino per aver consentito l'impiego del personale e degli strumenti del Centro di Fotogrammetria; al Prof. Roberto Malaroda, Direttore dell'Istituto di Geologia dell'Università di Torino, per avere permesso l'indispensabile collaborazione di disegnatori specializzati, e all'Assessorato al Turismo della Regione Autonoma della Valle d'Aosta, che ha concesso l'uso di fotogrammi aerei eseguiti dalla ditta Rossi di Brescia.

NOTA

Fino al 1968 sono stati eseguiti in Italia i seguenti rilievi speciali di ghiacciai, in scale variabili da 1 : 10.000 a 1 : 20.000:

con metodo celerimetrico	39
con metodo fotogrammetrico classico	2
con stereofotogrammetria terrestre	17
con aereofotogrammetria	4

Cinque ghiacciai sono stati rilevati due volte, uno è stato rilevato quattro volte.

- Per quanto riguarda i ghiacciai extraeuropei rilevati da spedizioni italiane abbiamo al nostro attivo:
- 1909 - Rilievo in scala 1:100.000 con apparecchiature Paganini dei ghiacciai Baltoro e Godwin Austin (Spedizione Duca degli Abruzzi).
- 1299 - Rilievo stereofotogrammetrico terrestre dell'alto Baltoro e del K2. Tre carte in scala 1 : 75.000, una carta in scala 1 : 25.000 (Spedizione Duca di Spoleto).
- 1954 - Rilievo stereofotogrammetrico terrestre del K2 in scala 1 : 12.500 (Spedizione del CAI, diretta dal Prof. Desio).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] FORBES - Travels through the Alps. London, 1842.
- [2] AGASSIZ L. - Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels. Edition Masson, Paris 1874.
- [3] PAGANINI P. - Fotogrammetria. Ed. Hoepli, Milano 1901.
- [4] FINSTERWALDER R. - Photogrammetry and Glacier Research with special Reference to Glacier retreat in the Eastern Alps. Journal of Glaciology, n. 15 - 1954.
- [5] PORRO F. - Ricerche preliminari sopra i ghiacci italiani del Monte Bianco (Campagna del 1897). Bollettino Soc. Geogr. It., n. 11 - 1902.
- [6] PORRO F. - Il rilievo fotogrammetrico del Ghiacciaio del Miage. Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano, n. 1 - I^a serie - 1913.
- [7] LESCA C. - Il rilievo stereofotogrammetrico del Ghiacciaio di Valtournanche. B.C.G.I., n. 6 - II^a serie - 1955.
- [8] LESCA C. - PERETTI L. - Rilievi stereofotogrammetrici in Valnontey. B.C.G.I., n. 7 - II^a serie - 1956.
- [9] CUNIETTI M. - MARAZIO A. - Rilievo fotogrammetrico della lingua terminale del Ghiacciaio del Lys eseguito nell'agosto 1953. B.C.G.I. - n. 6 - II^a serie, 1955.
- [10] HOLDSWORTH G. - Primary Transverse Crevasses. Journal of Glaciology, n. 52 - 1969.
- [11] ASTORI B. - TOGLIATTI G. - Il rilievo aerofotogrammetrico del Ghiacciaio di Pian di Neve. B.C.G.I., n. 11 - 1962.
- [12] KASSER P. - ROETHLISBERGER H. - Some Problems of Glacier Mapping experienced with the 1 : 10.000 Map of the Aletsch Glacier. Canadian Journal of Earth Sciences - Giugno 1966.
- [13] EWING K.J. - M.G. MARCUS - Cartographie Representation and Symbolisation in Glacier Mapping. Canadian Journal of Earth Sciences - Giugno 1966.
- [14] BLACHUT T.J. - MÜLLER F. - Some fundamental Considerations on Glacier Mapping. Canadian Journal of Earth Sciences - Giugno 1966.
- [15] PATERSON W.S.B. - Test of contour accuracy on a photogrammetric Map of Athabasca Glacier. Canadian Journal of Earth Sciences - Giugno 1966.
- [16] ØSTREM G. - Surface coloring of Glaciers for Air Photography. Canadian Journal of Earth Sciences - Giugno 1966.

- [137] KONECNY G. - Applications of photogrammetry to Surveys of glaciers in Canada and Alaska. Canadian Journal of Earth Sciences - Giugno 1966.
- [138] LLIBOUTRY L. - Traité de Glaciologie. Voll. I e II - Ed. Masson, Paris 1964-65.
- [139] KNIZHNIKOY F. - A general formula for determination of the surface rate of movement of ice by the pseudoparallax method - Geodesy and Aerophotography - n. 1 - 1962.
- [140] LIESTØL O. - Special Investigation on Hellstugubreen and Tverrabreen - Norsk Polar Institutt - Pubblicazione n. 114.
- [141] DAVEY A. - Changes in Blue Glacier - Inst. Polar Studies - Ohio State University - Pubblicazione n. 1 - 1962.
- [142] Catasto dei Ghiacciai Italiani, Vol. I, II, III - Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1961.