

# Prove di multitracciamento di ghiacciai rocciosi e ambienti periglaciali nel Vallon de Réchy (VS) e nella Valle di Sceru (TI)

Stefano Mari<sup>1,2</sup>, Cristian Scapozza<sup>3</sup>, Sebastian Pera<sup>3</sup> e Reynald Delaloye<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Via ai Ronchi, CH-6936 Cademario, Svizzera

<sup>2</sup> Dipartimento di geoscienze, Università di Friburgo, Chemin du Musée 4, CH-1700 Friburgo, Svizzera

<sup>3</sup> Istituto scienze della Terra, SUPSI, Campus Trevano, CH-6952 Canobbio, Svizzera

*stefano.mari@bluewin.ch*

---

**Riassunto:** Le prove di multitracciamento eseguite nel Vallon de Réchy (Alpi vallesane) e nella Valle di Sceru (Alpi ticinesi) hanno permesso di ottenere informazioni sulle caratteristiche idriche di ghiacciai rocciosi di diverso grado di attività e, più in generale, dell'ambiente periglaciale di alta montagna. Mediante l'utilizzo congiunto di fluocaptori e di fluorimetri, è stato possibile ricostruire i percorsi dei coloranti utilizzati ed elaborare delle curve di restituzione degli stessi. Nel Vallon de Réchy, la ripetizione dei tracciamenti effettuati più di 20 anni fa da G. Tenthorey ha permesso di evidenziare come il probabile degrado del permafrost a seguito del riscaldamento climatico in atto abbia forse allungato i tempi di transito dei traccianti a causa di una maggiore fessurazione del corpo gelato. Nella Valle di Sceru, è stata provata una diversa dinamica idrologica tra i versanti destro e sinistro della valle. Nel versante sinistro, dove la presenza di permafrost è improbabile, si è verificata una rapida circolazione dei traccianti dovuta all'infiltrazione di un riale che riemerge al fronte del ghiacciaio roccioso fossile di Sceru I. Nel versante destro, dove la presenza di permafrost discontinuo è probabile, si è osservata una circolazione più lenta accompagnata da una forte diluizione del colorante alla sorgente Rongia di Sceru.

**Parole chiave:** permafrost, idrologia periglaciale, circolazione di coloranti, geofisica, Alpi svizzere

**Multiple water tracing of rockglaciers and periglacial environments in the Vallon de Réchy (VS) and in the Valle di Sceru (TI)**

**Abstract:** The multiple water tracing carried out in the Vallon de Réchy (Valais Alps) and in the Valle di Sceru (Ticino Alps) allowed to obtain important information about the hydrological behaviour of rockglaciers of different degree of activity and, more generally, of the high alpine periglacial environment. Thanks to the joint utilisation of fluocaptors and fluorimeters, it was possible to determine both the dye circulation and the dye's return curves. In the Vallon de Réchy, the reiteration of multiple water tracing carried out more of 20 years ago by G. Tenthorey allowed to put in evidence the probably permafrost thawing induced by the global warming, which has maybe lengthened the time of circulation of the dyes because of the bigger cracking of the frozen body. In the Valle di Sceru, a different hydrological dynamic between the two sides of the valley was proved. On the left side of the valley, where the presence of permafrost is improbable, a rapid circulation of the dyes, due to the seepage of a creek which re-emerges at the base of the front of the Sceru I relict rockglacier, was verified. On the right side, where the presence of discontinuous permafrost was put in evidence by thermal and geophysical measurements, a slower circulation velocity and a strong dilution of the injected dyes was observed.

**Keywords:** permafrost, periglacial hydrology, dye circulation, geophysics, Swiss Alps

---

## INTRODUZIONE

Fino a oggi, pochi lavori si sono interessati allo studio dell'idrologia dell'ambiente periglaciale alpino. Tuttavia, già alla fine degli anni Ottanta del secolo scorso sono stati effettuati dei tracciamenti in zone con presenza di permafrost (per es. Tenthorey, 1992, 1993; Krainer & Mostler, 2002). Questi lavori hanno studiato in particolare il tipo di circolazione all'interno di un ghiacciaio roccioso e il regime idrico delle sorgenti in

zona di permafrost continuo e discontinuo. Al fine di effettuare un confronto con la circolazione nei ghiacciai, si può citare il lavoro di Brugman (1987), che ha evidenziato l'elevata velocità di circolazione, paragonabile a quella degli ambienti carsici.

Le investigazioni idrologiche dei ghiacciai rocciosi sono tuttavia complesse da effettuare, dato che l'acqua scorre all'interno della massa di detriti rocciosi che li costituiscono. Inoltre, non sempre un ghiacciaio roccioso presenta perdite idonee a immettervi coloranti e

sorgenti al suo fronte che permettano di rintracciarli. Per queste ragioni e per motivi legati all'accessibilità sono stati scelti i siti del Vallon de Réchy (Vallese) e della Valle di Sceru (Ticino) per eseguire le indagini.

Gli obiettivi delle prove di multitracciamento eseguite in questo studio sono molteplici e variano secondo il sito di studio.

Nel Vallon de Réchy, lo scopo è di effettuare un confronto tra le prove di multitracciamento effettuate tra il 1986 e il 1990 da G. Tenthorey sui ghiacciai rocciosi attivi per trovare le eventuali differenze idrologiche avvenute in quest'ultimo ventennio a causa del probabile degrado del permafrost dovuto al riscaldamento climatico.

Il principale obiettivo della prova di multitracciamento eseguita nella Valle di Sceru è invece di verificare il comportamento idrologico in funzione della differente presenza di permafrost tra il versante sinistro e destro della valle (vedi Scapozza *et al.*, 2011). Un altro obiettivo, che sarà trattato in separata sede, è anche quello di verificare tramite la prova di multitracciamento i percorsi intrapresi dalle acque sotterranee evidenziati dalla prospezione geofisica superficiale, in particolare mediante la prospezione dei potenziali spontanei (vedi Scapozza, 2008; Scapozza *et al.*, 2008).

## IDROLOGIA DELL'AMBIENTE PERIGLACIALE ALPINO

### Principali caratteristiche idrologiche dei ghiacciai rocciosi attivi

I ghiacciai rocciosi attivi sono definiti tali per il fatto che contengono del ghiaccio e sono in movimento (Scapozza & Fontana, 2009). La causa di questo movimento è da ricercare nella reptazione del ghiaccio del permafrost che sta al loro interno. La prima considerazione da fare è che, come anche dimostrato da Gardaz (1998), un ghiacciaio roccioso non deve essere considerato come un sistema idrologico isolato, ma facente parte di un sistema montano periglaciale che comprende anche altri sottosistemi come ad esempio pareti rocciose, falde di detrito, il substrato roccioso, ecc.

Haeberli (1985) suggerisce che la quantità delle acque di fusione di un ghiacciaio roccioso è minore della quantità di acqua rilasciata da un ghiacciaio avente dimensioni simili e stima, per un ghiacciaio roccioso di medie dimensioni (circa 300 m di lunghezza), una portata media annua da 2 a 50 l/s con punte di 250 l/s durante il periodo primaverile (vedi anche Barsch, 1996). Evin & Assier (1983), Gardaz (1998 e Tenthorey (1993) hanno mostrato come la massima portata delle sorgenti di ghiacciai rocciosi si verifica durante il periodo dello scioglimento delle nevi e diminuisce progressivamente in estate e in autunno per poi arrivare quasi a zero durante l'inverno. Krainer & Mostler (2002) hanno postulato che le fluttuazioni della portata delle sorgenti di alcuni ghiacciai rocciosi delle Alpi austriache sono in relazione diretta con le precipitazioni estive intense; in particolare, i temporali farebbero aumentare sensibilmente e immediatamente la loro

portata. Questo suggerisce quindi un tipo di circolazione superficiale supra-permafrost (fig. 1), ossia che avviene sopra la superficie ghiacciata. Questo tipo di circolazione è particolarmente evidente nei ghiacciai rocciosi attivi di piccole e medie dimensioni (circa 200-300 m di lunghezza), come il ghiacciaio roccioso di Tsavolire nel Vallon de Réchy (vedi Tenthorey, 1994), studiato in questo articolo.

Il sistema idrologico di un ghiacciaio roccioso attivo è però complesso e non del tutto conosciuto. Nel suo studio, i parametri che devono essere tenuti in considerazione sono molteplici, e comprendono per esempio le fluttuazioni di portata (stagionali e giornaliere), lo specifico regime di precipitazioni, la taglia e granulometria dei suoi blocchi e il tipo di ghiaccio del permafrost che lo compone.

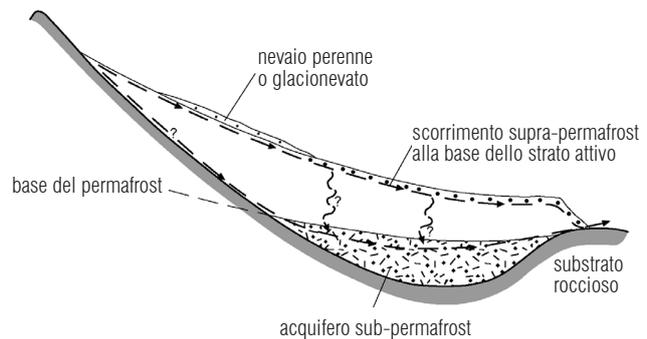


Figura 1: Possibile modello idrologico di un ghiacciaio roccioso. Si noti la circolazione supra-permafrost in superficie, la circolazione sub-permafrost sul fondo e quella intra-permafrost all'interno del corpo gelato. Questo schema si riferisce al ghiacciaio roccioso di Murtél (GR), dove sotto il corpo gelato si trova una falda acquifera (modificato da Scapozza, 2008 e Haeberli, 1985).

### Principali caratteristiche idrologiche dei ghiacciai rocciosi inattivi e degli ambienti periglaciali con permafrost discontinuo

I ghiacciai rocciosi inattivi, che contengono sempre del ghiaccio ma che non presentano movimenti superficiali, sono generalmente situati a quote inferiori rispetto a quelli attivi, e si situano in prossimità del limite inferiore della zona periglaciale (Scapozza & Mari, 2010). Il permafrost che li compone è quindi discontinuo, e presenta minori quantità di ghiaccio rispetto ai ghiacciai rocciosi attivi. La massa di ghiaccio si presenta spesso fessurata e permette l'infiltrazione di acqua meteorica. A causa di queste fessurazioni, l'ordine di grandezza del tempo di attraversamento da parte dei coloranti in ghiacciai rocciosi inattivi è quantificabile in una decina di giorni, come mostrato da Tenthorey (1989). Si ha quindi una circolazione di tipo intra-permafrost, ossia che avviene all'interno delle fessure del corpo ghiacciato. Questo tipo di circolazione è complessa e ancora poco conosciuta dato che si compone anche di una componente supra e sub-permafrost (che avviene sotto la massa ghiacciata) e quindi le velocità di circolazione sono la risultante di queste differenti dinamiche idrologiche.

Per ciò che concerne invece la circolazione dell'acqua nelle zone periglaciali con permafrost discontinuo, si

possono elaborare le stesse considerazioni fatte per i ghiacciai rocciosi inattivi, tenendo tuttavia in considerazione che la struttura del terreno non sempre è formata da depositi sciolti come nei ghiacciai rocciosi ma, invece, può essere composta da rocce di differenti litologie (e quindi differenti caratteristiche di permeabilità). Infine, per ciò che riguarda i ghiacciai rocciosi fossili, data l'assenza al loro interno di qualsiasi corpo ghiacciato, possiamo supporre che la circolazione dell'acqua sia paragonabile alla circolazione in depositi sciolti. In questi casi entrano allora in linea di conto la taglia e la granulometria dei blocchi, la pendenza del versante e la presenza di un'eventuale falda acquifera sotterranea.

## MATERIALI E METODI

Per rilevare i coloranti iniettati, sono stati usati per queste campagne di multitracciamento due differenti metodi: la posa di fluocaptori e la campionatura automatica mediante fluorimetri (tab. 1). I fluocaptori consistono in sacchetti permeabili riempiti di carbone attivo con una sensibilità al passaggio dei traccianti dell'ordine di  $1 \cdot 10^{-3}$  µg/g. Questi, tuttavia, sono in grado di fornire solamente dei risultati qualitativi, vale a dire che rilevano o meno il passaggio del tracciante. La sensibilità ai traccianti dei fluorimetri è minore di quella dei fluocaptori. Ciò è da attribuire al fatto che i fluocaptori accumulano il tracciante per tutto il tempo in cui sono immersi in acqua, mentre i fluorimetri automatici misurano la concentrazione di colorante solamente a un istante preciso.

Per ottenere dei risultati qualitativi, e quindi una curva di restituzione, si deve procedere a una campionatura che si può effettuare manualmente mediante la raccolta di campioni d'acqua o, come nel nostro caso, automaticamente mediante l'utilizzo di fluorimetri.

I metodi di tracciamento che disponiamo ora sono notevolmente avanzati rispetto a vent'anni fa e permettono una migliore rintracciabilità dei traccianti usandone quantitativi inferiori nel pieno rispetto della protezione dell'ambiente

Tabella 1: Caratteristiche, vantaggi e svantaggi dei fluocaptori e dei fluorimetri per il rilevamento dei coloranti.

Metodo	Risultato	Sensibilità	Vantaggi	Svantaggi
<b>Fluocaptori</b>	Qualitativo	Ottima	Affidabilità dei risultati. Elevata sensibilità ai traccianti. Adatto al rilevamento di molti punti.	Solo risultati qualitativi. Abbastanza costoso.
<b>Fluorimetri</b>	Quantitativo	Buona	Curva di restituzione. Procedura automatica. Rapido e veloce. Risultati immediati.	Possibili imprevisti disturbano i risultati. Apparecchi pesanti da trasportare. Corretto dosaggio dei traccianti per evitare saturazioni dello strumento. Necessità di calibrazione.

Per ciò che riguarda la scelta dei traccianti, si deve operare in base al tipo di campionatura che si desidera utilizzare. Se si utilizzano dei fluorimetri, il tipo di tracciante dipende dalla predisposizione dell'apparecchio.

Per le nostre prove, gli strumenti sono stati messi a disposizione dall'Istituto scienze della Terra della SUPSI per il rilevamento della fluoresceina e della sulforodamina-B e dalla ditta Albillia Sàrl per il rilevamento dell'eosina.

La fluoresceina è un colorante adatto a seguire percorsi su lunghe distanze e periodi di restituzione estesi, come è il caso in sistemi idrici complessi nonché fessurati; questo colorante è quindi ideale per una circolazione di tipo intra-permafrost.

Per la quantità di coloranti da iniettare, Käss & Behrens (1998) suggeriscono la relazione empirica seguente:

$$\text{Massa di tracciante (in kg)} = L * K \quad (1)$$

Dove  $L$  rappresenta la distanza tra il punto di immisione (in km) e il punto di arrivo, mentre  $K$  è il coefficiente che dipende dalla natura dell'acquifero (terreni sabbiosi:  $K = 0.2 \rightarrow 1$ ; terreni fessurati:  $K = 0.2 \rightarrow 2$ ). Bisogna prestare attenzione a non iniettare un quantitativo di colorante potenzialmente inferiore al limite di rintracciabilità dello strumento ma anche a non esagerare in senso opposto per evitare di portare lo strumento a saturazione.

È inoltre importante misurare la portata dei corsi d'acqua, in quanto questo risultato, moltiplicato per la somma di tutte le concentrazioni registrate dal fluorimetro, permette di calcolare la percentuale di restituzione di un colorante. Per le misure di portata effettuate nella Valle di Sceru e nel Vallon de Réchy è stato usato del cloruro di sodio (normale sale da cucina) e un campionatore automatico dell'acqua del tipo *SalinoMADD*, che permette di eseguire delle misure rapide e precise della portata di un corso d'acqua.

## RISULTATI

### Prova di multitracciamento nel Vallon de Réchy (VS)

La prima prova di multitracciamento è stata effettuata nel Vallon de Réchy, che da più di vent'anni è stato oggetto di numerosi studi idrologici che sono stati pionieristici nell'ambito dei traccianti di ghiacciai rocciosi (Tenthorey, 1989; 1992). Il Vallon de Réchy è una valle laterale della sponda sinistra della Valle del Rodano e prende il nome dall'omonimo comune situato nelle immediate vicinanze di Sierre (VS). La parte studiata consiste solo nella parte alta di questa valle, tra i 2200 e i 3000 metri di altitudine. Questa zona è delimitata a ovest dalla Becca di Lovegno (2821 m slm) e dalla cima La Maya (2916 m slm), a nord dalla Pointe de la Tsavolire (3026 m slm) e a est dall'imponente Becs de Bosson (3149 m slm). Queste cime definiscono lo spartiacque della parte alta del Vallon de Réchy. Nell'alto Vallon de Réchy si trova il laghetto alpino Le Louché, il quale origina il torrente La Réche che drena l'intera valle fino alla Piana del Rodano a Réchy (fig. 2).

La parte alta della valle presenta tre ghiacciai rocciosi: i ghiacciai rocciosi attivi di Becs de Bosson, di Tsavolire (oggetti del nostro tracciamento) e il ghiacciaio roccioso inattivo di La Maya. Il ghiacciaio roccioso di Becs de Bosson è composto prevalentemente da

calcescisti, mentre dei gessi sono presenti alle sue radici. A Tsavolire si trovano invece delle dolomie, corniole e gessi quindi non sarebbe da escludere la presenza di un sistema carsico.

Dai tempi dei tracciamenti effettuati da G. Tenthorey, le condizioni climatiche e di innevamento sono mutate. Alla fine degli anni Ottanta, Tenthorey (1992) descriveva ancora la presenza di nevai permanenti alle radici di questi ghiacciai rocciosi, che al giorno d'oggi sono completamente scomparsi. Per cercare di effettuare i tracciamenti rispettando le condizioni di 20 anni fa, si è quindi deciso di iniettare i traccianti 1 mese in anticipo rispetto alle prove eseguite da G. Tenthorey, sfruttando la neve che alla fine di luglio è ancora in fase di scioglimento.

Tenthorey (1993) ha eseguito una prova di tracciamento del ghiacciaio roccioso di Tsavolire l'8 agosto 1990 iniettando 2 kg di eosina. Il 21 agosto 1986 è stato invece iniettato 1 kg di fluoresceina alle radici del ghiacciaio roccioso di Becs de Bosson. Sullo stesso ghiacciaio roccioso, il 18 agosto 1990 sono stati iniettati 15 kg di sale. Se i risultati di Tsavolire indicavano una restituzione del tracciante rapida, quindi tipica di una circolazione supra-permafrost, a Becs de Bosson si è osservata una circolazione molto più lenta e complessa indicando una circolazione intra-permafrost e sub-permafrost e l'esistenza di una probabile falda acquifera. La stessa complessa circolazione è stata ipotizzata

anche da Gardaz (1998) misurando la carica disciolta dell'acqua delle differenti sorgenti al fronte di questo grande ghiacciaio roccioso.

La prova di multitracciamento si è svolta il 19 luglio 2012. Come mostra la fig. 2, i tracciamenti hanno interessato i ghiacciai rocciosi di Tsavolire e Becs de Bosson. I coloranti sono stati iniettati alle loro radici, in corrispondenza di punti di fusione dei nevai che si trovavano appena sopra degli inghiottitoi. Entrambi questi ghiacciai rocciosi presentano delle sorgenti al loro fronte (vedi punti 1, 2 e 3), che sono state monitorate con fluorimetri e fluocaptori. Altri fluocaptori sono stati piazzati ai punti 2a, 4, 6, 7 e 8. Va precisato che al fine di ottenere risultati anche in parte quantitativi dai fluocaptori, questi sono stati sostituiti dopo 1, 2, 3, 23 e 70 giorni dalle iniezioni dei coloranti.

A Tsavolire, è stato immesso 1 kg di eosina che è stata restituita con un forte segnale alla sorgente presente al fronte di questo ghiacciaio roccioso. In questo caso, è stato possibile elaborare una curva di restituzione (fig. 3) e calcolare un tasso di restituzione di circa il 10%. L'eosina è stata anche rilevata in tracce ai punti 2a, 3 e 7, situati molto distante dal punto d'iniezione.

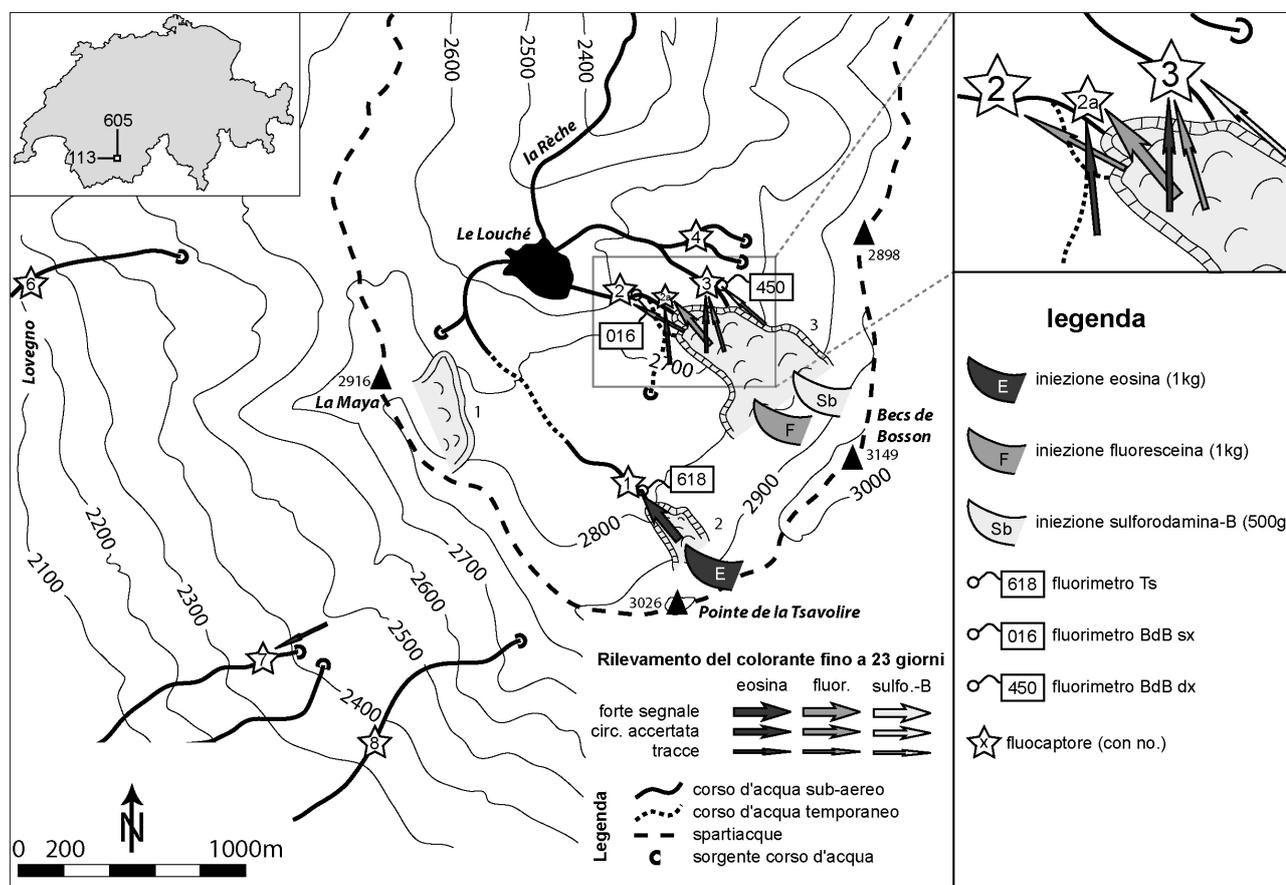


Figura 2: Inquadramento geografico della parte alta del Vallon de Réchy e circolazione dei traccianti rilevata dai fluocaptori fino a 23 giorni dalle iniezioni. Si noti il forte segnale di restituzione sul ghiacciaio roccioso di Tsavolire.

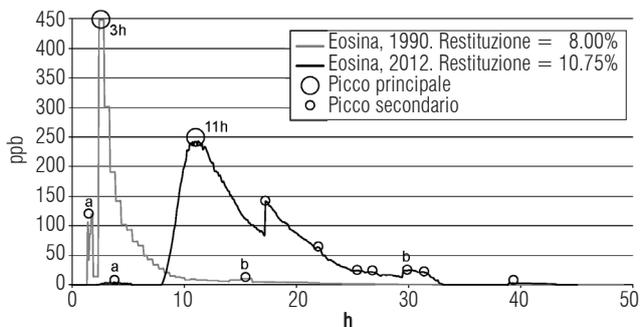


Figura 3: Curve di restituzione dei tracciamenti effettuati l'08.08.1990 (Tenthorey, 1993) e il 19.07.2012 sul ghiacciaio roccioso di Tsavolire. Si notino la corrispondenza nelle due curve dei picchi secondari a) e b) e la presenza nella curva del 2012 di un maggior numero di picchi nella coda della curva.

A Becs de Bosson è stato invece iniettato 1 kg di fluoresceina, che è stata rintracciata in tracce solo alla sorgente 2 e accertata alla sorgente 3. La sulforodamina-B iniettata al punto C (500 g) non è stata rilevata da nessuna parte se non in tracce alla sorgente 3, ma solo fino al secondo giorno dall'iniezione. I fluorimetri posizionati ai punti 2 e 3 non hanno rilevato passaggi di coloranti, confermando la loro minore sensibilità ai traccianti rispetto ai fluocaptori.

**Prova di multitracciamento nella Valle di Sceru (TI)**  
 La Valle di Sceru è stata scelta come luogo per eseguire una prova di multitracciamento data la quantità di dati

geofisici e misurazioni idrologiche effettuate in questa zona (vedi Scapozza, 2008; 2009; Scapozza *et al.* 2008; 2011). Qui non si tratta di studiare esclusivamente la circolazione idrica all'interno di un singolo ghiacciaio roccioso (come nel Vallon de Réchy), ma più in generale di studiare la dinamica idrologica dell'ambiente periglaciale alpino. La Valle di Sceru si situa nella parte orientale della Valle di Blenio e si trova tra la Cima di Piancabella (2583 m slm), il Pizzo di Sceru (2628 m slm) e la Cima di Gana Rossa (2787 m slm) (fig. 4). Questo massiccio costituisce lo spartiacque tra la Valle di Blenio a ovest, la Val Malvaglia a est e la Val Soi a nord. La regione è priva di ghiacciai e nevai permanenti.

Questa valle è stata studiata in passato con metodi cartografici, geofisici e idrologici. I risultati di queste indagini hanno permesso di evidenziare una ripartizione del permafrost eterogenea tra il versante destro e il versante sinistro della valle. In effetti, nel versante sinistro, esposto maggiormente a solatio, la presenza di permafrost è improbabile. Le investigazioni geofisiche e le temperature delle sorgenti (Scapozza, 2008; 2009; Scapozza *et al.* 2011) hanno invece evidenziato nel versante destro, più in ombra, la probabile presenza di permafrost. Le temperature rilevate alla sorgente della Rongia di Sceru, situata in riva destra della valle (al fronte del lobo sud del ghiacciaio roccioso di Sceru I), mostrano valori più bassi e soprattutto più costanti rispetto alla sorgente del versante sinistro (sorgente del Ri Barbói, al fronte del lobo nord del ghiacciaio

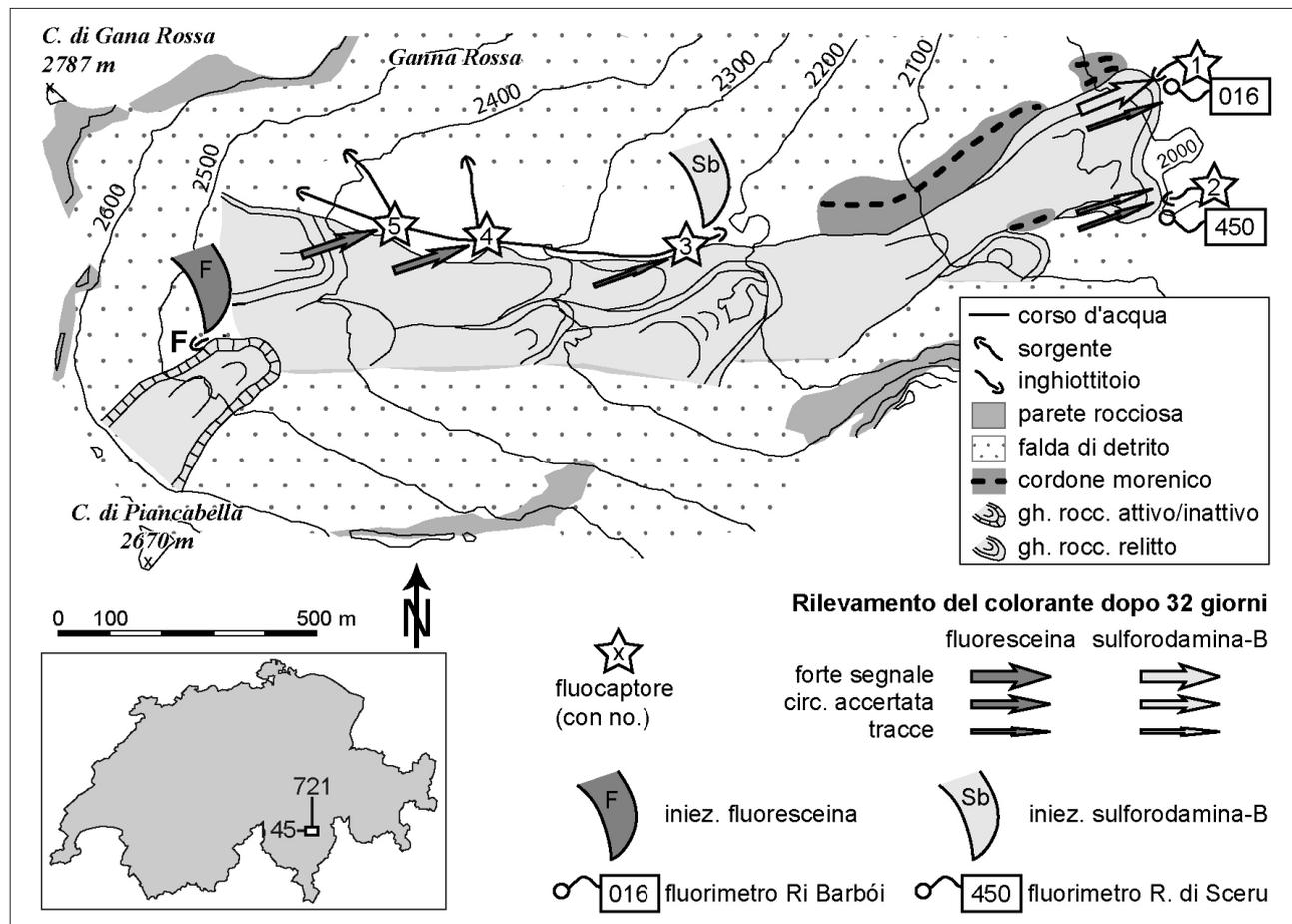


Figura 4: Circolazione dei traccianti rilevata dai fluocaptori a Sceru tra 0 e 32 giorni dalle iniezioni. Si noti il forte segnale di restituzione della sulforodamina-B sul versante sinistro della Valle di Sceru (fondo di carta rielaborato da Scapozza, 2008).

roccioso di Sceru I). Questi valori fanno pensare quindi a una differente presenza del permafrost nei due versanti della valle: esso sarebbe assente sul versante sinistro, mentre sarebbe di tipo discontinuo sul versante destro.

La prova di multitracciamento nella Valle di Sceru si è tenuta il 18 agosto 2012. Un kg di fluoresceina è stato iniettato in una piccola depressione al fronte del ghiacciaio roccioso attivo di Piancabella sul versante destro della Valle di Sceru. In questa depressione, a pochi decimetri di profondità un piccolo rigagnolo d'acqua scorreva tra i blocchi e ha favorito la circolazione del colorante. 500 g di sulfurodamina-B sono invece stati immessi più a valle nel ruscello che scorre sul fondo della Valle di Sceru, poco prima di un inghiottitoio. Due fluorimetri automatici sono stati posati alle 2 sorgenti (del Ri Barbói e della Rongia di Sceru) situate al fronte del ghiacciaio roccioso fossile di Sceru I. I fluorimetri sono stati posati anche accanto ai fluorimetri delle sorgenti sopraccitate nonché ai punti 3 e 4 (fig. 4), situati nell'alveo del riale che drena la parte superiore della Valle di Sceru, e al punto 5, che corrisponde a un piccolo laghetto periglaciale situato poco a valle della sorgente dello stesso riale.

Come è possibile notare dalla fig. 4, la fluoresceina è stata rintracciata dai fluorimetri in tutti i punti di controllo. I fluorimetri, invece, hanno mostrato un debolissimo segnale della fluoresceina sia alla sorgente del Ri Barbói, sia alla sorgente della Rongia di Sceru.

La sulfurodamina-B è stata invece rintracciata con un forte segnale dal fluorimetro alla sorgente del Ri Barbói, mentre alla sorgente della Rongia di Sceru il segnale è stato solo accertato. Il fluorimetro alla sorgente della Rongia di Sceru non ha perciò registrato passaggi significativi di sulfurodamina-B, mentre alla sorgente del Ri Barbói il fluorimetro ha rilevato il passaggio di questo colorante potendo quindi elaborare una curva di restituzione (fig. 5) con un tasso di restituzione quasi del 100%. Chiaramente, i fluorimetri 3, 4 e 5 non hanno accumulato la sulfurodamina-B dato che sono stati posizionati a quote più alte del punto d'iniezione.

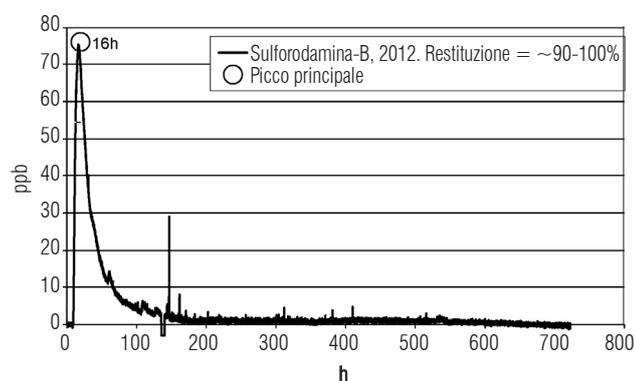


Figura 5: Curva di restituzione della sulfurodamina-B del tracciamento effettuato il 18.08.2012 nella Valle di Sceru. Si noti la veloce circolazione (picco massimo dopo 16h) del tracciante nei depositi sciolti liberi da permafrost e le irregolarità nella coda della curva dovute ai molti percorsi compiuti dal tracciante all'interno dei depositi sciolti che compongono questo ghiacciaio roccioso fossile.

## DISCUSSIONE

### Prova di multitracciamento nel Vallon de Réchy (VS)

Il ghiacciaio roccioso di Becs de Bosson ha evidenziato una circolazione lenta e delle percentuali di restituzione dei coloranti molto limitate, confermando i risultati ottenuti a suo tempo da Tenthorey (1990, 1992). Questo ghiacciaio roccioso presenta probabilmente una circolazione prevalentemente di tipo intra-permafrost e sub-permafrost con una probabile presenza di una falda acquifera sotterranea che avrebbe molto diluito i traccianti iniettati.

Il confronto effettuato a Tsavolire (fig. 3) con il tracciamento del 1990 (vedi Tenthorey, 1993) ha prodotto una curva di restituzione che rispetto alla curva del 1990 presenta un ritardo nell'arrivo dell'eosina di circa 5 ore e un ritardo del picco massimo di circa 8 ore. Nel 2012 la curva presenta una concentrazione di tracciante di circa la metà rispetto al tracciamento del 1990. Questo tracciante è però stato restituito più lentamente, così come la fine della restituzione si presenta in ritardo rispetto al 1990. Questi risultati hanno confermato le ipotesi iniziali, ossia che il probabile degrado del permafrost dovuto a più di 20 anni di riscaldamento climatico si sarebbe manifestato in una modifica della restituzione del tracciante.

È inoltre interessante osservare la presenza di picchi secondari in entrambe le curve di restituzione. Come evidenziato in tracciamenti in ghiacciai eseguiti da Brugman (1987), in un corpo compatto ghiacciato l'acqua circola molto velocemente in canali all'interno del ghiacciaio, ma la restituzione del colorante non è tuttavia regolare dato che questo deve percorrere differenti percorsi (con differenti lunghezze) all'interno della massa ghiacciata. In particolare, più canali sono presenti e più picchi presenterà la curva di restituzione. L'irregolarità della curva di restituzione è ancora più grande se all'interno della massa ghiacciata si formano delle pozze di acqua liquida di fusione che potrebbero svolgere un effetto di diluizione e/o di tampone sui tempi di restituzione dell'acqua. La curva di restituzione ideale si ha solo in un tubo; le irregolarità rappresentate dai picchi secondari delle restituzioni stanno quindi a indicare la presenza di percorsi alternativi e/o pozze sul tragitto del tracciante. In ultima analisi, questi picchi secondari potrebbero quindi testimoniare una maggiore fessurazione e quindi una parziale fusione del corpo ghiacciato.

La curva di restituzione del 2012 evidenzia comunque ancora una circolazione rapida dell'acqua di tipo prevalentemente supra-permafrost per questo ghiacciaio roccioso, anche se in leggero ritardo rispetto alla curva di restituzione del 1990. La durata maggiore della restituzione e soprattutto la presenza di un numero maggiore di irregolarità farebbero comunque supporre un'aumentata fessurazione del corpo ghiacciato da imputare probabilmente al degrado del permafrost. Se ciò non fosse il caso solamente una circolazione prevalentemente sub-permafrost potrebbe giustificare i risultati ottenuti, ma ciò allo stato attuale delle ricerche non può ancora essere dimostrato.

### Prova di multitracciamento nella Valle di Sceru (TI)

I risultati ottenuti in questa valle hanno confermato in parte le ipotesi iniziali, vale a dire l'esistenza di differenti dinamiche idrologiche tra il versante sinistro della valle e quello destro, come ipotizzato da Scapozza (2008) con rilevamenti geofisici e idrologici. Il versante sinistro, dove la presenza di permafrost è improbabile, ha presentato una rapida circolazione della sulforodamina-B iniettata e restituita in gran parte alla sorgente del Ri Barbói: come mostra la fig. 5, la curva di restituzione ha evidenziato l'arrivo del tracciante dopo circa 8 ore, il picco massimo dopo 16 ore e la fine dell'arrivo del tracciante dopo 6 giorni. Il tracciante è stato restituito alla sorgente del Ri Barbói quasi completamente. Questa dinamica idrologica è caratteristica della circolazione di fluidi in depositi sciolti liberi da ghiaccio interstiziale.

La circolazione della parte destra ha invece indicato una forte diluizione della fluoresceina iniettata. Probabilmente, la presenza di permafrost al punto d'iniezione e sul versante destro della valle ha rallentato e diluito la circolazione di questo colorante, che si è verosimilmente introdotto nelle numerose fessure presenti all'interno del corpo del permafrost. La presenza probabile di permafrost nel versante destro della valle ha inoltre agito in parte da barriera alla sulforodamina-B, che in maggior parte è arrivata alla sorgente del Ri Barbói situata sul versante opposto.

### CONCLUSIONI

Per confermare il probabile degrado o quantomeno modifica del permafrost riscontrato nel Vallon de Réchy, sarebbe opportuno eseguire in futuro un monitoraggio GPS della dinamica del ghiacciaio roccioso di Tsavolire, allo scopo di scoprire eventuali accelerazioni dei suoi movimenti che potrebbero aver causato un'estensione del corpo del permafrost e una sua conseguente fessurazione. Queste accelerazioni sono state verificate per il ghiacciaio roccioso di Becs de Bosson da Perrouchoud & Delaloye (2007) e Kääb (2005). Inoltre, non si riesce ancora a comprendere come una circolazione che dovrebbe essere prevalentemente di tipo supra-permafrost possa fornire delle percentuali di restituzione molto basse, dell'ordine del 10%. Solo con delle tomografie delle resistività elettriche e con un monitoraggio termico sul lungo periodo si potrà avere una migliore comprensione di questo tipo di circolazione. Per migliorare la comprensione della circolazione dell'acqua nella Valle di Sceru, sarebbe invece necessario ripetere i tracciamenti ed eseguire delle misure in continuo della portata dei riali, allo scopo di ottenere dati più precisi sulla percentuale di restituzione dei traccianti, anche tenendo in considerazione il regime e la quantità delle precipitazioni nella regione.

In conclusione, si può affermare come lo studio idrologico degli ambienti periglaciali sia complesso e difficile da realizzare considerando la variabilità di elementi che, oltre al permafrost stesso, possono influenzare la circolazione delle acque, come per esempio le differenti litologie, l'esposizione dei versanti, la granulometria

del terreno, la grandezza del ghiacciaio roccioso, ecc. Questi primi risultati mostrano tuttavia le potenzialità di questo tipo di ricerche per lo studio e il monitoraggio dell'evoluzione del permafrost in relazione al surriscaldamento climatico in atto, nonché un'implementazione dello studio delle risorse in acqua disponibili in questi ambienti periglaciali.

### RINGRAZIAMENTI

Per il supporto tecnico e le analisi di laboratorio siamo particolarmente grati all'Istituto scienze della Terra della SUPSI a Lugano-Trevano, al Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN) di Neuchâtel e alla ditta Albillia (Albillia Sàrl, Rue de l'Évole 13, CH-2000 Neuchâtel) (Dr. Pierre Schnegg). Un ringraziamento particolare a Fosco Spinedi per la rilettura critica del manoscritto.

### BIBLIOGRAFIA

- Barsch D. 1996. Rockglaciers: indicators for the present and Former geocology in high mountain environments. Berlin, Springer-Verlag, 331 pp.
- Brugman M. 1987. Water flow at the base of a surging glacier. PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 267 pp.
- Gardaz J.M. 1998. Permafrost prospecting, periglacial and rock glacier hydrology in mountain areas. Case studies in the Valais Alps, Switzerland. PhD Thesis, University of Fribourg, 1222 pp.
- Evin M. & Assier A. 1983. Glacier et glaciers rocheux dans le Haut-Vallon du Loup, (Haute-Ubaye, Alpes du Sud, France). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 19: 27-41.
- Haeberli W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich, 77: 1-142.
- Kääb A. (2005). Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep. – In: Physical Geography Series 48, Department of Geography, University of Zurich.
- Käss W. & Behrens H. 1998. Tracing technique in geohydrology. London, Taylor & Francis, 581 pp.
- Krainer K. & Mostler W. 2002. Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 34(2): 142-149.
- Perruchoud E. & Delaloye R. (2007). Short-term changes in surface velocities on the Becs-de-Bosson rock glacier (western Swiss Alps). – In: Proceedings of the 9th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography (HMRSC-IX), Graz, 14- 15 September 2006, Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung 43:131-136.
- Scapozza C. 2008. Contribution à l'étude géomorphologique et géophysique des environnements périglaciaires des Alpes Tessinoises orientales. Thèse de Master, Université de Lausanne, 286 pp. (disponibile su <http://doc.rero.ch/record/8799?ln=fr>).

- Scapozza C. 2009. Contributo dei metodi termici alla prospezione del permafrost montano: esempi dal massiccio della Cima di Gana Bianca (Val Blenio, Svizzera). *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 97: 55-66.
- Scapozza C. & Mari S. 2010. Catasto, caratteristiche e dinamica dei rock glaciers delle Alpi Ticinesi. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 98: 15-29.
- Scapozza C. & Fontana G. 2009. Le Alpi Bleniesi: storia glaciale e periglaciale e patrimonio geomorfologico. *Memorie della Società ticinese di scienze naturali e del Museo cantonale di storia naturale*, Lugano, 10: 1-111.
- Scapozza C., Gex P., Lambiel C. & Reynard E. 2008. Contribution of self-potential (SP) measurements in the study of alpine periglacial hydrology: examples from the Southern Swiss Alps. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, Fair-banks, Alaska, 29 June–3 July 2008*: 1583-1588.
- Scapozza C., Lambiel C., Gex P. & Reynard E. 2011. Prospection géophysique multi-méthodes du pergélisol alpin dans le Sud des Alpes Suisses. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1/2011: 15-32.
- Tenthorey G. 1989. Etude géomorphologique et hydrologique des terrains périglaciaires du Haut-Val de Réchy (Nax, VS) : présentation du projet. *Bulletin de la Murithienne*, 107: 59-67.
- Tenthorey G. 1992. Perennial névés and the hydrology of rock glaciers. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3: 247-252.
- Tenthorey G. 1993. Paysage géomorphologique du Haut-Val de Réchy (Valais, Suisse) et hydrologie liée aux glaciers rocheux. Thèse de doctorat, Université de Fribourg, 307 pp.
- Tenthorey G. 1994. Hydrologie liée aux glaciers rocheux, Haut-Val de Réchy (Nax, VS). *Bulletin de la Murithienne*, 112: 97-116.