

GHIACCIAIO

campagna di rilievi con Georadar e GPS



Stefano Benato

Dipartimento Scienze della Terra
Facoltà di Scienze M.F.N.
Università degli studi di Torino
stefanobenato@libero.it

Vengono riportati i risultati delle campagne di rilevamento radar che sono state effettuate nel corso dell'estate 2003 sul Ghiacciaio di Valtournenche in Valle d'Aosta.

Utilizzando due differenti frequenze centrali è stato possibile studiare il ghiacciaio a diverse profondità e risoluzioni.

La frequenza centrale di 35 MHz ha seguito bene il substrato roccioso individuando in un punto uno spessore di ghiaccio di 60 m.

La frequenza di 250 MHz ha seguito il substrato roccioso fino solo a 20 m di profondità, ma ha permesso di individuare strutture deformative, stratificazioni del ghiaccio e del manto nevoso e strutture di percolazione dell'acqua di fusione.

Il sistema GPS è stato affiancato ai rilievi radar per avere una corretta georeferenziazione delle sezioni oltre che per effettuare precise misure della fronte glaciale.

Il Georadar o G.P.R. (Ground Penetrating Radar) viene normalmente usato per investigare la struttura e la composizione del sottosuolo trovando numerose applicazioni in geologia (determinazione della natura e della geometria del substrato, localizzazione di corpi rocciosi, individuazione di discontinuità come faglie o fratture.); ingegneria civile (localizzazione di sottoservizi come tubi o cavi, controlli strutturali, individuazione di strutture sepolte e riconoscimento dei corpi di fondazione.);

archeologia (individuazione di strutture murarie e di manufatti..) e in varie problematiche ambientali (individuazione di suoli inquinati, ricerca di discariche abusive..).

I primi approcci all'utilizzo della tecnica georadar in ambito glaciale risalgono al 1933 quando, alla base Antartica "Admiral Bird", si riconobbe come neve e ghiaccio fossero relativamente trasparenti agli impulsi elettromagnetici ad elevata frequenza. In Italia, i primi utilizzi delle metodologie georadar applicate allo

studio di ghiacciai si svilupparono soltanto negli anni '90, anche grazie, forse, all'accresciuto interesse per le problematiche ambientali e alla rivalutazione degli apparati glaciali come risorsa idroelettrica (Guglielmin & alii 1995; Merlanti & alii 1995; Fiucci & alii 1997; Frassoni & alii 1999; De Sisti & alii; Tabacco; ..).

Le possibilità di indagine che questo strumento offre nel campo della Glaciologia sono molteplici e interessanti:

- determinazione dello spessore del ghiacciaio (S.Gogineni and

An aerial photograph of a rugged, mountainous landscape. The terrain is characterized by light-colored, layered rock formations and deep, narrow valleys. A river or stream flows through the central valley, creating a winding path. The lighting is bright, casting sharp shadows that emphasize the textures and contours of the rock. The overall scene is one of natural beauty and geological complexity.

DI
VALTOURNENCHE

others 1998), della profondità del substrato roccioso e delle sue proprietà (J.S.Wellner and others 2001; A.M.Gades and others 1998; J.L.Bamber; M.L.Moran);

- individuazione e studio delle diverse strutture glaciali quali pieghe, thrusts, fratture, crepac-ci (Matthew R. and others 1991);
- individuazione delle cause che determinano stratificazioni interne e riconoscimento di apparati morenici interni (L.Hempel and others; S.Gogineni and others);

Fig. 1 • riconoscimento di flussi idrici



Fig. 2



interni al ghiacciaio, canali e reti di drenaggio, mulini, laghi sottoglaciali o interni (C.Mayer and M.J.Siegert; T.Murray and others; Steven A. and others; S.E.Hamran and others;);

- caratterizzazione delle condizioni termiche di un corpo glaciale (L.Copland and M.Sharp; H.Björnsson and others);
- cambiamenti nella microstruttura del ghiaccio e della neve sottoposti a deformazione (Q.Michael and others);
- studio degli spessori e delle caratteristiche dei livelli di neve e del firn.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La Valtournenche si sviluppa dall'abitato di Châtillon (549 m) alla conca dal Breuil con una asse vallivo lungo circa 27 km orientato ortogonalmente all'asse principale della Valle d'Aosta, in direzione Nord-Sud fino al Breuil dove si orienta NE-SW (Fig. 1).

Il Ghiacciaio di Valtournenche (Fig. 2,3, 4) occupa attualmente solo la parte più alta della conca del Breuil. Si posiziona tra 45°55'25" e 45°56'8" di latitudine Nord, tra 7°41'46" e 7°42'36" di longitudine Est, e si sviluppa a partire da una quota di circa 3450 m fino a 3000 m. Appartiene al sottogruppo della Tête Grise e del Dos de Rollin, gruppo montuoso del Monte Rosa e fa parte del bacino idrografico del torrente Marmore – Dora Baltea – Po. Si sviluppa per una lunghezza di circa 2000 m, con una inclinazione media di 19°. Ricopriva una superficie di 2,34 km² nel 1929, di 1,77 km² nel 1952 mentre attualmente si estende per 0,8 km² con una diminuzione del 65% rispetto alle estensioni del 1929. La superficie totale del bacino imbrifero è di 2,60 km², di cui 0,8 km² di superficie glaciale, con una intensità di glaciazione

del 30%.

L'orientazione del bacino a SW fa sì che il ghiacciaio sia sottoposto ad un'intensa insolazione, con una conseguente elevata fusione di neve e ghiaccio; risente inoltre dell'azione dei venti umidi che creano uno stato idrometrico non favorevole per la conservazione della massa glaciale.

Le acque di fusione si versano nel Lac des Cimes Blanches da cui si origina il torrente Marmore. Questo è il principale torrente della vallata e con le sue acque, come accennato nell'introduzione, viene alimentato, tramite condotta sotterranea, il bacino artificiale del Goillet (2520 m) che deve infatti il suo intenso colore bianco-verde all'acqua di ghiacciaio ricca di limo di esarazione. Nonostante la stagione povera di precipitazioni e calda come è stata quella del 2003, il livello dell'acqua è piuttosto alto, anche se non raggiunge il valore massimo, e questo è possibile solo perché l'invaso può contare sull'apporto derivante dalle risorse idriche del ghiacciaio.

Non si tratta di un vero e proprio ghiacciaio montano o alpino, ma piuttosto di un icefield, ovvero di un ghiacciaio di pendio a mantello, essendo costituito da una massa di ghiaccio in forma di calotta poco inclinata il cui spessore non è sufficiente ad occultare la morfologia sottostante.

Proprio perché è un ghiacciaio a mantello, non presenta rilevanti cordoni morenici; manca anche una vera e propria morena frontale, poichè negli ultimi decenni la massa glaciale si è ritirata regolarmente e incessantemente e non ha lasciato altro che materiali morenici fini e sparsi. Inoltre, la mancanza di pareti laterali da cui potrebbe precipitare del detrito di falda, mantiene il ghiacciaio pulito e scoperto, tant'è che può essere anche definito un ghiac-

ciaio "bianco", proprio grazie alla sua colorazione opposta a quella di ghiacciai "neri" ricchi di detrito superficiale come il Miage.

Esso è il principale responsabile del modellamento della morfologia della zona; dal punto in cui si è ritirato attualmente, ricopriva, nel Pleistocene, l'intera vallata, con uno spessore di circa 500-600 m in corrispondenza di Valtournenche, confluendo nel ghiacciaio principale della Valle d'Aosta, il Balteo. Si nota una marcata diminuzione della pendenza dei ghiacciai della conca del Breuil da Ovest verso Est, e cioè da quelli strapiombanti di Mont Tabèl, Chérillon (pendenza media 45%) a quello meno ripido della Forclaz, per arrivare a quelli quasi pianeggianti del Théodule e di Valtournenche (pendenza media 20%). Questo potrebbe essere in diretta relazione con la diversa natura delle rocce: gneiss e graniti più duri ad Ovest a cui corrispondono versanti severi e ripidi; calcescisti e pietre verdi ad Est con caratteristiche morfologie più addolcite. Si nota pure, sempre da Ovest verso Est un progressivo e graduale innalzamento del livello cui giungono le fronti; dal Mont Tabèl la cui fronte giunge a circa 2600 m, si passa al Gh. di Valtournenche con fronte a 3000 m. Ciò potrebbe dipendere dalle diverse ampiezze del bacino di alimentazione, dall'altitudine del fondo di ciascun circo, dalla diversa esposizione, dalla copertura morenica e dalla maggiore pendenza dei versanti occidentali.

Vi sono diversi aspetti che rendono il Ghiacciaio di Valtournenche particolarmente adatto allo studio in questione.

Anzitutto le sue caratteristiche morfologiche come una limitata distribuzione areale, una debole



Fig. 3
Fig. 4

pendenza e una superficie scarsamente tormentata da crepacciature o seracchi; è infatti stato possibile effettuare senza limitazioni lunghe sezioni sia trasversali che longitudinali sull'intera superficie del ghiacciaio.

Un secondo ma non meno importante aspetto è dato dalla presenza degli impianti di risalita (del comprensorio Breuil - Cervinia) che hanno estremamente facilitato l'accesso con lo strumento e che ci hanno permesso di concludere il rilevamento in breve tempo.

Particolare poi, è il ruolo che riveste il Ghiacciaio nella conca del Breuil: è la principale massa glaciale del bacino alimentatore della diga artificiale del Goillet, di proprietà della C.V.A. s.p.a. (Compagnie Valdôtaine des Eaux) e, su di esso, viene battuta ogni inverno la pista di discesa del "Ventina". L'importanza, quindi, che lo studio sul Ghiacciaio di Valtournenche può avere, non è soltanto puramente scientifica, ma riguarda anche un più attento e rigoroso monitoraggio di un Ghiacciaio che viene intensamente sfruttato dal punto di



vista turistico e che rappresenta anche una risorsa idroelettrica non trascurabile.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il complesso dei calcescisti con pietre verdi della zona piemontese in Valtournenche (come in Val d'Ayas) è interposto tra la falda penninica del Monte Rosa ed il sistema tettonico austroalpino della Dent Blanche e della zona Sesia Lanzo. Si compone di due unità strutturali sovrapposte, ben distinte nell'associazione litologica, nei caratteri metamorfici e nel significato paleogeografico.

L'unità inferiore, o zona di Zermatt-Saas, è costituita da una



Fig. 5 e 6



potentissima sequenza basale di peridotiti tettonizzate, da metagabbri con frequenti relitti di clinopirosseno magmatico e da metavulcaniti di vario tipo con composizione basaltica a tendenza alcalina più o meno accentuata (Dal Piazz, Devecchi e Mezzacasa). Vi si associa una copertura sedimentaria, da sin a postvulcanica, formata da prevalenti micascisti granatiferi ad ankerite e da marmi, calcescisti e metaradiolariti.

La zona di Zermatt-Saas mostra un quadro metamorfico composito: associazioni eclogitiche di età eoalpina (Hunziker, 1974) sono sostituite, in forma da incipiente a quasi completa, da nuove associazioni metamorfiche in facies scisti blu e quindi in facies scisti verdi. Le serpentiniti contengono numerosi filoni di gabbri e diabasi rodingitici.

L'unità superiore, o zona del Combin, ha un assetto litostratigrafico del tutto particolare che si discosta nettamente da quello delle tipiche associazioni ofiolitiche ad affinità oceanica. E' costituita infatti da un substrato preofiolitico attribuibile al Trias ed al Giurese inferiore e da un complesso ofiolitico formato in gran prevalenza da ripetute e regolari alternanze di calcescisti e di prasiniti stratoidi.

La zona del Combin non mostra traccia delle associazioni eclogitiche che contraddistinguono la contigua zona di Zermatt-Saas, benché il chimismo delle metabasiti sia sostanzialmente analogo. L'elemento strutturale inferiore della zona dei calcescisti con pietre verdi comprende un complesso sedimentario-metamorfico ad inclusi arrotondati e brecciosi che, aumentando gradualmente di spessore, assume massima estensione e potenza proprio nella conca del Breuil. Esso si sovrappone, con contatto

tettonico, alla grande fascia serpentinoso Rocca di Verra-Gobba di Rollin ed alla equivalente massa ultrafemica di Valtour-nenche-Nôtre Dame de la Garde. Prevalgono scisti muscovitico-carbonatici ricchi di granato e con percentuali subordinate di zoisite, epidoto e biotite; nella conca di Zermatt è abbondante il cloritoide. Le caratteristiche fisiografiche di questi tipi litologici ne suggeriscono la generica denominazione di "calcescisti bianchi".

Lungo la parete compresa tra il Ghiacciaio di Valtour-nenche ed il sottostante laghetto si osservano zone di diffusa albitizzazione.

Il limite cronologico superiore della zona dei calcescisti bianchi è costituito dal metamorfismo alpino, quello inferiore, per l'abbondanza di materiale ofiolitico fra i ciottoli, deve almeno coincidere con la base del Giurese, essendo le pietre verdi di presumibile età post-triassica. Le frane sottomarine, che presumibilmente hanno dato origine ai calcescisti bianchi ed a gran parte dei loro eterogenei inclusi, possono essere attribuite al superamento della resistenza al taglio nella originaria alternanza di sedimenti e ofioliti.

La parte più elevata di questa zona è ricca di calcescisti argilloso-arenacei di colore dal bruno scuro al nerastro e contiene numerose scaglie tettoniche, di dimensioni spesso imponenti, riferibili al cristallino del ricoprimento e della sua zona radicale (Tête Grise) (Fig. 5, 6).

GEORADAR

Il termine RADAR è composto dalle iniziali delle parole inglesi RA-dio D-etection A-nd R-anging, significa radiorilevamento e determinazione della distanza a mezzo di onde radio; è un dispositivo che emette onde

elettromagnetiche (fig. 7) in direzioni volute allo scopo di individuare un ostacolo a mezzo delle onde riflesse. Il georadar, o G.P.R. (Ground Penetrating Radar), è l'applicazione operativa del sistema radar alla geotecnica, alla geologia e, in questo caso, alla glaciologia.

La peculiarità del metodo è rappresentata dalla possibilità di investigare sulla struttura e sulla composizione del sottosuolo in maniera non distruttiva; è inoltre una tecnica che permette di ottenere immagini ad alta risoluzione di strutture dell'ordine dei decimetri in intervalli di pochi metri.

Analogamente alla prospezione sismica a riflessione, anche la prospezione georadar è basata sulla propagazione di un impulso e sulla misura del suo tempo di ritorno. La differenza sostanziale rispetto al metodo sismico è che questa metodologia opera in campo elettromagnetico, per cui le caratteristiche che consentono le determinazioni sugli elementi da indagare sono legate alle proprietà elettriche e magnetiche della materia. Una riflessione dell'onda elettromagnetica si verifica ogni volta che il mezzo di propagazione mostra una variazione (o disomogeneità) delle caratteristiche elettromagnetiche, come accade in corrispondenza di un cambiamento del mezzo (Fig. 8). Le condizioni limitanti l'utilizzabilità della prospezione radar dipendono dalle proprietà dielettriche e di conducibilità elettrica dei materiali da indagare: per poter operare con tecnica georadar è necessario che il mezzo risulti trasparente alle onde elettromagnetiche, quindi caratterizzato da scarsa conducibilità elettrica, mentre per poter essere discriminato rispetto ad altri elementi presenti deve possedere un buon contrasto



Fig. 7

nelle caratteristiche dielettriche. Entrambe le condizioni sono facilmente riscontrabili durante la prospezione di masse glaciali in quanto queste presentano un buon contrasto nelle proprietà elettromagnetiche rispetto alle rocce circostanti, e valori di conducibilità elettrica σ piuttosto piccoli (resistività ρ dell'ordine dei $10^5 \Omega m$). L'impulso viene inviato nel terreno tramite un'antenna o trasduttore, si propaga verticalmente con una certa velocità; quando incontra un'interfaccia, parte dell'impulso viene riflessa (e in parte rifratta). Il metodo radar presenta inoltre alcuni vantaggi rispetto alla prospezione sismica sintetizzabili in una migliore trasportabilità degli apparati di misura e in una maggiore velocità di acquisizione; questo metodo inoltre non necessita di spazi considerevoli per la stesura dei dispositivi di misura.

Le onde elettromagnetiche sono costituite da un campo elettrico E e un campo magnetico B perpendicolari tra loro, che oscillano nel tempo con legge sinusoidale, entrambi con la stessa frequenza ν . I parametri caratteristici di un'onda sono proprio la frequenza ν (Hz), la velocità di propagazione

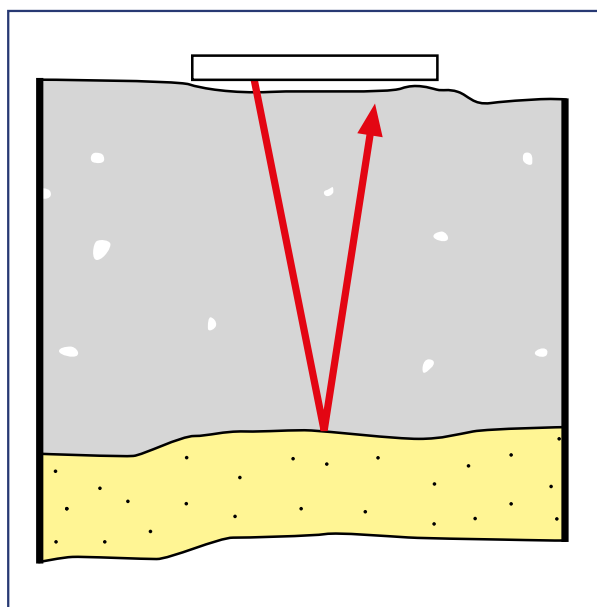


Fig. 8

V e la lunghezza d'onda λ .

Le onde utilizzate dal georadar, come da qualsiasi comune sistema radar sono classificate come Microonde, e hanno frequenze che vanno da 10^9 Hz a $3 \cdot 10^{11}$ Hz e lunghezze d'onda da 0,3 m fino a 10^{-3} m. La velocità di propagazione assume valori di circa 0,17 m/ηs nel ghiaccio e di 0,19 m/ηs in firn e neve.

La stima della velocità di propagazione è essenziale per misurare la profondità esatta dei riflettori ed è funzione della costante dielettrica del mezzo. La costante dielettrica è una tra le proprietà fisiche dei materiali

che governano la propagazione delle onde elettromagnetiche. Un campo elettrico variabile produce fenomeni di polarizzazione elettrica su particelle che costituiscono la materia come elettroni, ioni, molecole.

La costante dielettrica è un parametro caratteristico di un materiale e rappresenta l'effetto barriera che il materiale stesso produce quando due cariche immerse in esso interagiscono: la forza di interazione (forza di Coulomb) viene ridotta del fattore ϵ .

La costante dielettrica assoluta del vuoto ϵ_0 vale nel Sistema Internazionale $8.85 \cdot 10^{-12}$ (C²/N)m².

Il rapporto $\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r$ rappresenta la cosiddetta costante dielettrica relativa ϵ_r , che è un parametro adimensionale e che esprime il rapporto tra la velocità degli impulsi elettromagnetici nel vuoto e nel materiale in esame:

$$\epsilon_r = c^2/v_r^2$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto ($3 \cdot 10^8$ m/s) e v_r la velocità delle onde elettromagnetiche nel

mezzo considerato.

La profondità h alla quale si trova una superficie riflettente sarà così data da:

$$h = c \cdot t_r / 2\sqrt{\epsilon_r}$$

dove t_r è il tempo trascorso tra l'emissione e la ricezione dell'impulso.

RILIEVI

Rilievi a 250 MHz

La prima campagna di rilievi è stata effettuata utilizzando un'antenna con frequenza da 250 MHz della ERA Technology, messa gentilmente a disposizione dalla ditta "Radar Geoservizi" di Torino. Un'antenna da 250 MHz permette in genere di indagare in terreni per profondità non superiori ai 2-3 m con una risoluzione di 0,2 m. Grazie alla relativa "trasparenza" del ghiaccio, la profondità di indagine con questa frequenza può spingersi fino a 18-20 m.

Sono stati usati due tempi di acquisizione che hanno permesso di indagare a profondità differenti con diverse risoluzioni: con un tempo di acquisizione di 205 ns la profondità di indagine si spin-

ge fino a 18 m ma la risoluzione si aggira intorno agli 0,2 m; un tempo di acquisizione di 102 ns limita invece la profondità di indagine a 11 m ma permette una risoluzione dell'ordine di 0,1 m.

La prima sezione (Fig. 9) è stata effettuata con una frequenza centrale di 250 MHz. E' caratterizzata da 2154 scansioni, un intervallo di campionatura di 400 ps, 512 campionature per scansione e una risoluzione di 50 mm. Alla costante dielettrica relativa è stato assegnato un valore medio di 3 mentre l'attenuazione media è stata impostata a 1 dB/m. La sezione parte dal Rifugio delle Guide del Cervino e si sviluppa in direzione 110° NE per una lunghezza di 42 m.

Risulta molto ben evidente un riflettore importante (indicato con la freccia rossa) che segna un netto passaggio tra due materiali a caratteristiche dielettriche diverse; è il substrato roccioso, che si riesce a seguire fino a 18 m. La riflessione è causata dalla differenza tra la ϵ_r del ghiaccio (~3) e la ϵ_r della roccia sottostante (~5), che causa un rallentamento dell'onda elettromagnetica che viene così in parte riflessa. Inoltre, la superficie della roccia rappresenta il primo livello impermeabile che incontra l'acqua di fusione che percola attraverso il ghiacciaio e che enfatizza la riflessione.

Le riflessioni interne alla roccia sembrano disegnare delle scistosità e delle fatturazioni sub-parallele all'andamento del substrato. Queste sarebbero in perfetto accordo con la natura del substrato roccioso costituito prevalentemente da argilloscisti e calcescisti. La sezione 2 (Fig. 10) è sempre acquisita con una frequenza centrale di 250 MHz, è caratterizzata da 1252 scansioni, con 512 campionature per scansione ed un intervallo di

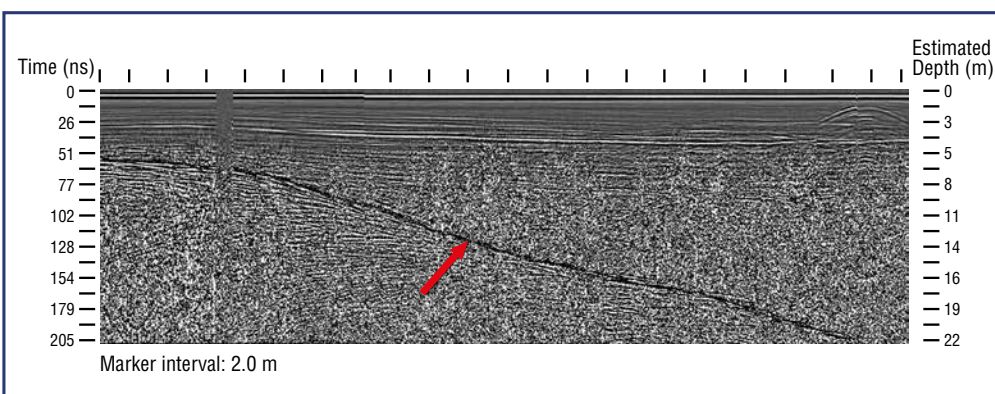
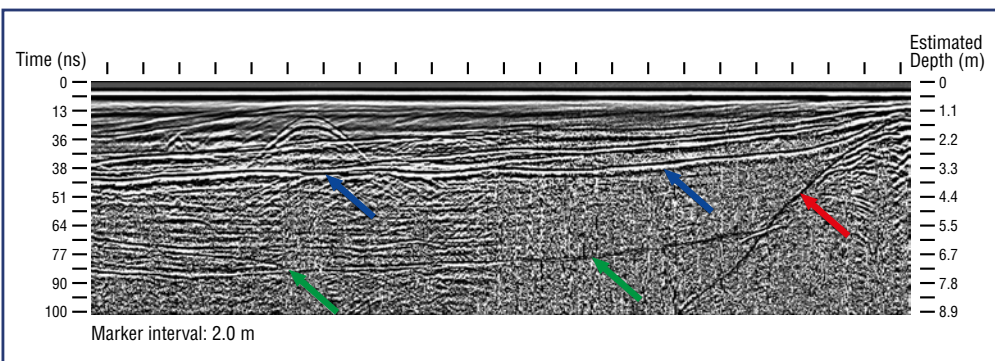


Fig. 9

Fig. 10



campionatura di 200 ps.

La sezione parte dal punto di coordinate 399950,5087680, sullo spuntone roccioso in prossimità del Rifugio delle Guide del Cervino dove è stata posizionata la stazione base del GPS, e si sviluppa in direzione 110° NE per una lunghezza di circa 50 metri.

La freccia verde indica la superficie di separazione tra firn e ghiaccio, ad una profondità di circa 7,5 m. In blu è indicato invece un importante riflettore posizionato alla profondità di circa 3 m, che rappresenta la superficie di separazione tra neve e firn, in rosso il substrato roccioso.

Al di sopra di tale superficie sono presenti numerose riflessioni secondarie. Tali stratificazioni possono essere causate da:

- **Ricristallizzazione per irraggiamento** ; la superficie di uno strato di neve appena deposto rimane direttamente a contatto con gli agenti atmosferici fino alla nevicata successiva. A seconda di quanto intercorre tra le due nevicate, si può formare così una crosta superficiale più o meno spessa per ricristallizzazione da irraggiamento.

- **Azione del vento** ; anche il vento può costruire stratificazioni sul manto nevoso appena deposto. Stratificazioni per opera del vento possono formarsi sia durante che dopo la nevicata, orientando i cristalli di neve in una direzione preferenziale.

- **Processo di lubrificazione**; canali che raccolgono l'acqua di percolazione facendola accumulare alla base degli strati, dove rigela e origina croste di ghiaccio.

- **Bolle d'aria**; variazioni delle dimensioni e della forma delle bolle d'aria presenti nella neve causando un aumento di densità locale. Questo avviene soprattutto in corrispondenza al limite

superiore ed inferiore dello strato di neve per opera di un assestamento degli strati.

- **Livelli contenenti impurità**: queste possono essere legate alle precipitazioni che trasportano silts dal deserto, oppure dovute a sabbie silts e polveri trasportate dal vento sul ghiacciaio.

- **Livelli acidi**: possono essere legati ad eruzioni vulcaniche (rari ma importanti), che formeranno uno strato databile nel ghiaccio (isocrona), o, più comunemente, da precipitazioni acide inquinate (peraltro spesso registrate proprio a Plateau Rosa).

In realtà un successivo profilo stratigrafico ha permesso di capire che la maggior parte delle riflessioni secondarie era legata essenzialmente a strutture di percolazione dell'acqua di fusione (a causa della stagione avanzata) (Fig. 11). Il profilo ha inoltre permesso di rilevare la profondità delle superfici di separazione tra neve firn (a circa 3 m) e tra firn e ghiaccio (sondata a circa 7 m), in perfetto accordo con i dati radar (Fig. 12). Il primo strato corrispondente alla neve della stagione invernale era caratterizzato da durezza bassa ($R=55$ N), densità ρ di $0,6$ g/cm^3 ed una bassa quantità di impurità. Il secondo strato corrispondente al firn mostrava invece durezza alta ($R=520$ N), una densità ρ di $0,8$ g/cm^3 ed una quantità importante di impurità. Particolarmente interessanti



Fig. 11



Fig. 12

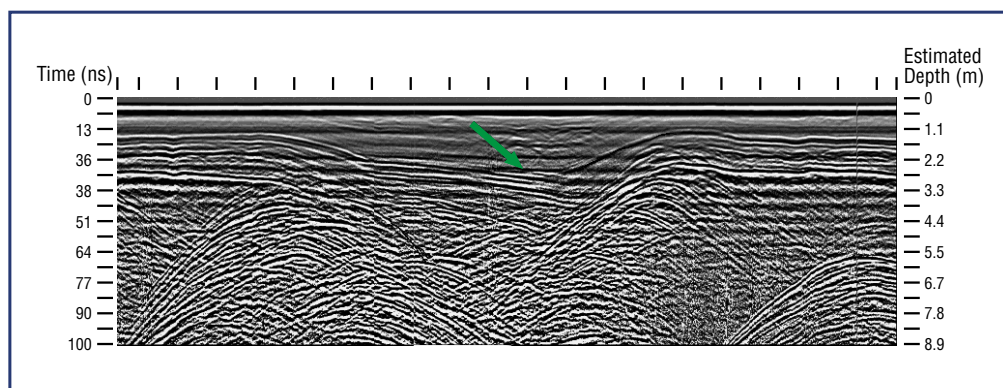


Fig. 13

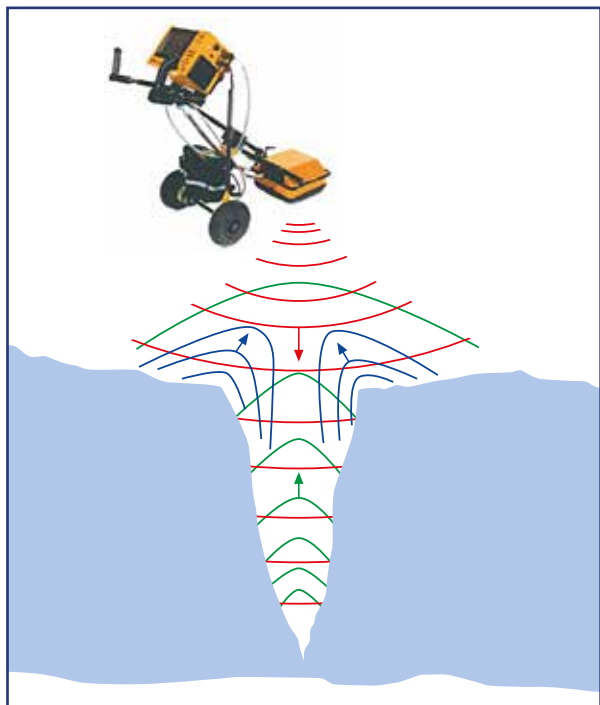


Fig. 14



Fig. 15

sono le applicazioni che sezioni radar di così elevata risoluzione possono avere nell'ambito dello studio e della prevenzione di valanghe.

Lo studio a distanza degli strati di neve e della resistenza rappresenta una valida alternativa ai profili stratigrafici classici, che richiedono lunghi tempi di esecuzione. Questi inoltre sono limitati al punto in cui viene scavata la buca, mentre il radar permette di coprire un'area molto vasta in poco tempo, per osservare le variazioni della stratigrafia. I sistemi radar sono già utilizzati in alcuni paesi e, rappresentano un potente strumento per la raccolta dei dati e l'analisi della struttura della neve. L'antenna

può essere sepolta sotto la neve con direzione verticale verso l'alto, e consente il monitoraggio continuo dello spessore del manto, dell'assessamento degli strati e della localizzazione dei depositi d'acqua (processo di lubrificazione). Alternativamente, l'antenna viene direzionata verso il basso e trasportata da un veicolo o da una fune appena sopra la superficie.

La sezione 3 mostra un'ulteriore interessante applicazione della metodologia radar con frequenza a 250 MHz, ossia la possibilità di localizzare esattamente crepacciature nascoste. Si sviluppa in vari settori del ghiacciaio, pertanto non ne vengono riportate le coordinate. E' caratterizzata da 512 campionature per scansione e un intervallo di campionatura di 200 ps. I crepacci in questa zona sono molto numerosi, vengono pertanto riportati solo i più significativi (Fig. 13). Sono ben evidenti gli strati di neve, che, in corrispondenza all'apertura del crepaccio, hanno subito un notevole rilassamento (freccia verde). Il fatto che non si veda una continuazione lineare delle sue pareti è dovuto alla presenza di numerose parabole di riflessione presenti nella parte bassa della sezione. In linea di massima queste riflessioni sono generate continuamente dagli spigoli, dai bordi e dalle pareti del crepaccio, come rappresentato schematicamente in figura 14.

Rilievi a 35 MHz

L'antenna (Fig. 15) è stata gentilmente messa a disposizione dall'Enel.Hydro, lo strumento dal Dip. di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino. L'antenna ha una lunghezza di circa 2 m ed è dotata di un pulsante per segnare un marker ogni 5m (Fig. 15); lo strumento compatibile è il SIRII, della GSSI, alimentato da una batteria da 12 V.

Le ridotte dimensioni del SIR II sono particolarmente adatte per terreni accidentati.

Con un tempo di acquisizione di 1000 ns anche questa sezione (come la sez. 2 - rilievo 250 MHz) parte dal punto di coordinate 399950,5087680, sullo spuntone roccioso in prossimità del Rifugio delle Guide del Cervino, e si sviluppa in direzione 90° NE per una lunghezza di 60 metri.

Le sezioni sono state acquisite tenendo fermo in un punto lo strumento e muovendo l'antenna grazie ad un cavo di 30 m.

La sezione più significativa, così come la si osserva in figura 16, è stata ottenuta in seguito ad una rimozione dei disturbi più superficiali, una rimozione dei disturbi legati a frequenze superiori a 120 MHz ed un filtraggio orizzontale. Con questa frequenza più bassa sono andati persi i dettagli più fini relativi a stratigrafie e strutture deformative ma è stato possibile seguire il substrato roccioso fino ad una profondità di circa 60 m. Forti limiti per questa tecnica sono rappresentati dalle zone densamente crepacciate, a causa delle riflessioni generate dalle pareti delle spaccature che disturbano il segnale ricevuto.

Come per i rilievi a 250 MHz, ci si è avvalsi di un GPS (metodologia "Stop & Go") di elevata precisione soprattutto al fine di ottenere una buona accuratezza sulla quota (Fig. 17, 18).

Il sistema è stato anche utilizzato per un rilievo della fronte, in regresso di addirittura 1,5 km rispetto alla posizione occupata nel 1922.

CONCLUSIONI

Gli studi condotti hanno evidenziato come l'utilizzo della metodologia radar possa dare importanti informazioni riguardo caratteristiche interne e spessore dei ghiacciai.

Un radar che opera a 250 MHz permette di studiare con ottimi risultati le caratteristiche degli strati più superficiali di un manto nevoso o di un ghiacciaio, ottenendo dati con risoluzioni millimetriche per profondità che raggiungono i 18 – 20 m. Questa metodologia ha individuato stratificazioni di varia natura, livelli contenenti impurità o soluzioni acide e strati con diverse densità proponendosi come utile alternativa per il monitoraggio delle valanghe in zone difficilmente accessibili. Tenuto conto dell'intenso sfruttamento turistico di ghiacciai come il Valtournenche e il Plateau Rosa, una prospezione radar a 250 MHz rappresenta inoltre un interessante mezzo di monitoraggio non invasivo dei crepacci nascosti (Fig. 19), permettendo un controllo continuo di dimensioni e spessori dei ponti di neve, per una valutazione del livello di pericolosità. Permette infine di individuare con precisione eventuali livelli di acqua all'interno del ghiacciaio. Il clima degli ultimi decenni ha causato un'intensa fase di ritiro dei ghiacciai, innescando in questi ultimi situazioni di disequilibrio, come è il caso del Ghiacciaio del Rocciamelone, del Ghiacciaio del Monviso, della Croce Rossa e del Belvedere, dove l'utilizzo del radar ha dato ottimi risultati, permettendo di valutare in breve tempo la pericolosità delle sacche d'acqua e gli interventi necessari.

Diversi sono invece i campi di applicazione sui ghiacciai di un radar che opera ad una frequenza di 35 MHz. Come illustrato nell'ultimo capitolo, gli impulsi elettromagnetici con questa frequenza non risentono delle stratificazioni interne ma riescono a penetrare nel ghiaccio per spessori superiori ai 60 m. Con questa frequenza centrale il

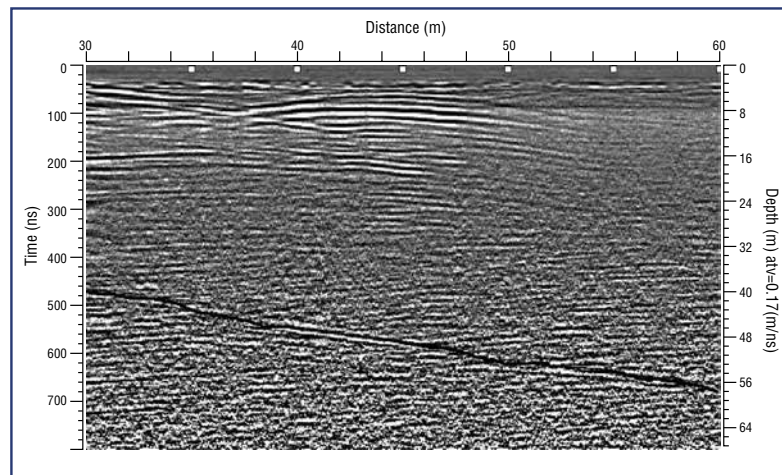


Fig. 16

radar permette di valutare rapidamente e su vaste aree le variazioni di spessore dei ghiacciai, con la possibilità di ottenere un modello tridimensionale (DTM) e calcolare così volume e corrispondente equivalente in acqua. Questi studi sono particolarmente adatti per quei ghiacciai come quello di Valtournenche che rappresentano anche importanti risorse idroelettriche.

Le informazioni ottenute con il radar non hanno solo un interesse puramente scientifico, ma riguardano anche un più attento e rigoroso monitoraggio delle masse glaciali, strutture particolari e affascinanti che possono però generare situazioni di elevata pericolosità.

RINGRAZIAMENTI

Un primo importante ringraziamento va a tutti coloro che hanno gentilmente messo a disposizione strumenti e conoscenze per realizzare il progetto: Tamburini A., Federici P. (Enel.Hydro), Ufficio Valanghe di Aosta, Compagnia Valdostana delle Acque (C.V.A.), Funivie del Cervino s.p.a., Giardino M., Lanza R. e, in particolare a Ferguglia M. (Radar Geoservizi-To) e Godio A. (Dip. Georis. e Terr.-Politecnico-To), che hanno collaborato anche nell'acquisizione e nell'elaborazione delle sezioni.

Nella ricerca ci si è avvalsi inoltre dell'indispensabile aiuto di Christine P., Fabrizio P., Alessandro B., Stefano C., Laurent D., Vittorio C., Michel L. e Carbotta L., a cui va un sentito ringraziamento.



Fig. 17

Fig. 18



Fig. 19



BIBLIOGRAFIA

- Arcone S.A. - "Airborne-radar stratigraphy and electrical structure of temperate firn: Bagley Ice Field, Alaska, U.S.A." - *Journal of Glaciology*, Vol. 48, n° 161, 2002.
- Arcone S.A., Yankielun N.E. - "1.4 GHz radar penetration and evidence of drainage structure in temperate ice: Black Rapids Glacier, Alaska, U.S.A." - *Journal of Glaciology*, Vol.46, n° 154, 2000.
- Bamber J.L. - "Ice/bed interface and englacial properties of Svalbard ice masses deduced from airborne radio echo-sounding data" - *Scott Polar Institute, University of Cambridge - Journal of Glaciology*, Vol. 35, n° 119, 1989.
- Bennett M.R. et al. - "Glaciofluvial crevasses and conduit fills as indicators of supraglacial dewatering during a surge, Skeioarjökull, Iceland" - *Journal of Glaciology*, Vol. 46, n° 152, 2000.
- Cagnati A. - "La valutazione della stabilità del manto nevoso" - *ARPAV Centro Valanghe di Arabba*, 1999.
- Björnsson H. et al. - "The thermal regime of sub-polar glaciers mapped by multi-frequency radio-echo sounding" - *Journal of Glaciology*, Vol. 42, n° 140, 1996.
- Bogorodsky V.V., Bentley C.R., Gudmansen P.E. - "Radioglaciology" - *Glaciology and quaternary geology*, 1985.
- Colbeck S. - "Classificazione internazionale della neve stagionale presente al suolo" - *The International Commission on Snow and Ice*, 1985.
- Dal Piaz G.V. - "La formazione mesozoica dei calcescisti con pietre verdi fra la Valsesia e la Valtourneche ed i suoi rapporti con il ricoprimento Monte Rosa e con la zona Sesia-Lanzo" - Nota preliminare presentata all'Adunanza del 12.12.1964, Centro Nazionale per lo studio geologico e petrografico delle Alpi del CNR (IV sezione, Torino).
- Dal Piaz G.V., Ernst W.G. - "Areal geology and petrology of eclogites and associated metabasites of the Piemonte ophiolite nappe, Breuil-St. Jacques area, Italian Western Alps" - *Tectonophysics*, 51 - 99 - 126 1978..
- Dahl-Jensen D. et al. - "A search in north Greenland for a new ice-core drill site" - *Journal of Glaciology*, Vol. 43, n° 144, 1997.
- Edens M.Q., Brown R.L. - "Changes in microstructure of snow under large deformations" - *Journal of Glaciology*, Vol. 37, n° 126, 1991.
- Gades A.M. et al. - "Bed properties of Siple Dome and adjacent ice streams, West Antarctica, inferred from radio-echo sounding measurements" - *Journal of Glaciology*, Vol. 46, n° 152, 2000.
- Gogineni S. et al. - "An improved coherent radar depth sounder" - *Journal of Glaciology*, Vol. 44, n° 148, 1998. Saetrang A.C.,
- Hamran S.E. et al. - "Estimation of relative water content in a sub-polar glacier using surface penetration radar" - *Journal of Glaciology*, Vol. 42, n° 142, 1996.
- Hempel L. et al. - "A comparison of radio-echo sounding data and electrical conductivity of the GRIP ice core" - *Journal of Glaciology*, Vol. 46, n°154, 2000.
- Lesca C., Vanni M, De Gemini F. - "Il ghiacciaio di Valtourneche" - *Estratto dal Bollettino del C.G.I.*, n°6, II serie, 1955.
- Mayer C., Siegert M.J. - "Numerical modelling of ice-sheet dynamics across the Vostok subglacial lake, central East Antarctica" - *Journal of Glaciology*, Vol. 46, n°153, 2000.
- McClung D., Schaerer P. - "Manuale delle valanghe (The avalanche Handbook) - Zanichelli, 2000.
- Moran M.L. et al. - "Delineation of a complexly dipping temperate glacier bed using short-pulse radar arrays" - *Journal of Glaciology*, Vol 46, n°153, 2000.
- Murray T. et al. - "Englacial water distribution in a temperate glacier from surface and borehole radar velocity analysis" - *Journal of Glaciology*, Vol. 47, n°158, 2001.
- Paterson W.S.B. - "The physics of glaciers "
- Rasmussen L.A. - "Refraction correction for radio echo-sounding of ice overlain by firn" - *Journal of Glaciology*, Vol. 32, n° 111, 1986.
- Ress W.G., Donovan R.E. - "Refraction correction for radio-echo sounding of large ice masses" - *Journal of Glaciology*, Vol. 38, n° 129, 1992.
- Sacco F. - "Glacialismo antico e moderno del Cervino" - *Note del prof. Federico Sacco, Reale accademia delle scienze di Torino*, 1917-18.
- Shumskii P.A. - "Principles of structural glaciology" - *Translated from the Russian by Kraus D.*
- Siegert M.J., Fujita S. - "Internal ice-sheet radar layer profiles and their relation to reflection mechanisms between Dome C and the Transantarctic Mountains" - *Journal of Glaciology*, Vol. 47, n° 157, 2001.
- Tabacco I.E., Frezzotti M., Zirizzotti A. - "Ice discharge of eastern Dome C drainage area Antarctica, determined from airborne radar survey and satellite image analysis" - *Journal of Glaciology*, Vol. 46, n° 153, 2000.
- Thiel D.V., James D., Johnson P. - "VLF surface impedance measurements for ice-depth mapping; an assessment of some commonly encountered interference effects" - *Journal of Glaciology*, Vol 42, n° 140, 1996.
- Uratsuka S., Nishio F., Mae S. - "Internal and basal changes near the grounding line derived from radio-echo sounding" - *Journal of Glaciology*, Vol. 42, n° 140, 1996.
- Vanni M. - "I ghiacciai del Cervino sul versante italiano" - *Estratto dal Bollettino del C.G.I.*, n° 7, 1927.
- Vanni M., Aliverti G., De Gemini F. - "Les glaciers du Val d'Aoste" - *Extrait de la publication n° 39 de l'Association Internationale d'Hydrologie (Assemblée générale de Rome, tome IV)*.
- Vinay P. - "The thermal climate in Breuil Basin" - *Studies in climatology* (n° 1), vol. 5, 1966.
- Wellner J.S., Lowe A.L., Shipp S.S., Anderson J.B. - "Distribution of glacial features on the Antarctic continental shelf and correlation with substrate: implications for ice behaviour" - *Journal of Glaciology*, Vol 47, n° 158, 2001.
- Wold B. - Results from the radio-echo sounding on parts of the Jostedalbreen ice cap, Norway" - *Norwegian Water resources and Energy Administration, Annals of Glaciology* 8, 1986.