



Il permafrost in Trentino

Attività di monitoraggio 2025



Luglio 2026

Report a cura di:

Roberto Seppi - Università di Pavia, Dipartimento Scienze della Terra e dell'Ambiente
roberto.seppi@unipv.it

Matteo Zumiani - Provincia autonoma di Trento, Servizio Geologico
matteo.zumiani@provincia.tn.it

Monica Tolotti - Fondazione Edmund Mach, Centro Ricerca e Innovazione
monica.tolotti@fmach.it

Luca Carturan - Università di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro Forestali
luca.carturan@unipd.it

Le immagini e i grafici pubblicati nel presente report possono essere scaricati come singoli file.

I dati riportati nel report sono stati acquisiti nell'ambito di convenzioni tra gli Enti regolate da specifici accordi.

In copertina

La Val de La Mare ripresa dal Passo della Focola (Val di Peio). Permafrost e rock glacier sono molto diffusi in quest'area.

INDICE

• Le attività di studio e monitoraggio del permafrost in Trentino	p. 4
• Focus di approfondimento	p. 9
○ Focus A - Permafrost	p. 9
○ Focus B - Rock glacier	p. 10
○ Focus C - Temperatura del suolo	p. 11
○ Focus D - Sorgenti e acque in relazione al permafrost	p. 12
• Anno idrologico 2024-2025: sintesi meteorologica e temperatura in alta quota	p. 13
• Stagione nivologica 2024-2025	p. 16
• Attività di monitoraggio del permafrost svolte nel 2025	p. 18
○ Misure di spostamento dei rock glacier	p. 18
○ Misure di temperatura della superficie del suolo (GST)	p. 18
○ Misure di temperatura del sottosuolo	p. 19
○ Campionamenti per la chimica e la biologia delle acque	p. 19
• Casi di studio	p. 21
○ Misure a lungo termine della cinematica dei rock glacier	p. 21
○ Dieci anni di monitoraggi presso il rifugio Ai Caduti dell'Adamello	p. 27
○ Monitoraggio della cresta del Monte Vioz	p. 31
• Ringraziamenti	p. 38
• Pubblicazioni recenti con dati di monitoraggio del permafrost in Trentino	p. 38

Le attività di studio e monitoraggio del permafrost in Trentino

Le attività di studio e monitoraggio del permafrost in Trentino sono svolte dal Servizio Geologico della Provincia autonoma di Trento (Dipartimento Protezione Civile, Foreste e Fauna), in collaborazione con l'Università di Pavia (Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente), l'Università di Padova (Dipartimento Territorio e Sistemi Agro Forestali e Dipartimento di Geoscienze) e la Fondazione Edmund Mach (Centro Ricerca e Innovazione, Gruppo Idrobiologia).

La collaborazione tra gli enti citati, regolata da una serie di convenzioni, è attiva da oltre un decennio e, in precedenza, le attività di monitoraggio hanno avuto un considerevole impulso dalla partecipazione al progetto Alpine Space PermaNET (Permafrost Long-term Monitoring Network), che si è svolto tra il 2008 e il 2011. In Trentino, è stato coinvolto come partner del progetto PermaNET il Servizio Geologico della Provincia autonoma di Trento, che si è avvalso della collaborazione scientifica delle università di Padova, Pavia e Trento e di professionisti del settore. Nell'ambito del progetto è stato realizzato il catasto completo dei rock glacier del Trentino, con più di 700 forme censite, è stata realizzata una carta della distribuzione del permafrost e sono stati allestiti alcuni siti di monitoraggio a lungo termine.

Precedentemente al progetto PermaNET, le indagini si erano concentrate sul censimento e la caratterizzazione dei rock glacier di alcuni settori montuosi della provincia grazie al sostegno del Parco Adamello Brenta e della Società degli Alpinisti Tridentini. Attualmente, i monitoraggi si concentrano su alcuni siti particolarmente significativi, distribuiti nei principali gruppi montuosi del Trentino (Adamello-Presanella, Ortles Cevedale, Dolomiti, Lagorai) (**Fig. 1**).

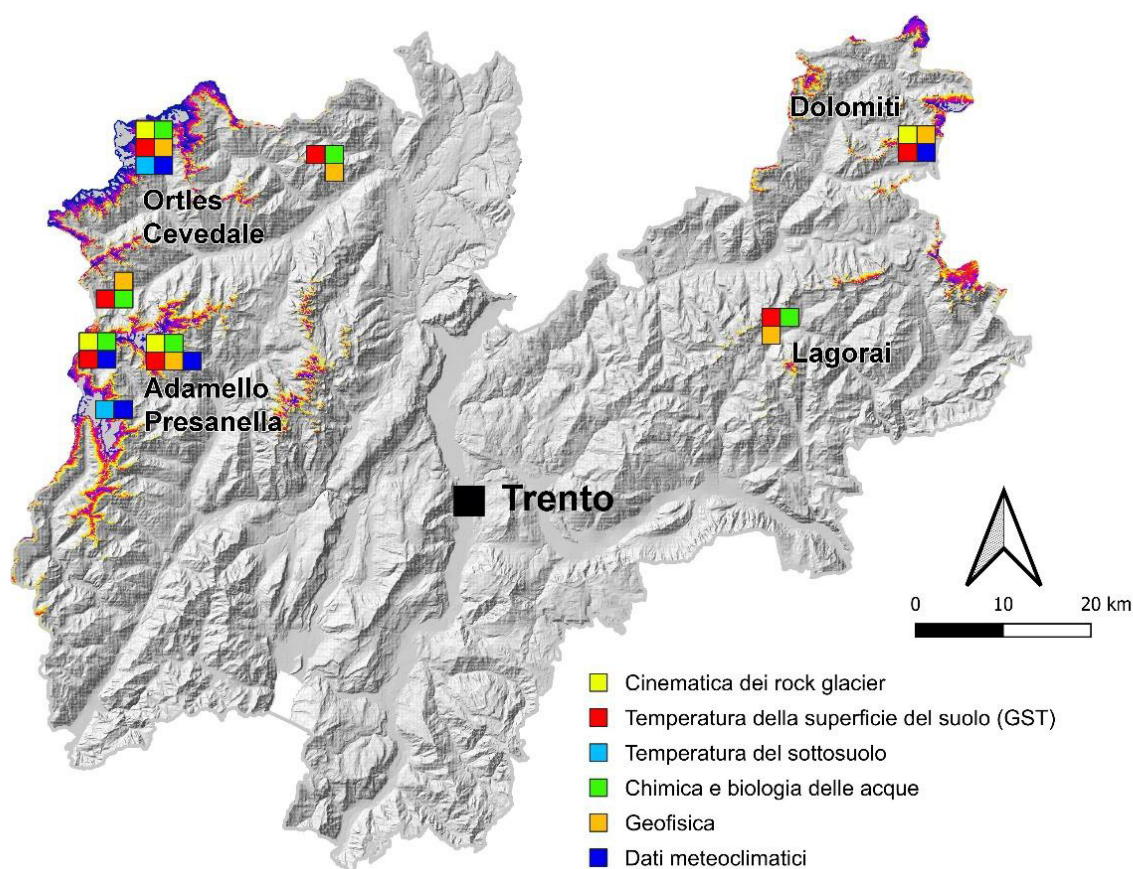


Fig. 1 – Siti di monitoraggio del permafrost in Trentino e tipologie di indagini effettuate. Le aree colorate indicano la distribuzione del permafrost secondo il modello APIM (Boeckli et al., 2012).

Le indagini si concentrano su alcune attività principali, spesso associate tra loro:

cinematica dei rock glacier;

temperatura della superficie del suolo (GST);

temperatura del sottosuolo;

chimica e biologia delle acque in relazione al permafrost; idrogeologia dei rock glacier;

geofisica;

dati meteorologici.

Cinematica dei rock glacier

Le velocità di spostamento di quattro rock glacier sono misurate annualmente utilizzando tecniche di terreno quali stazione totale laser, Global Navigation Satellite System (GNSS) differenziale e laser scanner terrestre, fotogrammetria da drone e confronti multitemporali di ortofoto digitali e laser scanner da aereo. I rock glacier studiati sono situati nei gruppi montuosi della Presanella, del Cevedale e delle Dolomiti.

Due di essi, il rock glacier del Maroccaro (alta Val Genova) e il rock glacier della val d'Amola, sono monitorati regolarmente dal 2001 e le serie storiche di dati sono le più lunghe delle Alpi italiane. I due rock glacier sono situati a circa 10 km di distanza l'uno dall'altro e sono caratterizzati da quota ed esposizione molto differenti. Il rock glacier del Maroccaro colloca il suo margine inferiore a 2800 m di quota ed è esposto a sud, quello della val d'Amola si colloca attorno ai 2400 m ed è esposto a nord. Su entrambi i rock glacier, nel 2001 è stata istituita una rete di misura costituita da 25 target materializzati con tasselli in metallo su altrettanti blocchi rocciosi di grandi dimensioni (**Fig. 2**). Tra metà settembre e metà ottobre di ogni anno viene misurata con precisione la posizione dei target, utilizzando una stazione totale laser oppure, negli ultimi anni, un GNSS in modalità Real-Time Kinematic (RTK). Confrontando i dati di anno in anno viene quindi calcolata la velocità di spostamento dei target.

Nel Gruppo Ortles Cevedale, dal 2019 sono iniziate le misure di spostamento su un rock glacier situato in val de La Mare, poco a monte del lago del Careser (rock glacier di Cima Pontevecchio). Il rock glacier è esposto ad ovest e si sviluppa tra le quote di circa 2800 m e 2950 m. Su questo rock glacier sono stati materializzati 24 target, misurati annualmente con l'uso di un GNSS in modalità base-rover (**Fig. 2**).

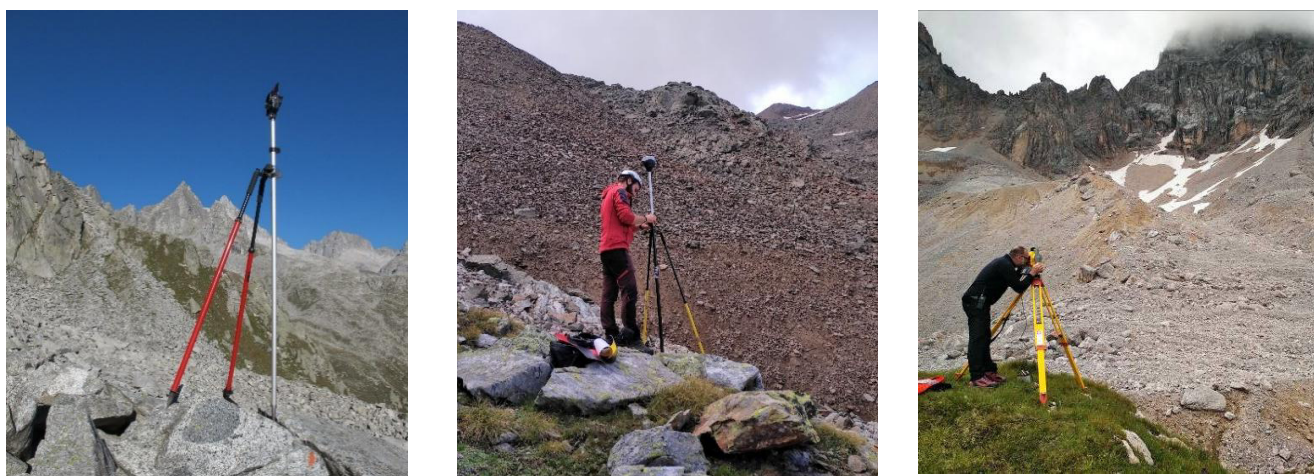


Fig. 2 – Operazioni di rilievo della cinematica dei rock glacier della Val d'Amola (a sinistra), di Cima Pontevecchio (al centro) e di Cima Uomo (a destra).

Un altro sito di indagine è il rock glacier di Cima Uomo situato in alta val San Nicolò, nelle Dolomiti. Il rock glacier è allungato in direzione nord-ovest e si colloca tra 2400 m e 2650 m di quota. A partire dal 2010, su questo rock glacier sono effettuate misure topografiche di spostamento utilizzando una stazione totale laser. A fine agosto di ogni anno viene misurata la posizione di 24 target materializzati su blocchi rocciosi (**Fig. 2**).

Temperatura della superficie del suolo (GST)

Le misure di temperatura della superficie del suolo (Ground Surface Temperature - GST) vengono effettuate in numerose aree del Trentino situate nei principali gruppi montuosi. I siti di misura sono collocati su rock glacier, su falde detritiche o nello strato di materiale detritico di copertura della roccia, tra una quota minima di 1940 m (rock glacier Valbiolo) e una quota massima di 3530 m (area del rifugio Mantova al Vioz).

I primi siti di monitoraggio sono stati istituiti nel 2004 e le misure di alcuni di essi proseguono con regolarità fino ad oggi. Nel corso del tempo e nell'ambito di diversi progetti di ricerca sono stati gestiti fino a un massimo di 124 siti di indagine, dei quali il 20% attivi ancora oggi. I siti sono visitati annualmente nel corso dell'estate, allo scopo di scaricare i dati acquisiti ed effettuare la manutenzione dei data logger utilizzati per le misure.

Temperatura del sottosuolo

Le misure di temperatura del sottosuolo sono effettuate in tre perforazioni in roccia, situate presso il rifugio ai Caduti dell'Adamello (3040 m, passo della Lobbia Alta, val Genova; profondità del sondaggio 17 metri), poco a monte del lago del Careser (2890 m, località Cavaion, val di Peio; profondità del sondaggio 50 metri) e presso il rifugio Mantova al Vioz (3535 m, cresta del Monte Vioz, Val di Peio; profondità del sondaggio 29 m).

Le misure di temperatura del sottosuolo sono acquisite a varie profondità tramite delle catene di termistori calate nei pozzi. I dati sono registrati da data logger collegati alle catene stesse e, nel caso del sito di Cavaion, trasmessi presso gli uffici del Servizio Geologico. Sono acquisite in loco anche le principali variabili climatiche, prima tra tutte la temperatura dell'aria. Nel caso dei siti di Cavaion e rifugio Vioz sono state allestite due stazioni meteorologiche complete.

Chimica e biologia delle acque in relazione al permafrost; idrogeologia dei rock glacier

Il monitoraggio della qualità chimica e biologica delle acque alimentate da permafrost in Trentino è iniziato nel 2020. L'attività si concentra su alcuni siti nei gruppi della Presanella, dell'Ortles Cevedale e del Lagorai, in particolare in alta Val Genova (rock glacier del Maroccaro e aree limitrofe), Val d'Amola (rock glacier Amola e aree limitrofe), Val de la Mare (aree del Vioz, di Cavaion, di Forcola e del Lago delle Marmotte), Val di Fiemme (rock glacier di Val Sadole e aree limitrofe). Alla fine del periodo estivo di ogni anno, da sorgenti e torrenti alimentati dalla fusione di permafrost e, per confronto, da torrenti glaciali e sorgenti non influenzate da permafrost, sono raccolti campioni per l'analisi chimica dell'acqua (ioni principali, nutrienti ed elementi in traccia, isotopi stabili di idrogeno e ossigeno) e per la determinazione della diversità delle alghe diatomee bentoniche, utilizzate come indicatori sintetici di qualità ecologica (**Fig. 3**). Nell'area del Lago delle Marmotte, sono monitorati annualmente dal 2016 il lago e il suo immissario principale, con il ramo

che proviene dall'ex Ghiacciaio delle Marmotte, ormai scomparso, e il ramo che trae origine dalla fusione di permafrost di versante.

Sono inoltre raccolti campioni di neve, ghiaccio e pioggia per l'analisi degli isotopi stabili di idrogeno e ossigeno nelle acque meteoriche, i quali servono come traccianti di riferimento per stabilire l'origine prevalente dell'acqua dei vari corpi idrici.

Alcune intensive campagne di campionamento delle acque in aree interessate da permafrost e rock glacier sono state svolte nell'ambito di specifici progetti di ricerca, come il progetto PRIN 2022 "SUBSURFICE", coordinato dall'Università di Padova e svolto tra 2024 e 2026 e il progetto Interreg Alpine Space WATERWISE (2024-2027), coordinato dall'Università di Neuchâtel (Svizzera) e dalla Fondazione Edmund Mach.

Geofisica

Presso numerosi siti di monitoraggio del permafrost sono state svolte indagini di tipo geofisico, coinvolgendo gruppi di ricerca specializzati e professionisti del settore. In alcuni casi, le indagini si sono svolte nell'ambito di specifici progetti di ricerca (es. progetto PRIN 2022 "SUBSURFICE"). I siti coinvolti sono situati nei gruppi montuosi della Presanella (rock glacier Val d'Amola), dell'Ortles Cevedale (cresta del Monte Vioz, rock glacier della Forcola e rock glacier di Cima Pontevecchio, area di Valbiolo), del Lagorai (rock glacier di Val Sadole) e delle Dolomiti (rock glacier di Cima Uomo) (**Fig. 3**). Nella maggior parte dei casi, si è trattato di rilievi di tipo geoelettrico, in particolare tomografie elettriche 2D, che consentono di indagare le caratteristiche del sottosuolo e la presenza di materiale congelato. In alcuni siti sono state effettuate anche indagini di tipo sismico, gravimetrico e magnetotellurico e, sui rock glacier di Cima Uomo e Sadole, anche indagini GPR (Ground Penetrating Radar).



Fig. 3 – A sinistra, campionamento delle acque del lago periglaciale situato a valle del rock glacier del Maroccaro; a destra, rilievi geofisici sulla cresta del Monte Vioz.

Dati meteoclimatici

Presso alcuni siti di monitoraggio sono raccolti dati di tipo meteoclimatico, sia tramite l'installazione di stazioni meteorologiche complete, sia tramite l'uso di singoli sensori. Si tratta di dati di fondamentale importanza per interpretare le informazioni sull'evoluzione delle condizioni del permafrost.

Dal 2010 è attiva una stazione meteorologica completa presso la perforazione del sito di Cavaion, installata nell'ambito del progetto Alpine Space "PermaNET". Sono acquisiti dati di pressione, temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento, radiazione solare e precipitazioni. I dati di questa stazione, attualmente gestita in collaborazione con Meteotrentino, sono trasmessi quotidianamente ai database della Provincia autonoma di Trento.

Una stazione meteorologica completa è stata installata nel 2024 presso il rifugio Mantova al Vioz, nell'ambito del progetto "Rifugi Sentinelle del Clima e dell'Ambiente", coordinato dal Club Alpino Italiano e dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAC) (**Fig. 4**). Gli strumenti acquisiscono dati di pressione, temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento, radiazione solare e precipitazioni; i dati sono trasmessi in tempo reale tramite collegamento telefonico e possono essere consultati sul web ([LINK](#)). Nell'area di Cavaion è attiva anche una fotocamera che inquadra il rock glacier di Cima Pontevecchio.

Singoli sensori di temperatura dell'aria collegati a data logger sono inoltre installati sulla cresta di Cima Presena (3015 m) e presso il rifugio ai Caduti dell'Adamello (3040 m).

Sui rock glacier del Maroccaro, di Val Amola e di Cima Uomo, nel 2013 sono state installate stazioni di misura dello spessore del manto nevoso e della temperatura dell'aria. Attualmente è ancora attiva la stazione sul rock glacier di Cima Uomo. Per approfondimenti consultare il seguente [LINK](#).



Fig. 4 – La stazione meteorologica installata nei pressi del rifugio Mantova al Vioz.

Focus A - PERMAFROST

Il permafrost è un'importante componente della "criosfera" alpina ed è definito come qualsiasi terreno (roccia o materiale detritico) che rimane in condizioni di congelamento per molti anni consecutivi. La sua presenza interessa molti versanti in roccia e pendii di detrito, ma è difficilmente rilevabile in quanto spesso non si presenta con forme del rilievo direttamente osservabili. Un terreno in condizioni di permafrost solitamente contiene ghiaccio in varie forme e aggregazioni ed è soggetto a rapide modificazioni indotte dai cambiamenti climatici. Il riscaldamento atmosferico, infatti, aumenta la temperatura del permafrost, causandone la degradazione e, spesso, la scomparsa.

Il ghiaccio contenuto nei terreni con permafrost è un'importante ma tuttora poco conosciuta risorsa idrica e la sua presenza contribuisce a rendere più stabili gli ammassi rocciosi e i versanti detritici in alta quota. La degradazione del permafrost comporta la perdita di questa risorsa idrica e l'aumento del rischio di frane e colate detritiche.



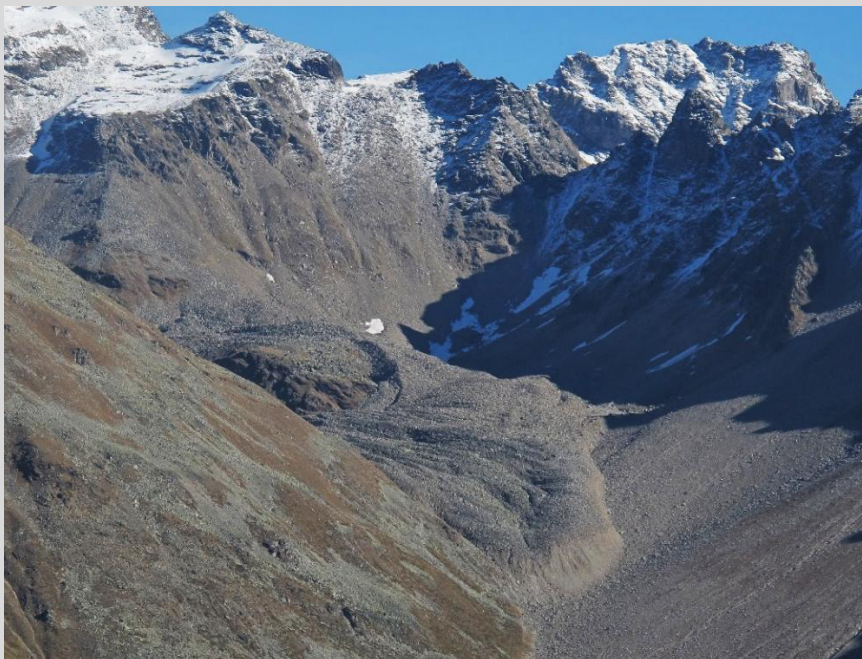
Un tipico ambiente periglaciale alpino dove è presente permafrost: Cima Cavaion (3120 m s.l.m.) in Val di Peio.

Focus B – ROCK GLACIER

La presenza di permafrost nei versanti alpini si rende visibile soprattutto grazie a forme del rilievo come i rock glacier, ammassi detritici estesi per centinaia di metri che contengono ghiaccio e che si originano dalla deformazione del materiale che li costituisce. Sono contraddistinti da peculiari caratteristiche morfologiche quali ripide scarpate frontali e laterali, solchi, pieghe e strutture legate alla deformazione plastica del materiale. Se sono attivi, i rock glacier scorrono lentamente lungo i versanti con velocità tra pochi centimetri ed alcuni metri all'anno.

Il movimento dei rock glacier è uno dei principali elementi dinamici che caratterizzano l'evoluzione geomorfologica dei versanti di alta quota. Il monitoraggio della velocità dei rock glacier è di fondamentale importanza per osservare l'evoluzione della dinamica di queste forme in relazione al variare delle condizioni climatiche e per tenere sotto controllo eventuali accelerazioni che potrebbero creare problematiche di dissesto. Le misure possono essere effettuate direttamente sui corpi detritici oppure da remoto. Nel primo caso sono utilizzate stazioni totali laser o sistemi di posizionamento satellitare (GNSS) che possono misurare con precisione gli spostamenti di numerosi blocchi in roccia (definiti "target") situati sui rock glacier. Nel secondo caso vengono utilizzate tecniche quali la fotogrammetria da drone e confronti multitemporali di ortofoto digitali e modelli della superficie del suolo acquisiti da aereo.

Permafrost e rock glacier sono diffusi in Trentino a quote superiori a 2500 m, ma possono essere presenti anche a quote inferiori se le condizioni climatiche e topografiche locali lo consentono. Attualmente, il permafrost occupa in Trentino una superficie di circa 150 km² e sono stati catalogati più di 700 rock glacier. I rock glacier più antichi, ormai stabilizzati e che non contengono più ghiaccio, si possono trovare anche al di sotto del limite del bosco e indicano condizioni climatiche del passato più fredde dell'attuale.



Un rock glacier attivo, con ripide scarpate, solchi e strutture legate al flusso plastico del materiale detritico misto a ghiaccio.

Focus C – TEMPERATURA DEL SUOLO

Le misure di temperatura del suolo hanno lo scopo di verificare la presenza di permafrost, il suo stato termico e le relazioni con le variabili atmosferiche. Soltanto raramente la temperatura del permafrost può essere misurata direttamente con dati del sottosuolo acquisiti in pozzi trivellati in roccia o nel detrito. Più frequentemente, le misure di temperatura sono effettuate pochi centimetri sotto la superficie del suolo e forniscono indicazioni indirette della presenza di terreno perennemente congelato. In questo caso si parla di misure GST (Ground Surface Temperature) e possono riguardare sia depositi di materiale detritico, come ad esempio rock glacier e falde di detrito, sia la roccia in posto. Se sono protratte nel tempo, tali misure sono in grado di evidenziare le tendenze di lungo periodo e l'eventuale degradazione delle condizioni termiche del permafrost. In particolare, la temperatura dell'atmosfera e la presenza del manto nevoso invernale sono determinanti nell'influencare il regime termico annuale del suolo e nel regolare gli scambi energetici all'interfaccia suolo-atmosfera.

I dati vengono acquisiti da strumenti automatici con cadenza regolare per tutto il corso dell'anno e consentono di osservare l'evoluzione delle condizioni termiche del suolo in funzione delle condizioni esterne. A questo scopo, dai dati GST possono essere calcolate numerose variabili che definiscono le condizioni termiche del suolo, quali la temperatura media annua della superficie del suolo (Mean Annual Ground Surface Temperature - MAGST), gli indici di congelamento e scongelamento del suolo (Ground Freezing Index e Ground Thawing Index - GFI e GTI), la fase di temperatura stabile a zero gradi centigradi (Zero Curtain - ZC) e la temperatura di equilibrio invernale (Winter Equilibrium Temperature - WEqT), particolarmente importante per definire la presenza di permafrost nel sito di indagine.

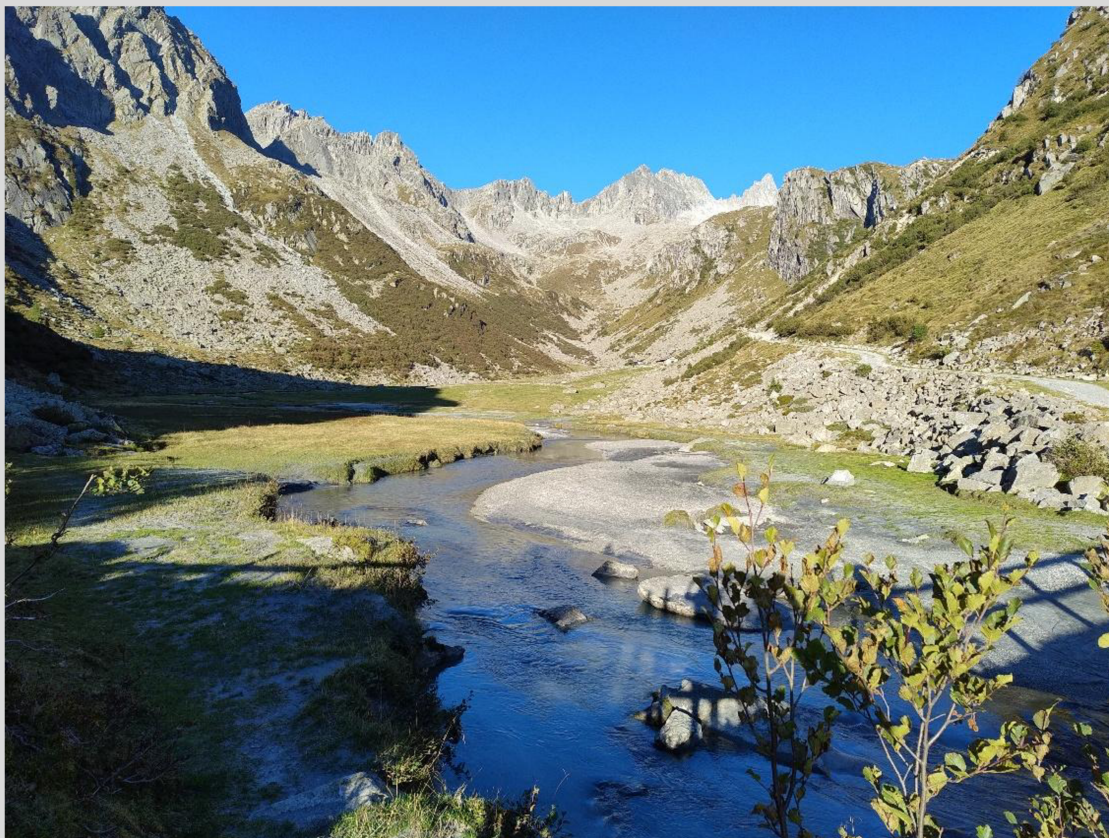


Alcuni data logger per la misura della temperatura della superficie del suolo.

Focus D - SORGENTI E ACQUE IN RELAZIONE AL PERMAFROST

Il ghiaccio contenuto nei rock glacier e altri depositi costituisce una risorsa idrica poco conosciuta ma rilevante nell'attuale contesto di riscaldamento globale. Attualmente, le variazioni stagionali della portata di torrenti in alta quota e di fiumi di fondovalle che hanno relazione con le aree glacializzate sono ancora dominate dal ciclo annuale di fusione dei ghiacciai, i quali a scala globale contengono un volume di ghiaccio circa tre volte maggiore di quello contenuto nel permafrost. Questa situazione cambierà nei prossimi decenni, in quanto i ghiacciai sono destinati a ridursi molto più rapidamente del ghiaccio contenuto nel permafrost. Quest'ultimo diverrà una risorsa idrica progressivamente più importante in futuro.

I processi legati alla degradazione del permafrost influenzano la qualità fisica, chimica e biologica dell'acqua di fusione che scaturisce dalle aree interessate da questo fenomeno. Queste acque meritano grande attenzione, sia in quanto potenziale risorsa idrica per un futuro privo di ghiacciai e scarso di precipitazioni atmosferiche, sia come rifugio ecologico per una serie di organismi acquatici minacciati dal riscaldamento globale. Tuttavia, la qualità chimica delle acque che si originano nelle aree con permafrost è ancora poco conosciuta e pone delle potenziali criticità per l'utilizzo umano, a causa dell'arricchimento in elementi chimici legati ai processi fisici e chimici che avvengono nel permafrost. È necessario quindi un attento monitoraggio della qualità e della biodiversità delle acque alimentate dalla fusione del permafrost alpino in un contesto di rapida evoluzione come quello attuale.



Un torrente in ambiente periglaciale: Val d'Amola (Gruppo della Presanella).

Anno idrologico 2024-2025: sintesi meteorologica e temperatura in alta quota

La sintesi delle condizioni meteorologiche mensili nell'anno idrologico 2024-2025 (1° ottobre 2024 – 30 settembre 2025) sono tratte dai report di Meteotrentino. I report completi possono essere consultati sulla pagina web di Meteotrentino:

(<https://www.meteotrentino.it/pubblicazioni/pubblicazioni-meteorologia/analisi-mensili/>)

Ottobre 2024

Il mese è stato caratterizzato da **precipitazioni molto superiori alla media**, specie nelle prime due decadi, mentre le **temperature sono risultate sopra la media soprattutto nell'ultima decade**. Le precipitazioni cumulate da gennaio a ottobre 2024 sono le più elevate dal 1921, mentre la temperatura media del medesimo periodo risulta la terza più alta ed inferiore solo al 2022 e 2023.

Novembre 2024

Mese caratterizzato da **precipitazioni molto scarse e temperature poco sopra la media delle serie storiche**. Nonostante la scarsità delle precipitazioni di novembre, il 2024 risulta essere il secondo anno più piovoso dopo il 2014, mentre dal punto di vista termico è il terzo anno più caldo dopo il 2022 e il 2023. La neve è stata osservata anche nei fondovalle nella notte tra 21 e 22 novembre, seppur con accumuli significativi soltanto in montagna.

Dicembre 2024

Mese caratterizzato da **precipitazioni inferiori alla media e temperature sopra la media**. I flussi in quota sono stati prevalentemente settentrionali con alcuni episodi di forti venti a carattere di Föhn in valle. Da segnalare soltanto deboli nevicate a bassa quota.

Gennaio 2025

Il mese è stato caratterizzato da **temperature e precipitazioni superiori alla media**. In particolare, tra lunedì 27 e martedì 28 il passaggio di una perturbazione ha determinato precipitazioni diffuse, a tratti persistenti, e che, nella mattinata di martedì, sono risultate localmente a carattere temporalesco. **La quota neve, durante la fase più intensa, è risultata mediamente oltre i 2000 – 2200 m.**

Febbraio 2025

Mese **più caldo della media e con precipitazioni poco inferiori alla media**. Nonostante il numero di giorni piovosi (8) sia stato il doppio della media (4), le precipitazioni cumulate mensili sono risultate, seppur di poco, inferiori alla media. Le precipitazioni giornaliere più abbondanti del mese sono state registrate il giorno 9, quando una debole perturbazione atlantica ha interessato le Alpi.

Marzo 2025

Mese **più piovoso della media, specie nella seconda decade, e più caldo della norma**. Anche il **numero di giorni piovosi è più alto della media**. Va evidenziato che negli ultimi giorni del mese flussi settentrionali hanno interessato le Alpi e si sono verificati alcuni episodi di Föhn in valle.

Aprile 2025

Mese **più piovoso della media, specie nella seconda decade, e più caldo della norma**. Va evidenziato che il giorno 17 le precipitazioni sono risultate diffuse e persistenti con cumulate di pioggia che, in alcune stazioni, sono risultate da record.

Maggio 2025

Mese con **valori di precipitazione e temperatura nella media**. In questo periodo, salvo eccezioni, le Alpi sono vulnerabili alle perturbazioni atlantiche e le precipitazioni sono piuttosto abbondanti anche in valle. Il giorno con le precipitazioni più abbondanti è stato il 22 maggio, quando si sono registrate precipitazioni diffuse con cumulate localmente abbondanti e la quota neve è scesa fino a circa 2000 – 2200 m.

Giugno 2025

Mese **eccezionalmente caldo e con precipitazioni molto disomogenee** e generalmente **inferiori alla media**. Alcuni temporali hanno interessato il territorio e la città di Trento il giorno 30, dove in poche decine di minuti sono caduti circa 25 mm di pioggia.

Luglio 2025

Il mese ha registrato **condizioni piovose e temperature vicine alla media**. La temperatura media mensile è risultata inferiore a quella degli ultimi anni. Le **precipitazioni sono risultate superiori alla media**, ma generalmente inferiori ai massimi storici. I primi giorni del mese sono stati molto caldi e il 1° luglio, analogamente al giorno precedente, si sono sviluppati alcuni forti temporali.

Agosto 2025

Mese **più caldo e più piovoso della media**. Da segnalare che, sul fondovalle di Trento, per ben sette notti consecutive, dal 9 al 15 agosto, le temperature minime sono risultate superiori a 20°C (notti tropicali). Il giorno 28 intensi flussi sudoccidentali hanno determinato precipitazioni diffuse, localmente molto abbondanti ed a carattere temporalesco.

Settembre 2025

Mese **più piovoso della media e con temperature vicine alla media**. Attorno al giorno 24, un vortice depressionario centrato sulla Francia meridionale ha determinato intensi flussi da Sud sulle Alpi. Tale circolazione è rimasta pressoché stazionaria per alcune giorni determinando precipitazioni frequenti, che, soprattutto nella giornata del 24, sono risultate diffuse, localmente abbondanti ed a carattere temporalesco.

L'andamento della temperatura dell'aria in alta quota in Trentino occidentale nell'anno idrologico 2024-2025 è rappresentato dai dati acquisiti presso le stazioni meteorologiche del sito di Cavaion e del rifugio Mantova al Vioz.

I grafici mostrano l'andamento delle temperature medie giornaliere (**Fig. 5**) e mensili (**Fig. 6**). Le temperature medie annue sono state di -4.8°C presso il rifugio Mantova al Vioz (3535 m) e di -1.2°C presso il sito di Cavaion (2890 m).

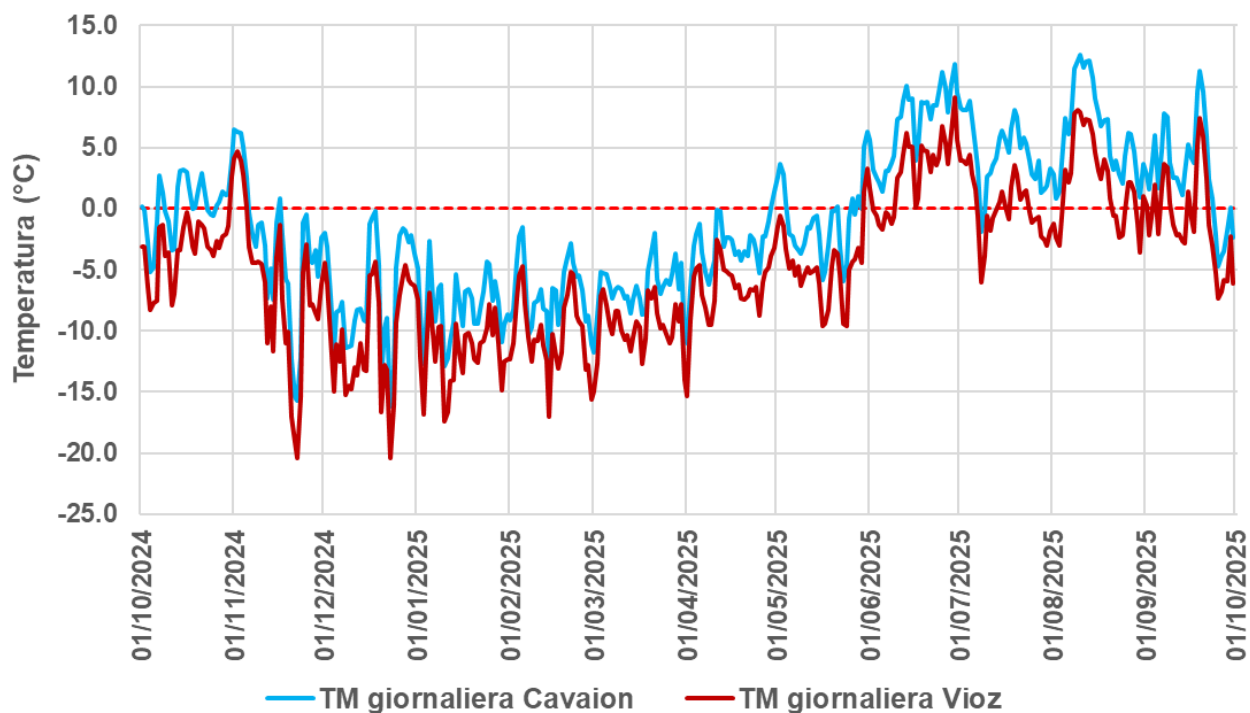


Fig. 5 – Temperatura media giornaliera dell'aria per l'anno idrologico 2024-2025 presso i siti di Cavaion e rifugio Mantova al Vioz.

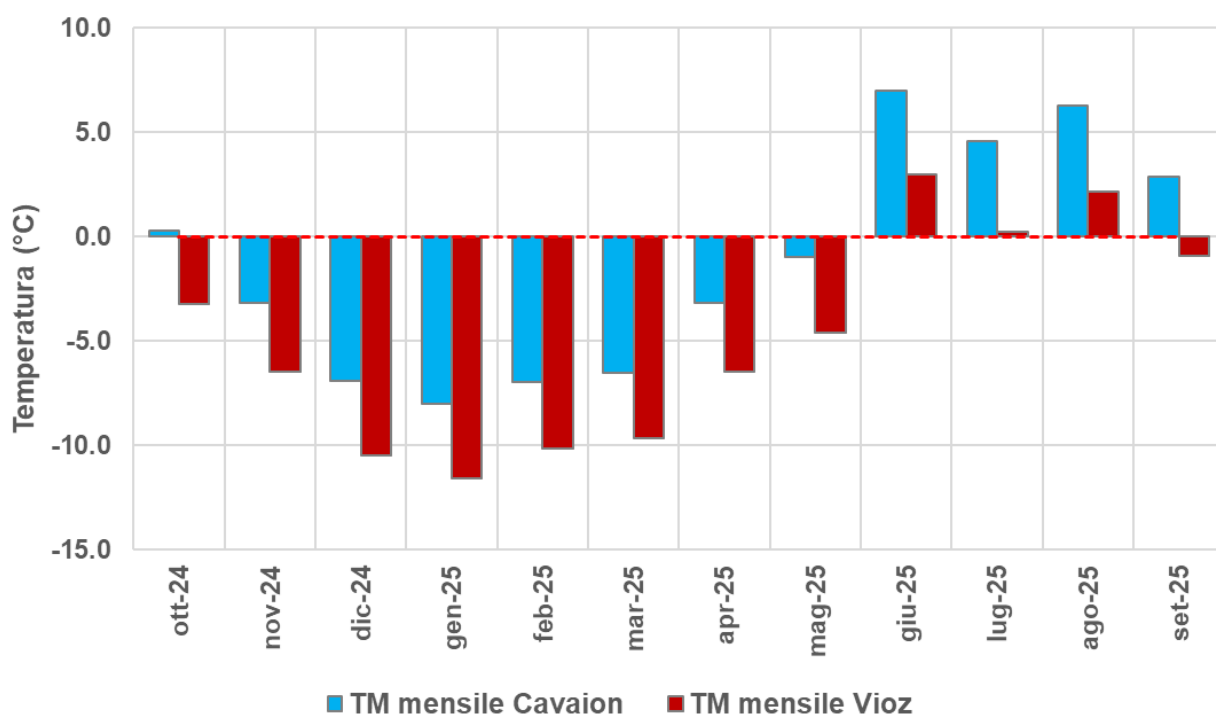


Fig. 6 - Temperatura media mensile dell'aria per l'anno idrologico 2024-2025 presso i siti di Cavaion e rifugio Mantova al Vioz.

Stagione nivologica 2024-2025

La sintesi della stagione nivologica 2024-2025 è tratta dai report di AINEVA (Associazione Interregionale di coordinamento e documentazione per i problemi inerenti alla neve e alle valanghe). I report completi possono essere consultati sulla pagina web di AINEVA (<https://aineva.it/>).

La stagione invernale 2024-2025 si è distinta per una caratteristica dominante: una generale e persistente scarsità di nevicate. Per lunghi periodi, gli spessori di neve al suolo sono stati esigui, tanto che a tutte le quote, anche le più elevate, il manto nevoso si è mantenuto quasi costantemente al di sotto dei valori medi storici, delineando un'annata anomala.

Autunno: Le perturbazioni autunnali, che solitamente portano le prime consistenti nevicate in alta quota, sono state prevalentemente piovose. Questo ha impedito la formazione di una solida base nevosa iniziale, anche a quote superiori ai 2500 metri.

Inverno: Le nevicate invernali sono state poco frequenti e non particolarmente abbondanti. Di conseguenza, lo spessore del manto nevoso è rimasto ridotto per gran parte del periodo, con una copertura assente o poco significativa alle quote più basse.

Primavera: Anche le precipitazioni primaverili sono state nel complesso modeste e non sono riuscite a colmare il deficit accumulato. Questo ha portato a una fusione anticipata e a una permanenza della neve al suolo più breve del solito.

I grafici seguenti (**Fig. 7** e **Fig. 8**) mostrano l'andamento della copertura nevosa al suolo presso alcuni campi neve significativi per il Trentino occidentale (Peio-Tarlenza, Grostè e Passo Tonale) e orientale (Passo Rolle, Passo Valles e Sas Becè-Canazei). I dati sono tratti dal sito web di Meteotrentino, dove possono essere consultate le informazioni complete:

(<https://www.meteotrentino.it/dati/neve/>).

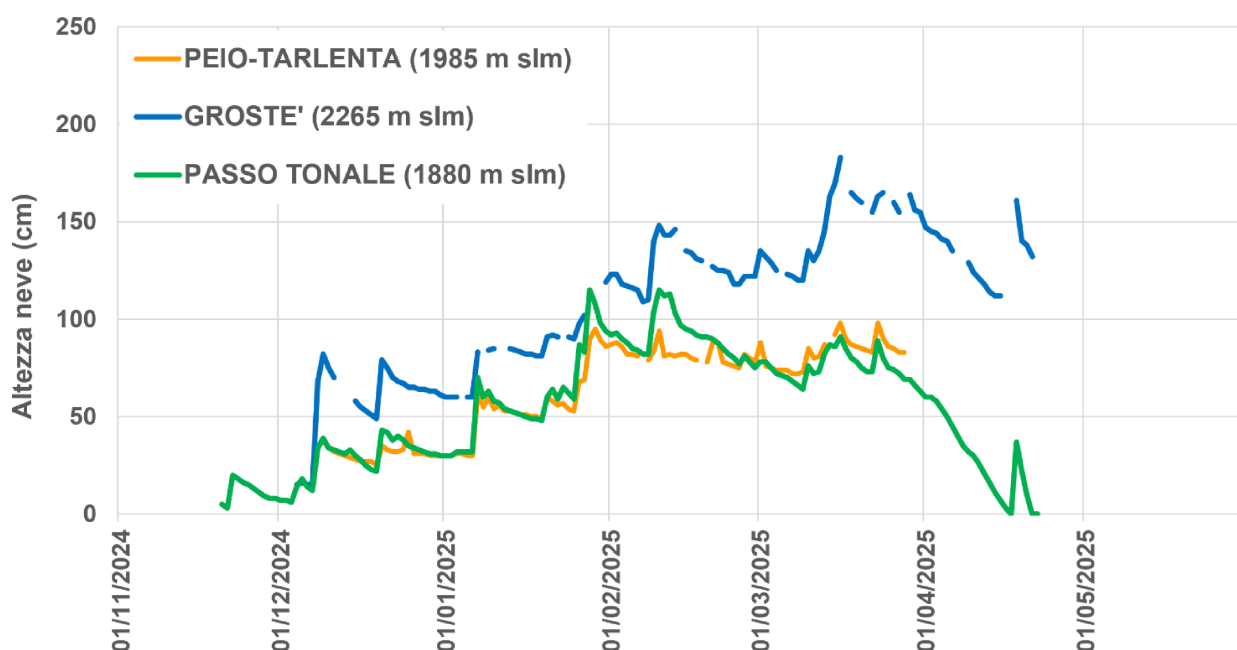


Fig. 7 – Spessore del manto nevoso nella stagione invernale 2024-2025 presso alcuni siti di misura in Trentino Occidentale.

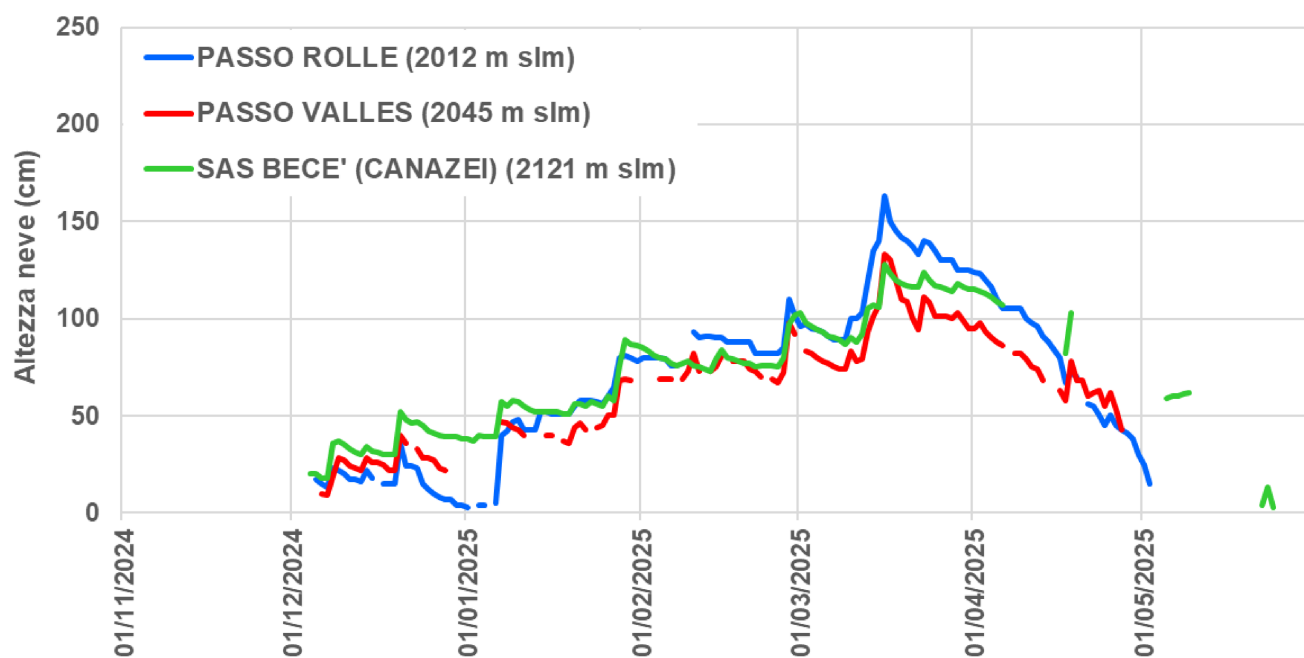


Fig. 8 - Spessore del manto nevoso nella stagione invernale 2024-2025 presso alcuni siti di misura in Trentino Orientale.

Misure di spostamento dei rock glacier

Nell'area di Cavaion, i 24 target posizionati sul **rock glacier di Cima Pontevecchio** sono stati rilevati con GNSS in modalità base-rover il giorno 18 settembre. Contemporaneamente, sono stati rilevati i due punti fissi di controllo posizionati su roccia in posto. Nella stessa giornata, è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico con drone per la costruzione del modello 3D della superficie del rock glacier ed è stata effettuata la manutenzione della fotocamera che inquadra il rock glacier (**Fig. 9**).

Il **rock glacier di Val d'Amola** è stato rilevato il giorno 19 settembre, utilizzando il GNSS in modalità RTK con collegamento alla rete di posizionamento TPOS del Trentino (**Fig. 9**). Oltre ai 25 target posizionati sul rock glacier, sono stati rilevati i due punti fissi di controllo situati sul costone in roccia di fronte al rock glacier (punto di base della stazione totale e punto di controllo denominato "200").

Il **rock glacier di Cima Uomo** è stato rilevato con stazione totale laser il giorno 27 agosto. Il rilievo è stato effettuato dall'Università di Padova (Dipartimento di Scienze Storiche, Geografiche e dell'Antichità), che collabora a questa attività dal primo anno (2010). Sono stati misurati i 24 target posizionati sul rock glacier e due punti di controllo esterni posizionati su roccia in posto.



Fig. 9 – A sinistra, fotocamera installata per inquadrare il rock glacier di Cima Pontevecchio; a destra, operazioni di rilievo della cinematica del rock glacier di Val d'Amola.

Misure di temperatura della superficie del suolo (GST)

Alcuni siti GST sono stati visitati nel mese di luglio, in particolare tre siti posizionati sul **rock glacier di Val Sadole** (11 luglio), sei siti nella **zona di Cavaion** (18 luglio) e quattro siti attorno al **rifugio Mantova al Vioz** (30 luglio). Altri data logger GST sono stati scaricati e mantenuti nei

mesi di agosto e settembre. Nell'**area di Cavaion** il 9 agosto è stato scaricato un ulteriore data logger ed è stata effettuata la manutenzione su altri due strumenti visitati in precedenza. I dati dei siti GST posizionati sul **rock glacier di Cima Uomo** e nelle aree limitrofe sono stati acquisiti il giorno 27 agosto, in concomitanza con le attività di rilievo topografico del rock glacier. Degli otto data logger situati in quest'area dal 2009, tre sono stati prelevati definitivamente e le misure si sono concluse.

Il 6 settembre sono stati acquisiti i dati GST di quattro data logger posizionati in **Val del La Mare sul rock glacier della Forcola** e di altri sensori situati lungo le creste e i versanti circostanti. I dati GST dei tre data logger posizionati sul **rock glacier di Val d'Amola** dal 2008 sono stati acquisiti il 9 settembre e, contemporaneamente, sono stati prelevati definitivamente altri quattro strumenti che erano stati posizionati negli anni precedenti sul rock glacier e nell'area antistante la fronte. I quattro data logger posizionati sul **rock glacier del Maroccaro** sono stati scaricati e mantenuti il giorno 11 settembre. Nello stesso giorno, sono stati scaricati i dati di temperatura dell'aria acquisiti dal data logger posizionato sulla **cresta di Cima Presena**. Nell'**area di Cavaion** il 18 settembre sono stati acquisiti i dati di una catena di termistori posizionata sul **rock glacier di Cima Pontevecchio** e di due data logger che misurano la temperatura della superficie della roccia sulla cresta di confine con la Val di Rabbi.

I numerosi siti di misura GST posizionati nell'**area di Valbiolo** (Passo del Tonale) e in **Val di Bresimo** nell'ambito di un progetto specifico (PRIN 2022 "SUBSURFICE") sono stati dismessi nella tarda estate dopo alcuni anni di funzionamento.

Misure di temperatura del sottosuolo

Il 1° luglio sono stati scaricati i dati annuali di temperatura del sottosuolo del sondaggio in roccia di 17 metri situato presso il **rifugio ai Caduti dell'Adamello** (3040 m s.l.m.). La catena di termistori è stata installata nel 2014 e ha funzionato regolarmente. Nello stesso giorno è stata effettuata la manutenzione e sono stati scaricati i dati del data logger che misura la temperatura dell'aria, posizionato sotto la terrazza del rifugio (**Fig. 18**). I dati relativi a questo sito di monitoraggio sono presentati nel caso di studio a pag. 27.

I dati della catena di termistori installata nella perforazione profonda 50 m situata nell'**area di Cavaion** non necessitano di essere scaricati, in quanto sono teletrasmessi presso il Servizio Geologico. Sono state tuttavia effettuate operazioni di manutenzione della strumentazione, in particolare il giorno 18 settembre.

Campionamenti per la chimica e la biologia delle acque

La maggior parte dei campionamenti di acque in relazione al permafrost si è svolta nell'ambito di un progetto specifico coordinato dall'Università di Padova (progetto PRIN 2022 "SUBSURFICE"). Durante l'estate, sono stati campionati più volte sorgenti e torrenti nelle aree di **Valbiolo** (Passo del Tonale), **Val di Bresimo** (Malga Preghena e Bordolona) **Val del La Mare** (Passo della Forcola e area di Cavaion) e **Val Sadole**.

Il **Rio Sadole** è stato campionato più volte, dalla sorgente Maseron fino in prossimità del suo sbocco nel Fiume Avisio, anche nell'ambito del progetto Alpine Space WATERWISE. Oltre alla raccolta di campioni d'acqua per analisi chimiche (bilancio ionico, nutrienti ed elementi in traccia) e isotopiche e di campioni per l'analisi delle diatomee bentoniche, è stato installato poco a monte

della sorgente Maseron un campionario Palmex per la raccolta di campioni di pioggia, dove a giugno sono stati raccolti anche campioni di neve per l'analisi isotopica. Presso i siti campionati nell'ambito dei due progetti, dati ad alta frequenza di temperatura dell'acqua, conducibilità e, in alcuni casi, del livello dell'acqua, sono stati raccolti mediante sensori installati in loco.

Altri campionamenti hanno riguardato le acque dell'alta **Val di Genova** (sorgente e piccolo lago nei pressi del rock glacier Maroccaro e Lago Scuro), effettuati l'11 settembre. Altri campioni sono stati prelevati in **Val de La Mare** (Lago delle Marmotte e torrenti limitrofi) il 18 settembre. Questi campionamenti rientrano nell'ambito delle attività di monitoraggio effettuate da alcuni anni per la caratterizzazione chimico-fisica e biologica delle acque in relazione alla degradazione del permafrost.

Misure a lungo termine della cinematica dei rock glacier

Rock glacier del Maroccaro e di Val d'Amola

La cinematica dei rock glacier del Maroccaro e di Val d'Amola è misurata annualmente dal 2001. Per il primo di essi, nella **Figura 10** sono mostrati gli spostamenti planimetrici totali misurati su tutto il periodo di osservazione (2001-2024) dei blocchi rocciosi utilizzati come target. I blocchi caratterizzati da un comportamento cinematico più accentuato, situati verso la fronte del rock glacier, si sono spostati tra 6 e 7 metri in 23 anni (punti 1, 4 e 6). Da osservare che i blocchi contrassegnati dai punti 2 e 3 sono crollati dalla fronte del rock glacier e non sono attualmente misurati.

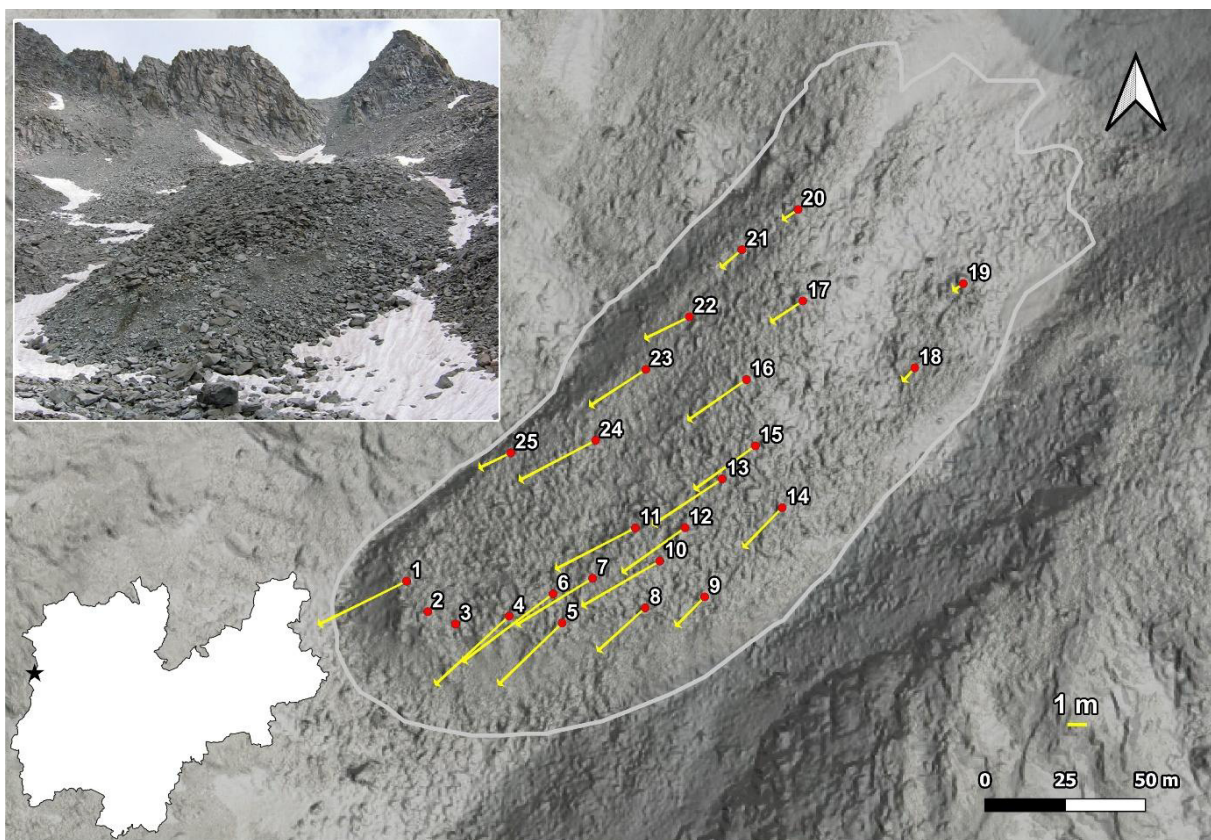


Fig. 10 – Spostamento planimetrico totale dal 2001 al 2024 per i target misurati sul rock glacier del Maroccaro. Negli inserti, un'immagine del rock glacier (in alto) e l'ubicazione in Trentino (in basso).

Il grafico di **Figura 11** mostra la variazione annuale di velocità planimetrica dei singoli target posizionati sul rock glacier del Maroccaro (linee grigie) e della media di tutti i target (linea rossa). Nel grafico, la linea tratteggiata nera indica la velocità media di spostamento di tutti i blocchi su tutto il periodo di osservazione, pari a circa 0.2 m/anno. Si può osservare una considerevole variabilità interannuale della velocità media (linea rossa), con alcuni picchi nel 2015, 2019-2021 (misura biennale) e 2024, quando la velocità media ha raggiunto il massimo della serie storica, con circa 0.4 m/anno. Da osservare, inoltre, una evidente tendenza all'accelerazione della velocità media, caratteristica comune alla maggior parte dei rock glacier monitorati sull'arco alpino, in risposta all'aumento della temperatura dell'aria negli ultimi decenni.

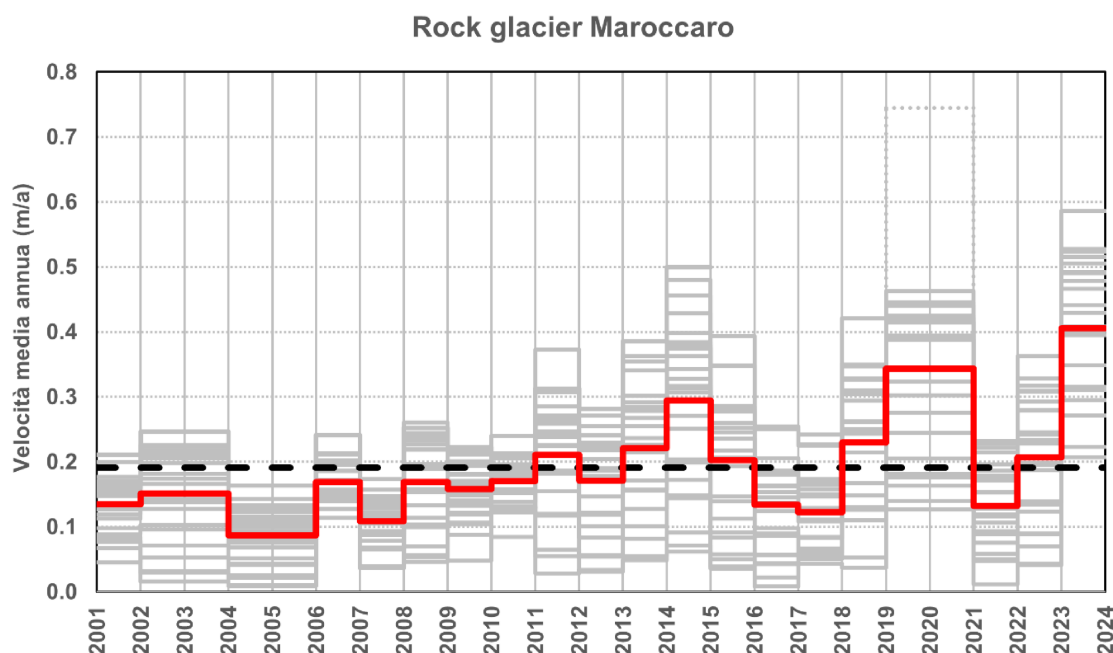


Fig. 11 – Grafico che mostra lo spostamento medio annuo dei target misurati sul rock glacier del Maroccaro (linea rossa), lo spostamento medio su tutto il periodo di osservazione (linea tratteggiata nera) e lo spostamento annuo dei singoli target (linee grigie).

Gli spostamenti totali dei punti target misurati sul rock glacier di Val d'Amola tra 2001 e 2025 sono mostrati nella **Figura 12**. Gli spostamenti massimi, nei 24 anni di osservazione, hanno interessato i blocchi contrassegnati con i numeri 15 (5,8 m) e 14 (5,2 m). La superficie di questo rock glacier è caratterizzata da alcune zone più dinamiche (settore sinistro dell'area frontale e settore destro verso le quote più elevate) e altre dove i punti misurati sono pressoché fermi (settore destro dell'area frontale). Inoltre, anche le direzioni di spostamento sono considerevolmente diverse da zona a zona.

Il grafico delle variazioni annuali di velocità planimetrica media (linea rossa in **Fig. 13**) mostra una certa variabilità interannuale, con un picco fuori scala fatto registrare nel 2023. Questo dato, non ancora verificato definitivamente, è superiore di circa il 250% rispetto alla velocità media di tutto il periodo di osservazione, pari a 0,13 m/anno (linea nera tratteggiata). Le cause di questa improvvisa accelerazione, annullatasi nei due anni successivi, non sono note. Nel periodo di osservazione, la velocità media non ha mostrato una generale tendenza ad accelerare o rallentare.

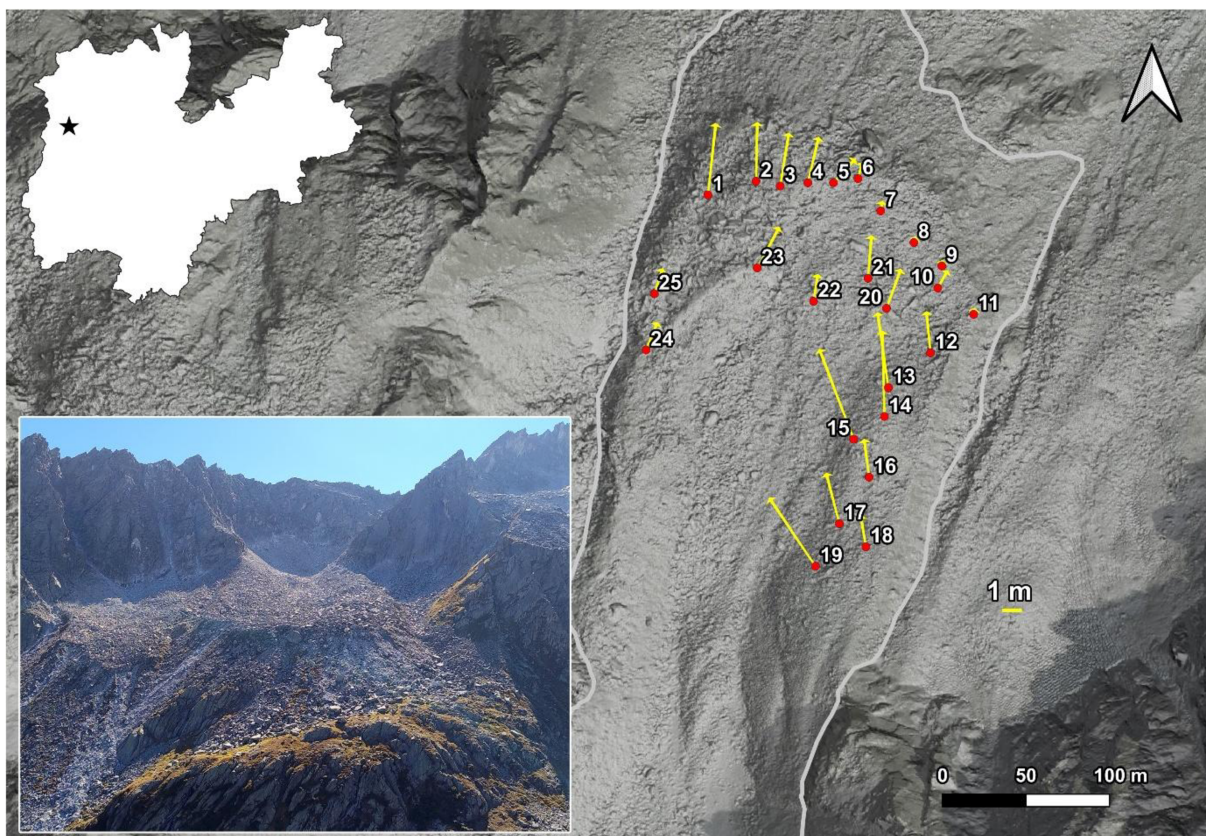


Fig. 12 - Spostamento planimetrico totale dal 2001 al 2025 per i target misurati sul rock glacier di Val d'Amola. Negli inserti, un'immagine del rock glacier (in basso) e l'ubicazione in Trentino (in alto).

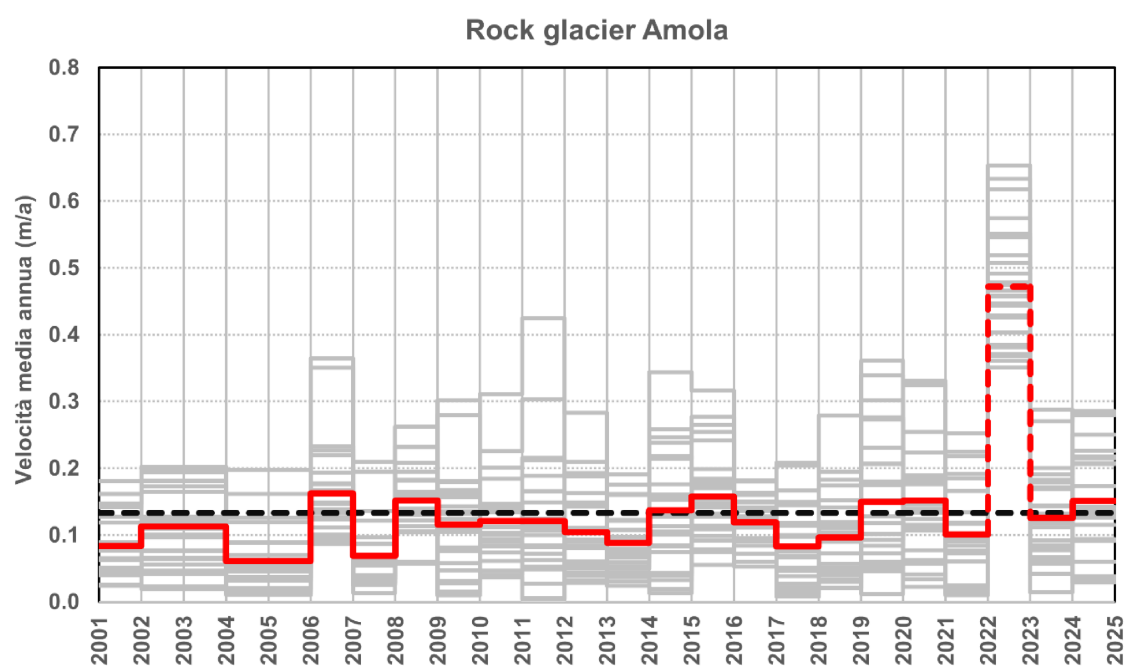


Fig. 13 - Grafico che mostra lo spostamento medio annuo dei target misurati sul rock glacier di Val d'Amola (linea rossa), lo spostamento medio su tutto il periodo di osservazione (linea tratteggiata nera) e lo spostamento annuo dei singoli target (linee grigie).

Rock glacier di Cima Uomo

Le misure di spostamento di questo rock glacier sono iniziate nel 2010 per quanto riguarda 14 target principali (H1-H14 **Fig. 14**), ai quali si riferiscono i dati e le figure presentati di seguito. A questi sono stati aggiunti nel 2014 ulteriori nove punti dislocati lungo il margine frontale (non mostrati nelle figure). Come si può osservare nella **Figura 14**, lo spostamento planimetrico massimo in tutto il periodo di osservazione (2010-2025) è stato superiore a 1,5 m (target H2, H10 e H13). La velocità dei target è in generale più bassa sul settore sinistro del corpo detritico e aumenta leggermente verso monte. La variabilità interannuale della velocità media di tutti i punti misurati è piuttosto bassa, con un evidente picco di velocità nel 2016 (**Fig. 15**, linea rossa). Non sono note le cause di questa breve accelerazione che è mostrata da tutti i target misurati, ma negli anni successivi la velocità è ritornata ad attestarsi attorno al valore medio di tutto il periodo di osservazione (0,1 m/anno circa, linea tratteggiata nera).

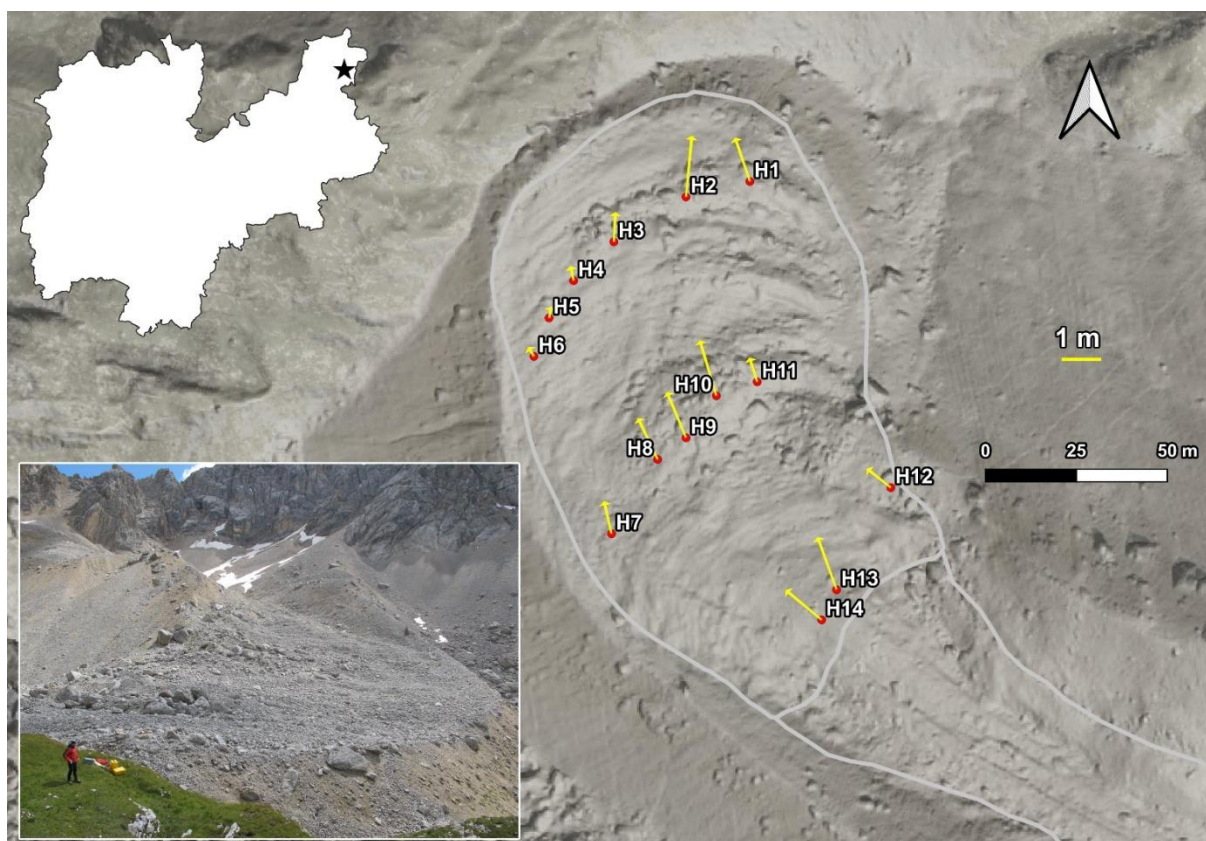


Fig. 14 - Spostamento planimetrico totale dal 2010 al 2025 per i target misurati sul rock glacier di Cima Uomo. Negli inserti, un'immagine del rock glacier (in basso) e l'ubicazione in Trentino (in alto).

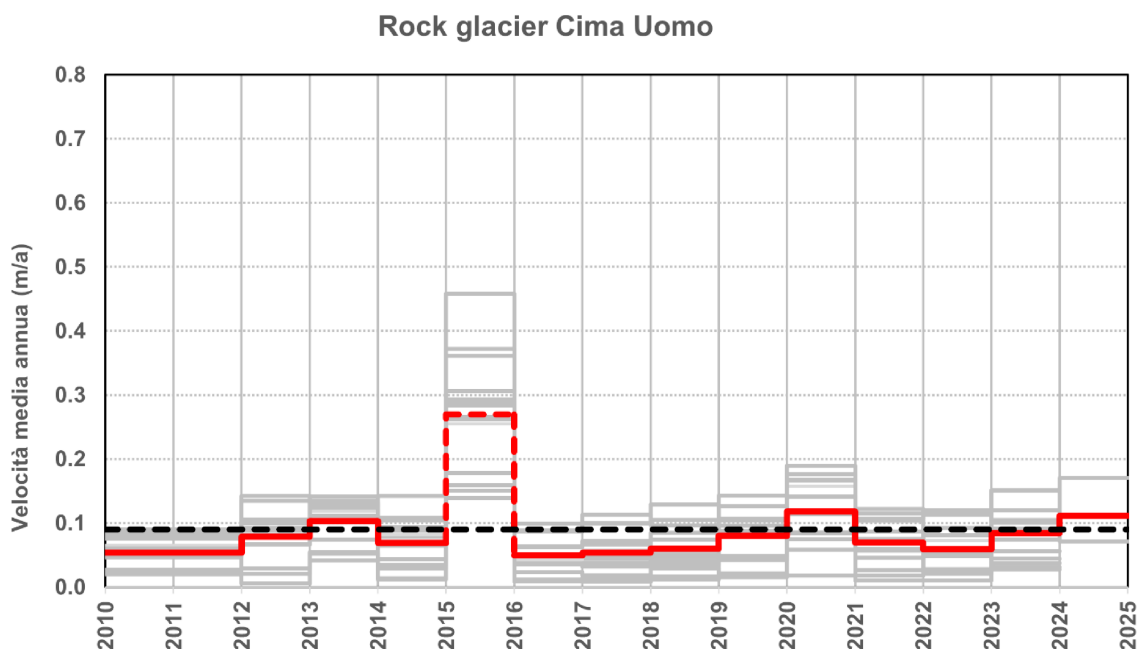


Fig. 15 - Grafico che mostra lo spostamento medio annuo dei target misurati sul rock glacier di Cima Uomo (linea rossa), lo spostamento medio su tutto il periodo di osservazione (linea tratteggiata nera) e lo spostamento annuo dei singoli target (linee grigie).

Rock glacier di Cima Pontevecchio

Le misure di spostamento di questo rock glacier sono iniziate nel 2019 e riguardano il lobo inferiore del corpo detritico. Tali misure sono iniziate dopo aver osservato i considerevoli cambiamenti morfologici che lo hanno interessato negli ultimi anni, suggerendo che potesse essere caratterizzato da una cinematica particolarmente veloce. Fin dall'inizio sono state osservate velocità di spostamento significative, quantificabili in alcuni metri all'anno. Lo spostamento planimetrico totale nell'intero periodo di osservato (2019-2025) è mostrato in **Figura 16**. Gli spostamenti planimetrici massimi superano i 18 m in sei anni (target 9 e 13), mentre lo spostamento planimetrico medio di tutti i 24 punti misurati è stato di circa 15,5 m.

Le velocità planimetriche dei target misurati sono mostrate nel grafico di **Figura 17**. Si osserva una certa variabilità interannuale, con una velocità più elevata nel primo biennio di misurazione (2019-2021). La velocità media di tutti i punti misurati nell'intero periodo di osservazione è di poco superiore a 2,5 m/anno (linea nera tratteggiata). La serie di misure è ancora troppo breve per osservare eventuali tendenze ad accelerazioni o rallentamenti. Si tratta comunque di velocità molto elevate, che suggeriscono come probabilmente questo settore del rock glacier si trovi in una fase di "destabilizzazione".

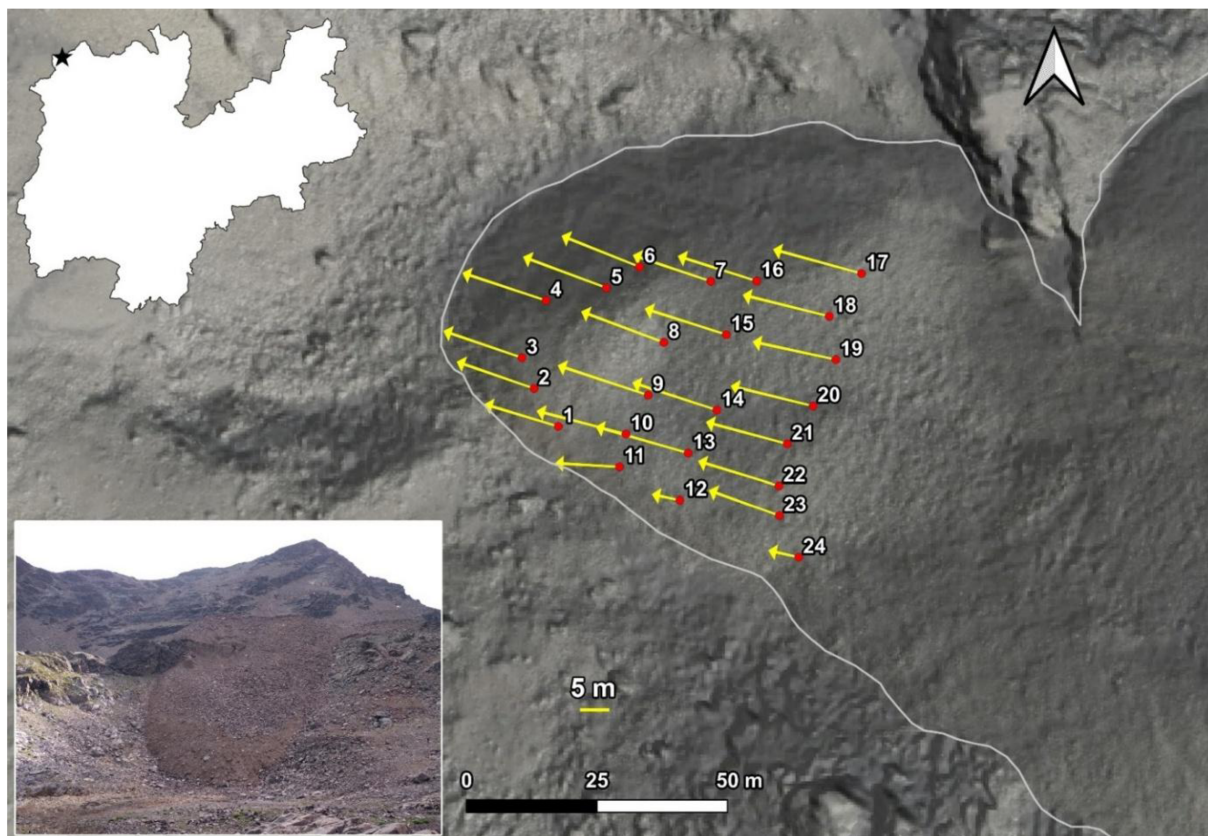


Fig. 16 - Spostamento planimetrico totale dal 2019 al 2025 per i target misurati sul rock glacier di Cima Pontevecchio. Negli inserti, un'immagine del rock glacier (in basso) e l'ubicazione in Trentino (in alto).

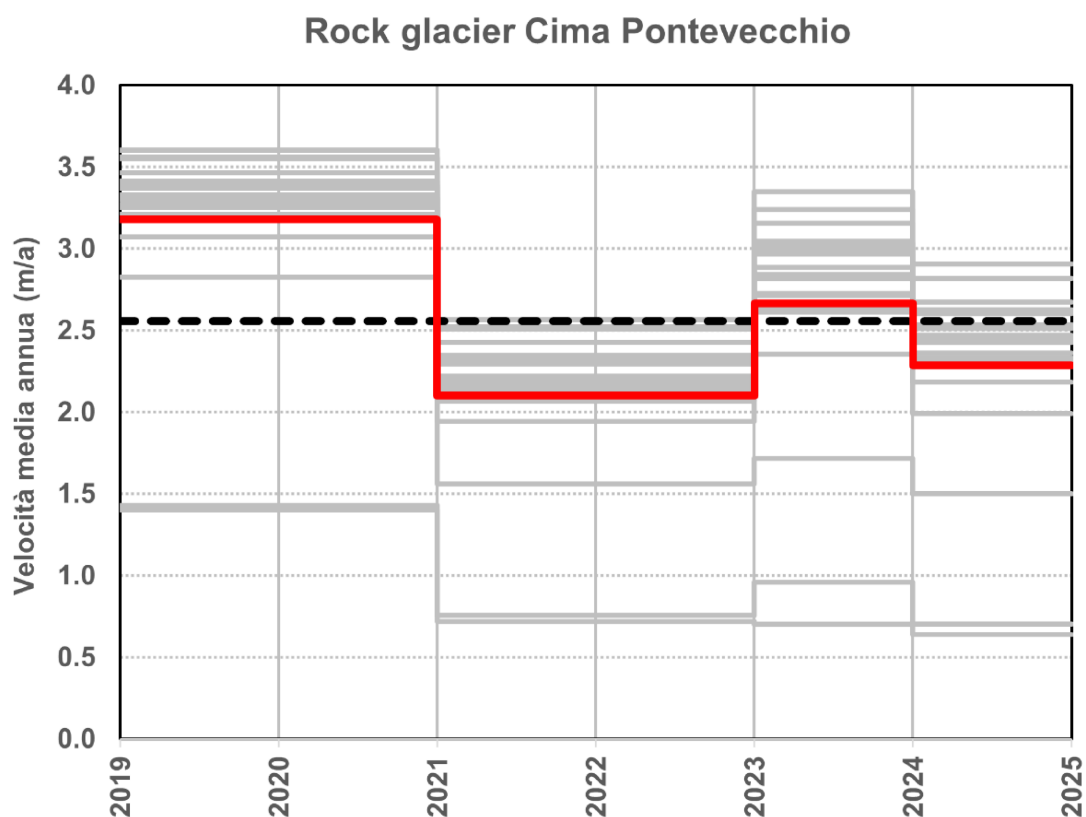


Fig. 17 - Grafico che mostra lo spostamento medio annuo dei target misurati sul rock glacier di Val di Cima Pontevecchio (linea rossa), lo spostamento medio su tutto il periodo di osservazione (linea tratteggiata nera) e lo spostamento annuo dei singoli target (linee grigie).

Dieci anni di monitoraggi presso il rifugio Ai Caduti dell'Adamello

Il rifugio Ai Caduti dell'Adamello si trova a 3040 m s.l.m. nei pressi del Passo della Lobbia Alta ed è collocato su un ripido versante roccioso esposto a sud-ovest. Nell'ambito dei lavori di ristrutturazione del rifugio, svolti nei primi anni '90 dello scorso secolo, a valle dell'edificio sono stati realizzati alcuni fori inclinometrici verticali, con lo scopo di misurare le eventuali deformazioni del versante. Nel 2014, uno dei fori è stato attrezzato con una catena di termistori che misurano la temperatura del sottosuolo fino ad una profondità di 17 m. Allo stesso tempo, sotto la terrazza del rifugio è stato posizionato un data logger per la misura della temperatura dell'aria (**Fig. 18**).



Fig. 18 – Il rifugio Ai Caduti dell'Adamello, con i siti di ubicazione della perforazione e della misura della temperatura dell'aria.

Gli strumenti sono tuttora in funzione e in questo report sono presentati i dati osservati nei primi dieci anni idrologici (dal 2014-2025 al 2023-2024).

Per quanto riguarda la temperatura dell'aria, il grafico di **Figura 19** mostra l'andamento dei valori medi giornalieri su tutto il periodo di osservazione (linea blu, scala di riferimento a sinistra). Nello stesso grafico si può osservare la variazione della temperatura media annuale (linea arancio, scala di riferimento a destra) e la temperatura media su tutto il periodo di osservazione, che è pari a $-1,5^{\circ}\text{C}$ (linea nera tratteggiata, scala di riferimento a destra).

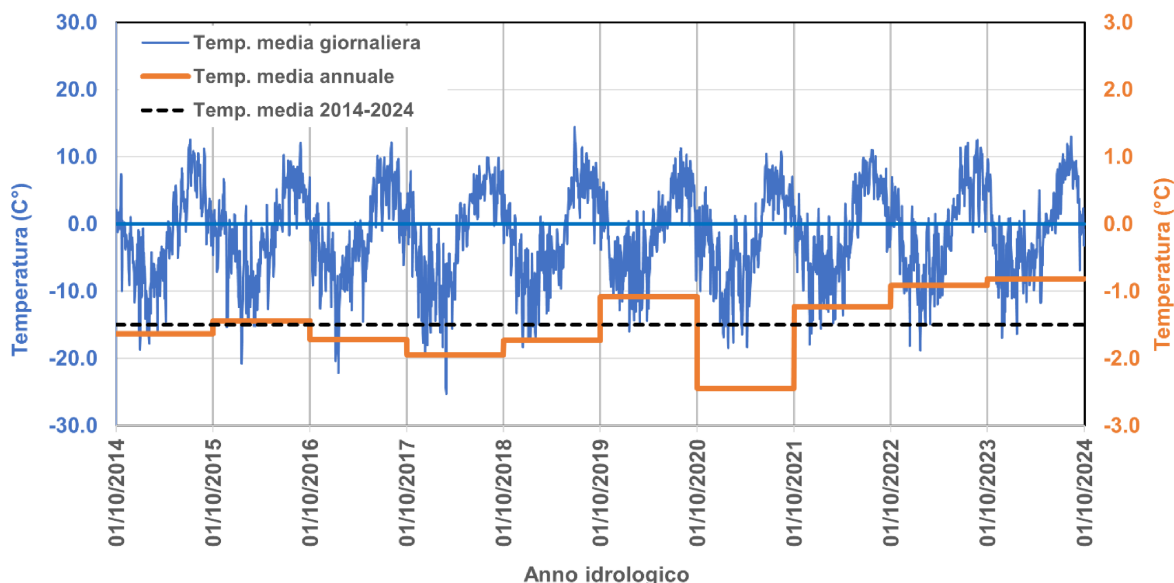


Fig. 19 – Temperatura media giornaliera dell'aria presso il rifugio Ai Caduti dell'Adamello (linea blu, scala a sinistra); temperatura media annua (linea arancio, scala a destra) e temperatura media su tutto il periodo di osservazione (linea nera tratteggiata, scala a destra).

Le temperature medie mensili sono mostrate nel grafico di **Figura 20**. Le linee grigie si riferiscono ai singoli anni idrologici, la linea blu alla media su tutti i dieci anni di osservazione. Il mese più freddo è risultato gennaio, con una temperatura media di circa -9°C , quello più caldo luglio con un valore di circa $6,8^{\circ}\text{C}$. Le variazioni di temperatura media annua nei dieci anni di osservazione sono mostrate nel grafico di **Figura 21**. L'anno più freddo è stato il 2020-2021 con $-2,4^{\circ}\text{C}$, quello meno freddo il 2023-2024 con una temperatura di $-0,8^{\circ}\text{C}$. Come si può osservare dall'interpolazione lineare rappresentata dalla linea blu tratteggiata, c'è una netta tendenza all'aumento della temperatura media annua, quantificabile in un incremento di $0,07^{\circ}\text{C}$ all'anno.

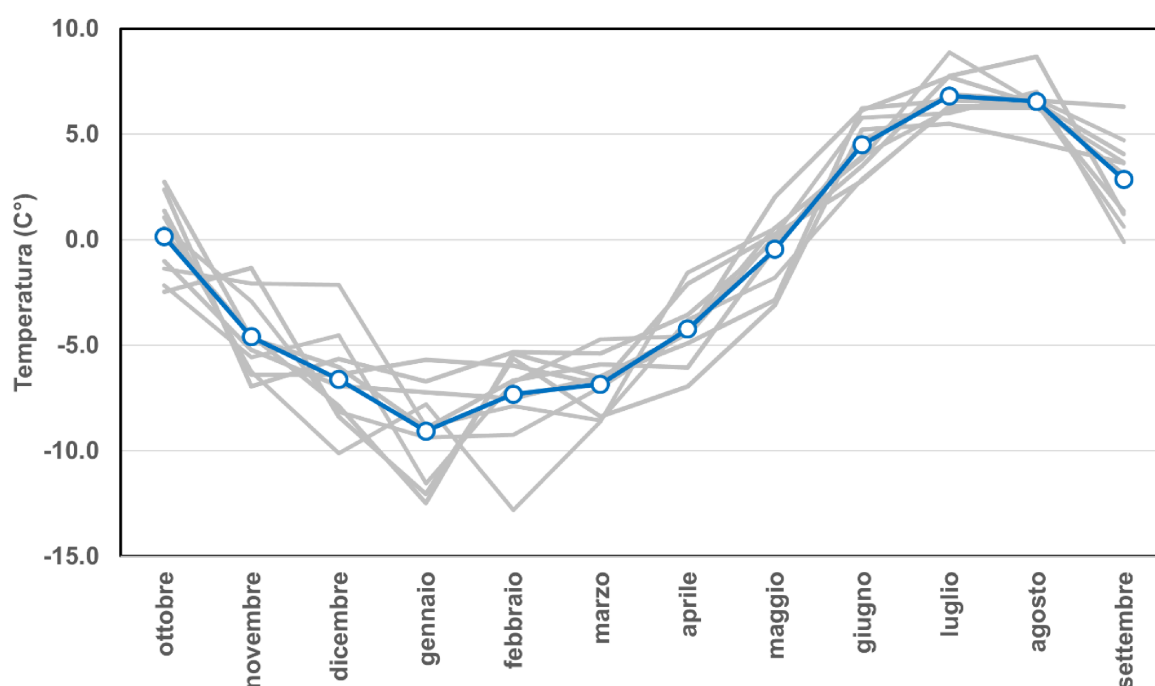


Fig. 20 – Temperatura media mensile dell'aria presso il rifugio Ai Caduti dell'Adamello. La linea blu indica la media di tutti gli anni di misurazione (2014-2024), le linee grigie indicano i singoli anni.

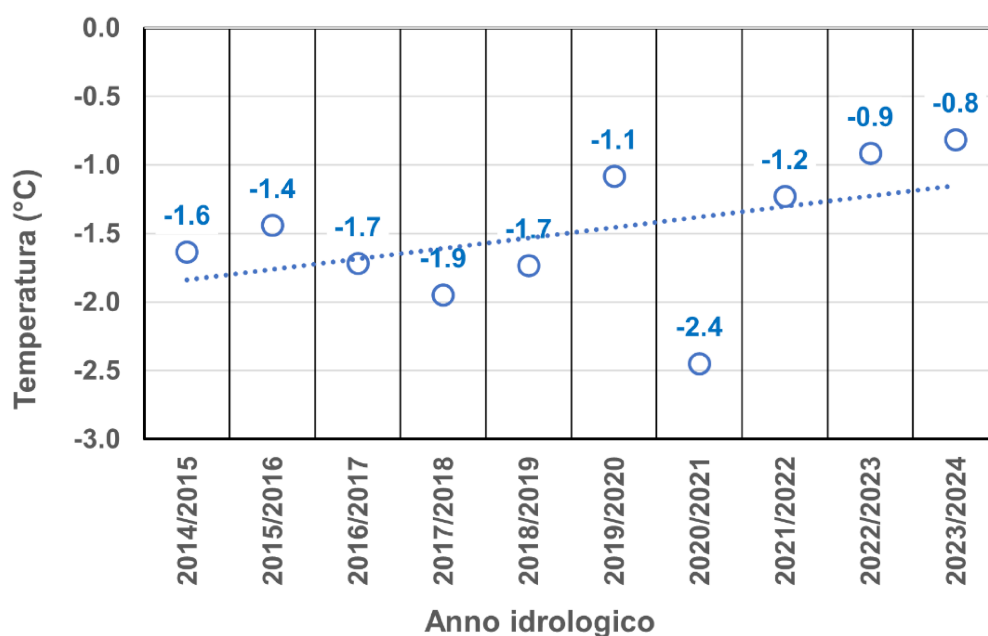


Fig. 21 – Temperatura media annua dell'aria presso il rifugio Ai Caduti dell'Adamello per tutti gli anni di osservazione. La linea blu indica l'interpolazione lineare dei dati annuali (linea di tendenza).

Le temperature del sottosuolo sono mostrate nel grafico di **Figura 22** per tutte le profondità misurate nei dieci anni idrologici di osservazione. I boxplot rappresentano in modo aggregato i valori massimo, minimo e mediano di ciascuna profondità misurata, nonché lo scarto interquartile (box rettangolare di colore rosso). Come si può osservare, le variazioni di temperatura sono più sensibili vicino alla superficie e si smorzano progressivamente in profondità. Per confronto, il boxplot di sinistra (colore azzurro) mostra con la stessa modalità i dati di temperatura dell'aria.

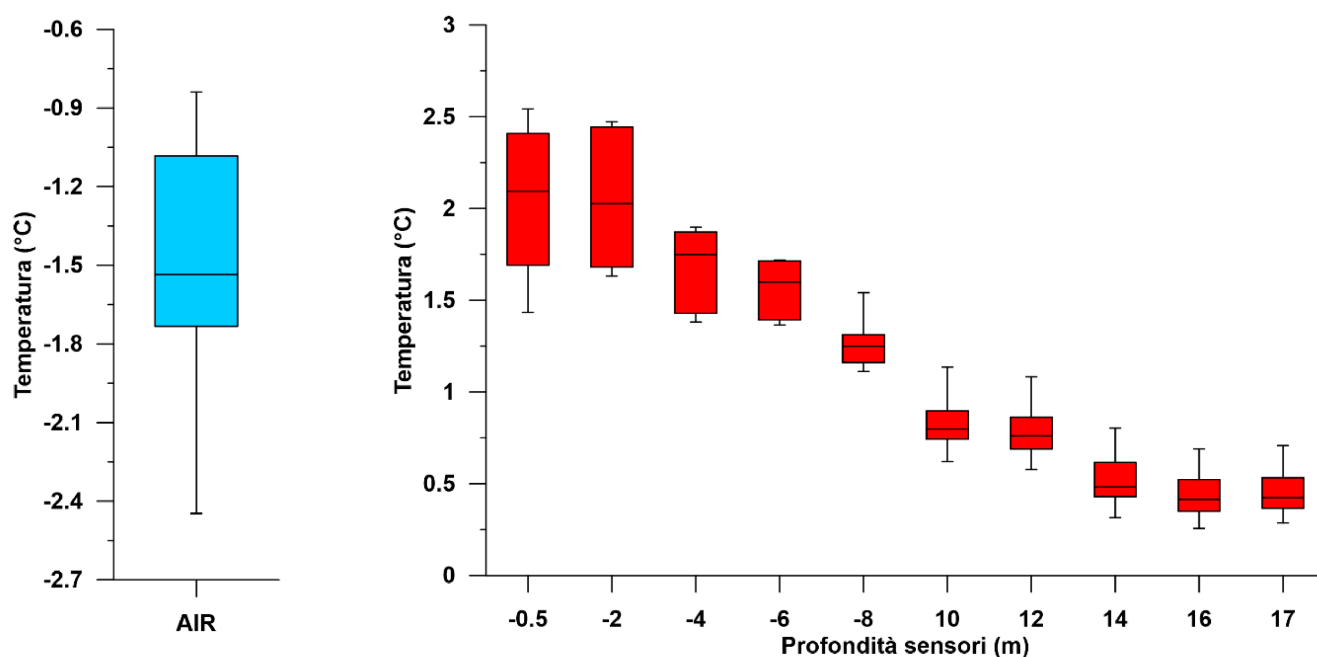


Fig. 22 – Boxplot della temperatura dell'aria (a sinistra) e del sottosuolo (a destra) presso il rifugio Ai Caduti dell'Adamello. I boxplot indicano gli estremi superiore e inferiore delle temperature medie annue, la temperatura mediana (linea nera orizzontale) e lo scarto interquartile (rettangolo colorato) su tutto il periodo di osservazione.

Le temperature medie mensili del sottosuolo alle varie profondità sono mostrate dal grafico di **Figura 23**. Anche in questo caso i dati del sottosuolo sono confrontati con quelli di temperatura dell'aria (punti isolati in alto nel grafico). Si osserva che la temperatura del sottosuolo varia nel corso dell'anno fino a circa 16 m di profondità. Al di sotto, le variazioni annuali e interannuali sono molto limitate e la temperatura si attesta costantemente su valori attorno a 0°C. Non si può escludere che condizioni più fredde si possano riscontrare a profondità maggiori di quella massima indagata, ma temperature prossime a 0°C rendono il permafrost presso questo sito molto sensibile ai cambiamenti climatici.

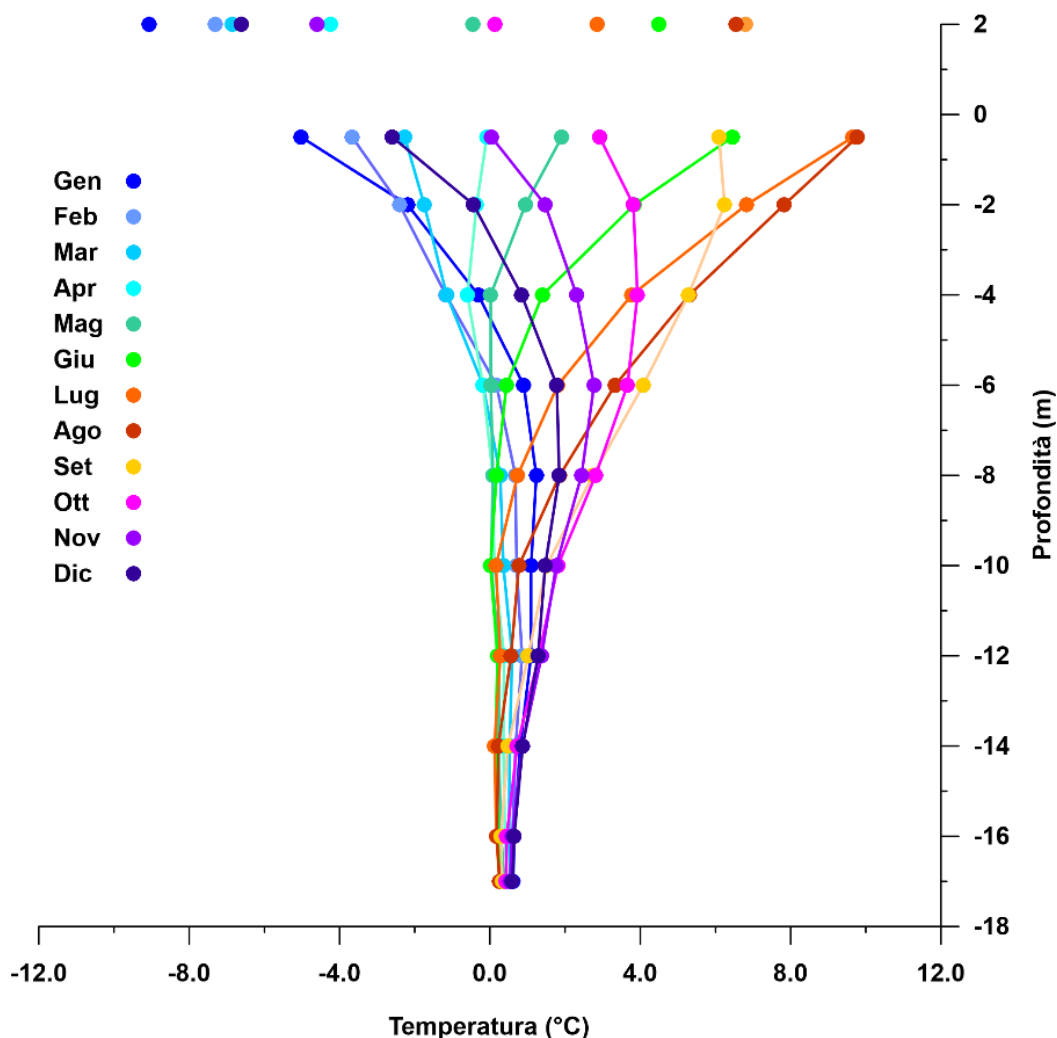


Fig. 23 – Temperatura media mensile del sottosuolo fino a 17 metri di profondità presso il rifugio il rifugio Ai Caduti dell'Adamello, calcolata su tutto il periodo di osservazione. I punti in alto indicano la temperatura media mensile dell'aria presso lo stesso sito.

Monitoraggio della cresta del Monte Vioz

Uno dei siti chiave per le indagini sul permafrost in Trentino si trova sulla cresta rocciosa che conduce da Sud-Est alla cima del Monte Vioz (3645 m), nel Gruppo Ortles Cevedale. Lungo la cresta, poche centinaia di metri a valle della cima, si trova il rifugio Mantova al Vioz (3535 m), che costituisce l'infrastruttura alpina di quota più elevata nel settore centro-orientale delle Alpi. Il substrato dell'area studiata è costituito da rocce di tipo metamorfico, appartenenti alla falda dell'Ortles-Campo. In particolare, si tratta di micascisti a granato e staurolite che appartengono geologicamente all'Unità di Peio. Le rocce del substrato sono soggette a intensa degradazione meteorica e nell'area sono attivi processi morfogenetici legati all'azione della gravità e del gelo.

Il monitoraggio del permafrost presso il rifugio è iniziato nel 2010 con misure continuative della temperatura della superficie del suolo (GST - Ground Surface Temperature). A questo scopo, sono stati posizionati attorno al rifugio quattro sensori di temperatura collegati a data logger, che consentono di effettuare misure con scansione oraria (**Fig. 24**).

I monitoraggi di questa area sono stati intensificati a partire dal 2022, quando è stato osservato come il tratto di cresta che conduce dal rifugio alla cima del Monte Vioz fosse interessato da numerose fessure disposte longitudinalmente, lunghe fino ad alcuni metri e larghe fino a qualche decimetro (**Fig. 24**). L'ipotesi era che le temperature molto elevate dell'estate avessero accelerato un fenomeno di deformazione della cresta già in atto e che la degradazione del permafrost potesse essere una delle possibili concause.

Tra il 2022 e il 2025 nell'area del rifugio sono state effettuate numerose indagini con lo scopo di osservare eventuali movimenti della cresta, verificare la presenza di permafrost nel massiccio roccioso e misurare la temperatura del sottosuolo. Sono quindi state effettuate misure interferometriche con radar terrestre (Ground-Based SAR), sia di un tratto di cresta tra il rifugio e la cima Vioz, sia di un'area più ampia che comprende tutto il versante meridionale del Monte Vioz. Le tecniche interferometriche di questo tipo consentono di rilevare movimenti centimetrici con una risoluzione temporale dell'ordine dei minuti.

Inoltre, nell'area del rifugio sono state effettuate indagini geofisiche, in particolare tomografie elettriche (ERT – Electrical Resistivity Tomography) e indagini sismiche a rifrazione condotte sugli stessi profili.

Infine, nell'estate del 2025 è stato realizzato un sondaggio a carotaggio continuo nei pressi del rifugio, allo scopo di campionare le rocce del substrato e l'eventuale presenza di ghiaccio. Inoltre, il foro è stato attrezzato con una catena di termistori per la misura della temperatura del sottosuolo e osservare nel tempo l'eventuale degradazione del permafrost.

In questo report sono brevemente presentati e commentati i principali risultati delle indagini effettuate a partire dal 2010.

GST

L'evoluzione della temperatura media giornaliera per i quattordici anni di misure dei quattro siti GST situati attorno al rifugio Mantova al Vioz è mostrata nel grafico di **Figura 25**. I dati evidenziano alcune lacune, dovute a malfunzionamento degli strumenti e all'interruzione forzata nel periodo della pandemia. Sono state registrate temperature medie giornaliere particolarmente basse, fino a quasi -25°C per il sito PAT-SG09, nell'inverno del 2016, probabilmente in

concomitanza con una fase di scarsità di neve. Le temperature estive non hanno mai superato i 15°C.



Fig. 24 – A sinistra, i siti GST situati presso il rifugio Mantova al Vioz; a destra, alcune fessure beanti osservate sulla cresta del Monte Vioz nell'estate del 2022.

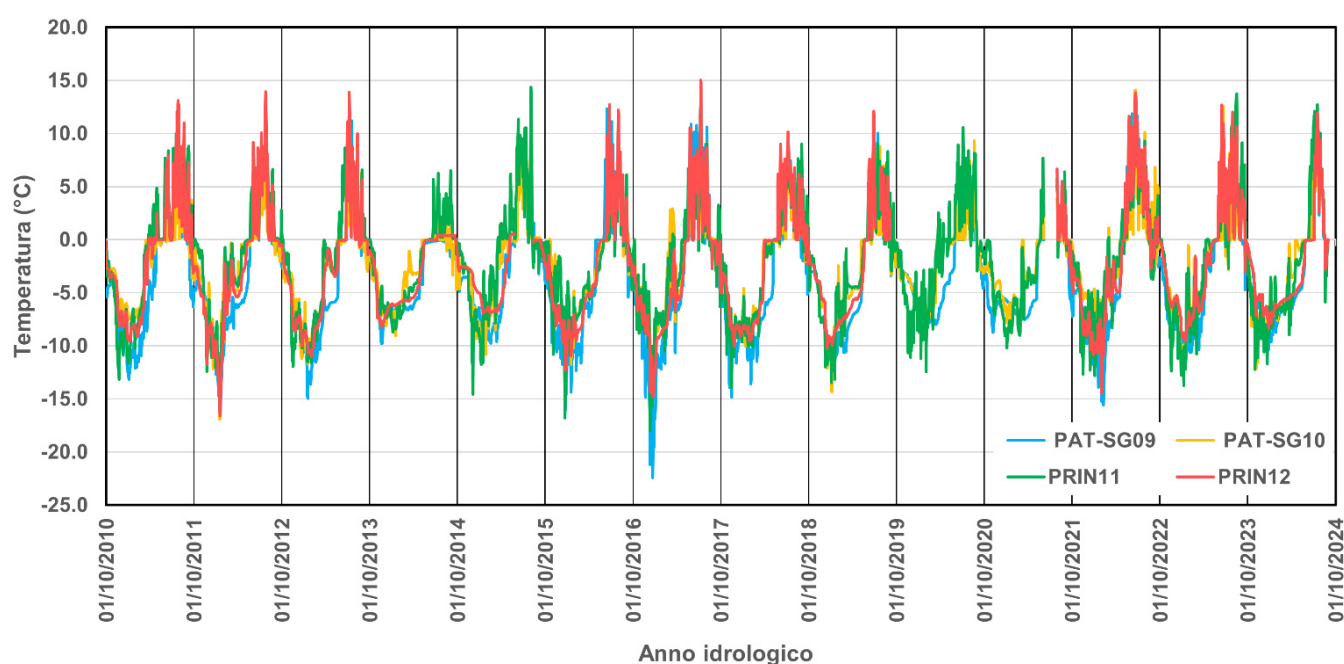


Fig. 25 – Temperatura media giornaliera della superficie del suolo dal 2010 al 2024 per i quattro siti GST situati nei pressi del rifugio Mantova al Vioz.

Sono state calcolate le temperature medie annue, che per tutti i siti di monitoraggio si sono attestate su valori negativi in tutto il periodo di osservazione (**Fig. 26**). La temperatura più bassa, pari a -4,7°C, è stata registrata presso il sito PAT-SG09 nell'anno 2017-2018. Soltanto per dieci anni su quattordici è stato possibile calcolare la temperatura media dei quattro siti, che si è attestata tra un valore minimo di -3,2°C (2012-2013) e uno massimo di -2°C (2021-2022). Tali temperature confermano la presenza di permafrost in tutti i siti misurati.

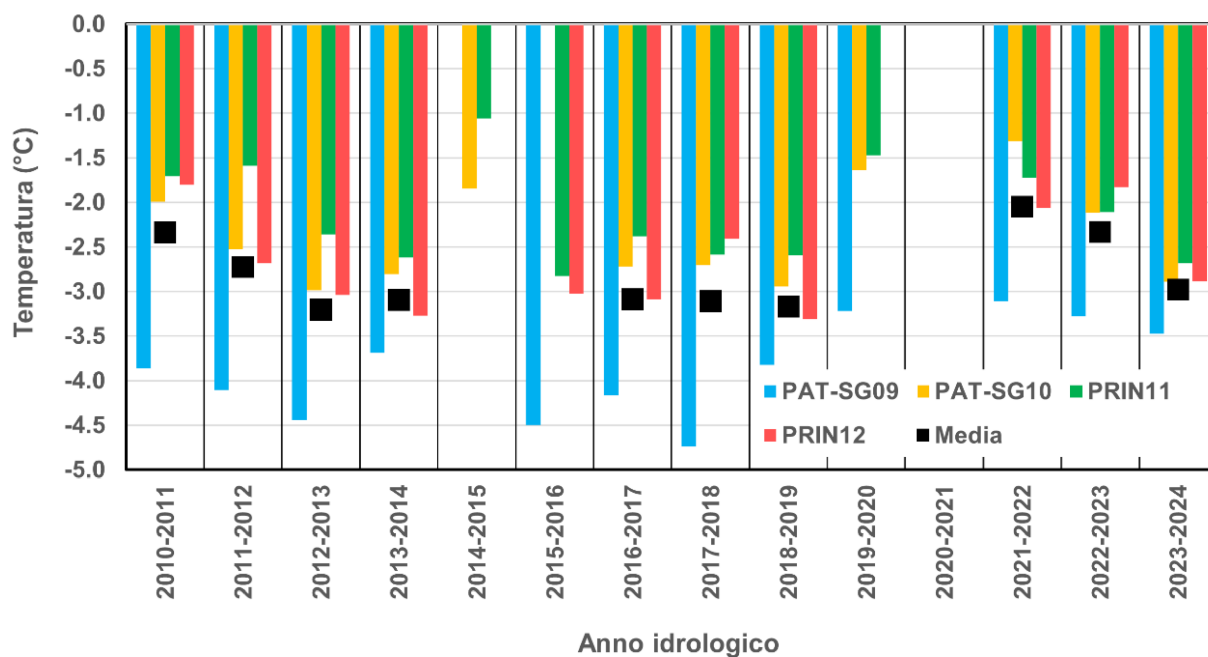


Fig. 26 – Temperatura media annua della superficie del suolo dal 2010 al 2024 dei quattro siti GST situati nei pressi del rifugio Mantova al Vioz. I quadrati neri rappresentano la media dei quattro siti.

Interferometria radar e indagini geofisiche

La prima campagna di misure radar si è svolta dal 13 al 30 agosto 2022 e ha interessato un settore di cresta tra il rifugio e la cima Vioz. Lo strumento GB-SAR, messo a disposizione dal Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Pavia, ha funzionato ininterrottamente, effettuando un'acquisizione ogni 30 minuti. L'analisi interferometrica dei dati, che sono consistiti in un totale di oltre 800 acquisizioni, ha prodotto un insieme di più di 8000 target puntuali distribuiti sull'area studiata. Il movimento dei target puntuali è caratterizzato da un pattern eterogeneo e l'analisi cinematica ha mostrato come alcuni settori dell'area indagata abbiano fatto registrare, in poco più di 15 giorni, spostamenti lungo la linea di osservazione dello strumento (LOS – Line Of Sight) superiori anche a 30 cm (**Fig. 27**).

Le successive campagne interferometriche hanno interessato l'intero versante Sud-Ovest del Monte Vioz e sono state svolte tra settembre e ottobre del 2024 e nel mese di agosto del 2025. Si è trattato di monitoraggi interferometrici da terra tipo Periodical Check, realizzati con un sistema GBInSAR (Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) e affidati dal Servizio Geologico alla ditta Ellegi S.r.l. di Milano. Il sistema GBInSAR LiSALab è stato posizionato sul tetto della stazione di arrivo della funivia Peio 3000, in modo da poter inquadrare tutto il versante interessato. I dati acquisiti hanno permesso di effettuare analisi a breve termine, relative a ciascuna campagna di monitoraggio, ed analisi a medio lungo termine, confrontando e correlando i dati acquisiti nel 2024 con quelli acquisiti nel 2025, al fine di generare una mappa degli spostamenti di medio-lungo termine che interessano l'intero versante e ricostruire l'evoluzione della deformazione del versante nel tempo e nello spazio.

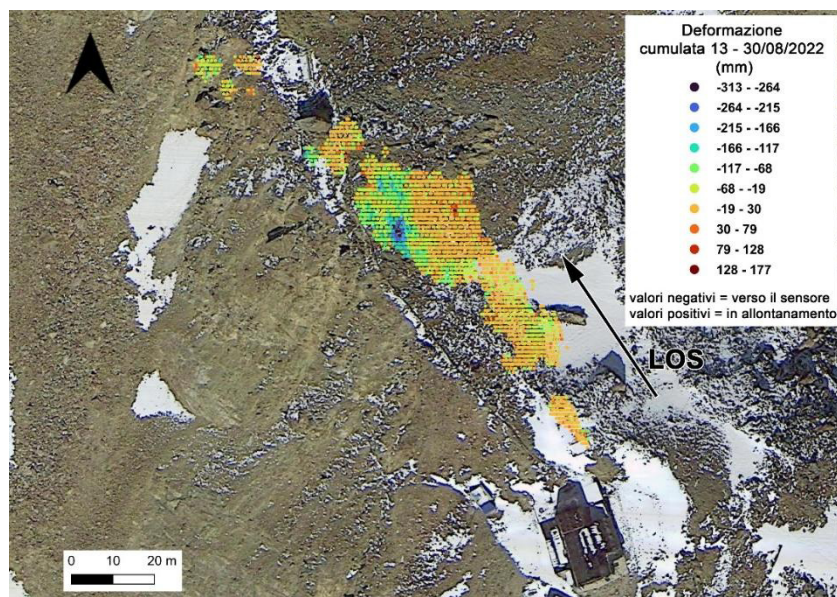


Fig. 27 - Spostamenti del versante in mm registrati dal GB-SAR nel periodo compreso tra il 13 e il 30 agosto 2022. Gli spostamenti rappresentati sono disposti lungo la linea di vista dello strumento (LOS – Line of Sight).

Le analisi a breve termine hanno permesso di individuare porzioni di versante caratterizzate da movimenti complessivi di entità da millimetrica a decimetrica. Le aree caratterizzate dai cinematismi più evidenti, con movimenti da pluricentimetrici a decimetrici, riguardano settori di versante coperti da materiale incoerente di spessore metrico o plurimetrico in cui sono in atto fenomeni gravitativi tipici di ambienti periglaciali, quali l'evoluzione incipiente di nuovi rock glacier (Fig. 28).

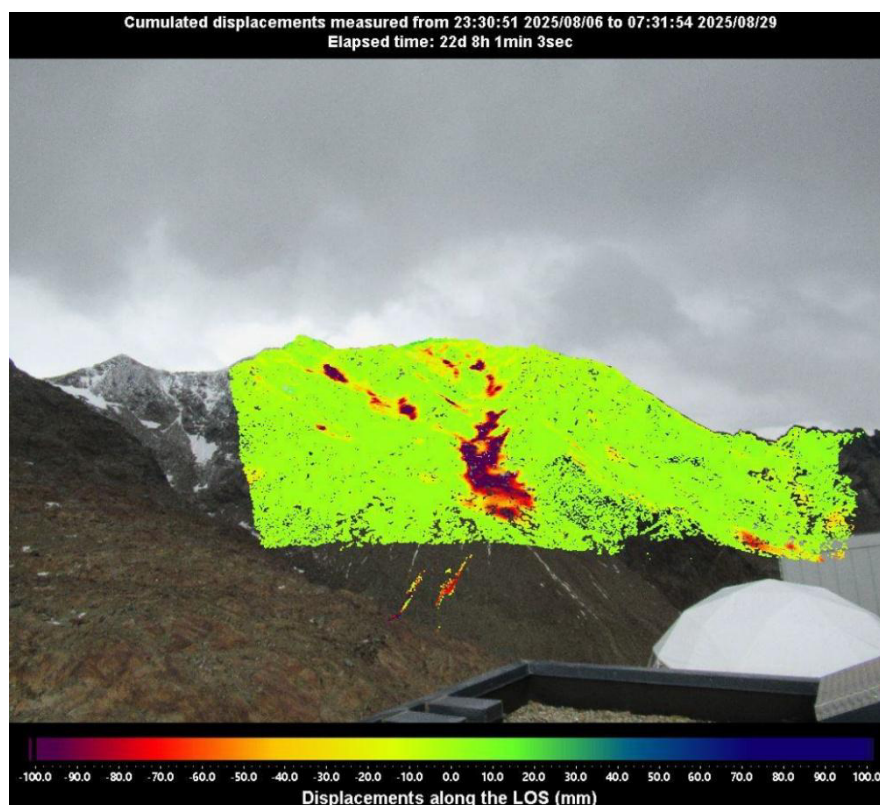


Fig. 28 - Mappa degli spostamenti del versante Sud-Ovest del Monte Vioz relativa al periodo 6 – 29 agosto 2025.

L'analisi degli spostamenti a medio-lungo termine è stata effettuata correlando i dati acquisiti nelle campagne del 2024 e del 2025, coprendo un intervallo temporale di circa 325 giorni. Tale analisi ha mostrato come, diversamente da quanto misurato a breve termine nelle singole campagne di monitoraggio, l'area interessata da movimento include anche il rifugio Mantova al Vioz, con valori di spostamento lungo la LOS compresi tra -26.4 mm e -40 mm in circa 325 giorni.

Allo scopo di approfondire la conoscenza delle caratteristiche del sottosuolo nell'area del rifugio Mantova al Vioz, il Servizio Geologico ha affidato alla società GG Service S.r.l. l'esecuzione di indagini geofisiche. Nel mese di settembre 2024 sono stati eseguiti tre profili con acquisizione congiunta di indagini di tomografia elettrica e sismiche a rifrazione tomografica (**Fig. 29**).

Le indagini hanno suggerito che, al di sotto della superficie, si riscontra uno spessore stimato attorno ai 10-15 m di ammasso roccioso assai fratturato e destrutturato. Segue poi una fascia di transizione di pochi metri di spessore e, più in profondità, un ammasso roccioso di qualità leggermente migliore.

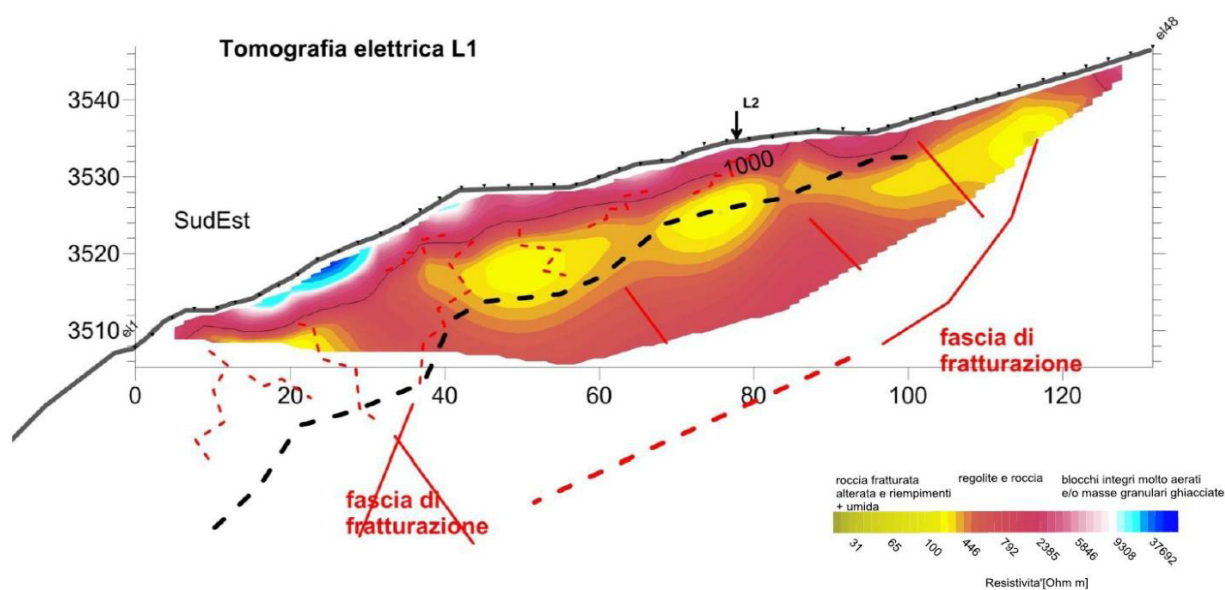
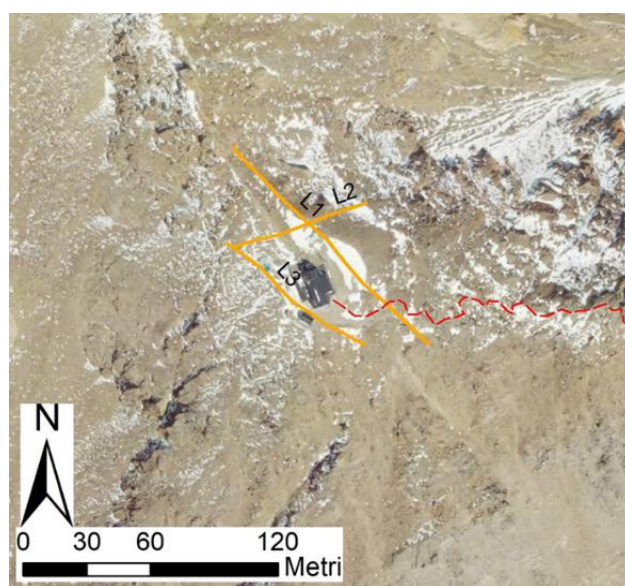


Fig. 29 – In alto, ubicazione delle linee di indagine geofisica presso il rifugio Mantova al Vioz; in basso, sezione di tomografia elettrica L1.

I dati acquisiti mostrano come il Monte Vioz sia caratterizzato da fenomeni morfogenetici attivi. Tali fenomeni, di natura prevalentemente gravitativa, sono correlabili con la morfologia del sito, con l'assetto geologico e geomeccanico dell'ammasso roccioso, con la presenza di permafrost e con la scomparsa delle masse glaciali presenti alla sommità del rilievo. Allo stato attuale non è noto lo spessore della porzione di versante, che comprende anche il rifugio Mantova al Vioz, soggetta a movimento.

Sondaggio a carotaggio continuo

Allo scopo di affinare le conoscenze geologiche e geomeccaniche del substrato roccioso che costituisce la cresta del Monte Vioz e per indagare lo stato termico in profondità, il Servizio Geologico della PAT ha realizzato un sondaggio a carotaggio continuo nei pressi del rifugio Mantova al Vioz (3535 m s.l.m.). Il sondaggio, inclinato di 10°, è stato eseguito nel mese di agosto 2025 e raggiunge una profondità di 29 metri (**Fig. 30**).

Il prelievo delle carote ha permesso di approfondire le conoscenze dell'ammasso roccioso che si trova in condizioni di permafrost e definirne le caratteristiche geomeccaniche. Tale operazione ha permesso anche di osservare la presenza di materiale roccioso frammisto a ghiaccio e strati di ghiaccio massivo. Alcuni campioni di ghiaccio sono stati prelevati e sono conservati a temperature inferiori a zero, in attesa di essere analizzati e caratterizzati (**Fig. 30**).



Fig. 30 – A sinistra, operazioni di perforazione del pozzo presso il rifugio Mantova al Vioz; a destra, uno dei campioni di ghiaccio estratti a circa 24 m di profondità.

Il foro è stato attrezzato con una catena di termistori che acquisisce dati di temperatura dalla superficie fino al fondo a scansione oraria. Dopo una prima fase di assestamento successiva all'installazione, i sensori hanno fatto registrare temperature costantemente negative e comprese tra -1,5°C e -2,5°C a tutte le profondità. I dati acquisiti dal 7 agosto al 28 novembre 2025 sono presentati nel grafico di **Figura 31**, dove sono mostrate le temperature misurate da 10 dei 17 sensori. Queste misure dirette confermano quindi le condizioni di permafrost che interessano la cresta rocciosa del Monte Vioz dove è situato il rifugio.

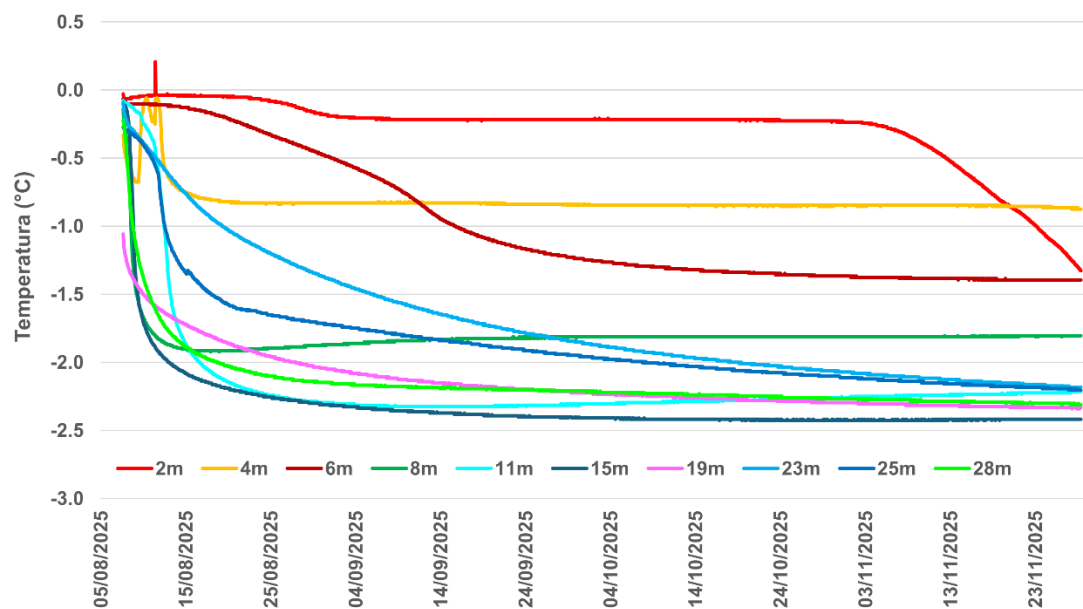


Fig. 31 – Temperatura del sottosuolo fino a 28 m di profondità nel pozzo trivellato presso il rifugio Mantova al Vioz. I dati sono riferiti al periodo dal 7 agosto al 28 novembre 2025.

Ringraziamenti

Numerosi enti e persone hanno a vario titolo collaborato alle attività presentate in questo report. Si ringraziano in particolare:

Parco Naturale Adamello Brenta - Geopark; Parco Nazionale dello Stelvio - Settore Trentino; Meteotrentino, AINEVA, Società degli Alpinisti Tridentini; Nucleo Elicotteri Vigili del Fuoco - Provincia autonoma di Trento; CNR-ISAC; Club Alpino Italiano; Comune di Ziano di Fiemme; Magnifica Comunità di Fiemme; Comune di Vermiglio; PEJO Funivie.

Alberto Carton, Aldino Bondesan, Thomas Zanoner, Mauro Degasperi, Luca Froner, Oscar Groaz, Antonio Brugnara, Daniela Ferrari, Costanza Morino, Giulia Zuecco, Enrico Marin, Jacopo Boaga, Mirko Pavoni, Alberto Carrera, Andrea Zampedri, Elena Guarise, Stefano Brighenti, Andrea Bruneri, Maria Cristina Bruno, Manuela Milan, Maria Vittoria Tenci, Francesco Zucca, Edoardo Scognamiglio, Matteo Pigeault, Vajolet Masè, William Bombarda, Mario Casanova, Romano Ceschini, Paolo Bonasoni, Luigi Mazari Villanova, Giovanni Margheritini, Cristian Ferrari.

Pubblicazioni recenti con dati di monitoraggio del permafrost in Trentino

Brighenti, S., Millar, C.I., Hotaling, S., Reato, A., Wiegand, T., Hayashi, M., Carturan, L., Morriss, M., Bearzot, F., Lencioni, V., Scotti, A., Janicke, A., Fischer, A., Larsen, S., Benech, A., Gschwentner, A., Tolotti, M., Bruno, M.C., Finn, D.S., Freppaz, M., Herbst, D., Tronstad, L., Comiti, F., Colombo, N., 2025. Global evidence that cold rocky landforms support icy springs in warming mountains. *Environmental Research Letters* 20, 104001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adf07f>

Zumiani M., Zanoner T., Baroni C., Carton A., Carturan L., Salvatore M.C., Seppi R., Tolotti M., 2025. Piccola Età Glaciale in Trentino. In: Ferrari, C., Carton, A. (eds), *Ghiacciai del Trentino – Ecosistemi di alta quota tra storia e ricerca*. Cierre Edizioni, Verona, 35-43.

Ferrari C., Carton A., Carturan L., Filippi Gilli E., Lencioni V., Seppi R., Tolotti M., Villa S., Zanoner T., Zumiani M., 2025. Effetti della deglaciazione sulle acque alpine. In: Ferrari C. & Carton. A. (eds), *Ghiacciai del Trentino – Ecosistemi di alta quota tra storia e ricerca*. Cierre Edizioni, Verona, 189-227.

Zumiani M., Seppi R., Carturan L., Zanoner T., Carton A., Tolotti M., 2025. Permafrost e rock glacier. In: Ferrari C., Carton, A. (eds), *Ghiacciai del Trentino – Ecosistemi di alta quota tra storia e ricerca*. Cierre Edizioni, Verona, 163-171.

Brighenti S., Colombo N., Wagner T., Pettauer M., Guyennon N., Krainer K., Winkler G., 2024. Factors controlling the water quality of rock glacier springs in European and American mountain ranges. *Science of The Total Environment*, 953, 175706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175706>

Kellerer-Pirklbauer-Eulenstein A., Bodin X., Delaloye R., Lambiel C., Gärtner-Roer I., Bonnefoy-Demongeot M., Carturan L., Damm B., Eulenstein J., Fischer A., Hartl L., Ikdea A., Kaufmann V., Krainer K., Matsuoka N., Morra di Cella U., Noetzli J., Seppi R., Scapozza C., Schoeneich P., Stocker-Waldhuber M., Thibert E., Zumiani M., 2024. Acceleration and interannual variability of creep rates in mountain permafrost landforms (rock glacier velocities) in the European Alps in 1995–2022. *Environmental Research Letters* 19, 034022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad25a4>

Carturan L., Zuecco G., Andreotti A., Boaga J., Morino C., Pavoni M., Seppi R., Tolotti M., Zanoner T., Zumiani M., 2024. Spring-water temperature suggests widespread occurrence of Alpine permafrost in pseudo-relict rock glaciers. *Cryosphere* 18, 5713–5733. <https://doi.org/10.5194/tc-18-5713-2024>

Zumiani, M., Seppi, R., Zucca, F., Zanoner, T., Tolotti, M., Carturan, L., 2024. CRESTA DEL MONTE VIOZ 3645 m Monitoraggio dei processi morfogenetici connessi alla degradazione del permafrost. *Neve e Valanghe* 97 (2023), 62–69.

Pavoni M., Boaga J., Carrera A., Zuecco G., Carturan L., and Zumiani M.: Brief communication: Mountain permafrost acts as an aquitard during an infiltration experiment monitored with electrical resistivity tomography time-lapse measurements, *The Cryosphere*, 17, 1601–1607.
<https://doi.org/10.5194/tc-17-1601-2023>

Tolotti M., Cerasino L., Donati C., Pindo M., Rogora M., Seppi R., Albanese D. 2020. Alpine headwaters emerging from glaciers and rock glaciers host different bacterial communities: Ecological implications for the future. *Sci. Total Env.* 717: 137101.

Seppi R., Carturan L., Carton A., Zanoner T., Zumiani M., Cazorzi F., Bertone A., Baroni C. & Salvatore M. C. (2019). Decoupled kinematics of two neighbouring permafrost creeping landforms in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(13), 2703-2719.

Rotta F., Cerasino L., Occhipinti-Ambrogi A., Rogora M., Seppi R., Tolotti M., 2018. Diatom diversity in headwaters influenced by permafrost thawing: first evidence from the Central Italian Alps. *Advances in Oceanography and Limnology* 9(2): 79-96 DOI:10.4081/aiol.2018.7929.

Zanoner T., Carton A., Baroni C., Carturan L., Salvatore M.C., Seppi R., Zumiani M. (2017). Little Ice Age mapping as a tool for identifying hazard in the paraglacial environment: the case study of Trentino (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 295, 551–562.

Carturan L., Zuecco G., Seppi R., Zanoner T., Borga M., Carton A., Dalla Fontana G.(2016). Catchment scale permafrost mapping using spring water characteristics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27, 253-270.

Seppi R., Zanoner T., Carton A., Bondesan A., Francese R., Carturan L., Zumiani M., Giorgi M. & Ninfo A. (2015). Current transition from glacial to periglacial processes in the Dolomites (South-Eastern Alps). *Geomorphology*, 228, 71-86.

Seppi R., Carton A., Zumiani M., Dall'Amico M., Zampedri G., & Rigon R. (2012). Inventory, distribution and topographic features of rock glaciers in the southern region of the Eastern Italian Alps (Trentino). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 35, 185-197.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



FONDAZIONE
EDMUND MACH
dal 1874



UNIVERSITÀ
DI PAVIA