

CRIO-GEOFISICA

A. Godio

Dipartimento di Ingegneria Ambientale, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino

Introduzione. In ambito glaciologico, la pericolosità è spesso associabile ai fenomeni, anche recenti, di rapida deglaciazione delle aree glaciali con conseguenti fenomeni di repentini crolli di ghiaccio e roccia oppure a rilasci di volumi di acque trattenuti all'interno dei ghiacciai (laghi endoglaciali). Molti di tali fenomeni sono legati ad alternanze di periodi di accumulo di neve e formazione di ghiaccio (periodi freddi) e periodi caldi, ai quali si associano fenomeni di fusione, infiltrazione di volumi di acqua all'interno di cavità, formazione di condotti e cavità endoglaciali. Tali fenomeni possono essere monitorati con approcci diversi, tra i quali i metodi geofisici; essi consentono di analizzare alcune peculiarità delle strutture endoglaciali o valutare spessori di neve e ghiaccio oppure definire le proprietà meccaniche del ghiaccio o del manto nevoso.

In un contesto di profondi mutamenti della criosfera delle Alpi, congiuntamente con la caratterizzazione geotecnica dei materiali che compongono la criosfera (e.g. Ferrero *et al.*, 2014), la geofisica applicata si rivela di particolare efficacia al fine di individuare elementi di rischio in ambiente alpino. Si illustrano i diversi approcci di geofisica applicata utilizzati nel valutare le condizioni di pericolosità in ambito glaciologico e nivologico, limitando la presentazione alle problematiche connesse con gli apparati glaciali e con il manto nevoso in ambiente alpino (Carturan *et al.*, 2013; Forte *et al.*, 2015). Per brevità non certo per importanza, si tralascia, in questa sede, la discussione relativa ai pericoli connessi con crolli di roccia e detrito, a seguito degli effetti di variazioni climatiche.

Pericolosità correlata al ritiro dei ghiacciai. Una delle conseguenze più ovvie del cambiamento climatico nei siti alpini è il diffuso ritiro e la disintegrazione dei ghiacciai (Zemp *et al.*, 2007; Diolaiuti *et al.*, 2011). Le conseguenze per i rischi naturali in seguito a variazioni sempre più rapide dei ghiacciai sono molteplici e comprendono la formazione di laghi marginali, accumuli di volumi di acqua endoglaciale, valanghe di ghiaccio e movimenti di massa provenienti dal de-tensionamento delle pareti e del substrato precedentemente glacializzati.

La rapida formazione e la crescita di laghi proglaciali negli ultimi anni è un fenomeno globale ampiamente osservato in gran parte delle Alpi svizzere e italiane (Künzler *et al.*, 2010). Alcuni dei laghi sono diventati importanti attrazioni turistiche, ma esiste una preoccupazione notevole per i rischi in caso di repentina esplosione di un lago che potrebbe essere innescato da valanghe di ghiaccio o rocce. Lo scenario plausibile prevede che, in un prossimo futuro, i fenomeni di deglaciazione e il ritiro dei ghiacciai possano determinare la formazione di molteplici laghi marginali e un intensificarsi di fenomeni di inondazioni e di scoppio di laghi endoglaciali (Frey *et al.*, 2010).

I repentini svuotamenti di laghi glaciali hanno provocato e continuano a determinare ingenti danni materiali e perdite di vite umane; esempi storici quali quello della Tete Rousse (1892) e più recenti in Nepal e India ne sono testimonianza diretta. Tali fenomeni sulle Alpi hanno in genere dimensioni più ridotte; i laghi di natura glaciale sulle Alpi sono generalmente più piccoli che in Nepal anche se le infrastrutture e gli insediamenti si trovano molto più vicini alla zona di pericolo. Di conseguenza, anche piccoli laghi glaciali possono causare notevoli danni (Haeberli, 1983). Tutto questo avviene in una delle catene montuose più popolate del mondo, dove si assiste ad un costante avanzamento delle infrastrutture e degli insediamenti in alte zone alpine. Nelle Alpi svizzere, fin dall'inizio della "Little Ice Age", si sono osservate oltre 100 inondazioni insolite (non periodiche), coinvolgendo meno di 40 ghiacciai, ossia circa il 2-3% di tutti i ghiacciai svizzeri. Gli eventi si concentrano nelle valli meridionali del Canton Vallese e si verificano più frequentemente nei mesi di giugno, luglio e agosto, a seguito della fusione della copertura nivale (Haeberli, 1983; www.glacier-hazards.ch).

I maggiori fenomeni di pericolosità sono tipici dei ghiacciai temperati dove sono più intensi i fenomeni di fusione nivale e di parte del ghiaccio, con conseguente formazione di

reticolo superficiale e interno di percorsi idrici. L'acqua di fusione derivante dal ghiacciaio si infila all'interno attraverso condotti verticali e lungo reticolo sotterraneo sub-orizzontale, che, scorrendo al di sotto del ghiacciaio stesso, al contatto con il substrato roccioso, provoca fenomeni di sotto-escavazione glaciale capaci di formare vere e proprie cavità endoglaciali. Le cavità si riempiono progressivamente della stessa acqua di fusione che le ha create. Il collasso culmina con il crollo della volta della cavità e, in funzione delle dinamiche della rete drenante endoglaciale, può rapidamente esaurirsi con la fusione del ghiaccio crollato, lasciando solamente una cicatrice nel ghiacciaio. Infine la concentrazione di ingenti volumi in cavità di notevoli dimensioni determina il rischio di sovrappressioni e/o di rottura dei margini glaciali.

Il monitoraggio geofisico. La geofisica applicata assume un ampio e diversificato ruolo per la caratterizzazione delle geometrie, l'individuazione di potenziali strutture o volumi pericolosi, la stima dei parametri meccanici delle masse glaciali o dei depositi morenici. In particolare, l'integrazione di indagini georadar e sismiche consente valutazioni di dettaglio circa la geometria e la densità della neve e del ghiaccio, o degli apparati morenici. Esempi di applicazione integrata di metodi geofisici, sismici ed elettromagnetici, per caratterizzare le proprietà meccaniche dei materiali che compongono la criosfera e per individuare e monitorare i principali elementi endoglaciali sono ampiamente riportati in letteratura (e.g. Arcone, 1996; Arcone *et al.*, 1998; Godio and Rege, 2015).

I metodi radar e/o sismici vengono adottati per la caratterizzazione della morfologia del substrato roccioso, e per verificare la presenza e la natura dei condotti e delle cavità, che costituiscono il reticolo idrologico interno. La presenza di acqua in cavità interne a ghiacciai temperati è stata individuata in diversi contesti attraverso misure georadar (Murray *et al.*, 2000). Tali studi non hanno una valenza puramente speculativa ma concorrono alla valutazione della pericolosità legata ad esempio ad accumuli di acqua endoglaciale. A titolo di esempio si riporta lo studio geofisico del ghiacciaio della Tete Rousse (Monte Bianco), dove l'integrazione di indagini georadar e misure di risonanza magnetica nucleare (NMR) (Legchenko *et al.*, 2014) ha permesso di individuare una cavità di circa 50.000 m³ di acqua, fondamentale per definire un intervento di messa in sicurezza del ghiacciaio con operazioni di perforazione e drenaggio (Vincent *et al.*, 2010).

Anche in Italia, lo studio preventivo e il monitoraggio delle strutture glaciali viene intensificato al fine di individuare la presenza di strutture endoglaciali e stimare i volumi di acqua accumulata all'interno delle cavità. L'obiettivo è quello di analizzare il pericolo associato a fenomeni di rapido svuotamento di laghi o di volumi di acqua trattenuta all'interno di strutture glaciali (Mercalli *et al.*, 2002a) o a margine di morene. A titolo di esempio si ricorda come nel massiccio del Monte Rosa, alla fronte del ghiacciaio delle Locce si sviluppa l'omonimo lago proglaciale, noto per gli improvvisi svuotamenti, che negli anni settanta misero a repentaglio la sicurezza dell'abitato sottostante (Macugnaga) (Mercalli *et al.*, 2002b). In tale contesto una serie di indagini georadar ha permesso di individuare definire gli spessori di ghiaccio nella zona a monte del lago (Tamburini *et al.*, 2008).

In parallelo alle metodologie sismiche e georadar, la sismologia applicata alla glaciologia si sta affermando come una disciplina giovane ma in rapida evoluzione. Con l'avvento di strumentazione sismica di ultima generazione, più economica e portatile, è ora possibile installare sensori in prossimità dei ghiacciai. Lo spettro sismico compreso tra centinaia di secondi e centinaia di Hertz fornisce importanti indicazioni relativamente a vari processi dinamici del ghiaccio, difficili o impossibili da studiare con tecniche convenzionali (Podolskiy e Walter, 2016). Esempi significativi di sismicità indotta dall'attività dei ghiacciai si riferiscono alla formazione ed all'estensione di crepacci superficiali (Colgan *et al.*, 2016).

Mentre gli eventi di scorrimento di ghiaccio sembrano essere una caratteristica importante della dinamica glaciale in Antartide, con conseguente rilevante sismicità indotta, non è chiaro come questo tipo di sismicità sia diffuso nelle regioni alpine. Molti studi riportano una mancanza di sismicità rilevabile sotto i ghiacciai alpini nell'emisfero nord (Moore *et al.*, 2013; Pomeroy *et*

al., 2013). Anche se presente, la sismicità basale sotto i ghiacciai alpini non può essere correlata allo scivolamento, bensì all'apertura e alla chiusura delle fratture di trazione nelle zone basali del ghiacciaio. La ragione di questa differenza è una questione aperta; una possibile spiegazione in termini di attività subglaciale è correlata alla bassa viscosità del ghiaccio temperato che porta ad una maggiore dissipazione viscosa dello stress accumulato. Inoltre si ha una oggettiva difficoltà nel rilevare i segnali basali in ghiacciai temperati a causa del basso rapporto segnale-rumore; pertanto la possibilità di rilevare lo scorrimento basale di taglio è meno probabile rispetto ai ghiacciai "freddi".

Analisi di fenomeni valanghivi. Nel contesto nivologico, l'approccio geofisico con metodi sismici ed elettromagnetici è spesso funzionale alla caratterizzazione e monitoraggio delle proprietà meccaniche e/o al contenuto di acqua libera all'interno del manto nevoso. La valutazione di tali parametri permette di stimare il pericolo e l'imminenza di un distacco valanghivo di tipo snow-gliding. Sensori di tipo elettromagnetico e monitoraggio con dispositivi georadar in modalità up-looking costituiscono un approccio consolidato per il monitoraggio di tali fenomeni (Heilig *et al.*, 2009; Heilig *et al.*, 2010).

Gli studi più recenti hanno dimostrato come le variazioni repentine della densità e dell'umidità del manto nevoso costituiscano un possibile indicatore e al tempo stesso elementi di triggering di fenomeni valanghivi (Jones, 2004); l'integrazione di dispositivi a basso costo [ad esempio i sensori tipo WCR, water content reflectometer: Stein *et al.* (1997)] e georadar rappresenta una valida soluzione tecnologica per il monitoraggio stagionale dell'evoluzione di tali parametri (Godio *et al.*, 2015). Nel contempo si sviluppano metodi sempre più affidabili per analizzare i profili verticali di velocità del manto nevoso sia stagionale e sia di accumulo al di sopra di apparati glaciali (Forte *et al.*, 2013, 2014); in questo secondo caso si cerca di valutare le modalità di stratificazione della neve stagionale al di sopra degli strati di neve più vecchia, che si sta trasformando in firn e successivamente in ghiaccio (Godio, 2016).

In parallelo, gli studi relativi allo sviluppo di relazioni costitutive tra i dati geofisici e le proprietà fisiche della neve e del ghiaccio (Sihvola *et al.*, 1985) permettono di ricavare correlazioni sempre più accurate dei parametri idrologici e meccanici del manto nevoso al fine di spazializzare alle diverse scale, versante e bacino, i dati georadar (Previati *et al.*, 2012).

Conclusioni. Si è inteso illustrare lo stato dell'arte in merito alle possibili applicazioni di metodi geofisici per la caratterizzazione di neve e di apparati glaciali in ambiente alpino, con particolare enfasi dato allo sviluppo di metodologie integrate per la caratterizzazione della pericolosità, associata all'ambiente in alta quota. Gli sviluppi più recenti sono finalizzati alla caratterizzazione delle discontinuità e delle cavità interne agli apparati glaciali, alle quali sono potenzialmente associabili fenomeni di repentini crolli e potenziali svuotamenti di acqua. In modo altrettanto sistematico si stanno sviluppando metodologie integrate per la caratterizzazione e il monitoraggio delle proprietà fisiche del manto nevoso (sia neve stagionale, sia in bacini di accumulo di apparati glaciali); tali studi sono di rilevante impatto per la definizione e il monitoraggio dei fenomeni valanghivi.

Ringraziamenti Si ringrazia il prezioso lavoro di acquisizione e elaborazione dati di Diego Franco (Politecnico di Torino), la collaborazione di Cesare Comina (Università di Torino) e la disponibilità di Fondazione Montagna sicura, Entreves (AO).

Bibliografia

- Arcone S.A.; 1996: *High resolution of glacial ice stratigraphy: a ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antartica*. Geophysics, **61**(6), 1653-1663.
- Arcone S.A., Lawson D.E., Delaney A.J.; 1995: *Short-pulse radar wavelet recovery and resolution of dielectric contrasts within englacial and basal ice of Matanuska Glacier, Alaska, USA*. Journal of Glaciology, **41**, 68-86.
- Carturan L. et al. ; 2013: *Decay of a long-term monitored glacier, The Careser glacier (Ortles-Cevedale, European Alps)*, The Cryosphere, Copernicus, **7**, doi: 10.5194/tc-7-1819-2013
- Colgan, W., Rajaram H., Abdalati W., McCutchan C., Mottram R., Moussavi M. S., Grigsby S.; 2016: *Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications*, Rev. Geophys., **54**, 119-161, doi: 10.1002/2015RG000504.

- Diolaiuti G.A., Maragno D., D'Agata C., Smiraglia C., Bocchiola D.; 2011: *Glacier retreat and climate change: documenting the last 50 years of Alpine glacier history from area and geometry changes of Dosde Piazzi glaciers (Lombardy Alps, Italy)*. Prog. Phys. Geogr., **35**, 161-182.
- Ferrero A., Godio A., Migliazza M., Sambuelli L., Segalini A., Theodule A.; 2014: *Geotechnical and Geophysical Characterization of Frozen Granular Material*, In: Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Springer International Publishing, 205-218.
- Forte, E., Dossi, M., Colucci, R.R., Pipan, M.; 2013: A new fast methodology to estimate the density of frozen materials by means of common offset GPR data. Journal of Applied Geophysics. **99**, 135-145. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.08.013.
- Forte, E., Dossi, M., Pipan, M., Colucci, R.R.; 2014: *Velocity analysis from common offset GPR data inversion: theory and application to synthetic and real data*. Geophys. J. Int. **197**, 1471-1483.
- Forte E., Pipan M., Francese R., Godio A.; 2015: *An overview of GPR investigation in the Italian Alps*. First Break, **33**, 8, 61 – 67.
- Frey H., Haerberli W., Linsbauer A., Huggel C., and Paul F., 2010: *A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., **10**, 339-352.
- Godio, A., 2008. *Performance and experimental evidence of GPR in density estimates of snowpack*, Boll. Geofis. Teor. Appl. **49**, 279-298.
- Godio A., Franco D., Chiaia B., Frigo B., Dublanc L. et al.; 2015: *Seasonal monitoring of snow properties by WCR and up-GPR*, Near Surface Geoscience 2015-21st European Conference, Torino, 4 pp.
- Godio A., Rege R.B.; 2015: *The mechanical properties of snow and ice of an alpine glacier inferred by integrating seismic and GPR methods*. Journal of Applied Geophysics, **115**, 92-99.
- Godio A.; 2016: *Multi population genetic algorithm to estimate snow properties from GPR data*. Journal of Applied Geophysics, **131**, 133-144.
- Haerberli F.; 1983: *Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps*. Annals of Glaciology, **4**(1), 85-90.
- Heilig A., Schneebeli M., Eisen O.; 2009: *Upward-looking ground-penetrating radar for monitoring snowpack stratigraphy*. Cold Reg. Sci. Technol., **59**(2-3), 152-162 (doi: 10.1016/j.coldregions.2009.07.008)
- Heilig A., Eisen O., Schneebeli M.; 2010: *Temporal observations of a seasonal snowpack using upward-looking GPR*. Hydrol. Process., **24** (22), 3133-3145 (doi: 10.1002/hyp.7749)
- Jones A.; 2004: *Review of glide processes and glide avalanche release*. Avalanche News, **69**(7), 53-60.
- Künzler, M., Huggel, C., Linsbauer, A., Haerberli, W.; 2010: *Emerging risks related to new lakes in deglaciating areas of the Alps*. In: Mountain Risks: Bringing Science to Society. Proc. of the Mountain Risk' Int. Conf., November 2010, Firenze, Italy, CERG Editions, Strasbourg, France, 453-458.
- Legchenko, A.; Vincent, C.; Baltassat, J.M.; Girard, J.F.; Thibert, E.; Gagliardini, O.; Desclotres, M.; Gilbert, A.; Garambois, S.; Chevalier, A.; Guyard, H. 2014: *Monitoring water accumulation in a glacier using magnetic resonance imaging*. The Cryosphere. **8**: 155-166.
- Mercalli L., Cat Berro D., Mortara G., Tamburini A.; 2002a: *Un lago sul ghiacciaio del Rocciamelone, Alpi Occidentali: caratteristiche e rischio potenziale*. NIMBUS Rivista Soc. Meteorologica Italiana, 23-24, VII (1-4), 3-9.
- Mortara G., Mercalli L.; 2002b: *Il lago epiglaciale "Effimero" sul ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga, Monte Rosa*. NIMBUS Rivista Soc. Meteorologica Italiana, 23-24, VII (1-4), 10-17.
- Moore, P.L., Winberry, J. P., Iverson, N. R.; Christianson, Knut A., et al. 2013: *Glacier Slip and Seismicity Induced by Surface Melt*. Natural Resource Ecology and Management Pub. 91. http://lib.dr.iastate.edu/nrem_pubs/91
- Murray T., Stuart G.W., Fry M., Gamble N.H. and Crabtree M.D.; 2000: *Englacial water distribution in a temperate glacier from surface and borehole radar velocity analysis*. Journal of Glaciology, **46** (154), 389-398.
- Picotti S., Francese R., Giorgi M., Pettenati F., Carcione J.M.; 2017: *Estimation of glacier thicknesses and basal properties using the horizontal-to-vertical component spectral ratio (HVSr) technique from passive seismic data*, Journal of Glaciology, **63**, 229-248, <https://doi.org/10.1017/jog.2016.135>.
- Podolskiy E.A., Walter F.; 2016: *Cryoseismology*, Reviews of Geophysics, **54** (4), 708.
- Pomeroy, J., Brisbourne A., Evans J., Graham D.; 2013: *The search for seismic signatures of movement at the glacier bed in a polythermal valley glacier*, Ann. Glaciol., **54**(64), 149-156, doi:10.3189/2013AoG64A203.
- Pomeroy, J. W., Bernhardt M., Marks D.; 2015: *Water resources: Research network to track alpine water*, Nature, **521** (7550), 156-157, doi:10.1038/521032c.
- Previati M., Godio A., Ferraris S., 2012. *Validation of spatial variability of snowpack thickness and density obtained with GPR and TDR methods*. Journal of Applied Geophysics **75**(2), 284-293.
- Rege, R.B., Godio, A., 2012. *Multimodal inversion of guided waves in georadar data*. Journal of Applied Geophysics. **81**, 68-75. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.021.
- Tamburini A., Villa A., Villa F., Bruno V., Fratini P.: 2008: *Indagini Ground Penetrating Radar sul ghiacciaio settentrionale delle locce (Monte Rosa, Macugnaga)*. Approccio metodologico e risultati. NGGTS 2008, 393-395.

- Sihvola, A., Nyfors, E. and Tiuri, M.; 1985: Mixing formulae and experimental results for the dielectric constant of snow. *J. Glaciology* **31** (108), 163-170
- Stein, J., Laberge, G., Lèvesque, D.; 1997: *Monitoring the dry density and the liquid water content of snow using time domain reflectometry*. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **25**, 123–136.
- Stoffel M., Huggel C.; 2012: *Effects of climate change on mass movements in mountain environments*. *Prog. Phys. Geogr.*, **36**, 421-439.
- Vincent C., Garambois S., Thibert E., Lefèbvre E.; 2010: *Origin of the outburst flood from Glacier de Tête Rousse in 1892 (Mont Blanc area, France)*. *Journal of Glaciology*, 56, (198) 688-698.
- Zemp M., Haeberli W., Bajracharya S., Chinn T.J., Fountain A.G., et al.; 2007: *Glaciers and ice caps. Part I: Global overview and outlook. Part II: Glacier changes around the world Global Outlook for Ice and Snow*, UNEP. 115-152.