

ALBERTO FRASSONI (*), GIANCARLO ROSSI (**) & ANDREA TAMBURINI (*)

STUDIO DEL GHIACCIAIO DELL'ADAMELLO MEDIANTE INDAGINI GEORADAR

ABSTRACT: FRASSONI A., ROSSI G.C. & TAMBURINI A., *Ground Penetrating Radar investigations on the Adamello Glacier*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

The results of the investigations carried out in 1997-98 in the Adamello Glacier area are discussed in this paper. Aim of the study was mapping the glacier surface and bedrock in order to better understand the dynamics and calculate the volume of the glacier. Aerial photogrammetry and GPS-assisted ground penetrating radar surveys both from the surface and by helicopter were carried out. Data were processed in ARC/INFO environment. The overall volume of the glacier reaches the value of about 870 million cubic meters, with a maximum ice thickness higher than 240 m in the Pian di Neve area. A good fit with the results of the previous surveys, carried out in the upper part of the glacier from the beginning of the 60s, can be observed, confirming that the Adamello glacier can be considered the largest alpine glacier.

KEY WORDS: Adamello Glacier, GPR, GPS, DEM.

RIASSUNTO: FRASSONI A., ROSSI G.C. & TAMBURINI A., *Studio del Ghiacciaio dell'Adamello mediante indagini georadar*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

Il presente lavoro illustra la metodologia ed i risultati delle indagini geofisiche condotte nell'estate 1997 e nei primi mesi del 1998, volte alla caratterizzazione geometrica e volumetrica del ghiacciaio dell'Adamello ed alla ricostruzione della morfologia del substrato roccioso. Le indagini sono state eseguite utilizzando un radar geofisico, georeferenziato mediante tecnica GPS, per un totale di circa 70 km di rilievi, parte a terra e parte trasportando la strumentazione in elicottero. I dati acquisiti, elaborati mediante procedure operanti in ambiente ARC/INFO, hanno reso possibile una valutazione del volume complessivo del ghiacciaio, unitamente alla ricostruzione degli spessori del ghiaccio e della loro distribuzione areale, che concordano sostanzialmente con i risultati delle indagini sismiche eseguite all'inizio degli anni '60. Il volume complessivo del ghiacciaio è risultato pari a circa 870 milioni di m³, con uno spessore massimo superiore a 240 metri nell'area del Pian di Neve. Le caratteristiche morfologiche della superficie del ghiacciaio e del sottostante substrato roccioso consentono di confermare le più recenti ipotesi classificative, che considerano il ghiacciaio dell'Adamello come un unico apparato glaciale.

TERMINI CHIAVE: Ghiacciaio dell'Adamello, Georadar, GPS, DEM.

INTRODUZIONE

Il Ghiacciaio dell'Adamello, attualmente considerato il più vasto apparato glaciale delle Alpi, costituisce la principale riserva idrica solida d'Italia. A lungo ritenuto suddiviso in più individui, è formato da un vasto altipiano, detto Pian di Neve, dal quale si dipartono numerose colate in direzione delle valli laterali. La più importante ed estesa è quella del Mandrone, che si sviluppa in direzione settentrionale occupando la parte sommitale della Val di Genova (Merciai, 1921 e 1924; Catasto dei Ghiacciai Italiani, 1961). In particolare il Passo Adamè, in corrispondenza del quale veniva tradizionalmente posta una soglia rocciosa, era considerato un limite tra la porzione meridionale (Pian di Neve) e quella settentrionale (Ghiacciaio del Mandrone).

A partire dagli anni '60 l'area è stata oggetto di numerose campagne di indagine, eseguite con diverse tecniche geofisiche, aventi lo scopo di valutare gli spessori del ghiaccio e soprattutto di ricostruire la morfologia del substrato roccioso, per poter tracciare le principali direzioni di flusso del ghiaccio e quindi definire con maggior chiarezza i limiti tra i vari individui. Si ricordano in particolare il rilievo sismico a riflessione eseguito da Carabelli (1962) ed i successivi rilievi geoelettrici eseguiti nel 1991 dalla Società Geoplan per conto della Società Alpinisti Tridentini (Bonardi & alii, 1995). Entrambe le indagini citate sono state limitate allo studio dell'area del Pian di Neve e del Passo Adamè.

Il Ghiacciaio dell'Adamello è attualmente considerato un unico apparato, con una morfologia riconducibile a quella di un ghiacciaio di tipo scandinavo, caratterizzato da un vasto altipiano ghiacciato di notevole spessore, da cui si dipartono radialmente numerose lingue (AA.VV. - Ghiacciai in Lombardia, 1992; Bonardi & alii, 1995).

SCHEMA DELLE INDAGINI

Nell'Estate 1997 è stata avviata per conto di ENEL S.p.A. una nuova campagna di indagine, ultimata agli inizi dell'anno successivo. Lo studio, esteso a tutta l'area

(*) ISMES S.p.A., via Pastrengo 9, 24068 Seriate (BG).

(**) via Montello 8, Noale (VE).

Si ringrazia il dott. L. Veronese, Direttore del Laboratorio Geotecnico del Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, per la disponibilità dimostrata e la collaborazione offerta durante l'esecuzione dei rilievi.

occupata dal ghiacciaio, è stato articolato nei seguenti punti:

- esecuzione di un rilievo aerofotogrammetrico alla scala 1:5000 dell'area occupata dal ghiacciaio e delle aree immediatamente adiacenti, al fine di poter realizzare un modello digitale di elevazione (DEM) della superficie del ghiacciaio,
- ricostruzione della morfologia del substrato roccioso mediante esecuzione di un rilievo georadar posizionato con tecnica GPS differenziale (circa 70 km di lunghezza totale dei profili), al fine di poter realizzare un modello digitale di elevazione (DEM) del substrato,
- confronto tra i due DEM con tecniche informatiche al fine di ottenere il volume del ghiacciaio e una carta degli spessori del ghiaccio.

RILIEVI GEORADAR

Strumentazione

Sono stati utilizzati due diversi sistemi georadar, in relazione alle esigenze logistiche di spostamento sul ghiacciaio ed alla complessità delle problematiche da affrontare. Il primo sistema (GSSI SIR-2¹), trasportabile a spalle, ha consentito di percorrere a piedi il ghiacciaio, ed in particolare l'area del Pian di Neve, la cui esplorazione rappresentava il problema più complesso e richiedeva l'esecuzione di una prima indagine dalla superficie, per sfruttare al meglio le potenzialità della tecnica di misura, limitando almeno inizialmente le possibili fonti di disturbo e di attenuazione del segnale. Il secondo sistema (GSSI SIR-10²), più ingombrante e trasportabile unicamente in elicottero, ma con profondità di indagine maggiore, ha permesso di integrare i risultati ottenuti nel corso della prima campagna, una volta tarata la metodologia di indagine sulla base dei primi risultati.

Come trasduttore è stata utilizzata l'antenna Mod. SUBECHO 40 della RADARTEAM (Sweden), con centro frequenza di 35 Mhz.

Nel corso delle indagini sono state utilizzate impostazioni strumentali pressoché identiche, tranne che per il tempo di analisi dei segnali radar, come sarà più approfonditamente discusso nel seguito.

¹ Le principali caratteristiche del sistema GSSI SIR-2 sono le seguenti:

- 1 canale di ingresso,
- conversione analogica/digitale a 8 o 16 bit,
- registrazione dati su disco,
- numero massimo di scansioni (segnali) al secondo pari a 64,
- tempo massimo di analisi dei segnali radar pari a 2000 ns.

² Le principali caratteristiche del sistema GSSI SIR-10 sono le seguenti:

- sino a 4 canali di ingresso,
- conversione analogica/digitale a 8 o 16 bit per ogni canale,
- registrazione dati su disco o nastro magnetico digitale,
- numero massimo di scansioni (segnali) al secondo pari a 128,
- tempo massimo di analisi dei segnali radar pari a 10.000 ns.

Georeferenziazione

La georeferenziazione dei profili radar è stata eseguita utilizzando la tecnica GPS differenziale. Non essendo possibile interfacciare direttamente i due sistemi, l'orario del sistema radar è stato sincronizzato con l'orario del sistema GPS, quest'ultimo trasmesso dai satelliti unitamente ai dati di posizione. L'operazione di sincronizzazione è servita ad agganciare tra loro i due sistemi di rilevamento e consentire, a posteriori, di stabilire la correlazione tra i segnali radar e la loro relativa posizione topografica.

Per quanto riguarda il tracciamento delle traiettorie seguite nel corso del rilievo radar sono state utilizzate due diverse tecniche di misura, in relazione alle modalità di esecuzione del rilievo stesso. Entrambe le tecniche sono basate sull'utilizzo contemporaneo di due ricevitori GPS, rispettivamente installati in corrispondenza dell'antenna radar e su di un punto di coordinate note, rispetto al quale vengono determinate le coordinate planoaltimetriche dei punti costituenti la traiettoria seguita, con cadenza temporale prefissata. In entrambi i casi si è preferito operare in *postprocessing*, onde evitare i problemi conseguenti all'eventuale perdita di collegamento radio tra i due ricevitori. La frequenza di acquisizione delle posizioni è stata fissata in un dato ogni quindici secondi per i rilievi a piedi, ed in un dato ogni tre secondi per i rilievi da elicottero.

In particolare, durante i rilievi a terra è stata applicata la tecnica cinematica interferenziale, che utilizza i dati di fase, consentendo di raggiungere una precisione centimetrica. Per i rilievi da elicottero si è fatto invece ricorso alla tecnica differenziale submetrica, che utilizza le misure di codice, o *pseudorange*, consentendo di ottenere errori in genere inferiori del metro. La seconda metodologia di rilievo consente la determinazione istantanea della posizione, mentre la prima richiede, oltre ad un tempo di inizializzazione, ovvero di reinizializzazione in caso di perdita della configurazione satellitare minima, una continuità nella registrazione, difficilmente ottenibile durante il volo. Operando da elicottero, infatti, la rapidità delle operazioni determina un'estrema variabilità della costellazione satellitare osservabile, con collegamenti discontinui con i satelliti, che provocherebbero cospicue perdite di dati, oltre alla necessità di reinizializzare frequentemente il rilievo. Considerata la finalità del lavoro, si ritiene che la tecnica prescelta sia adeguata e congruente alle precisioni rispettivamente associate alla restituzione del volo aerofotogrammetrico ed alla tecnica radar.

I punti di riferimento utilizzati nel corso dell'indagine corrispondono ad alcuni vertici della rete GPS statica, alternativamente occupati in relazione alla logistica delle indagini e all'organizzazione degli spostamenti, a piedi o in elicottero, sul ghiacciaio.

Rilievi in campo

Le indagini in campo sono state eseguite in due fasi. La prima campagna di misura, eseguita nella seconda settimana del mese di settembre 1997, è stata organizzata secondo lo schema di seguito riportato.

- Esecuzione del rilievo aerofotogrammetrico.
- Rilievo di una rete di punti di inquadramento con tecnica GPS statica interferenziale, utilizzati per la restituzione del volo e la successiva georeferenziazione delle traiettorie del rilievo georadar nel medesimo sistema di riferimento, al fine di garantire la sovrapposibilità delle due superfici.
- Esecuzione del rilievo georadar con posizionamento GPS: circa 25 km di rilievo sono stati eseguiti direttamente dalla superficie del ghiacciaio, trasportando a piedi l'attrezzatura; altri 25 km circa sono stati eseguiti con attrezzatura elitrasportata. Nel primo caso gli strumenti di registrazione sono stati trasportati a spalla e l'antenna radar è stata fatta strisciare sulla superficie del ghiacciaio; nel secondo caso gli strumenti sono stati trasportati a bordo dell'elicottero e l'antenna è stata appesa al di sotto del velivolo, alloggiata in un'apposita struttura aerodinamica che ne impediva la rotazione durante il volo.

La seconda campagna di misura si è svolta nel mese di gennaio dell'anno successivo, nell'arco di una sola giornata di lavoro. Essa ha consentito di verificare ed integrare le informazioni acquisite nel corso della prima campagna, a fronte dei risultati emersi dall'elaborazione preliminare dei dati acquisiti. Sono stati eseguiti altri 20 km circa di rilievo georadar, unicamente con attrezzatura elitrasportata, vista la difficoltà di operare nell'area di indagine durante la stagione invernale.

Nel corso dei rilievi a piedi è stato impostato un valore del tempo di analisi dei segnali radar pari a quello massimo consentito dallo strumento SIR-2, cioè 2000 ns. Corrispondentemente la massima profondità di indagine, considerando una velocità media delle onde elettromagnetiche nel ghiaccio pari a 16 cm/ns, è risultata di circa 160 m. Nei rilievi da elicottero il tempo di analisi dei segnali è stato impostato a 4100 ns, che per quanto sopra detto, corrisponde ad una profondità massima di investigazione di circa 320 m. Inoltre i rilievi a terra sono stati eseguiti acquisendo 8 scansioni (segnali) al secondo, invece quelli in elicottero sono stati effettuati acquisendo 16 scansioni al secondo, per tenere conto della maggior velocità di esecuzione dei rilievi stessi. Quindi, considerando una velocità di esecuzione tra 1 e 2 km/h per i rilievi a piedi e di circa 10 km/h per i rilievi in elicottero, risulta che sono stati rispettivamente registrati: circa 20 segnali ogni metro, nel primo caso, e 6 segnali ogni metro nel secondo.

Le traiettorie seguite nel corso dei rilievi georadar sono rappresentate in fig. 1.

Elaborazione dei dati

Ha comportato l'esecuzione delle seguenti operazioni:

- l'elaborazione delle sezioni radar, al fine di migliorare per ciascuna d'esse il rapporto tra segnale utile e rumore,
- l'interpretazione, che ha comportato l'evidenziazione, direttamente sulle sezioni radar, degli andamenti del passaggio ghiaccio-roccia,
- la trasformazione dei risultati delle indagini radar in informazioni utili per i programmi di elaborazione cartografica, cioè la digitalizzazione degli andamenti del passaggio ghiaccio-roccia.

In fase di elaborazione delle sezioni sono stati utilizzati due diversi software: il WINRAD della GSSI ed il GRADIX della INTERPEX. Le principali operazioni eseguite sono state: la normalizzazione dell'asse delle ascisse (cioè delle distanze dall'inizio della prospezione), l'amplificazione, i fil-traggi, la deconvoluzione e la riproduzione su stampa.

Utilizzando il sistema WINRAD, le sezioni radar sono state dapprima ridotte in lunghezza, mediando tra loro due segnali successivi e poi normalizzate lungo l'asse delle distanze impostando un valore di 3 segnali ogni metro. Quest'ultima operazione di normalizzazione, resa possibile dal sincronismo degli orologi dei sistemi radar e GPS, ha richiesto:

- la definizione, per ogni linea di prospezione, delle progressive ogni 100 metri,
- la determinazione degli orari di passaggio sulle progressive, così come registrati dal sistema GPS,
- l'inserimento sulle registrazioni radar di opportuni marker, corrispondenti ai tempi di passaggio sulle progressive,
- l'esecuzione della normalizzazione in base al procedimento previsto dal sistema software WINRAD.

In particolare, sono stati sviluppate apposite estensioni in ambiente ArcView per la definizione degli orari corrispondenti ai marker equispaziati lungo i profili a partire dai dati delle traiettorie del rilievo.

Successivamente alle operazioni di normalizzazione, sono stati applicati dei filtri passa banda sia nel dominio del tempo che dello spazio; i primi impostati tra 5 e 75 MHz, i secondi tra 3 e 255 tracce successive. Infine, utilizzando il sistema GRADIX, i dati sono stati corretti in amplificazione e riprodotti su carta.

Nella fase interpretativa si è dovuto tenere conto della difficoltà legate talvolta alla mancanza di linee di riflessione chiaramente associabili al substrato roccioso. Questo fatto è da imputare a due diverse cause. In primo luogo all'inclinazione della superficie del substrato roccioso che, deviando le riflessioni dalla verticale, ne ha spesso impedito il rilevamento in superficie. Secondariamente ai contatti tra strati di ghiaccio di diverse caratteristiche che, originando dei forti fenomeni di diffrazione, hanno oscurato le riflessioni di interesse. In proposito, con particolare riguardo alle risposte radar originate dagli strati di ghiaccio di diverse caratteristiche, o costanti dielettriche, esiste una ricca bibliografia che tratta di questo problema specifico, riscontrato in precedenti indagini su ghiacciai temperati. Per l'interpretazione dei dati, si è fatto riferimento a quanto riportato in Vallon & alii (1976) e Nicol-lin & alii (1994), secondo i quali le variazioni dielettriche nella colonna di ghiaccio sono imputabili al diverso contenuto d'acqua.

Alla luce delle osservazioni generali sopra esposte, tutte le sezioni radar sono state analizzate ricercando le tracce del contatto ghiaccio-roccia, ovvero di una corrispondente zona di passaggio. In considerazione dell'estrema varietà delle situazioni incontrate nel corso dei rilievi, si è cercato di stabilire alcune regole generali, alle quali si è fatto riferimento nel corso del complesso lavoro interpretativo. I principali criteri adottati sono di seguito elencati:

- Esecuzione del rilievo aerofotogrammetrico.
- Rilievo di una rete di punti di inquadramento con tecnica GPS statica interferenziale, utilizzati per la restituzione del volo e la successiva georeferenziazione delle traiettorie del rilievo georadar nel medesimo sistema di riferimento, al fine di garantire la sovrapposibilità delle due superfici.
- Esecuzione del rilievo georadar con posizionamento GPS: circa 25 km di rilievo sono stati eseguiti direttamente dalla superficie del ghiacciaio, trasportando a piedi l'attrezzatura; altri 25 km circa sono stati eseguiti con attrezzatura elitrasportata. Nel primo caso gli strumenti di registrazione sono stati trasportati a spalla e l'antenna radar è stata fatta strisciare sulla superficie del ghiacciaio; nel secondo caso gli strumenti sono stati trasportati a bordo dell'elicottero e l'antenna è stata appesa al di sotto del velivolo, alloggiata in un'apposita struttura aerodinamica che ne impediva la rotazione durante il volo.

La seconda campagna di misura si è svolta nel mese di gennaio dell'anno successivo, nell'arco di una sola giornata di lavoro. Essa ha consentito di verificare ed integrare le informazioni acquisite nel corso della prima campagna, a fronte dei risultati emersi dall'elaborazione preliminare dei dati acquisiti. Sono stati eseguiti altri 20 km circa di rilievo georadar, unicamente con attrezzatura elitrasportata, vista la difficoltà di operare nell'area di indagine durante la stagione invernale.

Nel corso dei rilievi a piedi è stato impostato un valore del tempo di analisi dei segnali radar pari a quello massimo consentito dallo strumento SIR-2, cioè 2000 ns. Corrispondentemente la massima profondità di indagine, considerando una velocità media delle onde elettromagnetiche nel ghiaccio pari a 16 cm/ns, è risultata di circa 160 m. Nei rilievi da elicottero il tempo di analisi dei segnali è stato impostato a 4100 ns, che per quanto sopra detto, corrisponde ad una profondità massima di investigazione di circa 320 m. Inoltre i rilievi a terra sono stati eseguiti acquisendo 8 scansioni (segnali) al secondo, invece quelli in elicottero sono stati effettuati acquisendo 16 scansioni al secondo, per tenere conto della maggior velocità di esecuzione dei rilievi stessi. Quindi, considerando una velocità di esecuzione tra 1 e 2 km/h per i rilievi a piedi e di circa 10 km/h per i rilievi in elicottero, risulta che sono stati rispettivamente registrati: circa 20 segnali ogni metro, nel primo caso, e 6 segnali ogni metro nel secondo.

Le traiettorie seguite nel corso dei rilievi georadar sono rappresentate in fig. 1.

Elaborazione dei dati

Ha comportato l'esecuzione delle seguenti operazioni:

- l'elaborazione delle sezioni radar, al fine di migliorare per ciascuna d'esse il rapporto tra segnale utile e rumore,
- l'interpretazione, che ha comportato l'evidenziazione, direttamente sulle sezioni radar, degli andamenti del passaggio ghiaccio-roccia,
- la trasformazione dei risultati delle indagini radar in informazioni utili per i programmi di elaborazione cartografica, cioè la digitalizzazione degli andamenti del passaggio ghiaccio-roccia.

In fase di elaborazione delle sezioni sono stati utilizzati due diversi software: il WINRAD della GSSI ed il GRADIX della INTERPEX. Le principali operazioni eseguite sono state: la normalizzazione dell'asse delle ascisse (cioè delle distanze dall'inizio della prospezione), l'amplificazione, i filtri, la deconvoluzione e la riproduzione su stampa.

Utilizzando il sistema WINRAD, le sezioni radar sono state dapprima ridotte in lunghezza, mediando tra loro due segnali successivi e poi normalizzate lungo l'asse delle distanze impostando un valore di 3 segnali ogni metro. Quest'ultima operazione di normalizzazione, resa possibile dal sincronismo degli orologi dei sistemi radar e GPS, ha richiesto:

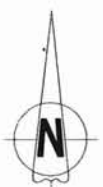
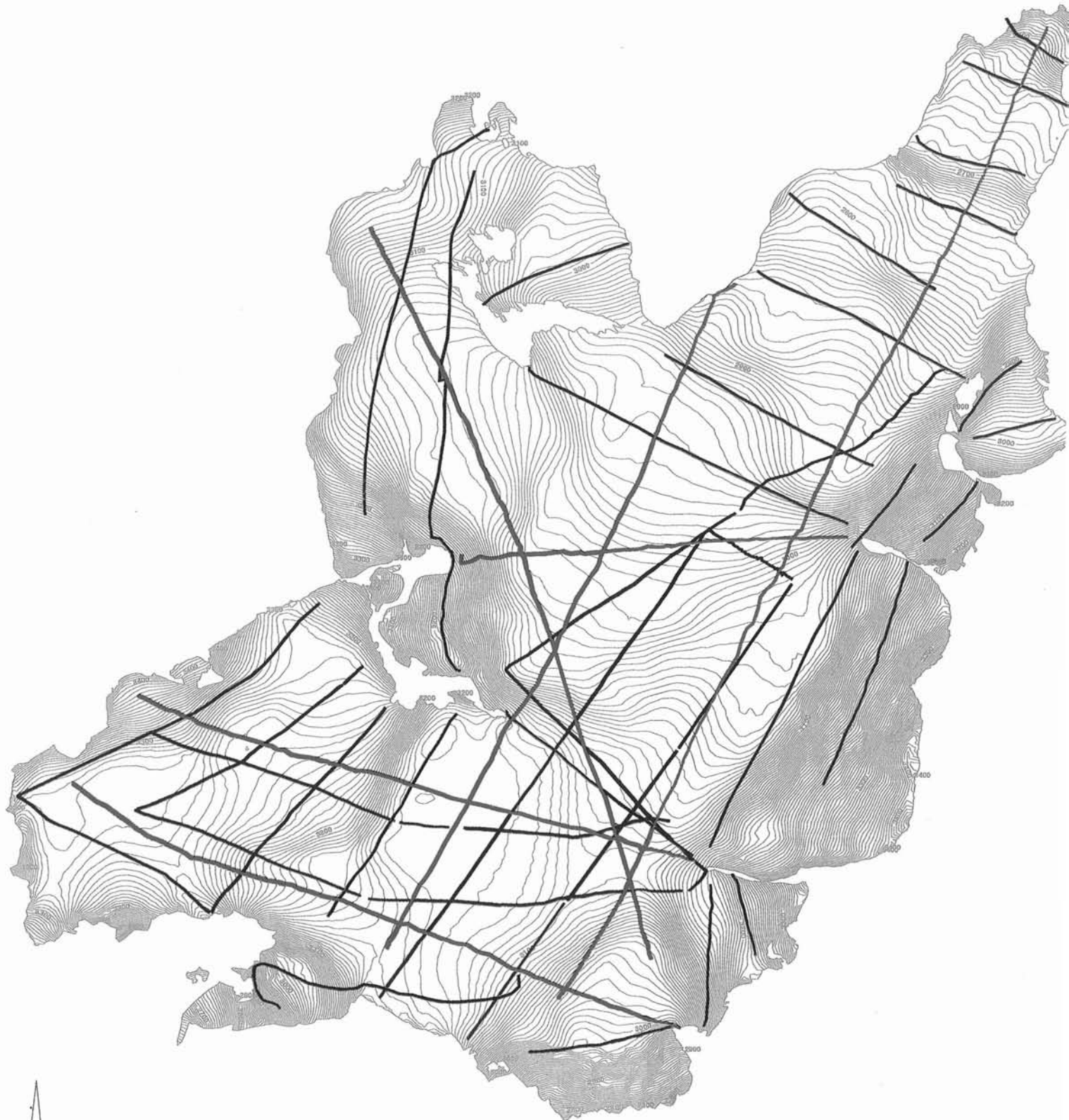
- la definizione, per ogni linea di prospezione, delle progressive ogni 100 metri,
- la determinazione degli orari di passaggio sulle progressive, così come registrati dal sistema GPS,
- l'inserimento sulle registrazioni radar di opportuni marker, corrispondenti ai tempi di passaggio sulle progressive,
- l'esecuzione della normalizzazione in base al procedimento previsto dal sistema software WINRAD.

In particolare, sono stati sviluppate apposite estensioni in ambiente ArcView per la definizione degli orari corrispondenti ai marker equispaziati lungo i profili a partire dai dati delle traiettorie del rilievo.

Successivamente alle operazioni di normalizzazione, sono stati applicati dei filtri passa banda sia nel dominio del tempo che dello spazio; i primi impostati tra 5 e 75 MHz, i secondi tra 3 e 255 tracce successive. Infine, utilizzando il sistema GRADIX, i dati sono stati corretti in amplificazione e riprodotti su carta.

Nella fase interpretativa si è dovuto tenere conto della difficoltà legate talvolta alla mancanza di linee di riflessione chiaramente associabili al substrato roccioso. Questo fatto è da imputare a due diverse cause. In primo luogo all'inclinazione della superficie del substrato roccioso che, deviando le riflessioni dalla verticale, ne ha spesso impedito il rilevamento in superficie. Secondariamente ai contatti tra strati di ghiaccio di diverse caratteristiche che, originando dei forti fenomeni di diffrazione, hanno oscurato le riflessioni di interesse. In proposito, con particolare riguardo alle risposte radar originate dagli strati di ghiaccio di diverse caratteristiche, o costanti dielettriche, esiste una ricca bibliografia che tratta di questo problema specifico, riscontrato in precedenti indagini su ghiacciai temperati. Per l'interpretazione dei dati, si è fatto riferimento a quanto riportato in Vallon & *alii* (1976) e Nicollin & *alii* (1994), secondo i quali le variazioni dielettriche nella colonna di ghiaccio sono imputabili al diverso contenuto d'acqua.

Alla luce delle osservazioni generali sopra esposte, tutte le sezioni radar sono state analizzate ricercando le tracce del contatto ghiaccio-roccia, ovvero di una corrispondente zona di passaggio. In considerazione dell'estrema varietà delle situazioni incontrate nel corso dei rilievi, si è cercato di stabilire alcune regole generali, alle quali si è fatto riferimento nel corso del complesso lavoro interpretativo. I principali criteri adottati sono di seguito elencati:



Rilievo aerofotogrammetrico Luglio 1997
equidistanza curve di livello 10 metri

0 m. 250 500 750 1000 1250 m. 2500 m.

— Rilievo dalla superficie
— Rilievo da elicottero 1997
— Rilievo da elicottero 1998

FIG. 1 - Ghiacciaio dell'Adamello: traiettorie dei rilievi georadar.

FIG. 1 - Adamello Glacier: GPR survey tracks.

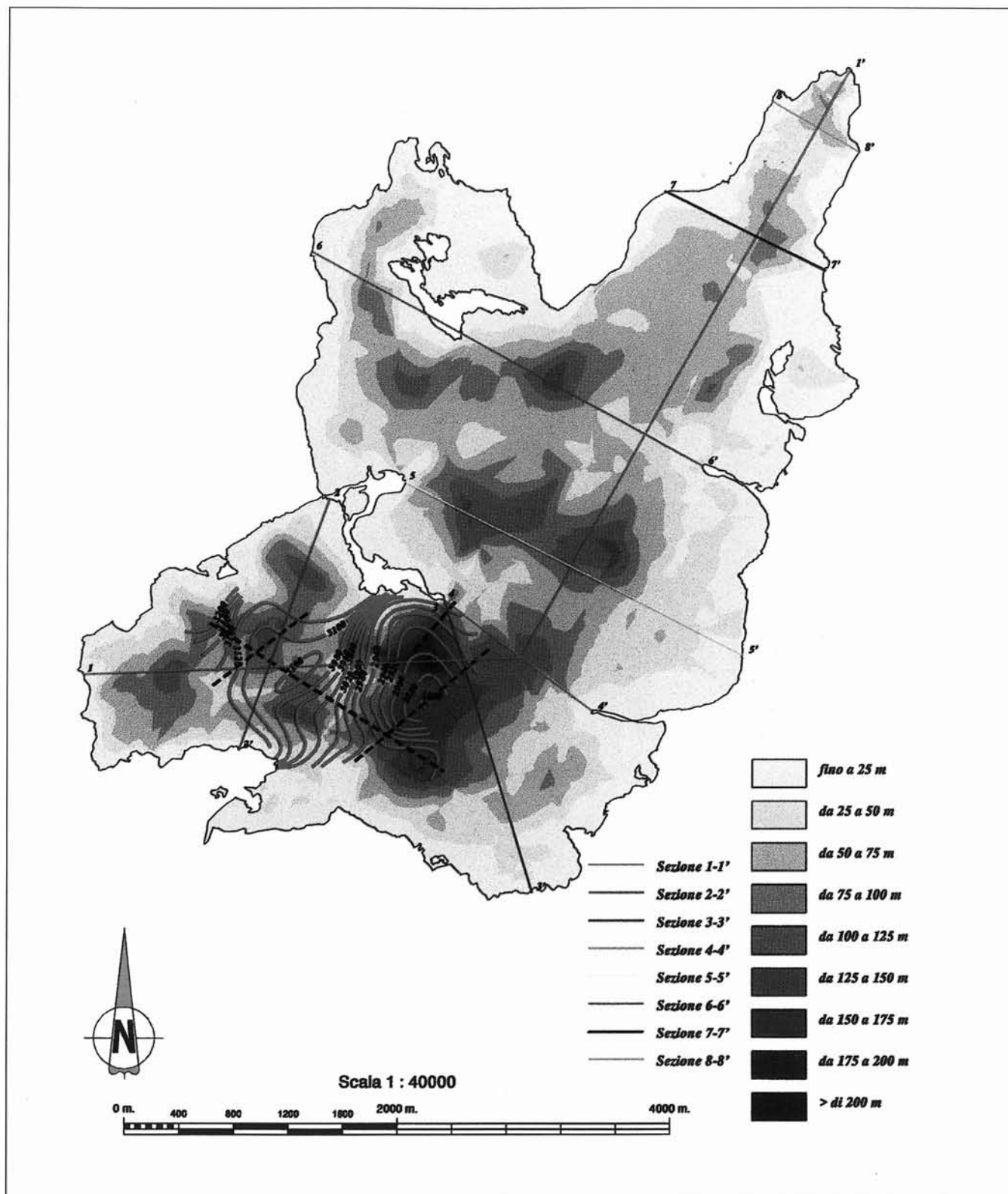


FIG. 2 - Ghiacciaio dell'Adamello: carta degli spessori del ghiaccio determinati con il rilievo georadar, confrontati con le isoipse del substrato roccioso (linee rosse) determinate con indagini sismiche a riflessione (Carabelli, 1962). Con linea nera tratteggiata vengono indicate le tracce dei relativi profili sismici a riflessione, mentre le tracce delle sezioni sono rappresentate con segmenti colorati.

FIG. 2 - Adamello Glacier: ice thickness map obtained with GPR investigations, compared with the results of the seismic investigations (red lines) carried out by Carabelli in 1962. Seismic profiles are represented by black dashed lines; the other lines represent the position of the cross sections (see fig. 4).

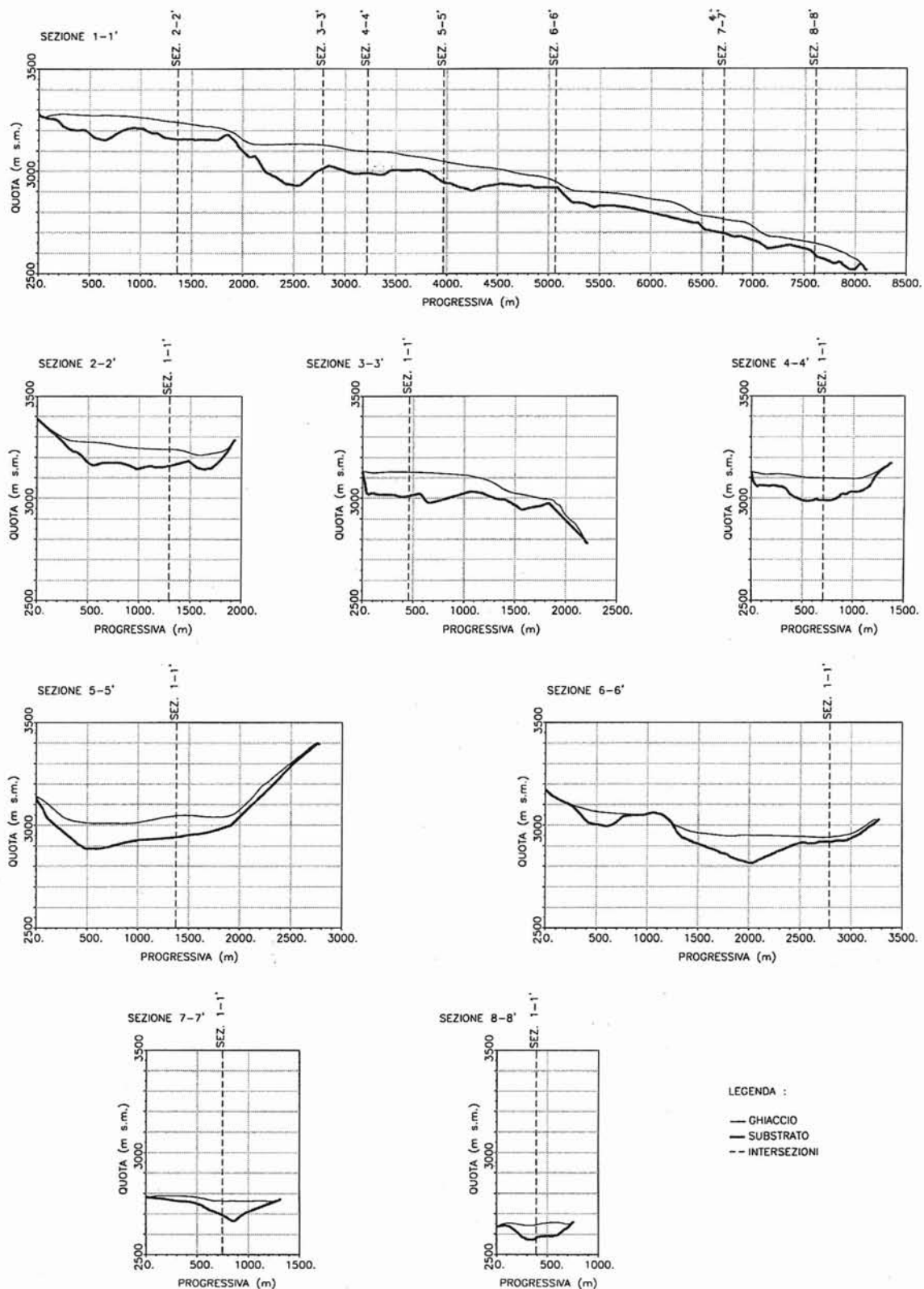


FIG. 4 - Ghiacciaio dell'Adamello: sezioni (l'ubicazione delle sezioni è rappresentata in fig. 2).

FIG. 4 - Ghiacciaio dell'Adamello: cross sections (see fig. 2 for section location).

- le riflessioni chiare ed evidenti, soprattutto in prossimità di rocce affioranti, sono state associate al contatto roccia-ghiaccio;
- le riflessioni chiare ed evidenti come le precedenti, ma con andamento prossimo all'orizzontale sono state associate ad un contatto tra neve e ghiaccio;
- le riflessioni anch'esse ben chiare e vicine alla superficie, ma al tempo stesso con andamento prossimo alla verticale, o con forme paraboliche, sono state associate alla presenza di crepacci, seracchi o comunque vuoti;
- gli insiemi di riflessioni caotiche, molto estesi sia in senso verticale che orizzontale, sono stati associati alla presenza di contatti tra strati di ghiaccio di differente caratteristiche dielettriche;
- l'assenza di segnali radar è stata associata a strati di ghiaccio compatti e di notevole spessore;
- la superficie di separazione tra roccia e ghiaccio, laddove non evidente, è stata ricercata sia all'estremità inferiore degli insiemi di riflessioni caotiche, sopra descritti, sia in corrispondenza delle deboli riflessioni che delimitano inferiormente le zone contraddistinte dall'assenza di segnali radar.

Sulla base delle tecniche interpretative sopra esposte, direttamente sulle sezioni radar sono state tracciate manualmente le linee corrispondenti al passaggio ghiaccio-roccia ed al passaggio aria-ghiaccio per le sezioni rilevate da elicottero.

Le sezioni distanze-tempi così ottenute sono state digitalizzate con un intervallo di campionamento idoneo a descrivere nel modo migliore possibile la morfologia della superficie rappresentata. Contemporaneamente, l'intersezione tra la traccia di ciascuna sezione e la superficie del ghiacciaio descritta dal relativo modello digitale di elevazione ha consentito di determinare la quota dei punti costituenti ciascuna traiettoria di rilievo nel medesimo sistema di riferimento adottato per la restituzione del volo aereo. Infine, la trasformazione dei tempi di risposta del riflettore in profondità ha consentito di determinare per ciascun punto la quota del substrato roccioso lungo la traccia dei profili radar.

Al fine di ottenere una stima del volume del ghiacciaio, i dati relativi alla quota del substrato roccioso sono stati importati in ambiente Arc-Info. Attraverso le funzioni CREATETIN e TINLATTICE è stato costruito il DEM del substrato roccioso. Il volume del ghiaccio è stato calcolato applicando la funzione CUTFILL di ARC/INFO ai DEM rispettivamente relativi alla superficie del ghiacciaio ed al substrato roccioso. Tale funzione, che esegue la sottrazione di due DEM produce, oltre al calcolo del volume compreso tra le due superfici, un terzo DEM che contiene le variazioni di quota, nel caso specifico lo spessore del ghiaccio. In tal modo è stata ricavata la carta riportata in fig. 2, la quale rappresenta con fasce di diverso colore gli spessori del ghiaccio e la loro distribuzione areale. Dal DEM del substrato roccioso è stata inoltre ricavata la carta ad isoipse riportata in fig. 3.

A completamento del lavoro sono state tracciate alcune sezioni, sulle quali viene rappresentato l'andamento del substrato roccioso in rapporto alla superficie del ghiacciaio. La traccia delle sezioni è riportata in fig. 2. In fig. 4 si

riportano una sezione longitudinale all'apparato glaciale, disposta lungo la principale direttrice di flusso (sez. 1-1') e sette sezioni trasversali. In particolare, la sezione longitudinale 1-1' attraversa l'area del Pian di Neve, dove è stato misurato il massimo spessore di ghiaccio, pari a circa 240 m, mentre la sezione 4-4' taglia trasversalmente il ghiacciaio nei pressi del Passo Adamè. In corrispondenza di quest'ultimo lo spessore del ghiaccio risulta superiore a 100 m.

CONCLUSIONI

I risultati dello studio possono essere sintetizzati come segue.

Il volume complessivo del ghiacciaio è risultato pari a circa 870 milioni di metri cubi.

Lo spessore massimo di ghiaccio, pari a circa 240 metri, è stato riscontrato nell'area del Pian di Neve; in quest'area i risultati ottenuti appaiono sostanzialmente in accordo con quelli delle indagini sismiche a riflessione eseguite all'inizio degli anni '60 (Carabelli, 1962), pur tenuto conto del tempo intercorso e delle diverse metodologie di indagine applicate. In fig. 2 vengono rappresentate sulla carta degli spessori del ghiaccio ottenuta dal rilievo georadar le isoipse del substrato roccioso costruite in base ai risultati dell'indagine sismica precedentemente citata.

Le caratteristiche morfologiche della superficie del ghiacciaio e del substrato roccioso consentono di considerarlo come un unico apparato glaciale, confermando le più recenti ipotesi classificative (Aa.Vv. - Ghiacciai in Lombardia, 1992; Bonardi & *alii*, 1995).

Dal punto di vista metodologico, il radar geofisico si è dimostrato un valido strumento di indagine, consentendo di investigare l'intera area occupata dal ghiacciaio in poco più di una settimana di lavoro, obiettivo difficilmente raggiungibile con altri metodi di indagine. L'esperienza condotta ha inoltre consentito di mettere a punto degli efficaci strumenti informatici per la correlazione a posteriori dei dati georadar con le posizioni GPS acquisite nel corso dell'indagine.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1992) - *Ghiacciai in Lombardia*. A cura del Servizio Glaciologico Lombardo, ed. Bolis, Bergamo.
- CNR-GCI (1961) - *Catasto dei Ghiacciai Italiani, vol. III, Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles Cevedale*. Torino.
- BONARDI L., GALLUCCIO A., LUGARES C., BATTAGLIA P., CATASTA G. & VIOLA E. (1995) - *Adamello il più grande*. Neve e Valanghe, 26, 34-47.
- CARABELLI E. (1962) - *Misure sismiche di spessore del Ghiacciaio del Pian di Neve (Adamello)*. Boll. Comit. Glac. It., ser. 2, 11, 51-68.
- MERCIAI G. (1921) - *Attorno ai ghiacciai dell'Adamello*. Boll. Comit. Glac. It., ser. 1, 4, 169-184.
- MERCIAI G. (1925) - *I ghiacciai del gruppo dell'Adamello*. Boll. Comit. Glac. It., ser. 1, 6, 86-171.
- NICOLLIN F. & KOFMAN W. (1994) - *Ground penetrating radar sounding of a temperate glacier; modelling of a multilayered medium*. Geoph. Prospecting, 42, 715-734.
- VALLON M., PETIT J.R. & FABRE B. (1976) - *Study of an ice core to the bedrock in the accumulation zone of an alpine glacier*. Journ. Glaciol., 17 (75), 13-28.