

INDAGINI RADAR per lo STUDIO delle CARATTERISTICHE ENDOGLACIALI del GHIACCIAIO dei FORNI in ALTA VALTELLINA

Matteo Fioletti e

Luigi Bonetti

ARPA Lombardia,
Centro Nivometeorologico, Bormio SO
m.fioletti@arpalombardia.it

**Claudio Smiraglia e
Guglielmina Diolaiuti**

Università degli Studi di Milano,
Dipartimento di Scienze
della Terra "A. Desio", Milano

**Carlo Breganze,
Moreno Dal Toso e**

Lorenzo Facco

TERR.A.IN Snc, Cittadella PD

Nel settore superiore della lingua orientale del Ghiacciaio dei Forni (Alta Valtellina, Gruppo dell'Ortles-Cevedale) sono stati realizzati nell'ottobre 2015 rilievi geofisici con metodologia GEORADAR per indagare le caratteristiche endoglaciali in corrispondenza di una serie di crepacci concentrici e di una zona di lieve subsidenza.

Sono state condotte due tipologie di rilievi: rilievi con georadar multicanale (frequenza centrale 200-600 MHz) attraverso l'accoppiamento a sistema di georeferenziazione mediante strumentazione satellitare e rilievi topografici GNSS in modalità *Base Rover*. Per questa tipologia di misure il caposaldo di riferimento è stato materializzato in prossimità delle stazioni automatiche AWS, presenti a margine dell'area interessata dal rilievo.

La costante dielettrica dei materiali presenti ha permesso di verificare la presenza di una forte attenuazione del segnale a partire da una profondità di 20-25 m. In questa zona "critica" si verifica verosimilmente un repentino aumento del contenuto in acqua, che provoca un conseguente incremento della conduttività.

Sulla base di quanto emerso dalle indagini, il notevole incremento del contenuto in acqua a tale livello è, allo stato attuale, l'unica ipotesi sostenibile e potrebbe essere collegato alla subsidenza in atto e alla crepacciatura.



INTRODUZIONE

Il monitoraggio degli apparati glaciali ha assunto negli ultimi anni un notevole interesse a livello scientifico sia dal punto di vista teorico che applicativo. La criosfera infatti, e in particolar modo i ghiacciai delle catene montuose, costituiscono

gli indicatori più pronti e affidabili delle variazioni climatiche globali in atto. Dal punto di vista applicativo rappresentano poi una risorsa idrica, energetica e turistica di crescente importanza. A questo si aggiungano le rapide trasformazioni che stanno modificando gli ambienti di

alta montagna in relazione all'intensa riduzione delle masse glaciali in atto e che in alcuni casi hanno provocato e possono provocare eventi classificabili come pericolosità e rischio ambientale (Mortara, 2013). Fra questi si possono ricordare: gli accumuli recenti di sedimenti glaciali, talora con lenti di ghiaccio residue, che per fusione rapida o precipitazioni intense possono dare origine a colate di fango e detriti; le variazioni dei parametri geometrici e dinamici delle masse glaciali che possono provocare crolli di frammenti o di intere porzioni di ghiacciaio; accumuli di acque di fusione sulla superficie, all'interno o alla base dei ghiacciai con possibilità di rapido rilascio e quindi formazione di GLOF (*Glacial Lake Ouburst Flood*) (Huggel et al., 2002) e *jökulhaupt* (Björnsson, 2010).

Alcuni di questi fenomeni, soprattutto l'accumulo di acque di fusione all'interno o alla base dei ghiacciai, possono essere indagati principalmente con metodi geofisici, in particolare con l'utilizzo di metodologie di tipo GEORADAR, tecniche ormai diffuse e sviluppate anche in ambito glaciologico (Goodman, 1975; Plewes e Hubbard, 2001; Zirizzotti et al., 2009). Nel presente articolo si vogliono fornire alcune informazioni preliminari su rilievi effettuati sul Ghiacciaio dei Forni (Lombardia, Alta Valtellina) volti ad indagare le caratteristiche interne di un settore del ghiacciaio.

IL GHIACCIAIO DEI FORNI

Il Ghiacciaio dei Forni con una superficie di 11,34 km² (Smiraglia et al., 2015) è il più vasto apparato vallivo delle Alpi Italiane e si trova nel gruppo dell'Ortles-Cevedale, il settore delle Alpi italiane maggiormente glacializzato. L'apparato glaciale, che si estende in un intervallo altitudinale compreso fra i 2500 m e i 3670 m, è costituito (o meglio era costituito fino al 2015) da tre bacini collettori che formavano altrettante lingue confluenti in un'unica grandiosa colata. I bacini sono circondati da una sequenza di cime ("Le 13 Cime"), fra le quali per al-

Fig. 1 - Localizzazione dell'area dei rilievi RADAR (da BING Map)



Fig. 2 - Dettaglio dell'area dei rilievi con evidenti crepacci circolari (foto G. Cola).



Fig. 3 - Area dei rilievi nell'ottobre 2015.



tezza spiccano il San Matteo (3678 m), il Vioz (3645 m) e il Palon de la Mare (3703 m). Il Ghiacciaio dei Forni è certamente uno degli apparati più studiati delle Alpi italiane; da circa un decennio vi è collocata anche una stazione meteorologica automatica (AWS) i cui dati sono utilizzati per lo studio delle relazioni fra microclima della superficie del ghiacciaio e quello delle aree circostanti, per la calibrazione e validazione dei modelli di bilancio energetico e per la verifica delle grandezze derivate dalle immagini satellitari, in particolare l'albedo (Citterio et al., 2007; Senese et al., 2012a; 2012b; 2014).

L'evoluzione recente del ghiacciaio ben s'inquadra in quella di tutto il glacialismo italiano e alpino. Dalla seconda metà del XIX secolo infatti è in atto una fase di accentuata contrazione che ha portato i ghiacciai alpini a perdere circa il 35% della loro superficie fra il 1850 e gli anni '70 del XX secolo e del 50% fino al 2000. I ghiacciai del gruppo Ortles Cevedale, settore lombardo, in particolare hanno visto una riduzione della loro superficie tra il 1954 e il 2007 di circa il 40% (D'Agata et al., 2014). La superficie del Ghiacciaio dei Forni è passata dai 17,80 km² alla fine della Piccola età glaciale (LIA, circa 1860) agli 11,34 km² nel 2007, con una perdita complessiva di superficie di -36,2%. Nello stesso periodo la fronte è arretrata di circa 2 km lineari (Diolaiuti e Smiraglia, 2010).

Questa evoluzione è stata accompagnata da una serie di profonde trasformazioni ambientali, come frammentazione della fronte, collassi di zone laterali del ghiacciaio, apertura di crepacci di notevoli dimensioni, formazione di caverne e di falesie e loro successivi crolli, emersione di bozze rocciose, crolli e colate detritiche dalle morene laterali, incremento della copertura detritica superficiale con inversione del rilievo ad opera dell'ablazione differenziale, collasso di porzioni di lingua e creazione di laghi effimeri subglaciali o di contatto glaciale, separazione delle lingue che ha provocato l'isolamento del bacino orientale (Tognini, 2008; Diolaiuti e Smiraglia, 2010). Durante l'estate 2015, oltre alla continuazione dei fenomeni sopra indicati, si è osservata la formazione di una serie di crepacci circolari grossolanamente concentrici nel settore superiore della lingua orientale che davano luogo a una leggera subsidenza al di sotto della fascia rocciosa emersa negli ultimi anni, che ha separato la seraccata proveniente dal bacino orientale (Monte Vioz) dalla lingua corrispondente (Figg. 1, 2, 3, 4).

OBIETTIVI E METODOLOGIE

Per ottenere informazioni su quest'ultimo fenomeno (crepacci circolari e subsidenza) e sulle sue caratteristiche endoglaciali, nell'autunno 2015 il Centro Nivometeorologico di ARPA Lombardia, in

collaborazione con la ditta Terrain Snc ha svolto una campagna di indagini geofisiche, avendo come principali obiettivi:

- la verifica della presenza di una cavità sottoglaciale e in caso affermativo la valutazione della sua geometria;
- la valutazione della presenza di acqua all'interno della cavità endoglaciale, se confermata;
- la possibilità di rilevare e mappare il substrato roccioso.

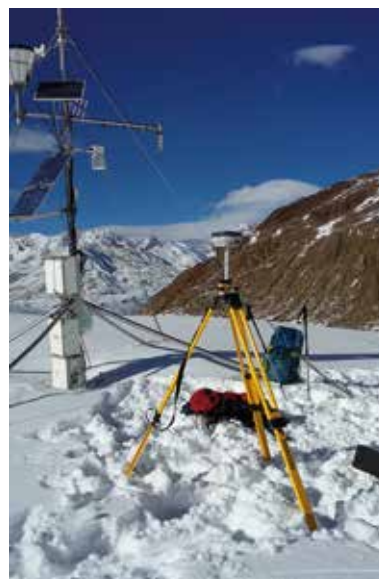
Nello specifico sono stati condotti due tipologie di indagini di terreno:

Rilievi topografici GNSS

Rilievi effettuati con strumentazione SOKKIA GRX1 e TOPCON GR5, in modalità *Base Rover*, centrata in prossimità delle stazioni automatiche (Fig. 5). In particolare i rilievi topografici sono stati condotti al fine di ubicare e modellare correttamente le indagini geofisiche effettuate con metodologia georadar (vedi paragrafo seguente).

Rilievi georadar

Sono stati utilizzati un georadar multicanale con frequenza centrale 200-600 MHz (georadar IDS STREAM X a 8 antenne a 200 MHz, di larghezza pari a 1 m) e uno monocanale con frequenza centrale 100 MHz (GSSI TerraSIRch SIR System-3000) con accoppiamento in continuo al sistema di georeferenziazione mediante strumentazione satellitare (Figg. 6 e 7).



Da sinistra:

Fig. 4 - Seraccata del Monte Vioz, interrotta dall'estate 2015.

Fig. 5 - Base Rover nel corso dei rilievi di ottobre 2015.

In totale sono state acquisite 11 sezioni radar per circa 1200 m complessivi lineari (Fig. 8).

Ogni singola scansione radar è stata sottoposta ai necessari filtri (*background removal, vertical bandpass filter, etc.*) al fine di una loro migliore interpretabilità. Successivamente si sono abbinati i dati geometrici della topografia in modo da ubicare correttamente le riflessioni. Per la trasposizione da tempo a profondità è stata utilizzata la velocità di 0,168 m/ns.

RISULTATI

Le condizioni dielettriche del ghiaccio hanno permesso di ottenere risultati leggibili fino a circa 20-25 m dal piano campagna, al di sotto si entra in un dominio fortemente conduttivo (individuabile in

tutte le scansioni radar), probabilmente per la presenza di ghiaccio misto ad acqua e a materiali fini e/o per importanti quantità d'acqua.

Dall'analisi dei dati radar si può pertanto ipotizzare la presenza di due domini sovrapposti a comportamento dielettrico differente, il primo superficiale di natura mediamente resistiva dei materiali presenti (ghiaccio e detriti sparsi), il secondo fortemente conduttivo (presenza di acque e/o materiale fine), che ha limitato la profondità d'investigazione consentendo la propagazione coerente dell'energia EM entro i primi 20-25 m.

All'interno dello strato resistivo sono individuabili strutture riconducibili a deformazioni fragili (crepacci) e duttili (foliazioni) che interessano lo spessore superiore

del ghiacciaio (in quanto danno origine ad evidenti riflettori), evidenziate dalla presenza dei crepacci circolari e pseudo-concentrici sulla superficie e dalla subsidenza in atto.

Tali morfologie divengono progressivamente meno evidenti al passaggio, intorno ai 20-25 m di profondità, da strato resistivo a strato conduttivo (Figg. 9 e 10).

Questa zona "critica" è presumibile sia caratterizzata da un repentino aumento del contenuto in acqua, che provoca un conseguente incremento della conduttività. Le onde elettromagnetiche subiscono pertanto una forte attenuazione e dissipazione, che riduce drasticamente la profondità d'investigazione, non permettendo una reale comprensione della geometria e della struttura della parte più profonda del ghiacciaio.

Sulla base di quanto emerso dalle indagini georadar, il notevole incremento del contenuto in acqua alla suddetta profondità critica è, allo stato attuale, l'unica ipotesi sostenibile e potrebbe essere collegato all'instaurarsi dei fenomeni superficiali descritti.

Con la tipologia di radar adottato non è stato possibile accertare la presenza di un vero e proprio lago effimero subglaciale e la stima delle sue dimensioni oppure di una tasca d'acqua endoglaciale o di ghiaccio imbevuto di acqua. A proposito di quest'ultima possibilità è noto che il ghiaccio temperato con inclusioni di acqua allo stato liquido determina zone di forte *scattering* dei segnali (Bamber, 1988; Hamran et al., 1996); va inoltre sottolineato che un altro fattore limitante dei rilievi RADAR è la presenza, come nel caso specifico, di vaste aree crepacciate (Dowdeswell et al., 1984; Huss et al., 2008).

Saranno quindi necessari altri rilievi multidisciplinari (glaciologici, geofisici, glaciopedologici) sia per chiarire queste ipotesi, sia per indagare le relazioni fra la presenza dell'acqua e i fenomeni superficiali, sia soprattutto per formulare scenari sulla loro evoluzione morfologica e idrologica (lenta subsidenza o formazione rapida di un "calderone del ghiacciaio" o "dolina glaciale").



Fig. 6 e 7 - Strumentazione IDS STREAM X a 8 antenne a 200 MHz ed esecuzione rilievi.



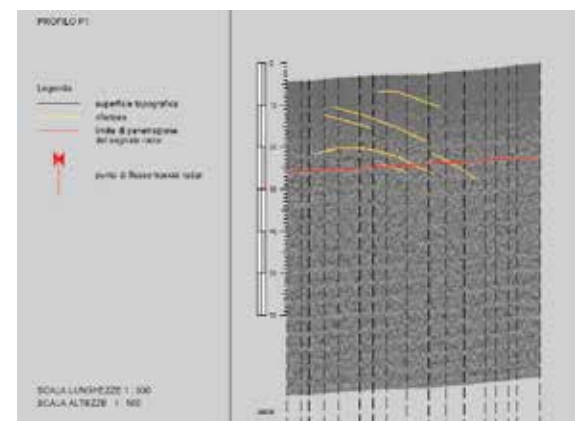
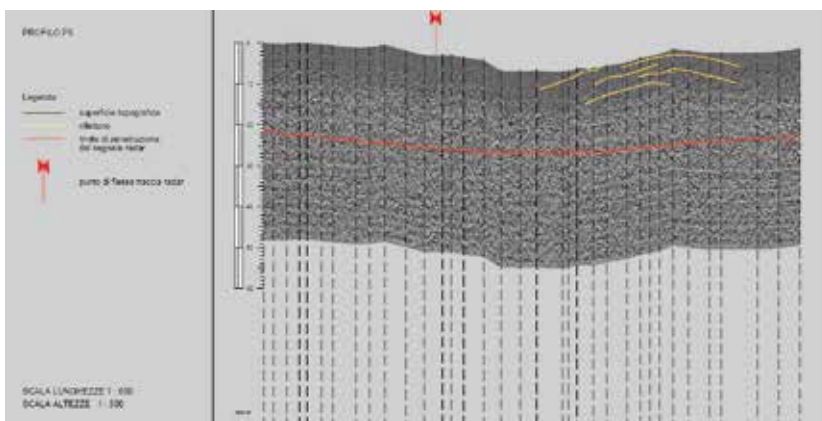


Fig. 8 - Ubicazione dei profili radar e localizzazione dei riflettori.

Sotto da sinistra:

Fig. 9 - Profilo P5 - Sezione Georadar - in evidenza i riflettori legati alle deformazioni del ghiacciaio (in giallo) e il limite di penetrazione del segnale radar.

Fig. 10 - Profilo P1 - Sezione Georadar - in evidenza i riflettori legati alle deformazioni del ghiacciaio (in giallo) e il limite di penetrazione del segnale radar.



Bibliografia

- Bamber J.L. (1988) - Enhanced radar scattering from water inclusions in ice. *Journal of Glaciology*, 35 (118).
- Björnsson H. (2010). Understanding jökulhlups: from tale to theory. *Journal of Glaciology*, 56 (200), 1002-1010.
- Citterio M., Diolaiuti G., Smiraglia C., Verza Gp. e Meraldi E. (2007) - Initial results from the Automatic Weather Station (AWS) on the ablation tongue of Forni Glacier (Upper Valtellina, Italy) . *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 141-151.
- D'Agata C., Bocchiola D., Maragno D., Smiraglia C. e Diolaiuti G.A. (2014) - Glacier shrinkage driven by climate change in the Ortles-Cevedale group (Stelvio National Park, Lombardy, Italian Alps) during half a century (1954-2007). *Theoretical Applied Climatology*, 116 (1-2), 169-190 <http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-013-0938-5>
- Diolaiuti G. e Smiraglia C. (2010) - Changing glaciers in a changing climate: how vanishing geomorphosites have been driving deep changes on mountain landscape and environment. *Géomorphologie: relief, processus, environnement (GRPE)*, 2, 131-152.
- Dowdesweel J.A., Drewry D.J., Liestol O. e Orheim O. (1984) - Radio echo-sounding of Spitsbergen glaciers: problems in the interpretation of layer and bottom returns. *Journal of Glaciology*, 30 (104), 16-21.
- Goodman R.H. (1975) - Radio Echo Sounding on temperate glacier. *Journal of Glaciology*, 14 (70), 135-142.
- Hamran S., Aarholt E., Hagen J.O. e Mo P. (1996) - Estimation of relative water content in a sub-polar glacier using surface-penetration radar. *Journal of Glaciology*, 42 (142), 533-537.
- Huggel C., Käbb A., Haerberli W., Teyssere P. e Paul F. (2002) - Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Can. Geotech. Journal*. 39, 316-330.
- Huss M., Farinotti D., Bauder A. e Funk M. (2008) - Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrol. Process.* 22, 3888-3902.
- Mortara G. (2013) - Un percorso di maturazione culturale sui rischi naturali della criosfera: da Glaciorisk a GlaRiskAlp. *Nimbus*, 69-70, 8-10.
- Plewes L. A. e Hubbard, B. (2001) - A review of the use of radio-echo sounding in glaciology- *Progress in Physical Geography*, 25 (2), 203-236.
- Senese A., Diolaiuti G., Mihalcea C. e Smiraglia C. (2012) - Energy and mass balance of Forni Glacier (Stelvio National Park, Italian Alps) from a 4-year meteorological data record. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44 (1), 122-134.
- Senese A., Diolaiuti G., Verza GP. e Smiraglia C. (2012a) - Surface energy budget and melt amount for the years 2009 and 2010 at the Forni Glacier (Italian Alps, Lombardy). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 35, 69-77, DOI 10.4461/GFDQ.2012.35.7
- Senese A., Diolaiuti G., Mihalcea C. e Smiraglia C. (2012b) - Energy and mass balance of Forni Glacier (Stelvio National Park, Italian Alps) from a 4-year meteorological data record. *Arctic, Antarctic, Alpine Research*, 44 (1), 122-134.
- Senese A., Maugeri M., Vuillermoz E., Smiraglia C. e Diolaiuti, G. (2014) - Using daily air temperature thresholds to evaluate snow melting occurrence and amount on Alpine glaciers by T-index models: the case study of the Forni Glacier (Italy). *The Cryosphere*, 8, 1921-1933.
- Smiraglia C., Azzoni R.S., D'Agata C., Maragno D., Fugazza D. e Diolaiuti G. (2015) - The evolution of the Italian glaciers from the previous data base to the New Italian Inventory. Preliminary considerations and results. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 38, 79.87.
- Tognini P. (2008) - L'evoluzione delle grotte glaciali del ghiacciaio dei Forni. *Il Grottesco*, 55.
- Zirizzotti A., Urbini S., Cafarella L. e Baskaradase (2009) - Radar Systems for Glaciology. In: Kouermou G. (editor), *Radar Technology*, INTECH, Rijeka.