

Rischi glaciali in Valle d'Aosta

Monitoraggio e ricerca applicata

Davide Bertolo

Regione Autonoma Valle d'Aosta,
Assessorato territorio,
ambiente e opere pubbliche,
Struttura Attività geologiche

**Michèle Curtaz,
Claudio Lucianaz,
Marco Vagliasindi**

Fondazione Montagna sicura,
Courmayeur, Valle d'Aosta

I fenomeni di origine glaciale rappresentano una fonte di rischio importante nelle aree di montagna e nelle Alpi in particolare. Il rischio deriva dall'interazione tra le dinamiche glaciali, molto attive ed in rapida evoluzione anche – ma non solo – in relazione al cambiamento climatico, e la presenza antropica, in forte espansione nelle aree alpine nell'ultimo secolo. I principali rischi di origine glaciale derivano dal crollo di seracchi, dal collasso di ghiacciai temperati e dal rilascio improvviso di acqua accumulata nei ghiacciai stessi. Il territorio valdostano, per le sue caratteristiche, è particolarmente soggetto a tali rischi. Per questa ragione l'amministrazione regionale, tramite la Fondazione montagna sicura, ha attuato un piano di monitoraggio specifico per il rischio glaciale. Il piano si articola in diverse azioni, sia a livello dell'intero territorio sia per il monitoraggio di casi specifici.



INTRODUZIONE

I ghiacciai e la criosfera in generale sono ambienti caratterizzati da una rapida evoluzione che si traduce in processi geomorfologici in grado di provocare un'alterazione delle condizioni di equilibrio dei versanti e determinare quindi dei dissesti. La presenza di elementi antropici vulnerabili, quali ad esempio aree edificate o infrastrutture, nelle aree di potenziale espansione di questi fenomeni genera delle situazioni di rischio. Si parla quindi di **rischi di origine glaciale** (in seguito per brevità "rischi glaciali"), in tutti i casi in cui processi che si originano da ambienti glacializzati, propagandosi, arrivano ad interferire con aree antropizzate o infrastrutturate.

L'evoluzione degli ambienti glaciali e periglaciali è un fenomeno naturale, che avviene in qualsiasi condizione, e non è necessariamente ed esclusivamente legata al *global warming*. Tuttavia, essendo principalmente determinata da forzanti meteorologiche, tale evoluzione diventa particolarmente sensibile in condizioni di rapido ed accentuato cambiamento del clima.

Le Alpi sono una delle aree geografiche in cui l'attuale fase di riscaldamento climatico è più accentuata: dalla fine del XIX secolo, la temperatura media è aumen-

tata di 2°C, oltre il doppio dell'aumento mediamente registrato nell'emisfero settentrionale. Pertanto i ghiacciai e la criosfera alpini stanno subendo una fase di importante riduzione e trasformazione, esemplificata dal dato di contrazione areale dei ghiacciai - valutata in oltre il 50% dal 1850 al 2000.

Queste comportano anche variazioni morfologiche che hanno una forte influenza sul paesaggio, sull'ambiente montano e sulle dinamiche di dissesto, come la scomparsa dei ghiacciai di più piccoli, la trasformazione di ghiacciai vallivi in ghiacciai sospesi, la copertura di detrito delle maggiori lingue glaciali. Allo stesso tempo, le Alpi sono una delle catene montuose con più elevato grado di antropizzazione, sia per ragioni storiche che per il recente sviluppo turistico e delle infrastrutture di comunicazione. Ne deriva che le regioni alpine sono fra le aree del mondo in cui le situazioni di rischio di origine glaciale sono maggiormente diffuse.

I DISSESTI DI ORIGINE GLACIALE E PERIGLACIALE

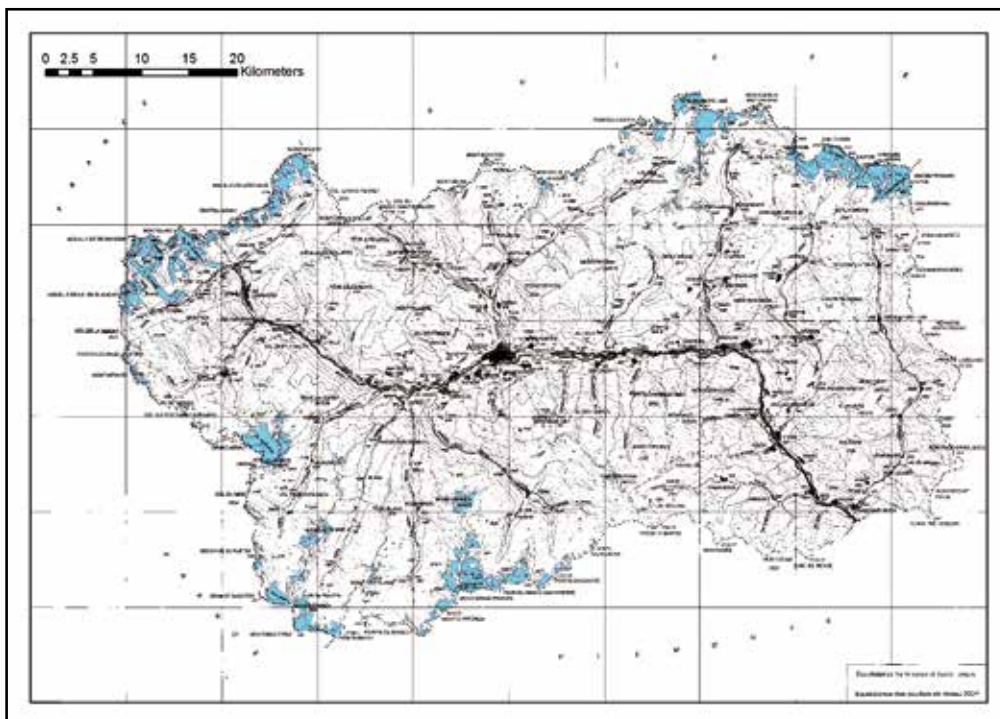
In generale, i dissesti di origine glaciale possono essere classificati in tre categorie principali.

Crollo di seracchi da ghiacciai sospesi. E' un fenomeno che interessa ghiacciai di tipo freddo, ossia senza circolazione di acqua liquida ed ancorati al substrato, posti su pendii molto ripidi ad alta quota. Si tratta di ghiacciai non bilanciati, in cui gli accumuli da precipitazione non sono compensati dalla fusione, e si ha pertanto una continua crescita della massa fino ad una situazione di disequilibrio che porta alla rottura meccanica ed al distacco di porzioni più o meno grandi di ghiaccio. E' un fenomeno periodico, che deve forzatamente avvenire per mantenere il ghiacciaio in uno stato di equilibrio. Questo tipo di dissesto non è quindi legato all'evoluzione climatica, anzi una diminuzione degli accumuli nevosi può portare ad una diminuzione della frequenza dei crolli. Il crollo di seracchi può provocare valanghe di ghiaccio o, in presenza di neve, innescare valanghe miste di grandi porzioni.

Collasso glaciale. E' un fenomeno che interessa i ghiacciai temperati (con circolazione di acqua liquida all'interno) o politermici (ghiacciai in cui la parte superiore è fredda e la parte inferiore temperata). L'instabilità di questi ghiacciai deriva da una combinazione tra le condizioni geometriche (pendenza) e la circolazione idrica. L'acqua gioca un ruolo chiave nel determinare l'instabilità, riducendo l'attrito ghiaccio/substrato e creando delle sovrappressioni idrauliche che favoriscono lo scollamento del ghiacciaio stesso. Questi fenomeni possono coinvolgere l'intero ghiacciaio o porzioni di grande volume, dando origine a valanghe di ghiaccio catastrofiche. L'innescò del collasso, risultando da una combinazione di diversi fattori, può prodursi in qualunque momento e non è di fatto prevedibile.

Rotta glaciale (*Glacial Lakes Outburst Flood - GLOF* o *Jökulhlaups*). Consiste nel rilascio improvviso di accumuli idrici formati all'interno del ghiacciaio (laghi endoglaciali), sulla sua superficie (laghi epiglaciali) o nelle aree perimetrali (laghi periglaciali). Una situazione tipica

Fig. 1 - Distribuzione dei ghiacciai sul territorio della Valle d'Aosta (Catasto Ghiacciai della R.A.V.A., 2005).



è quella di laghi che si formano tra le morene deposte dal ghiacciaio in fase di ritiro ed il ghiacciaio stesso. In assenza di drenaggio, l'accumulo d'acqua aumenta fino a che la pressione idrostatica supera la resistenza dello sbarramento o del ghiaccio circostante, e si verifica allora una rottura con rilascio improvviso di volumi d'acqua anche ingenti. Nel caso di accumuli endoglaciali, il fenomeno è praticamente non prevedibile. Le rotte glaciali possono provocare onde di piena improvvise e non correlate a eventi meteorici, o fenomeni di trasporto di massa o colate detritiche, il cui innesco è favorito dalla presenza di depositi non consolidati nelle aree periglaciali.

I dissesti di origine glaciale presentano caratteristiche che li rendono particolarmente critici dal punto di vista della gestione dei rischi. In generale si tratta di fenomeni caratterizzati da una frequenza di accadimento bassa ma da una elevata intensità, in termini di volume coinvolto (acqua o ghiaccio), o di energia. Il fatto di essere fenomeni poco frequenti o sporadici riduce le possibilità di studio volto alla previsione in termini temporali e alla localizzazione in termini spaziali. In secondo luogo si tratta di solito di fenomeni improvvisi, per i quali è difficile o talora impossibile individuare dei precursori, quantitativi o qualitativi, che ne consentano la previsione.

Infine, i fenomeni innescati dai dissesti glaciali - valanghe di ghiaccio o miste, ondate di piena e colate di fango o detrito - sono in grado di propagarsi con velocità molto elevate (da 50 fino a 300 km/h per le valanghe, 80-90 km/h per i *debris flow*) ed a notevoli distanze. Pertanto, anche se i ghiacciai possono sembrare degli oggetti "remoti" e le aree antropizzate sono poste a distanza, questo non significa che esse siano "a distanza di sicurezza".

Le variazioni morfologiche indotte dal cambiamento climatico si traducono in variazioni nelle condizioni di pericolosità, anche se non sempre necessariamente in un loro aumento. Ad esempio, la trasfor-

mazione di ghiacciai vallivi in ghiacciai sospesi genera nuove fronti sospese da cui si possono innescare crolli di seracchi. L'aumento della temperatura può cambiare il regime termico dei ghiacciai da freddi a temperati, cambiando quindi le dinamiche di dissesto a cui essi sono soggetti, e favorisce la formazione di accumuli idrici endoglaciali.

I RISCHI DI ORIGINE GLACIALE IN VALLE D'AOSTA

Il territorio della Valle d'Aosta presenta caratteristiche che lo rendono particolarmente soggetto ai rischi glaciali. Si tratta di un territorio montano (oltre il 50% del territorio è ad una quota superiore a 2000 m slm) in cui la presenza dei ghiacciai è rilevante sia in termini numerici che di superficie. Il dato riportato nel Catasto Ghiacciai della Regione autonoma Valle d'Aosta, attualmente aggiornato al 2005, indica la presenza di 209 ghiacciai che coprono una superficie di circa 135 km², poco meno del 5% del territorio regionale. I ghiacciai sono localizzati in corrispondenza dei principali gruppi montuosi (Monte Bianco, Monte Rosa-Cervino, Gran Paradiso) e sono per la maggior parte di piccole dimensioni (area inferiore a 1 km²). Negli ultimi anni essi hanno subito forti trasformazioni e una marcata riduzione areale, passando da 175 km² nel 1975 a 158 km² nel 1999, fino a 135 km² nel 2005.

Tra le caratteristiche geomorfologiche del territorio valdostano vi è l'elevata energia del rilievo: il fondovalle ha una quota minima di 340 m slm e si sviluppa a quote medie di poco più di 600 m slm, mentre i rilievi più alti superano i 4000 m e quasi tutte le valli laterali hanno rilievi che superano i 3000 m. Questo si traduce in un'elevata acclività dei versanti che favorisce l'innescio e la rapida propagazione di fenomeni gravitativi, tra cui i dissesti di origine glaciale.

La Valle d'Aosta presenta inoltre un elevato grado di antropizzazione: il forte sviluppo turistico ha portato alla realizzazione

di insediamenti ed infrastrutture in aree remote rispetto al fondovalle e vicine ai ghiacciai ed alle loro aree di influenza. In altre parole il territorio presenta numerosi elementi di vulnerabilità rispetto ai fenomeni di origine glaciale.

IL PIANO DI MONITORAGGIO DEL RISCHIO GLACIALE REGIONALE

L'elevata esposizione ai rischi di origine glaciale del territorio valdostano rende necessaria la presa in conto di tali problematiche nell'ambito della gestione del territorio e della protezione civile. La Regione autonoma Valle d'Aosta ed in particolare la Struttura organizzativa Attività geologiche del Dipartimento programmazione, opere pubbliche e difesa del suolo, ha messo in atto da alcuni anni un **piano di monitoraggio del rischio glaciale**, volto all'individuazione e prevenzione di questa tipologia di rischi. Il piano riguarda i fenomeni che possono interessare aree edificate o infrastrutture, escludendo totalmente i rischi soggettivi legati alla frequentazione alpinistica della montagna. Il piano è gestito da Fondazione montagna sicura, in stretta sinergia con le strutture regionali. Nello specifico esso si articola in due tipologie di attività:

• Individuazione e censimento delle situazioni di rischio glaciale presenti sul territorio regionale.

Partendo da dati storici di eventi di dissesto legati ai ghiacciai, contenuti in banche dati o archivi esistenti (tra cui quella del progetto *GLACIORISK*), si sono analizzate le condizioni geomorfologiche attuali di tutti i ghiacciai del territorio regionale per verificare la possibilità di propagazione di dissesti fino ad interagire con strutture antropiche individuando così i ghiacciai in grado di generare situazioni di rischio; infine si sono valutate le caratteristiche dei ghiacciai stessi per verificare l'effettiva possibilità dell'occorrenza di fenomeni di dissesto.

Per tenere conto della continua evoluzione dei settori glaciali, la valutazione delle condizioni morfologiche e glaciologiche

Il lago glaciale del Ghiacciaio del Lys e la valle di Gressoney.

Settore frontale del ghiacciaio di Planpincieux, Val Ferret.



viene svolta, a scala regionale, tramite un'analisi qualitativa di immagini fotografiche riprese da elicottero con frequenza annuale. Le analisi relative alla possibilità di propagazione e interferenza con aree antropizzate vengono effettuate tramite GIS. Tutti i dati sono immagazzinati all'interno di un geodatabase ed in schede monografiche, aggiornati annualmente. Allo stato attuale sono stati individuati 22 ghiacciai in grado di dare luogo a potenziali situazioni di rischio. L'evoluzione di questi ghiacciai viene controllata a livello qualitativo. Per alcune situazioni, illustrate in seguito si sono resi necessari interventi più specifici, consistenti in indagini e studi fino ad arrivare a monitoraggi veri e propri.

• **Predisposizione di un piano di studio e monitoraggio per tutti i casi di potenziale rischio (a medio-breve termine) differenziato secondo il tipo di dinamica ed il grado di pericolosità.**

Per le situazioni che presentano un rischio a breve o medio termine, si rende necessario adottare un controllo specifico per la prevenzione dei rischi stessi. I casi attualmente individuati in Valle d'Aosta

sono tre, e comprendono le tre principali tipologie di rischio glaciale: Il Ghiacciaio delle Grandes Jorasses, in comune di Courmayeur (ghiacciaio sospeso freddo), il Ghiacciaio di Planpincieux, sottostante al precedente, (ghiacciaio politermico con circolazione idrica), il Ghiacciaio del Lys, nella Valle di Gressoney (formazione di un lago glaciale). Nel seguito dell'articolo verranno illustrati i tre casi citati e le misure di monitoraggio adottate.

A livello metodologico, lo studio ed il monitoraggio dei fenomeni glaciali sono particolarmente complessi. Innanzitutto si ha a che fare con grandezze fisiche molto diverse, che vanno dalla velocità di movimento di un ghiacciaio sospeso, al livello di un lago glaciale, alle variazioni morfologiche di un fronte glaciale. I settori da monitorare sono situati in siti con accessibilità difficile e con condizioni ambientali (temperatura, precipitazioni, vento) gravose. L'insorgere di situazioni potenzialmente critiche è spesso improvviso, e richiede di mettere in atto misure di controllo, adattate all'ambiente glaciale, in tempi rapidi. Molte metodologie o strumenti adatti al monitoraggio in condizioni più favorevoli, diventano

difficilmente utilizzabili in siti di difficile accesso, con temperature rigide e con difficoltà di alimentazione. Per questo motivo, all'interno del piano di monitoraggio è stata effettuata, e viene continuamente aggiornata, un'analisi dei metodi di monitoraggio utilizzabili per le differenti situazioni, ma anche delle soluzioni di adattamento per impiegarli in ambienti difficili. I metodi presi in esame comprendono tecnologie recenti avanzate, quali ad esempio LIDAR, radar terrestre, GPR aereotrasportato, fotogrammetria digitale. Ove possibile, tali metodi vengono testati, in collaborazione con università e centri di ricerca, in situazioni non critiche, al fine di poter disporre di soluzioni tecniche efficaci pronte da utilizzare anche in situazioni di emergenza. In alcuni casi, il test e l'utilizzo di tali metodi assumono il carattere di vera e propria ricerca applicata.

IL LAGO GLACIALE DEL GHIACCIAIO DEL LYS (GRESSONEY-LATRINITÉ)

La lingua del Ghiacciaio del Lys, staccatasi dal corpo principale nel 2007, ha subito una forte contrazione. La circolazione

idrica subglaciale provoca la fusione dal basso del ghiaccio che si assottiglia fino al collasso della parte superiore, con lo sviluppo di cavità. Una cavità formatasi al margine sinistro della lingua a partire dal 2005 si è evoluta fino a costituire un vero e proprio bacino lacustre di circa 200 m di lunghezza e 70 di larghezza. Il bacino è separato dalla zona proglaciale, pianeggiante e a sua volta occupata da una serie di laghi da cui prende origine il torrente Lys, da uno sbarramento costituito da ghiaccio coperto e da detrito.

La problematica

L'accumulo idrico è confinato da uno sbarramento formato da ghiaccio e detrito, e con possibilità di interferenza con l'asta torrentizia del Lys, che percorre il fondovalle in prossimità di aree abitate. Si è reso quindi necessario valutare la possibilità di svuotamento improvviso e di conseguenti ondate lungo il torrente Lys.

Indagini e monitoraggio

Le prime indagini, iniziate nel 2010, sono state mirate a verificare l'eventuale incremento del livello del lago, e la conseguente possibilità di rilasci idrici improvvisi. Sono state posizionate aste idrometriche su cui sono state effettuate letture periodiche manuali. Parallelamente è stato effettuato un rilievo topografico – con l'appoggio della Struttura Assetto idrogeologico dei bacini montani regionale – per verificare l'effettivo volume eventualmente coinvolto in uno svuotamento. Il rilievo è stato successivamente integrato da una scansione LIDAR eseguita grazie alla collaborazione del DIATI del Politecnico di Torino. Tali rilievi hanno evidenziato che il lago è soggetto ad oscillazioni stagionali molto limitate, dell'ordine di 15-20 cm, e che il livello medio si trova ad una quota di poco superiore (circa 1 m) rispetto a quella dei laghi proglaciali da cui parte il torrente. Pertanto il volume coinvolto in un eventuale svuotamento potrebbe essere solo quello superiore a tale quota. Sono state quindi effettuate, in collaborazione con la Strutture Opere idrauliche, simulazioni

di *dam break* per verificare gli effetti in fondovalle di un eventuale rilascio. Tali simulazioni hanno messo in luce che il volume d'acqua che dovrebbe essere rilasciato per arrivare ad interessare con un'onda di piena strutture antropiche è superiore a quello che l'invaso è in grado di contenere nelle attuali condizioni. Pertanto a breve-medio termine non si ravvisa una situazione di rischio effettivo. Il monitoraggio del livello del lago e dell'evoluzione morfologica del settore prosegue comunque mediante rilievi periodici in sito, in considerazione della rapida evoluzione cui il sito è soggetto.

IL GHIACCIAIO DI PLANPINCIEUX (COURMAYEUR)

Il Ghiacciaio di Planpincieux è situato sul versante destro orografico della Val Ferret, sul versante meridionale della catena del Monte Bianco, ed insiste direttamente sul fondovalle, sulla strada comunale di accesso alla valle e sull'abitato da cui prende il nome. La presenza di uno scaricatore glaciale indica che il ghiacciaio, almeno nella parte inferiore, ha regime temperato.

La problematica

Una potenziale situazione di pericolosità,

relativa alla possibilità di crollo per scivolamento di volumi di ghiaccio dal settore frontale destro, è stata riconosciuta dal confronto fotografico svolto su immagini 2011-2012, condotto nell'ambito del Piano di monitoraggio del rischio glaciale, che ha evidenziato la formazione di una frattura anomala con elevata apertura. La situazione di rischio per il fondovalle è stata valutata tramite un'analisi degli scenari di valanga conseguenti a diverse ipotesi di volumi di crollo effettuata dall'istituto SLF di Davos. Quest'analisi ha evidenziato che il coinvolgimento del fondovalle, in particolare della strada, è possibile anche con il distacco di volumi medi (circa 200.000 m³). Non vi sono segnalazioni di eventi storici che abbiano coinvolto volumi elevati (una valanga catastrofica si verificò in questo settore nel 1952 ma non è certo che sia stata innescata da un crollo glaciale) tuttavia la morfologia e le caratteristiche del ghiacciaio sono compatibili con la dinamica del collasso glaciale. Per questo tipo di dinamica non è possibile una previsione temporale dei possibili fenomeni di crollo tramite parametri misurabili dei possibili fenomeni di crollo. Tuttavia esistono indizi morfologici che possono essere considerati precursori di una possibile destabilizzazione, tra cui l'apertura di

Il Ghiacciaio sospeso delle Grandes Jorasses (foto FMS, 2013).



nuove fratture o il rapido allargamento di quelle presenti e rapide variazioni nella posizione o nella portata del torrente subglaciale (). I fenomeni sono molto più probabili nel periodo estivo-autunnale.

Indagini e monitoraggio

Per una migliore comprensione della dinamica del ghiacciaio, si è scelto di installare un sistema di monitoraggio fotografico sul versante opposto del ghiacciaio.

Il sistema è stato progettato ed installato nel 2013 in collaborazione con il gruppo *Geohazard Monitoring Group* del Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica di Torino e prevede sia un monitoraggio qualitativo tramite confronto di immagini, sia l'applicazione di un metodo brevettato di correlazione di immagini (*IDMS* – Image detection Monitoring System) per arrivare alla misura quantitativa di spostamenti e deformazioni. Ad oggi sono disponibili oltre tre mesi di immagini riprese con frequenza oraria nella fascia diurna. Il confronto delle immagini di questo periodo mostra una elevata dinamicità del margine frontale, soggetto a frequenti crolli di piccoli volumi, ma non evidenzia segni indicanti a breve termine una destabilizzazione di volumi maggiori.

Nel caso del ghiacciaio di Planpincieux si sottolinea il carattere sperimentale del monitoraggio in atto, sia per quanto

riguarda il sistema fotografico ed il metodo di correlazione di immagini (*IDMS* – brevetto CNR IRPI), che viene applicato per la prima volta ad un ghiacciaio, sia per quanto attiene la comprensione della dinamica dei ghiacciai temperati che rappresenta un campo di studio tuttora aperto (5).

IL GHIACCIAIO DELLE GRANDES JORASSES (COURMAYEUR)

Il seracco del Ghiacciaio delle Grandes Jorasses è un ghiacciaio sospeso freddo. Situato su un pendio ripido interamente in zona di accumulo (a quote comprese tra 4000 e 4200 m slm), ha un bilancio di massa sempre positivo, pertanto la massa di firn e ghiaccio si accresce ogni anno fino a raggiungere condizioni di disequilibrio che portano al periodico distacco di volumi di ghiaccio che possono coinvolgere una parte o l'intero volume del ghiacciaio stesso. L'ultimo crollo totale si è verificato nell'estate 1998, generando una valanga di ghiaccio che ha raggiunto il fondovalle, senza conseguenze data l'assenza di neve; in seguito il seracco si è riformato fino a raggiungere nuovamente condizioni prossime all'equilibrio limite.

La problematica

Il ghiacciaio insiste sulla zona prossima al centro edificato di Planpincieux. Scenari

valanghivi elaborati dall'istituto SLF di Davos prendono in considerazione diverse combinazioni tra il volume di ghiaccio coinvolto nei possibili crolli e condizioni di innevamento e stabilità del manto nevoso sul versante sottostante. In caso di crollo totale (volume valutato in oltre 150.000 m³), anche in assenza di accumulo nevoso alla base, la valanga di ghiaccio è in grado di raggiungere la strada e la zona edificata di fondovalle. In presenza di manto nevoso instabile (pericolo valanghe grado 3 o superiore) anche crolli di volume minore possono generare valanghe miste di neve e ghiaccio con coinvolgimento delle aree di fondovalle.

Indagini e monitoraggio

Il Ghiacciaio delle Grandes Jorasses è stato oggetto di monitoraggio dal 1996 da parte del prof. M. Funk dell'istituto VAW dell'ETH di Zurigo. Il sistema di monitoraggio applicato permise all'epoca di prevedere il momento del crollo con uno scarto di soli due giorni. Il monitoraggio è poi ripreso dal 2008, a seguito della riformazione del seracco ghiacciaio sospeso e dell'apertura di fratture analoghe a quelle della fine anni '90, da parte della Fondazione Montagna sicura su incarico dell'amministrazione regionale e con la consulenza scientifica dello stesso prof. Funk.

Nel caso dei ghiacciai sospesi freddi, grazie alla casistica presente nelle Alpi e a numerosi studi condotti, è possibile un monitoraggio quantitativo tramite l'applicazione di una funzione esponenziale empirica che lega l'accelerazione del movimento del ghiacciaio stesso al momento del distacco (). Pertanto, misurando la velocità di spostamento di punti materializzati sulla superficie del ghiacciaio stesso, è possibile calcolarne l'accelerazione e, applicando un algoritmo di interpolazione, prevedere il momento del distacco. Attualmente è utilizzato un sistema di monitoraggio topografico composto da una stazione totale robotizzata a lunga portata (Leica TM30) e da prismi topografici posti su pali infissi nel ghiaccio. Le misure vengono effettuate

Sensori GNSS sulla superficie del Ghiacciaio delle Grandes Jorasses.



con frequenza oraria, corrette automaticamente grazie a due prismi fissi esterni al ghiacciaio, ed elaborate tramite un apposito codice di calcolo. Il sistema ha permesso, nel 2010, la previsione di un distacco parziale, che non ha provocato conseguenze per il fondovalle dato il volume ridotto. In condizioni "normali" i prismi fanno registrare velocità di spostamento di circa 4-5 cm/24h, con piccole oscillazioni stagionali legate alla temperatura, mentre dai casi noti in letteratura si considerano critiche velocità superiori a 30 cm/24h. Non esistono tuttavia valori soglia assoluti, ma è necessario valutare con continuità la velocità al fine di identificare eventuali accelerazioni.

Il sistema topografico tradizionale presenta una serie di limitazioni. In primo luogo necessità di visibilità ottica tra stazione totale e prismi e non è quindi operativo in condizioni di copertura nuvolosa o nebbia, molto frequenti nel settore in esame. Nella stagione invernale i prismi, nonostante siano posti su pali di adeguata lunghezza, rischiano talora di essere coperti da neve o da ghiaccio. Infine le condizioni di accesso particolarmente complesse (unicamente in elicottero) rendono difficile la gestione e manutenzione del sistema.

Allo scopo di ovviare alle limitazioni sopra descritte, nell'ambito del progetto *GlaRiskAlp* sono stati messi in atto a livello sperimentale alcuni sistemi di monitoraggio integrativi o alternativi a quello topografico.

Monitoraggio GNSS

Al fine di affiancare e sopperire, in caso di maltempo, al sistema topografico (stazione totale + prismi) è stato sviluppato e sperimentato un sistema basato sulla tecnologia GNSS (Global Navigation Satellite System), con l'impiego di ricevitori a basso costo posti sul seracco (in analogia ai prismi utilizzati per il sistema topografico) per la misura della velocità di movimento di quest'ultimo. La sperimentazione ha richiesto il superamento di molteplici problemi tecnici (ad es. le basse temperature che limitano la carica delle batterie) per

raggiungere gli obiettivi di progetto che richiedevano l'alimentazione continua dei ricevitori e la trasmissione dei dati in tempo reale alla sede di Fondazione Montagna sicura; a tal fine è stata creata una WSN (wireless sensors network) per la raccolta dei dati dai ricevitori GNSS e la loro trasmissione ad una stazione base posta nel fondovalle. I dati sono quindi stati elaborati con la tecnica DGPS (GPS differenziale) utilizzando per le correzioni la vicina stazione GNSS permanente del Ferrachet, e passando da precisioni di 3-5 metri a precisioni inferiori al centimetro compatibili con le velocità oggetto del monitoraggio.

Monitoraggio sismico

Lo scivolamento del ghiaccio genera dei microsismi dovuti all'attrito con il substrato e alle microfessurazioni del ghiaccio. In fase di accelerazione, la frequenza dei microsismi aumenta, pertanto la registrazione in tempo reale dell'attività sismica del seracco può costituire un metodo di previsione dei crolli. Si è quindi installato un sistema sperimentale costituito da un sismografo ed un geofono per registrare l'attività sismica del seracco e cercare una correlazione della stessa con le velocità registrate dagli altri sistemi. Il sistema è stato ingegnerizzato con un apparato di alimentazione e di trasmissione dei dati, (registrati anche in locale) tramite connessione GPRS al fine di avere un sistema operativo in tempo reale..

I dati sono stati elaborati al fine di estrapolare un indicatore correlabile alla velocità ed è stato identificato con la frequenza degli eventi sismici (eventi/giorno). Per estrarre la frequenza degli eventi è stato adottato un algoritmo in grado di filtrare il rumore di fondo e quindi contare automaticamente gli eventi sismici a maggior contenuto di energia. In particolare è stato utilizzato l'algoritmo STA/LTA (Short Time Average through Long Time Average). Vengono calcolate le medie sui segnali ricevuti (in modulo) in due finestre temporali mobili (una sottoinsieme dell'altra). Quindi eseguendo il rapporto tra le medie si rileva il superamento di un valore

di soglia opportunamente identificato.. Durante il periodo di sperimentazione si è riscontrato una buona correlazione tra l'attività sismica e la velocità del seracco; ma non è stato invece possibile osservare eventi di accelerazione antecedenti a crolli importanti di porzioni del seracco.

Bibliografia

- EEA (European Environment Agency), 2009. Regional climate change and adaptation; The Alps facing the challenge of changing water resources. EEA, Copenhagen, Report 8. doi: 10.2800/12552
- Zemp M, Paul F, Hoelzle M, and Haeberli W (2008) Glacier fluctuations in European Alps 1850–2000: An overview. In: Orlove B, Wiegandt E, and Luckman BH (eds) Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science and Society. Los Angeles, CA: University of California Press, 52–167
- Deline, P., Gardent, M., Magnin, F. and Ravel, L., 2012. The morphodynamics of the Mont Blanc massif in a changing cryosphere: a comprehensive review. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94, 265–283. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x.
- Failletaz J, Dalban P., Funk M, Vincent C., Diotri F - On the stability of steep glaciers in the Alps in EU/FP7 ACQWA Project – Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water – Deliverable Deliverable D.Science.8: Glacier response to climate change
- <http://catastoghiacciai.regione.vda.it/Ghiacciai/MainGhiacciai.html>
- GLACIORISK - Survey and prevention of extreme glaciological hazards, 5th framework Project
- Failletaz J., Funk M., Sornette D. – Instabilities on Alpine temperate glaciers: new insights arising from the numerical modeling of Allalingsletscher (Valais, Switzerland) – *Natural hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2977–2991, 2012.
- Pralong A., Funk M. – On the instability of avalanching glaciers - *Journal of Glaciology*, Vol. 52, No. 176, 2006
- GlaRiskAlp – Rischi glaciali nelle Alpi occidentali, Programma Operativo di cooperazione territoriale europea transfrontaliera Italia/Francia (Alpi) 2007/2013 "Alcotra"
- Failletaz J., Funk M., Sornette D. – Icequakes coupled with surface displacements for predicting glacier break-off, *Journal of Glaciology* 57 (203), 453–460 (2011)