

CLAUDIO SMIRAGLIA

MORFOLOGIA E GENESI DELLE MORENE MEDIANE DEL GHIACCIAIO DEI FORNI (ALTA VALTELLINA)

Introduzione (*). — Le morene mediane costituiscono una fra le forme più evidenti ed interessanti della morfologia superficiale dei ghiacciai, in particolare di quelli vallivi composti. Le morene di questo tipo sono state oggetto in tempi recenti di numerosi studi, che hanno riguardato soprattutto alcuni ghiacciai del versante settentrionale delle Alpi, della Norvegia, del Canada (1); per quanto riguarda invece il versante italiano delle Alpi, secondo quanto mi risulta, nessun lavoro sistematico è mai stato dedicato a tali argomenti. La presente nota è dunque volta ad analizzare la morfologia, la genesi e l'evoluzione delle morene mediane di un grande apparato glaciale delle Alpi italiane, il Ghiacciaio dei Forni. Quest'ultimo, che è situato in Valfurva (Alta Valtellina) (fig. 1), è un ghiacciaio vallivo composto, formato da tre colate; i suoi bacini alimentatori sono delimitati da una elevata cresta, da cui si innalzano numerose cime superiori ai 3600 m (da est verso ovest, Palon de la Mare, 3703 m; Monte Vioz, 3645 m; Punta Taviela, 3612 m; Punta S. Matteo, 3678 m) (fig. 2). La sua superficie (13 km²) ne fa il più vasto ghiacciaio del versante meridionale delle Alpi; è certamente anche uno dei più studiati (2). Dalla

(*) Il presente studio, che fa parte di un programma di ricerca sul Ghiacciaio dei Forni coordinato dal Comitato Glaciologico Italiano e dalla Sezione Glaciologia del Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia, è stato effettuato con contributi M.P.I. 40%. Il dott. Guido Catasta ha collaborato ai lavori sul terreno. L'Autore ringrazia il prof. Giuseppe Orombelli per i consigli avuti e per la lettura critica del testo e la Direzione del Parco Nazionale dello Stelvio per l'assistenza fornita.

I lavori sul terreno sono stati condotti nelle estati 1984 e 1985; attraverso rilievi topografici speditivi si sono determinate sezioni longitudinali e trasversali delle due morene; si è anche provveduto alla valutazione dell'entità dell'ablazione differenziale, tenendo conto delle metodologie già utilizzate da alcuni Autori (in particolare da SMALL e CLARK, 1974).

(1) Si vedano al riguardo i lavori di LOOMIS, 1970; di SMALL e CLARK, 1974; di EYLES e ROGERSON, 1978 e di SMALL, CLARK e CAWSE, 1979 citati nella bibliografia.

(2) Fra i numerosi lavori ricordo quelli di CASSINIS e CARABELLI, 1963; di ABBADESSA, 1955; di DESIO, 1967 e di SMIRAGLIA, 1985.

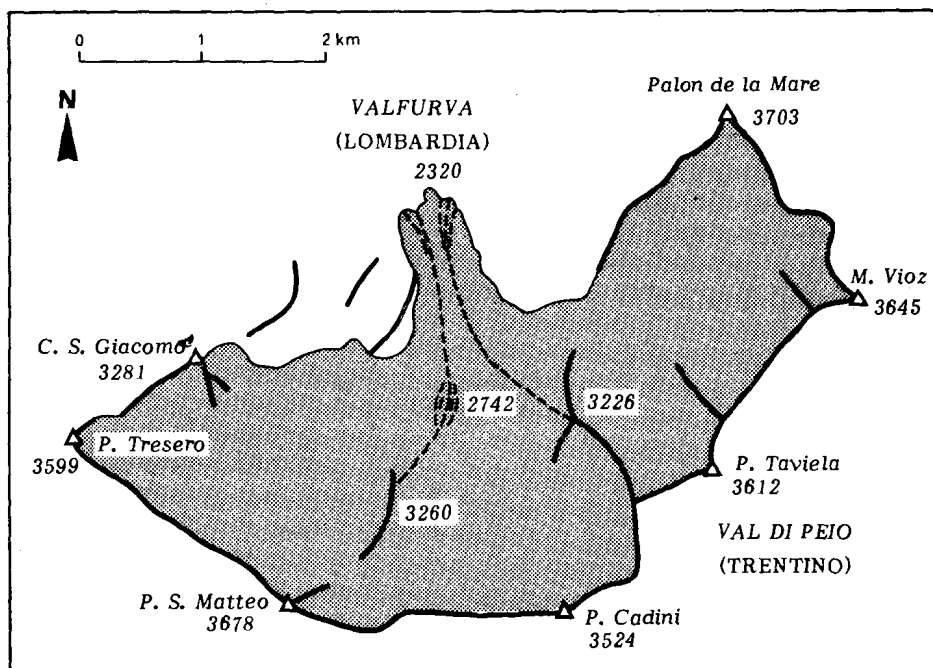


FIG. 1 — IL GHIACCIAIO DEI FORNI
(con il tratto forte sono indicate le creste, con i trattini le morene mediane).

confluenza delle tre colate si origina una lingua, che si estende per quasi due chilometri, sulla quale spiccano due morene mediane costituite da frammenti angolosi del litotipo dominante nella regione (filladi quarzifere cloritiche e sericitiche appartenenti alla formazione delle *Filladi di Bormio*).

La morfologia. — La morena mediana orientale, che separa la colata proveniente dal bacino orientale da quella del bacino centrale, spicca notevolmente per le sue dimensioni, la sua continuità e la sua struttura regolare. Essa appare direttamente collegata all'emergenza rocciosa la cui sommità è quotata 3226 m nella tavoletta I.G.M. *Peio* e la base 2712 m. Nel luglio 1984 la morena affiorava un centinaio di metri a valle dell'emergenza rocciosa, dalla quale era separata da neve vecchia e da conoidi di valanga; nel settembre 1985 la distanza fra la roccia in posto e la morena era ridotta a poche decine di metri. In questo tratto era visibile del detrito grossolano sparso sulla superficie del ghiacciaio, più abbondante e di maggiori dimensioni alla base



FIG. 2 — IL GHIACCIAIO DEI FORNI (VALFURVA, ALTA VALTELLINA), VISTO DAL PASSO ZEBRU" (3001 m).

Sulla lingua spiccano a sinistra la morena mediana orientale e a destra la morena mediana occidentale (fot. C. Smiraglia).

della parete occidentale dell'emergenza, al contatto con la colata centrale, più fine alla base del versante nord in corrispondenza della colata orientale. Il detrito sopraglaciaie assumeva una struttura organizzata e un'evidente morfologia a cresta una cinquantina di metri a valle della parete rocciosa (fig. 3). Il tratto iniziale della morena presenta un aspetto «a coda di rondine», con un ramo più sottile formato da clasti di minori dimensioni, e con materiale fine, verso

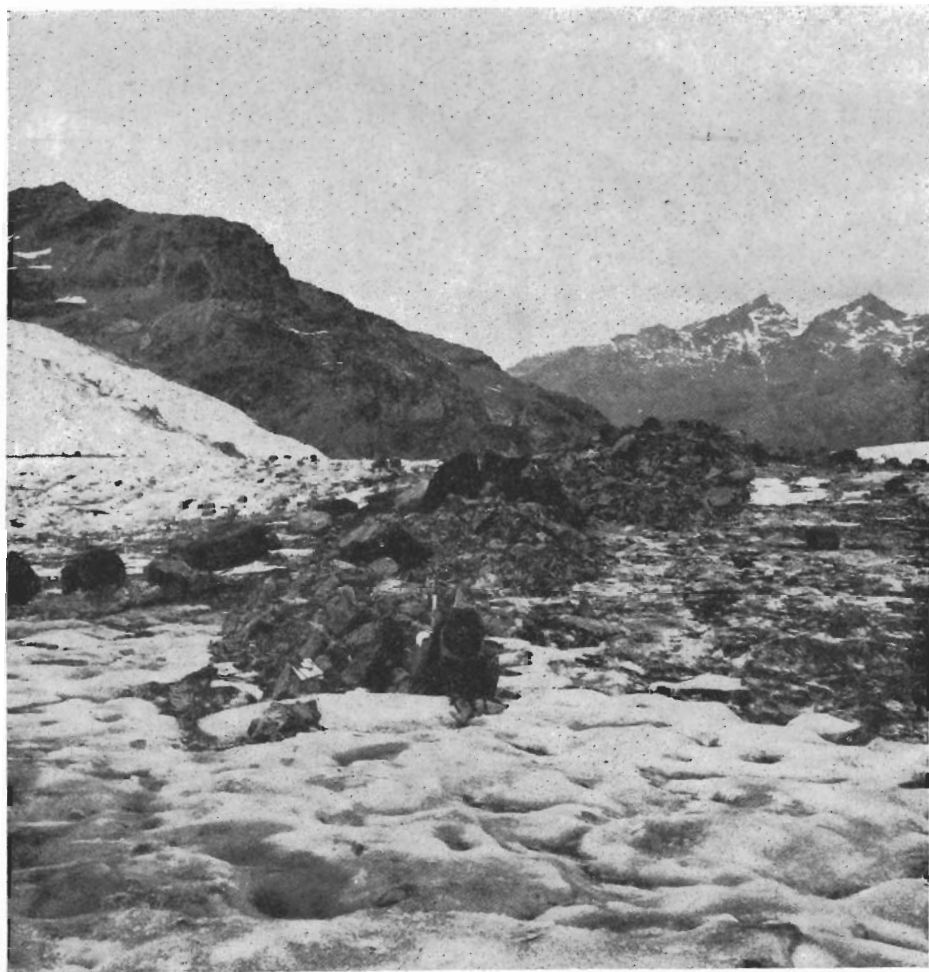


FIG. 3 — IL TRATTO INIZIALE DELLA MORENA MEDIANA ORIENTALE VISTO DALLA BASE DELL'EMERGENZA ROCCIOSA 3226 (fot. C. Smiraglia).

nord, un secondo ramo più largo e di maggiore spessore verso sud. In quest'ultimo i clasti si presentano con l'asse maggiore verticale e appoggiati gli uni sugli altri.

A partire dalla congiunzione dei due rami, la morena tende ad emergere sempre più dalla superficie del ghiacciaio; essa è formata da una successione di dossi, di collinette e di coni, spesso con l'asse maggiore trasversale alla colata, che nel complesso assumono la morfologia di una cresta, costituita all'apparenza essenzialmente da detriti

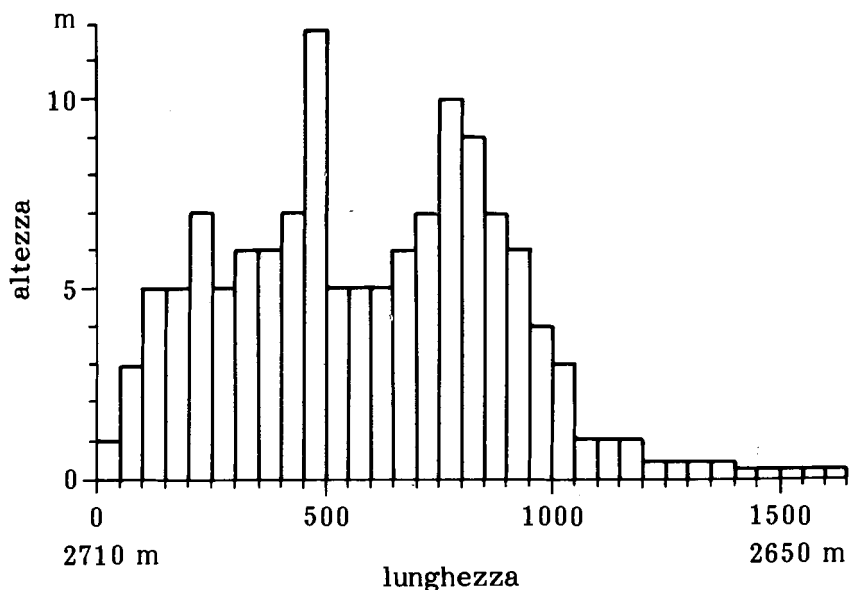


FIG. 4 — VARIAZIONI DELLE ALTEZZE DELLA MORENA MEDIANA ORIENTALE.

grossolani. L'osservazione mostra invece che i detriti rappresentano esclusivamente uno strato superficiale, il cui spessore varia mediamente fra 5 e 20 cm, al di sotto del quale affiora ghiaccio vivo. Questa struttura è particolarmente evidente lungo i crepacci, che numerosi intersecano trasversalmente il cordone morenico, le cui pareti appaiono di ghiaccio vivo, senza alcun clasto in esso inglobato. La cresta, partendo da 2710 m, si allunga verso nord-ovest e, pur con andamento oscillante, tende a divenire sempre più alta e più larga. L'altezza massima (10-12 m) è raggiunta dopo circa 450 m di lunghezza a 2670 m di quota; in questo punto la larghezza della morena si aggira sui 60 m. Da qui verso nord-nord-ovest si ha un graduale appiattimento della cresta, che si allarga sempre più e si deprime. A 2625 m cessa ogni evidenza morfologica; i materiali di copertura, con uno spessore medio di 2 cm, si distribuiscono « a ventaglio » fino alla fronte del ghiacciaio, raggiungendo una larghezza di circa 200 m. E' questa una zona di estrema frammentazione della superficie del ghiacciaio, dove l'intersecarsi dei crepacci trasversali e obliqui forma una seraccata localmente detta *Le Guglie*.

La distribuzione delle altezze delle morena più sopra evidenziata è confermata anche dalla fig. 4, dove sono mostrate le variazioni di altezza a distanze costanti di 50 m. Nella figura viene considerata

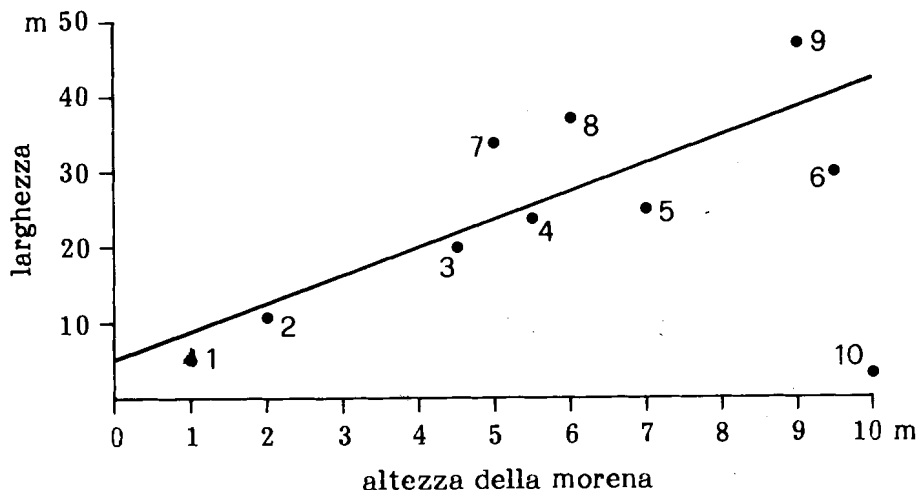


FIG. 5 — RELAZIONI FRA ALTEZZA E LARGHEZZA DELLA MORENA MEDIANA ORIENTALE.

l'altezza massima rispetto al livello del ghiaccio circostante, comprendendo copertura detritica e nucleo di ghiaccio. E' possibile constatare come le variazioni di altezza abbiano una distribuzione bimodale; si ha un aumento in breve spazio fino a 5 m di altezza, senza scendere al di sotto di questo valore per quasi un chilometro dall'inizio della morena. Successivamente si verifica una rapida diminuzione; dopo un chilometro la morena tende ad assumere valori di altezza sempre inferiori, fino a divenire appena avvertibile.

Le relazioni fra larghezza e altezza sono messe in evidenza dal grafico della fig. 5, dove i numeri indicano le corrispondenti sezioni trasversali che appaiono nella fig. 6. Si osservi come da monte verso valle la distribuzione dei punti presenti una tendenza abbastanza lineare, evidenziando così un incremento quasi regolare della larghezza al crescere dell'altezza nella prima parte del cordone morenico. Ciò è confermato anche dalla retta di regressione (la cui equazione è $y = 5,41 + 3,76 x$), tracciata tenendo conto solo di nove punti; il coefficiente di correlazione (sempre calcolato per altezze e larghezze delle prime nove sezioni) è 0,8246. Come appare chiaramente dal grafico, la decima sezione, tracciata a 2625 m, indica con il suo deciso scostamento dalla retta interpolante, una netta variazione nella morfologia del cordone morenico. Anche il coefficiente di correlazione calcolato per tutte le dieci sezioni diviene notevolmente inferiore ($r = +0,4898$).

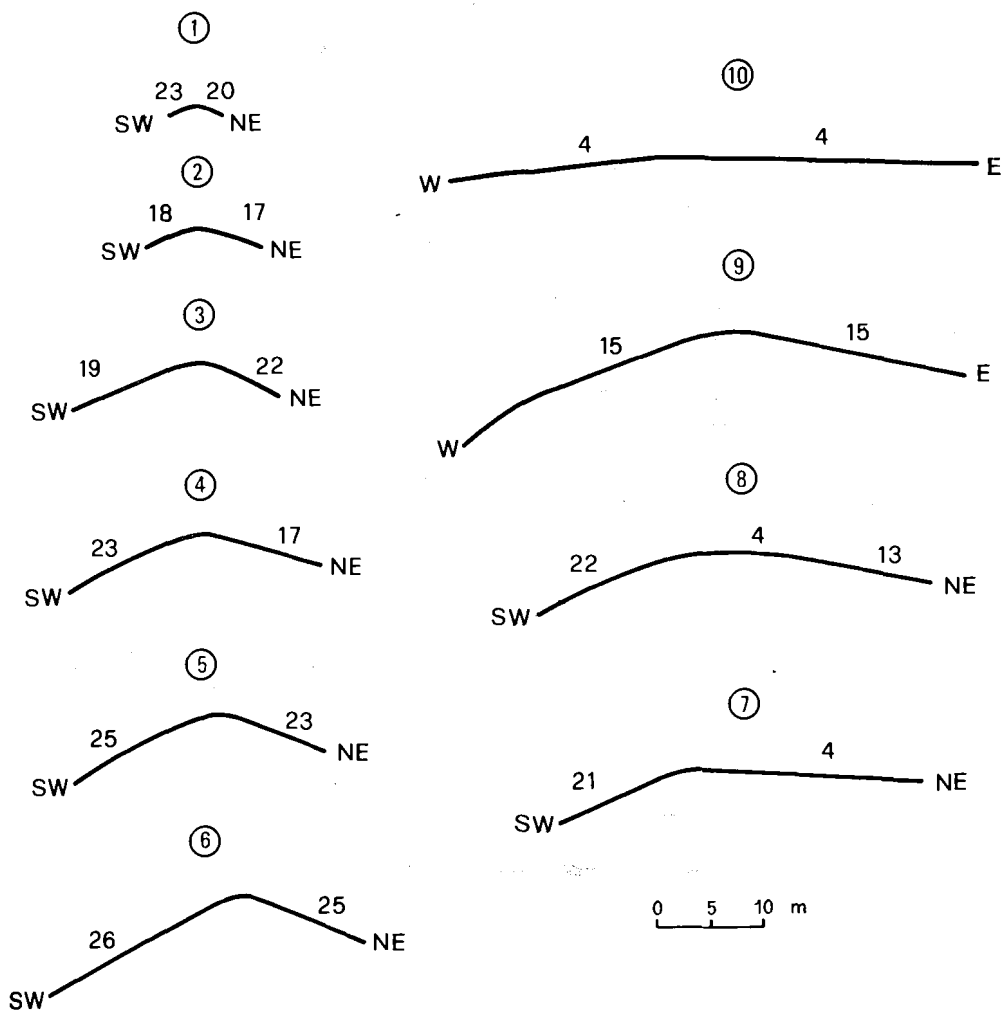


FIG. 6 — SEZIONI TRASVERSALI DELLA MORENA MEDIANA ORIENTALE
(i numeri indicano le inclinazioni in gradi).

La regolarità morfologica della morena orientale nel suo settore medio-superiore è dimostrata anche dal rapporto fra altezza e larghezza; tale rapporto per sei sezioni su nove è costantemente di 0,2, con oscillazioni massime per le altre sezioni di 0,1 e 0,3. Nella sezione 10, che appartiene al tratto inferiore, il rapporto scende invece a 0,05.

Anche l'inclinazione dei versanti della cresta morenica (così come l'altezza e la larghezza) assume valori molto differenziati in rela-

TAB. 1

MORFOLOGIA DELLA MORENA MEDIANA ORIENTALE
DEL GHIACCIAIO DEI FORNI

sezione	distanza dall'inizio m	altezza massima m	larghezza massima m	inclinazione ed esposizione
1	2	1	5	23° SW
2	20	2	11	18° SW
3	230	4,5	20	22° NE
4	265	5,5	24	23° SW
5	285	7	25	25° SW
6	450	9,5	30	26° SW
7	555	5	34	21° SW
8	670	6	37	22° SW
9	760	9,5	47	15° W
10	980	2,5	50	4° W

zione alla distanza dalla zona di origine. Come appare dalle sezioni trasversali della fig. 6, l'inclinazione, che già supera i 20° nel tratto iniziale, pur con qualche oscillazione, tende a crescere e raggiunge i valori massimi (25°-26°) fra 2700 e 2665 m di quota, dopo circa 500 m di sviluppo della cresta morenica. Più a valle le inclinazioni diminuiscono, pur restando superiori a 20°. Al di sotto di 2650 m, dove si raggiunge la massima larghezza, si ha un'ulteriore diminuzione a 15°, finché l'inclinazione diventa appena avvertibile (4°) e il cordone si trasforma in un ampio ventaglio di materiali sparsi senza più evidenza morfologica.

Dalle sezioni della fig. 6 emerge anche l'asimmetria della morena mediana orientale. Il versante interno, esposto in prevalenza verso sud-ovest, appare quasi costantemente più inclinato (si vedano in particolare le sezioni 4-7-8) e con la base posta a quote inferiori rispetto al versante opposto, con un dislivello massimo di 4 m verso 2675 m.

I caratteri morfologici della morena orientale sono sintetizzati nella tab. 1.

La morena mediana occidentale, che separa la colata proveniente del bacino centrale da quella del bacino occidentale, presenta dimensioni decisamente minori, almeno per quanto riguarda larghezza e altezza, e una morfologia meno regolare. Essa è infatti costituita da due settori che potrebbero essere considerati separatamente. Quello

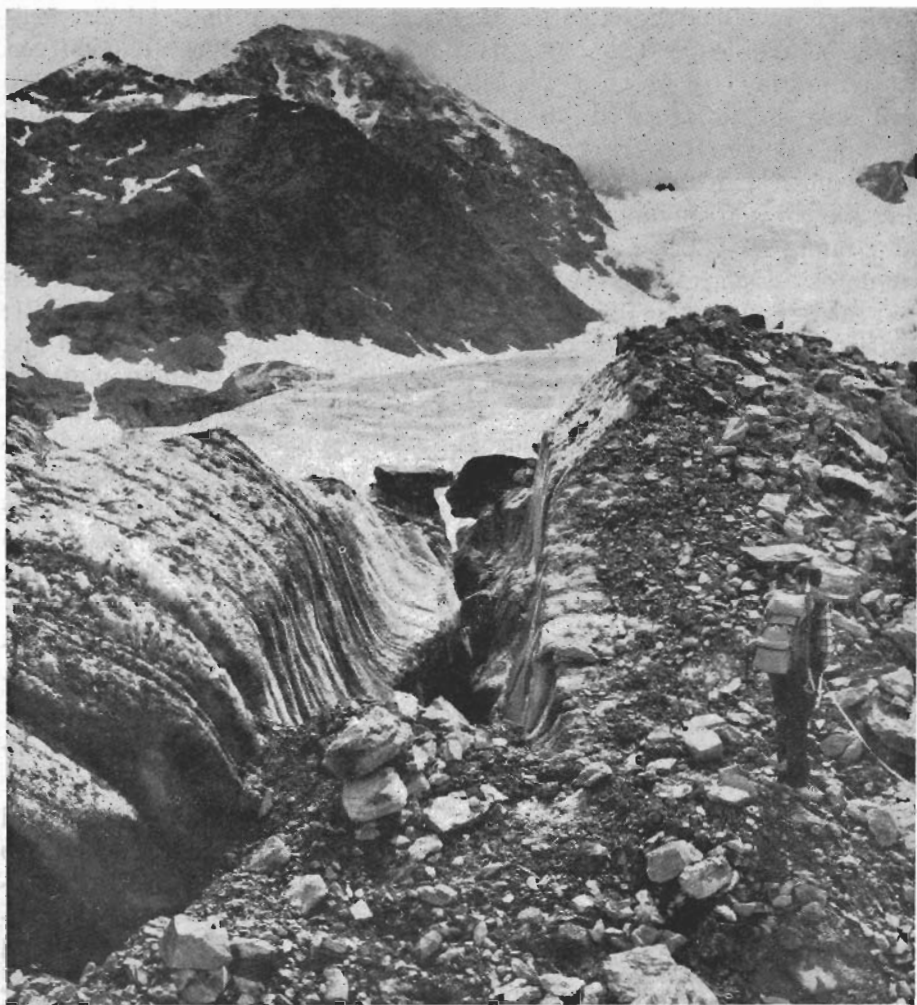


FIG. 7 — MORENA MEDIANA OCCIDENTALE.

In corrispondenza del crepaccio trasversale si osserva la parete di ghiaccio ricoperta da un limitato spessore di detrito (fot. C. Smiraglia).

superiore ha origine dall'emergenza rocciosa quotata 3260-2897 (I.G.M.) e si allunga stretto e poco rilevato fino a bordare sulla destra idrografica l'isolotto roccioso quasi completamente ricoperto da detrito, denominato sulla carta I.G.M. *Isola Persa* e quotato 2742 m. Nel tratto terminale del cordone i frammenti rocciosi, che anche in questo caso costituiscono una semplice copertura del ghiaccio vivo sottostante in

evidenza morfologica rispetto al livello del ghiacciaio, si distribuiscono su una superficie più vasta, si uniscono e si confondono con il materiale che ricopre l'isolotto. Al disotto del salto roccioso dell'Isola Persa, a 2700 m, la morena si ricostituisce. Nel tratto iniziale, al contatto fra la colata centrale e quella occidentale, presenta una struttura « a coda di rondine » visibile per poco più di 100 m, poi con un'unica cresta si allunga verso nord per 750 m fino alla quota di 2600 m. In questo tratto il cordone è intersecato da numerosi crepacci trasversali, taluni di vaste dimensioni, ben visibili anche sulla superficie del ghiacciaio ai lati della morena (fig. 7); il profilo longitudinale assume un aspetto « a denti di sega », con una successione continua di sommità e avvallamenti dai fianchi piuttosto ripidi, dove appare con estrema evidenza la struttura della morena, costituita da un nucleo di ghiaccio, quasi completamente privo di detriti inclusi, e da una sottile copertura detritica di clasti spigolosi. A valle di quota 2600, la morena perde evidenza morfologica, i materiali di copertura si distribuiscono su un'area maggiore, assumendo verso nord-ovest una forma a ventaglio simile a quella della morena orientale.

La lunghezza può stimarsi in 750 m per il settore superiore dall'emergenza rocciosa all'Isola Persa, e di 1300 m per il settore inferiore dall'Isola Persa alla fronte.

La morfologia complessa e piuttosto irregolare della morena occidentale emerge anche dalle sezioni trasversali della fig. 8.

Per quanto riguarda l'altezza, si osserva che i valori massimi sono riscontrabili nel tratto iniziale del settore inferiore, appena sotto l'Isola Persa; più a valle i valori variano notevolmente. L'altezza infatti da 8-9 m scende a 3, poi a 1, per risalire a 4 e a 8 m. Nel dettaglio anche la larghezza mostra variazioni avvertibili: passa infatti da 20 m a 10, poi a 15, 11, 17, ancora a 11. Nell'insieme, tuttavia, come appare anche dall'osservazione delle foto aeree, la larghezza della morena diminuisce rapidamente poche decine di metri a valle dell'Isola Persa, ma poi tende lentamente ad aumentare, raggiungendo la massima estensione nel tratto inferiore.

La maggiore complessità e irregolarità della morena occidentale è confermata anche dal rapporto fra i parametri altezza-larghezza, che presenta notevoli scarti (varia infatti fra 0,1 e 0,7), con un decremento da 0,4 a 0,1 e un successivo incremento da 0,1 a 0,7.

Le sezioni trasversali mostrano anche una decisa asimmetria nei due versanti della cresta morenica occidentale, sia per quanto riguarda l'inclinazione, sia per quanto riguarda la quota della base del ver-

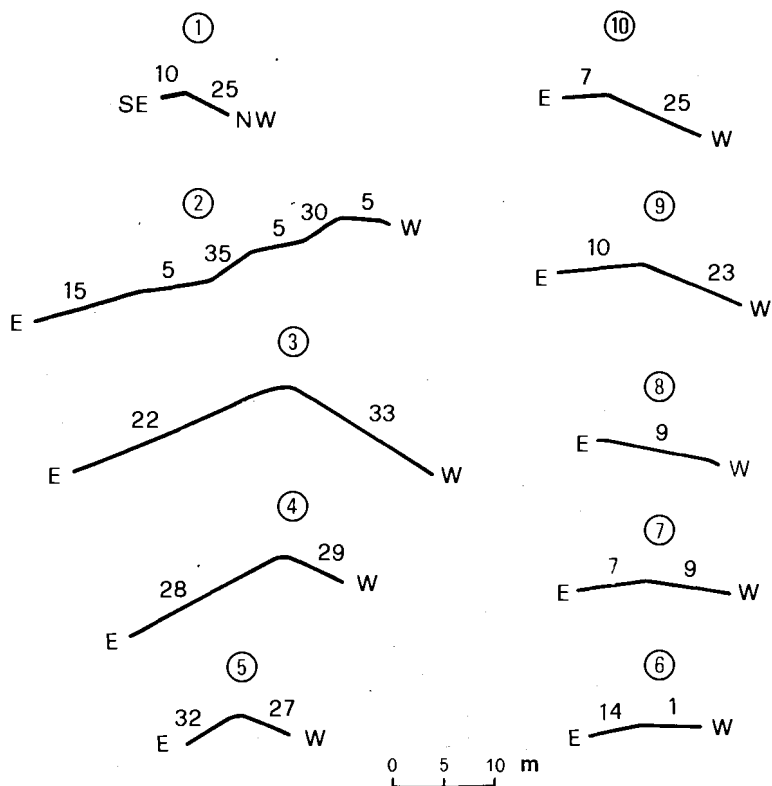


FIG. 2 — SEZIONI TRASVERSALI DELLA MORENA MEDIANA OCCIDENTALE
(i numeri indicano le inclinazioni in gradi).

sante. Nella maggior parte dei casi il versante esterno (volto verso ovest) è più inclinato (sezioni 3-4-7-8-9-10), mentre la base del versante è posta a quote inferiori rispetto alla base del versante interno. Ciò è particolarmente visibile nel settore più basso della morena (sezioni 7-8-9-10).

L'esame della morfologia dei due cordoni morenici e il loro confronto hanno permesso di evidenziare la maggiore complessità della morena occidentale, dove l'evoluzione dei rapporti fra i vari parametri appare talora piuttosto irregolare rispetto a quella orientale.

Per analizzare i fattori che determinano lo sviluppo delle morene mediane è tuttavia più opportuno sottolineare gli aspetti che accomunano le due morene del Ghiacciaio dei Forni. In particolare:

TAB. 2

MORFOLOGIA DELLA MORENA MEDIANA OCCIDENTALE
DEL GHIACCIAIO DEI FORNI

sezione	distanza dall'inizio m (*)	altezza massima m	larghezza massima m	inclinazione ed esposizione
1	375	2	7	25° NW
2	75	10	35	35° E
3	270	9	35	33° W
4	345	8	20	29° W
5	400	3	10	32° E
6	475	1	11	14° E
7	575	1,5	15	9° W
8	700	2	11	9° W
9	750	4	17	23° W
10	825	8	12	25° W

(*) Per la sezione 1 la distanza è calcolata dall'emergenza rocciosa 3260, per le altre sezioni dall'Isola Persa.

- 1) la struttura « a coda di rondine » che caratterizza il tratto iniziale dei due cordoni (per quello occidentale questa struttura è visibile solo al di sotto dell'Isola Persa);
- 2) la presenza di numerosi crepacci che intersecano le creste moreniche e che da trasversali nel settore medio-superiore tendono a disporsi obliquamente rispetto all'asse della cresta, formando verso valle angoli acuti;
- 3) la struttura « a ventaglio » nella parte terminale delle morene che si appiattiscono e perdono ogni evidenza morfologica;
- 4) l'asimmetria dei due versanti: quelli esposti a ovest (interno per la morena orientale, esterno per quella occidentale) appaiono mediamente più ripidi e la loro base risulta situata a quote inferiori rispetto al versante opposto. Quest'ultimo fenomeno fa assumere alla sezione trasversale del ghiacciaio una forma a gradoni digradanti da est verso ovest;
- 5) l'inclinazione dei due versanti, che si aggira mediamente fra 20° e 22° per entrambe le morene, con valori massimi di 33-35° per quella occidentale. Sui fianchi sono state misurate in aree limitatissime inclinazioni maggiori di 35° con massimi di 44°; in tal caso si è constatato l'affioramento di ghiaccio nudo;
- 6) la struttura delle creste moreniche, che sono ovunque formate essenzialmente da ghiaccio coperto da uno strato di detriti, la cui tessitura varia dai detriti minuti a clasti pluridecimetrici costan-

temente angolosi, ai blocchi di molti metri cubi di volume. Il materiale fine è molto scarso e concentrato in tasche superficiali di limitate dimensioni. Si può osservare che su entrambe le morene lo spessore di copertura varia da qualche centimetro a pochi decimetri e che tende ad aumentare nel settore medio dei cordoni per poi ridursi a un velo sottile nella parte terminale.

Fattori della genesi delle morene mediane dei Forni. — I fattori che determinano l'origine e l'evoluzione delle morene mediane, nonché la complessità delle relazioni fra i medesimi, sono stati analizzati da precedenti Autori. In particolare va ricordato il diagramma proposto da Small e Clark (1976), che sottolinea:

- 1) le relazioni fra alimentazione del materiale detritico, spessore della copertura morenica, ablazione differenziale (*Da*) e incremento dell'altezza della morena;
- 2) i rapporti fra altezza della morena, scivolamento laterale dei frammenti rocciosi e larghezza della morena;
- 3) la relazione fra l'assottigliamento dello spessore di copertura fino a un livello critico (circa 1 cm) e la perdita di evidenza morfologica della morena.

Particolarmente importante appare il concetto di « ablazione differenziale » (*Da*), espressa come rapporto fra l'entità dell'ablazione che si verifica sul ghiaccio vivo e quella che interessa il ghiaccio protetto dal detrito. Il passaggio da valori di $Da > 1$ a valori < 1 provoca la diminuzione di altezza della morena. Nel presente lavoro, per delineare la morfogenesi delle morene mediane del Ghiacciaio dei Forni, e in particolare di quella orientale, si farà riferimento allo schema sopra indicato, approfondendo quei temi che sono apparsi problematici e peculiari delle morene dei Forni. Si cercherà quindi di:

- individuare l'origine del detrito che forma la copertura;
- evidenziare gli effetti della compressione e dell'espansione laterale delle colate glaciali;
- chiarire il ruolo e l'entità dell'ablazione differenziale.

a) *L'alimentazione delle morene.* Che ci sia uno stretto legame fra cordoni morenici e affioramenti rocciosi è fuor di dubbio. L'esame delle foto aeree e delle carte topografiche indica chiaramente che la morena orientale è fisicamente collegata all'emergenza rocciosa quotata 3226, così come la morena occidentale è legata all'Isola Persa e allo sperone 3260; è un collegamento topografico che non può non implicare legami di tipo genetico. Nel dettaglio esiste però qualche

problema per l'esatta individuazione e definizione di questi legami. L'area di contatto fra cordone morenico e parete rocciosa, ad esempio, è quasi costantemente ricoperta da grandi coni di valanga, che ostacolano le osservazioni sul terreno, le quali nel tratto di ghiacciaio che fiancheggia il settore più elevato dell'affioramento roccioso sono limitate anche dalla presenza di numerosi crepacci trasversali. Nel settembre 1985, come indicato precedentemente, è stato però possibile osservare una struttura bifida nel settore iniziale della morena, con il ramo a contatto con la colata centrale più accentuato. Poco più a monte questo ramo, costituito da frammenti rocciosi nettamente verticalizzati, diventava sempre più stretto e meno rilevato, fino a trasformarsi in strisce e placche di materiale roccioso di limitato spessore e anche in detrito sparso, sempre localizzato ai piedi e ai bordi della parete rocciosa. Il materiale superficiale che alimenta la morena mediana deriva dunque dal disfacimento parietale per crioclastismo del dosso roccioso 3226, fenomeno particolarmente intenso sulle filladi quarzifere estremamente gelive, che costituiscono il litotipo predominante dell'area interessata (*Filladi di Bormio*). I frammenti rocciosi gelifratti, per gravità e per azione delle valanghe, si depositano sulla superficie del ghiacciaio ai piedi della parete. Ciò è direttamente verificabile per l'emergenza rocciosa 3226-2712, la cui base è posta al di sotto del limite delle nevi, che nel settembre 1985 per il Ghiacciaio dei Forni poteva stimarsi attorno a 2950-3000 m.

La presenza di crepacci trasversali potrebbe far pensare a una cospicua alimentazione attraverso l'ingestione dei detriti nei crepacci stessi e la loro riermersione più a valle. Questa componente non è certamente da escludere, ma riteniamo che abbia un'importanza secondaria e limitata prevalentemente ai materiali fini. Le pareti dei crepacci sia nella parte superiore del ghiacciaio sia sulla lingua appaiono quasi completamente prive di detriti. Lo stesso si può affermare a proposito della seraccata della colata orientale; sulle pareti dei seracchi non sono infatti visibili frammenti rocciosi. Si possono invece osservare materiali fini che formano uno strato sottile sulla base e sui fianchi dei seracchi a contatto con la parete rocciosa. Materiali fini sono presenti anche nei crepacci della colata centrale. Sulle loro pareti è infatti possibile distinguere una fascia di ghiaccio più scuro, carico di limo e di sabbia, sempre nella zona più vicina alla parete, nettamente separata da una fascia più chiara dove il ghiaccio è privo di inclusi. Tenendo conto delle osservazioni riportate più sopra, è quindi possibile affermare che l'alimentazione della morena orientale dei Forni è costituita prevalentemente da materiali superficiali, derivanti dalla gelifrazione dello sperone roccioso che separa la colata orientale da quella centrale.

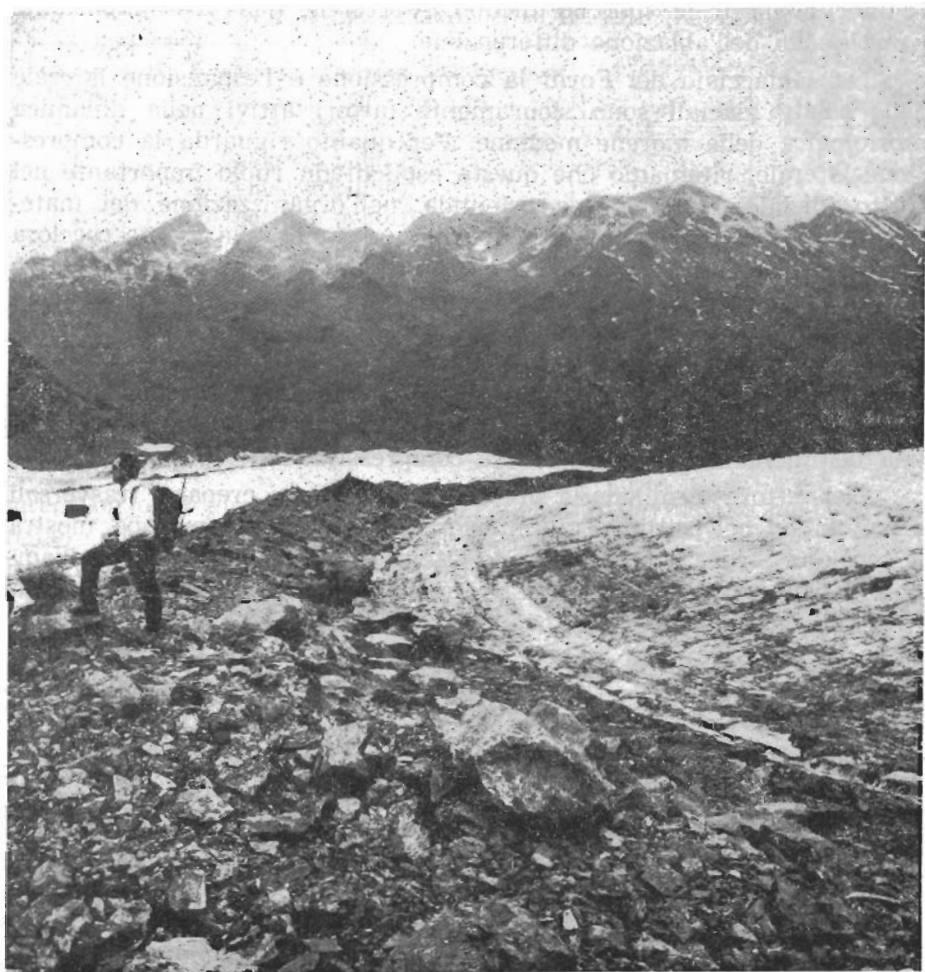


FIG. 9 — UN TRATTO DELLA MORENA MEDIANA ORIENTALE.

A sinistra la colata centrale del Ghiacciaio dei Forni, a destra la colata orientale (fot. C. Smiraglia).

b) *La compressione e l'espansione laterale.* Gli effetti delle azioni di compressione ed espansione laterale delle colate glaciali sulla morfologia delle morene mediane sono stati discussi da diversi Autori (3), che ne hanno variamente sottolineato o ridotto il ruolo rispetto a quello dell'ablazione differenziale. Small e Clark (1976) ritengono che la compressione laterale possa giocare qualche ruolo nel determinare

(3) EYLES, 1976; SMALL e CLARK, 1976 (v. bibliografia).

la morfologia delle morene mediane, tuttavia non così importante come quello dell'ablazione differenziale.

Nel Ghiacciaio dei Forni la compressione e l'espansione laterale delle colate glaciali sono sicuramente fattori attivi nella dinamica morfologica delle morene mediane. Per quanto riguarda la compressione laterale, riteniamo che questa espliciti un ruolo importante nel tratto iniziale della morena orientale, nell'organizzazione dei materiali sparsi sulla superficie del ghiacciaio ai piedi della parete rocciosa di quota 3226. La compressione esercitata dalla colata centrale verso nord e dalla colata orientale verso ovest dà luogo a una componente nord-ovest, lungo la quale si allineano i frammenti rocciosi, che assumono nel complesso una morfologia a setto longitudinale orientato esattamente verso nord-ovest (fig. 9). La verticalizzazione dei clasti osservata nel tratto iniziale della morena orientale potrebbe essere una testimonianza di queste forze compressive.

Nel settore terminale la presenza di numerosi crepacci trasversali e poi obliqui nel tratto medio-inferiore di entrambe le morene, mostra le tensioni dovute a un'espansione laterale, evidenziata anche dall'ampliarsi della larghezza del ghiacciaio nella parte terminale e nel divaricarsi delle due morene mediane. La distanza fra le due passa infatti da un minimo di 100 m a 2580 m di quota a un massimo di circa 200 m a 2500 m. Si deve infine osservare che l'ampliamento in larghezza della morena orientale nel suo settore terminale (circa 200 m) sembra alquanto eccessivo se attribuito esclusivamente allo scivolamento laterale del materiale di copertura.

c) *L'ablazione differenziale.* L'ablazione differenziale del ghiaccio protetto da detriti e del ghiaccio nudo è ormai ritenuto da molti Autori come il processo essenziale, anche se non esclusivo, che può spiegare l'origine delle morene mediane e la loro evoluzione. Numerosi sono stati anche i tentativi di valutare direttamente e di quantificare i rapporti fra l'ablazione del ghiaccio coperto e del ghiaccio nudo, e soprattutto di individuare la soglia al di sotto della quale si ha l'inversione del fenomeno, cioè il passaggio da $Da > 1$ (quindi con sviluppo in altezza della morena) a $Da < 1$ (con conseguente decremento dell'altezza). Sull'Isfallglaciären, ad esempio, Østrem (1959, 1965) ha potuto constatare che l'ablazione del ghiaccio protetto da morenico ammontava a solo il 66% di quella su ghiaccio vivo, mentre Loomis (1970) per il Kaskawulsh Glacier in Alaska l'ha valutata intorno al 74%. Nel luglio del 1985 sul Ghiacciaio Baltoro (Karakorum) a 5150 m di quota, ho potuto verificare che l'ablazione media giornaliera era di 2,78 cm su ghiaccio pulito, che divenivano 2,96 (106,47%) con uno strato di limo e sabbia di meno di un centimetro di spes-

ENTITA' DELL'ABLAZIONE DIFFERENZIALE

TAB. 3

numero palina	spessore copertura detritica cm	ablazione totale cm	ablazione giornaliera cm
1	0 (ghiaccio pulito)	36	2,77
2	0 (ghiaccio pulito)	36	2,77
3	0 (ghiaccio pulito)	34	2,61
4	0 (ghiaccio pulito)	35	2,69
5	2 (detrito fine e grossolano)	40	3,08
6	3 (detrito grossolano)	33	2,54
7	4 (detrito grossolano)	30	2,31
8	1-2 (detrito fine)	42	3,23
9	6 (detrito grossolano)	28,5	2,19
10	0 (ghiaccio pulito)	46	3,54

sore. Con poco più di tre centimetri di detriti la fusione media giornaliera era di 2 cm (71,94%), che scendevano a 1,91 (68,70%) con la protezione di dieci centimetri di detriti (4).

Sulle Alpi valutazioni di questo tipo sono state effettuate a più riprese sul Ghiacciaio Tsidjiore Nouve nel Vallese (Svizzera). Qui, nel settembre del 1972, Small e Clark (1974) osservavano un'ablazione media su ghiaccio senza protezione di 2,14 cm giornalieri, che si riducevano a 1,57 con una copertura superiore ai due centimetri di spessore; in percentuale l'ablazione del ghiaccio coperto rappresentava dunque il 73,3% di quello privo di protezione. Nell'estate 1976, sempre sullo stesso ghiacciaio, Small, Clark e Cawse (1979) constatavano un'ablazione media giornaliera di 3,9 cm su ghiaccio vivo, che aumentava a 4,6 cm con un centimetro di copertura e si riduceva a 1,6 cm con sei centimetri di protezione.

Per quanto riguarda il Ghiacciaio dei Forni, si è proceduto a una prima verifica dell'entità dell'ablazione in rapporto allo spessore del materiale di copertura nel luglio 1984, con l'infissione di 10 paline lungo una sezione trasversale a circa 2650 m di quota. Si è così potuto constatare che sul ghiaccio pulito si era prodotta un'ablazione di circa 3 cm al giorno, che salivano a 3,7 con una copertura di un centimetro di limo e di ciottoli minuti. Lo spessore di ghiaccio fuso si riduceva di 2 cm con la protezione di circa cinque centimetri di detriti. Un ulteriore controllo è stato attuato nel mese di settembre 1985 sempre nella stessa posizione, con l'infissione di altre 10 paline di materiale plastico in fori scavati sulla superficie del ghiacciaio. La verifica, effettuata dopo 13 giorni, ha dato i risultati sintetizzati

(4) Su queste ricerche riferisco in un altro articolo, attualmente in corso di stampa.

nella tab. 3. Le cinque paline infisse nel ghiaccio vivo hanno dato una ablazione media giornaliera di 2,88 cm, con valori oscillanti fra 2,61 cm e 3,54 cm. Con uno-due centimetri di limo e di detriti minuti si è avuta una diminuzione dello spessore di ghiaccio di 3,23 cm (111,11%), mentre con uno strato protettivo superiore ai due centimetri l'ablazione è risultata rallentata. Con quattro centimetri di detriti si è infatti avuto un calo di spessore di 2,31 cm (80,12%) e con sei centimetri si è scesi a 2,19 cm (76,12%).

Come appare dai dati sopra riportati, si tratta di valori comparabili con quelli ottenuti dai precedenti ricercatori, che offrono quindi una valutazione quantitativa sufficientemente approssimata dell'ablazione differenziale.

Alcune osservazioni conclusive. — Dopo aver posto in evidenza, nelle pagine precedenti, quei fattori che a parer nostro hanno in misura determinante contribuito alla genesi e all'evoluzione delle morene mediane dei Forni, si cercherà ora di delineare nel modo più completo possibile (soprattutto per la morena orientale) la successione degli eventi:

- 1) gelificazione intensa sulle pareti dell'affioramento roccioso di quota 3226; i clasti per gravità e per opera delle valanghe si raccolgono sulla superficie del ghiacciaio, distribuendosi ai piedi delle pareti e formando una copertura non continua fino a 2710 m. Una modesta quantità di detriti viene ingoiata dai crepacci e costituisce il detrito endoglaciale e subglaciale, che interessa una zona di limitata estensione nei pressi delle pareti e al contatto ghiaccio-roccia;
- 2) la compressione laterale della colata centrale e di quella orientale determinano l'allineamento del detrito sparso, che assume una morfologia a setto longitudinale. Ciò è verificabile già cento metri a valle dell'emergenza rocciosa;
- 3) inizia ad operare l'ablazione differenziale ($Da > 1$): la copertura di frammenti rocciosi, il cui spessore è mediamente superiore ai 2-3 cm, protegge dalla fusione il ghiaccio immediatamente sottostante, mentre tutt'attorno l'ablazione può agire normalmente;
- 4) la cresta morenica emerge sempre più rispetto al livello del ghiaccio circostante, finché, pur con varie oscillazioni, raggiunge la massima altezza e la massima inclinazione dei versanti. E' la cosiddetta *waxing section*, il cui limite inferiore per la morena orientale dei Forni si può collocare attorno a 2660 m di quota a circa 750 m dall'origine, dove l'altezza della morena tocca i dieci metri;

- 5) superata l'inclinazione critica (che per entrambe le morene è valutabile attorno ai 35°), i frammenti rocciosi tendono a scivolare ai lati; la copertura di protezione si assottiglia e diviene mediamente inferiore ai 2 cm, quindi $Da < 1$, mentre numerose aree di ghiaccio vivo restano direttamente esposte all'energia termica dei raggi solari;
- 6) la mancata protezione delle zone scoperte e il processo di accumulazione del calore e di trasmissione al ghiaccio sottostante ad opera del sottile strato detritico residuo provocano la diminuzione dell'altezza della morena (è la cosiddetta *waning section*), che si riduce a un ampio ma esiguo velo di materiali superficiali; l'espansione laterale della colata contribuisce a distribuire su una superficie più ampia i frammenti rocciosi e i materiali più fini, cosicché la morena orientale assume una tipica forma « a ventaglio » con apice verso monte e devia verso nord-nord-est. Questa struttura è chiaramente visibile fino a 2450 m, dove si ha sulla destra idrografica l'emergenza della parete rocciosa che interrompe la continuità di quel settore della fronte.

Dalle osservazioni sopra riportate, e soprattutto tenendo conto che l'alimentazione è prevalentemente superficiale, che la sorgente di tale alimentazione è in gran parte situata al di sotto del limite delle nevi, che è possibile distinguere una *waxing section* e una *waning section*, si può concludere che la morena mediana orientale del Ghiacciaio dei Forni può essere inserita nel tipo A della classificazione proposta da Small, Clark e Cawse (1979). E' probabile che la successione delle fasi indicata qui sopra possa adattarsi alle morene mediane di numerosi altri ghiacciai delle Alpi Italiane. Saranno comunque necessarie ulteriori ricerche su altri apparati glaciali per verificare la validità dello schema proposto e sullo stesso Ghiacciaio dei Forni per approfondire tematiche successive, in particolare per individuare la dimensione temporale degli eventi sopra delineati.

BIBLIOGRAFIA

- ABBADESSA F., *Rilievi e indagini sul Ghiacciaio dei Forni (Valtellina)*, in « Boll. Comit. Glaciol. Ital. », Torino, 1955, pp. 101-128.
- CASSINIS R. e CARABELLI E., *Misure di spessore del ghiaccio al Ghiacciaio dei Forni (Lombardia)*, in « Riv. Geofis. Appl. », Milano, 1953, pp. 1-15.
- DESIO A., *I ghiacciai del gruppo Ortles-Cevedale*, Torino, C.N.R. - Comit. Glaciol. Ital., 1967.
- EYLES N., *Morphology and development of medial moraines: comments on the paper by R.J. Small and M.J. Clark*, in « Journ. of Glaciology », Cambridge, 1976, pp. 161-162.

- EYLES N. e ROGERSON R. J., *A framework for the investigation of medial moraine formation: Austedalsbreen, Norway, and Berendon Glacier, British Columbia, Canada*, in « Journ. of Glaciology », Cambridge, 1978, pp. 99-113.
- LOOMIS S. R., *Morphology and ablation processes on glacier ice*, in V. C. BUSHNELL e R. H. RAGLE (a cura di), *Icefields Ranges Projects. Scientific results*, New York-Montreal, 1970, pp. 27-31.
- ID., *Morphology and structure of an ice-cored medial moraine. Kaskawulsh Glacier, Yukon*, in « Arctic Institute of North America », 1970, pp. 1-65.
- ØSTREM G., *Ice melting under a thin layer of moraine and the existence of ice cores in moraine ridges*, in « Geogr. Ann. », Stoccolma, 1959, pp. 228-230.
- ID., *Problems of dating ice-cored moraines*, in « Geogr. Ann. », Stoccolma, 1965, pp. 1-38.
- SMALL R. J. e CLARK M. J., *The medial moraines of the lower Glacier de Tsidiore Nouve, Valais, Switzerland*, in « Journ. of Glaciology », Cambridge, 1974, pp. 255-263.
- ID., *Morphology and development of medial moraines: reply to comments by N. Eyles*, in « Journ. of Glaciology », Cambridge, 1976, pp. 162-164.
- SMALL R. J., CLARK R. J. e CAWSE T. J., *The formation of medial moraines on alpine glaciers*, in « Journ. of Glaciology », Cambridge, 1979, pp. 43-52.
- SMIRAGLIA C., *Le tavole di ghiacciaio della Vedretta dei Forni (Gruppo Ortles-Cevedale). Osservazioni morfologiche*, in « Natura », Milano, 1984, pp. 91-100.
- ID., *Il Ghiacciaio dei Forni (Gruppo Ortles-Cevedale) e la sua storia recente*, in « Boll. Ann. Comit. Sci. Centr. C.A.I. », Milano, 1985, pp. 28-34.
- ID., *Valutazione dell'ablazione differenziale sul Ghiacciaio Baltoro (Karakorum, Pakistan) e morfologia derivante: nota preliminare*, in « Rend. Accad. Naz. Lincei », Roma, in corso di stampa.

MORPHOLOGY AND ORIGIN OF THE MEDIAL MORAINES OF THE GHIACCIAIO DEI FORNI (VALFURVA, UPPER VALTELLINA). — The two medial moraines of the Ghiacciaio dei Forni (Valtellina) are composed of a layer of debris that covers a septum of ice. They are basically fed by supraglacial debris deriving from the frost shattering of the walls of the rock outcrops that separate the three streams of the glacier. The debris takes the form of a longitudinal septum as a result of the lateral compression of the glacial streams. The emergence of the moraines is attributed basically to differential ablation, the role of which was studied during the summers of 1984 and 1985. The reduction in height and the considerable widening of the moraines in the end section is linked to the lateral sliding of the covering of debris, to the increase in ablation due to the thinning of the protective layer and to the lateral expansion of the glacial streams.

Milano, Università Cattolica, Istituto di Geografia.