

CRESTA DEL MONTE 3645 m VIOZ

Matteo Zumiani

Provincia autonoma di Trento, Servizio Geologico

Roberto Seppi, Francesco Zucca

e **Thomas Zanoner**

Università di Pavia,

Dipartimento Scienze della Terra e dell'Ambiente

Monica Tolotti

Fondazione Edmund Mach, Centro Ricerca e

Innovazione, S. Michele all'Adige (Trento)

Luca Carturan

Università di Padova, Dipartimento Territorio e
Sistemi Agro Forestali

Monitoraggio dei processi morfogenetici connessi alla degradazione del permafrost

Monitoring of permafrost-related morphogenetic processes on the Monte Vioz - 3645 m a.s.l.

The Vioz "Mantova" alpine hut, located in the Trentino sector of the Ortles-Cevedale group at 3535 m a.s.l., is the highest in the central-eastern Alps. The infrastructure stands on the large rocky ridge leading from the southeast to the summit of Mt. Vioz (3645 m a.s.l.), whose slopes are characterized by active geomorphological processes partly related to the presence of permafrost. The monitoring of this key component of the Alpine cryosphere has been carried out in this area since 2010, through continuous measurements of ground surface temperature.

In the summer of 2022, evidence of actively evolving morphogenetic phenomena has observed a short distance from the hut. For investigating the morphodynamic evolution of the slopes, in late summer 2022 a Ground-Based SAR was installed near the hut. This instrument is able to measure ground movements with centimetre accuracy and with a time scan of a few minutes. The GB-SAR operated continuously from August 13 to August 30, completing more than 800 acquisitions of a slope sector between the refuge and the summit of Mt. Vioz. The data showed that some sectors of the investigated slope moved more than 30 cm during the observation period (a little more than two weeks), thus providing information on the ongoing processes.

Il rifugio Vioz "Mantova" è situato nel settore trentino del gruppo Ortles-Cevedale e, con i suoi 3535 m di quota, è il più alto delle Alpi centro-orientali. L'infrastruttura sorge sull'ampia cresta rocciosa che conduce da Sud-Est alla vetta del Monte Vioz (3645 m), i cui versanti sono caratterizzati da processi geomorfologici attivi in parte riconducibili alla presenza di permafrost. Il monitoraggio di questo elemento chiave della criosfera alpina viene effettuato in quest'area dal 2010, con misure continue di temperatura della superficie del suolo. Nell'estate del 2022, a poca distanza dal rifugio sono state osservate evidenze di un'evoluzione attiva dei fenomeni morfogenetici. Allo scopo di indagare l'evoluzione in atto, nella tarda estate del 2022 è stato installato nei pressi del rifugio un Ground-Based SAR (GB-SAR), uno strumento in grado di misurare con estrema precisione i movimenti del terreno fino a scala centimetrica con una scansione temporale di pochi minuti. Il GB-SAR ha funzionato ininterrottamente dal 13 al 30 agosto 2022, effettuando più di 800 acquisizioni di un settore di versante compreso tra il rifugio e la cima del Monte Vioz. I dati hanno mostrato come alcuni settori del versante indagato si siano mossi più di 30 cm nel periodo di osservazione (poco più di due settimane) e hanno consentito di ottenere informazioni sui processi in atto.



INTRODUZIONE

Il terreno perennemente congelato, denominato permafrost, caratterizza numerose zone di alta quota del Trentino. La sua presenza interessa molti versanti in roccia o detrito, ma è difficilmente rilevabile perché solitamente non visibile sulla superficie del suolo. Le più importanti evidenze della presenza di permafrost nelle aree alpine sono i rock glacier, forme del rilievo costituite da detriti rocciosi misti a ghiaccio che si muovono lentamente lungo i versanti (Fig. 1).

Il permafrost è soggetto a rapide modificazioni indotte dai cambiamenti climatici e il riscaldamento globale sta causando la sua degradazione e spesso la sua scom-

parsa (1). A causa della degradazione del permafrost, i versanti in alta quota sono meno stabili e il rischio di frane e colate detritiche è in aumento (2). La scomparsa del ghiaccio contenuto nel permafrost, inoltre, può ridurre la disponibilità di un'importante e poco conosciuta riserva idrica (3).

Per queste ragioni è fondamentale conoscere la distribuzione del permafrost nei territori di montagna e studiare la sua evoluzione nel tempo. In Trentino, queste attività vengono svolte dal Servizio Geologico della Provincia autonoma di Trento (Dipartimento Protezione Civile, Foreste e Fauna), in collaborazione con l'Università di Padova (Dipartimento Territorio e

Sistemi Agro Forestali), l'Università di Pavia (Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente) e la Fondazione Edmund Mach, Centro di Ricerca e Innovazione di San Michele all'Adige.

Le attività di monitoraggio del permafrost in Trentino si concentrano su alcuni siti distribuiti nei principali gruppi montuosi della provincia (Adamello-Presanella, Ortles-Cevedale, Dolomiti e Lagorai) (Fig. 2). Si tratta di misure sistematiche e continuative di variabili climatiche e temperatura del suolo (sia in superficie che in profondità), di misure di spostamento di alcuni rock glacier, di misure geofisiche e di analisi chimiche di sorgenti e ruscelli alimentati dalla fusione del permafrost. Inoltre, i monitoraggi sul terreno sono completati da indagini da remoto, svolte anche con l'uso di droni e telerilevamento. Nell'ambito di alcuni progetti di ricerca già conclusi, è stato possibile definire l'area occupata dal permafrost in Trentino, che si aggira attorno ai 150 km² (2.4% dell'intera provincia). Inoltre, sono stati catalogati più di 700 rock glacier, che in totale occupano una superficie pari a circa 33 km², confrontabile con quella occupata dai ghiacciai nel 2015 (30 km²).

INQUADRAMENTO DEL SITO DI MONITORAGGIO

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 Vioz "Mantova" (3535 m), che costituisce l'infrastruttura alpina di quota più elevata nel settore centro-orientale delle Alpi (Fig. 3).

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

Pagina precedente: Punta San Matteo e il Ghiacciaio dei Forni ripresi da Punta Linke, nei pressi del Monte Vioz.

Fig. 1 - Un rock glacier attivo.



della gravità e del gelo. Fino al recente passato, i versanti sommitali della cresta del Vioz sono stati interessati anche da processi di tipo glaciale, dovuti alla presenza di due ghiacciai oggi molto ridotti di superficie e volume (Ghiacciaio di Valvenaia sul versante Est e Ghiacciaio Centrale del Vioz sul versante Ovest) (4, 5).

MISURE DI TEMPERATURA DEL SUOLO

Il monitoraggio del permafrost presso il rifugio è iniziato nel 2010 con misure continue 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. 4). Gli strumenti sono autonomi e richiedono una sola manutenzione annuale, per lo scarico dei dati e la sostituzione della batteria. Questa metodologia consente di acquisire dati per caratterizzare le condizioni termiche del suolo e calcolare alcune importanti variabili che indicano la presenza di permafrost e la sua evoluzione nel tempo. In particolare, è possibile calcolare la temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST - Mean Annual Ground Surface Temperature), la temperatura di equilibrio invernale, la durata del manto nevoso e i valori annui cumulati di temperatura del suolo superiore e inferiore a 0°C (GTI e GFI - Ground Thawing Index e Ground Freezing Index). Questi ultimi indicano rispettivamente la quantità di calore e il raffreddamento accumulati dal suolo durante l'anno idrologico (dal primo di ottobre al 30 settembre dell'anno successivo). È di particolare importanza, inoltre, l'analisi dell'evoluzione annuale della temperatura del suolo, che consente di interpretare al meglio le variabili numeriche calcolate (Fig. 5).

Le temperature del suolo registrate in 12 anni di misure indicano valori medi annui (MAGST) variabili ma compresi tra -2°C e -4°C, suggerendo che il sottosuolo dell'area in esame si trova in condizioni

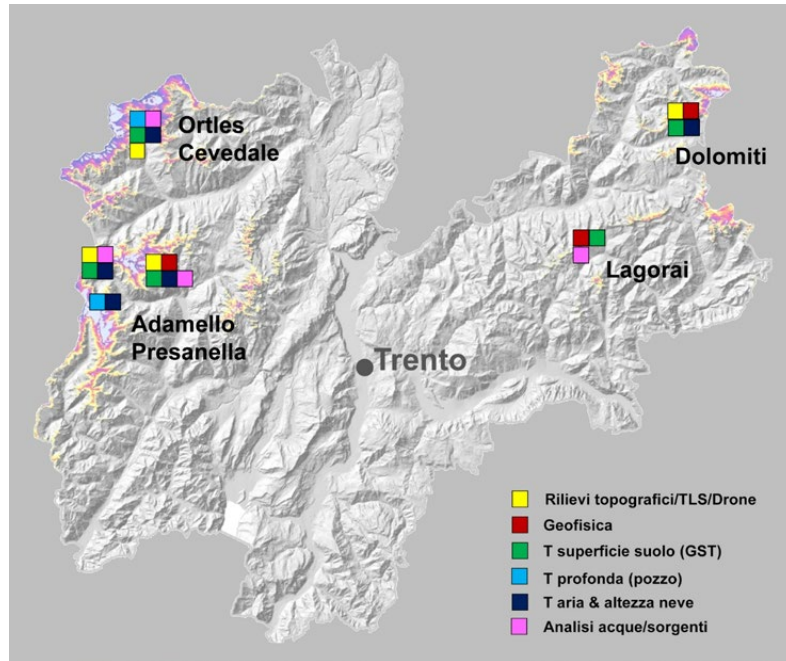
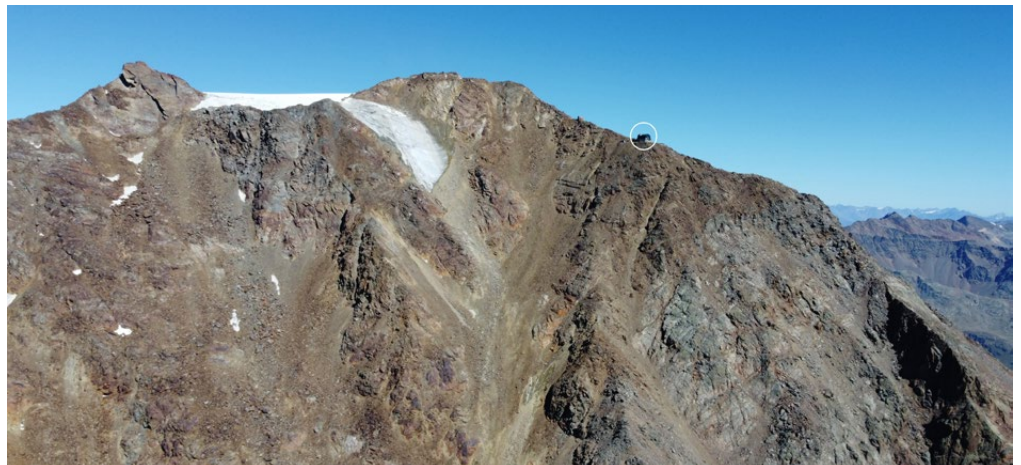


Fig. 2 - I siti di monitoraggio del permafrost in Trentino.

Fig. 3 - Nel cerchio bianco il rifugio Vioz "Mantova" (3535 m) e, poco sopra, la cima del Monte Vioz (3645 m).

Fig. 4 - Posizionamento dei data logger per la misura della temperatura della superficie del suolo nell'area del rifugio. Nel riquadro, uno dei data logger completo di sonda esterna.



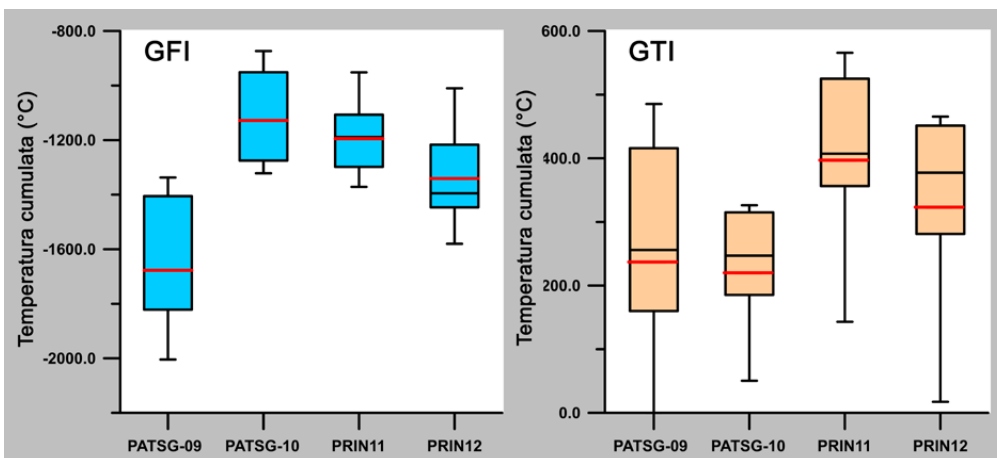
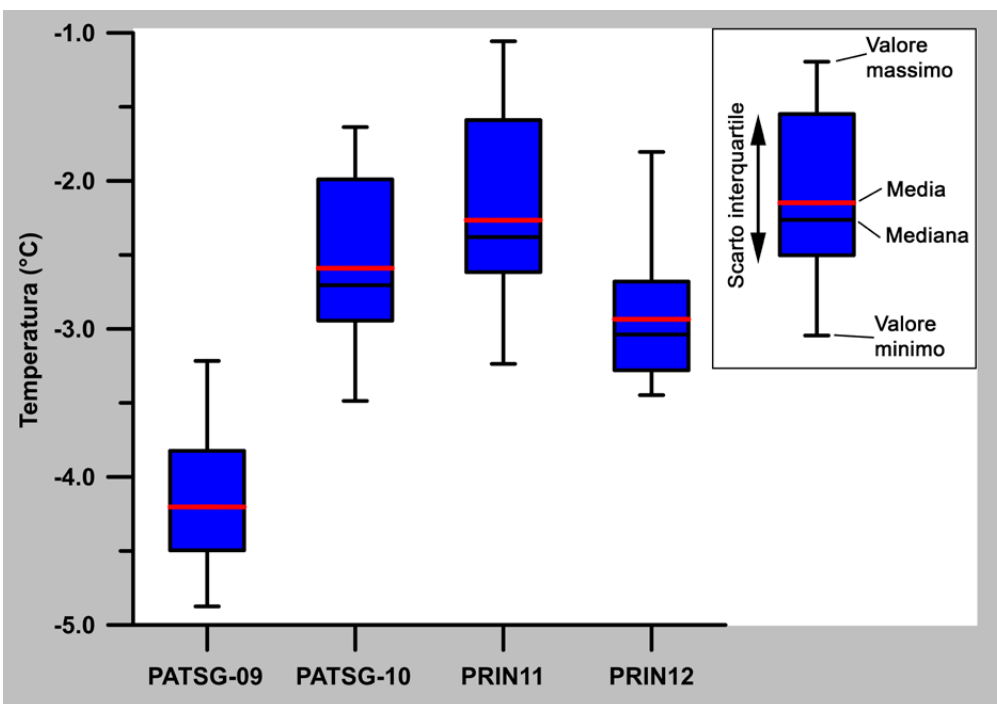
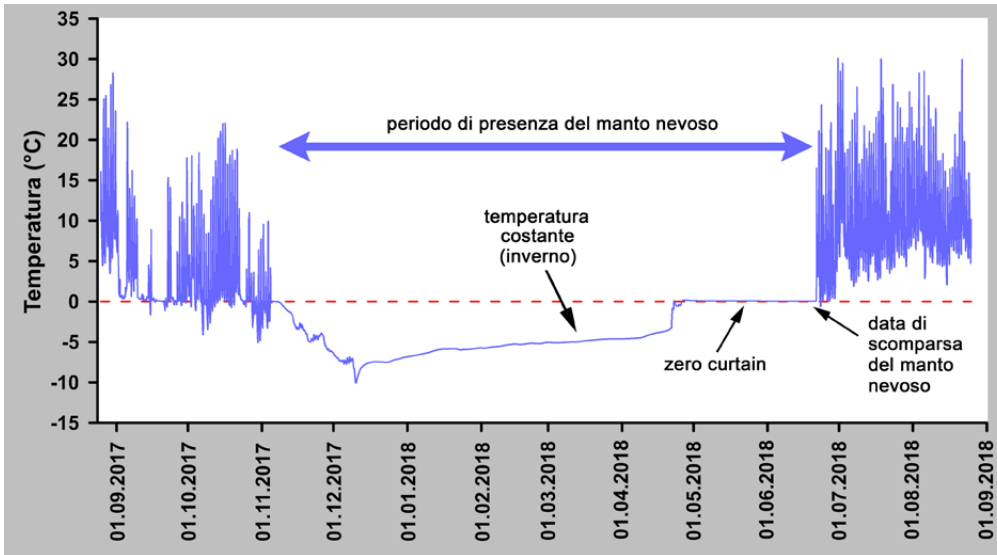


Fig. 5 – Esempio del regime termico annuale della superficie del suolo con indicate alcune variabili che è possibile calcolare dai dati misurati.

Fig. 6 - Grafico riassuntivo della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) in tutto il periodo di osservazione (2010 – 2022) per i siti di misura posizionati nell'area del rifugio. Per il sito PRIN12 mancano due anni di dati.

Fig. 7 - Grafici riassuntivi degli indici GFI (Ground Freezing Index) e GTI (Ground Thawing Index) in tutto il periodo di osservazione (2010 – 2022) per i siti di misura posizionati nell'area del rifugio. Per il sito PRIN12 mancano due anni di dati. La chiave di interpretazione dei grafici è analoga alla Fig. 6.

di permafrost (Fig. 6). Le temperature medie mensili mostrano, nel periodo di tempo considerato, una leggera tendenza all'aumento, almeno per tre dei quattro siti indagati. Gli indici GTI e GFI hanno una forte variabilità interannuale, che dipende essenzialmente dalla temperatura dell'aria e, nel caso del GFI, dallo spessore e permanenza del manto nevoso al suolo (Fig. 7). Il manto nevoso, infatti, a causa del suo forte potere isolante ha un ruolo fondamentale nel regolare gli scambi di energia tra atmosfera e suolo. La condizione migliore per conservare il permafrost nel sottosuolo è quella che vede un manto nevoso che compare in ritardo nella stagione invernale (consentendo al suolo di raffreddarsi) e che permane a lungo nella stagione primaverile/estiva (impedendo al suolo di riscaldarsi). Tale condizione causa, solitamente, i valori più bassi di GFI.

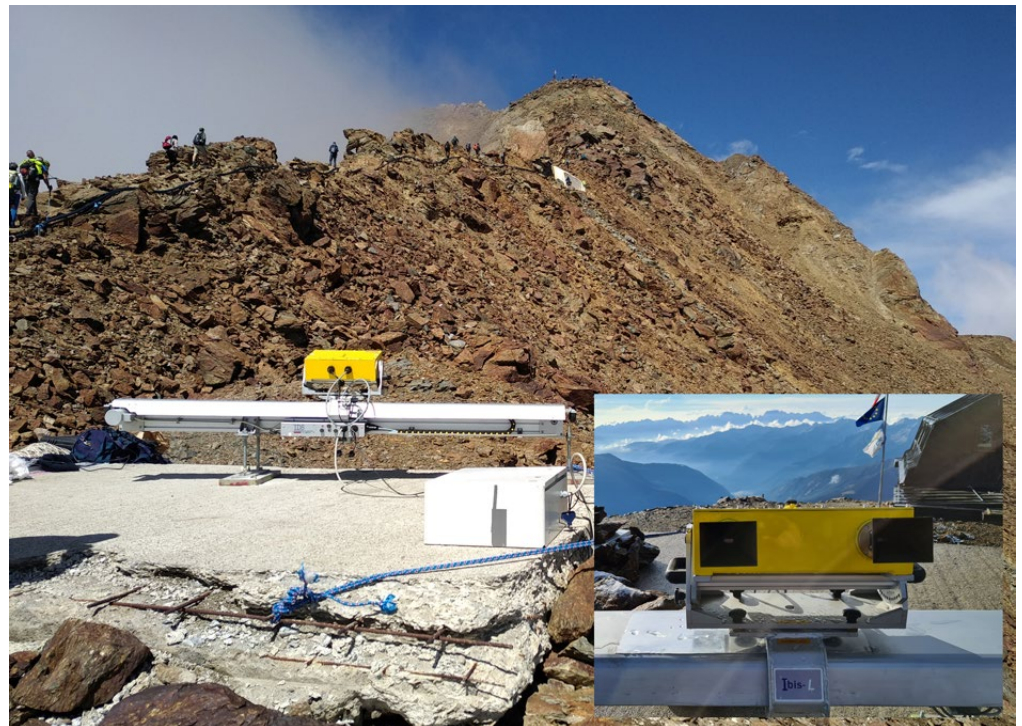
MISURE INTERFEROMETRICHE RADAR

Nel corso di alcuni sopralluoghi effettuati nel mese di luglio 2022 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. 8). Alcune di esse avevano interessato il basamento del piccolo locale che ospita le cisterne d'acqua a servizio del rifugio, posto lungo la cresta. L'ipotesi era che le temperature molto elevate dell'estate avessero accelerato un fenomeno già in atto e che la degradazione del permafrost potesse essere una delle possibili concause.

Allo scopo di osservare eventuali movimenti attivi delle fessure e del tratto di cresta a monte del rifugio, è stato installato un Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR), il quale, con tecniche interferometriche, consente di rilevare movimenti centimetrici con una risoluzione temporale dell'ordine dei minuti (6, 7). Si tratta di uno strumento di osservazione "attivo", in grado di emettere brevissimi ma intensi impulsi elettromagnetici nel campo delle

microonde e di “illuminare” una superficie più o meno ampia di pae-saggio. Lo strumento riceve l'eventuale segnale retrodiffuso dall'interazione scena-impulso energetico e costruisce un'immagine di quest'ultimo segnale, che contiene oltre alla potenza retroriflessa anche la fase del segnale (8).

La scansione sistematica dell'area osservata dallo strumento, effettuata con intervalli di alcuni minuti, produce una serie temporale ad alta densità di immagini, che permette di confrontare tra loro le diverse acquisizioni attraverso una tecnica interferometrica. Con questo approccio, si realizza la misura di variazione di distanza relativa tra un'immagine e un'altra, comparando le componenti di fase delle due immagini, pixel per pixel. Questa operazione, ripetuta per tutte le immagini dell'insieme, produce una serie di target puntuali distribuiti sull'area osservata che, se hanno mantenuto la coerenza nel periodo della campagna di osservazione, forniscono un'informazione su eventuali movimenti rispetto alla posizione dello strumento. I movimenti rilevati possono essere in avvicinamento o allontanamento dallo strumento, lungo quella che è denominata “linea di vista” (LOS – Line of Sight). I movimenti rilevati possono variare da pochi mm fino a qualche metro al giorno con accuratze di stima anche nell'ordine di 0.1 mm (9). Il monitoraggio con GB-SAR offre il vantaggio di poter essere effettuato in ogni momento (giorno e notte) e in qualsiasi condizione meteorologica, elemento molto importante in relazione alle condizioni operative in cui lo strumento è stato installato presso il Monte Vioz. Inoltre, un altro elemento a favore dell'utilizzo del GB-SAR per misure di deformazione è la sua capacità di produrre un campionamento molto denso nello spazio e nel tempo senza la necessità di accedere all'area in osservazione. Infine, un sistema GB-SAR permette di monitorare un'area distante da poche decine di metri fino ad oltre 4 km. Recentemente, il GB-SAR è stato utilizzato per la prima volta per misurare lo spostamento dei rock glacier



su scale temporali orarie (10).

Lo strumento utilizzato per questa indagine è un radar ad apertura sintetica di marca IDS IBIS-L, con emissione nella banda Ku (17.1 GHz), caratterizzato da un binario di 2.5 metri di lunghezza sul quale si muove la testa radar (Fig. 9).

Grazie al supporto logistico della SAT (Società degli Alpinisti Tridentini), proprietaria del rifugio, e alla disponibilità del gestore, lo strumento di misura è stato collocato nei pressi del rifugio su una piattaforma in calcestruzzo già esistente, in modo che

potesse indagare la zona soggetta ai fenomeni osservati (Fig. 10). Lo strumento ha funzionato ininterrottamente dal 13 al 30 agosto 2022, effettuando un'acquisizione ogni 30 minuti.

L'analisi interferometrica dei dati, che consistono in un totale di oltre 800 acquisizioni, ha prodotto un insieme di più di 8000 target puntuali distribuiti sull'area studiata. Questa elevata numerosità e la densità informativa spaziale dei target puntuali, unita alla capacità di misura ogni pochi minuti, ha permesso la pro-

Fig. 8 – Fratture attive osservate il 13 agosto 2022 sulla cresta tra il rifugio e la Cima Vioz.

Fig. 9 – Il GB-SAR installato presso il rifugio. Nel riquadro un dettaglio della testa del radar.

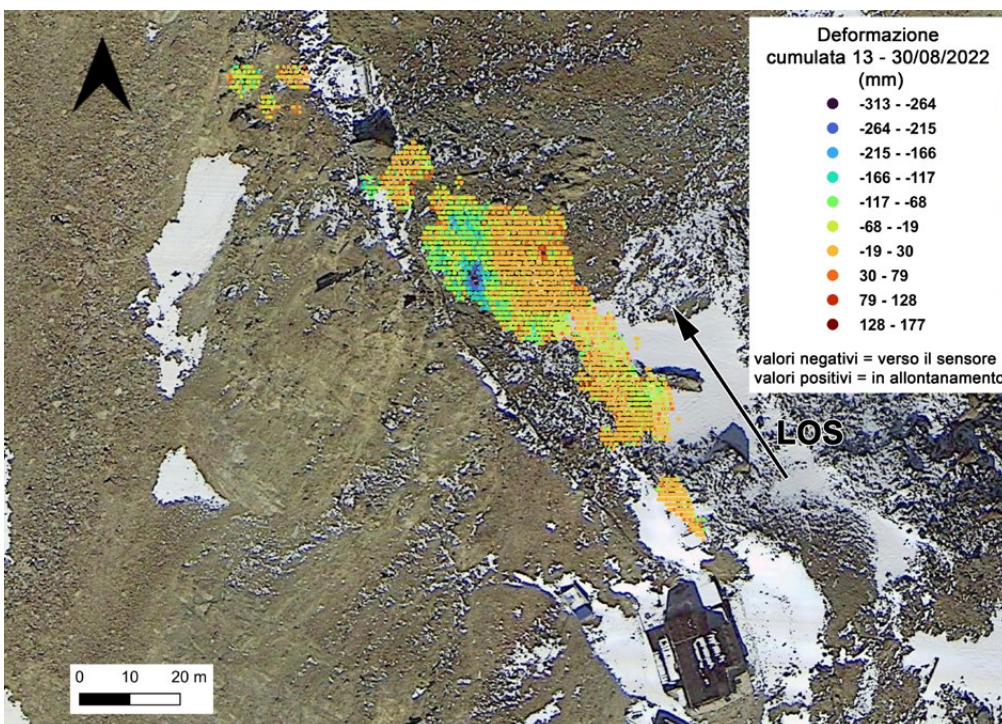
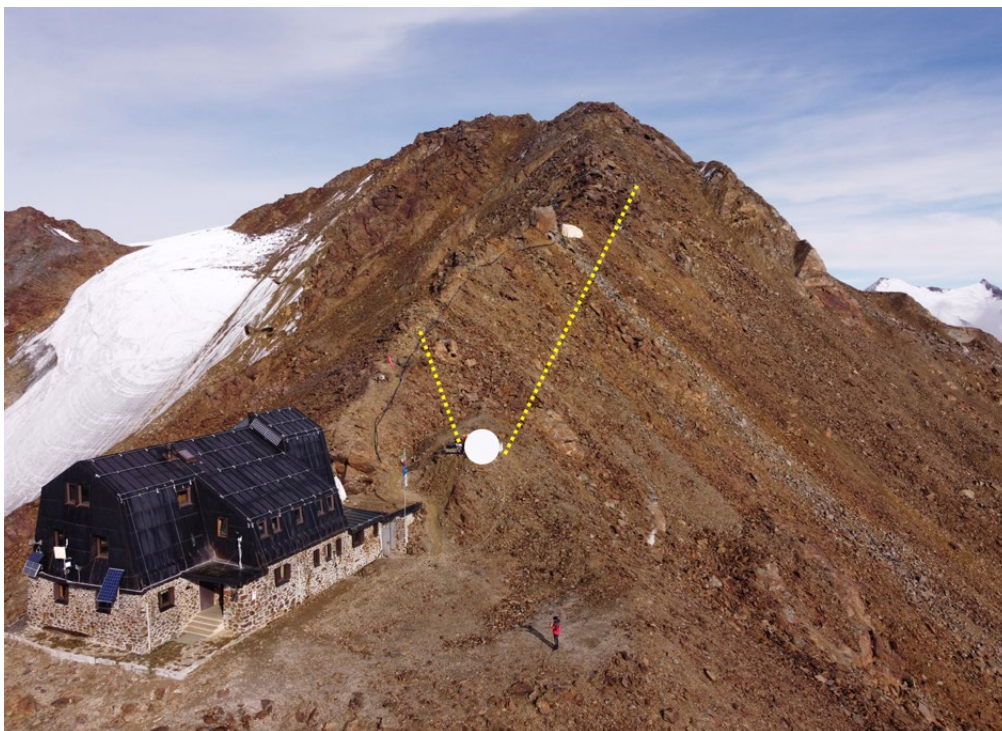


Fig. 10 – Punto di posizionamento del GB-SAR e settore di versante rilevato nel periodo di osservazione tra il 13 e il 30 agosto 2022.

Fig. 11 - Spostamenti del versante 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).

duzione di mappe di spostamento che consentono di distinguere aree stabili e aree in movimento nella zona in esame e di identificare anche piccoli e locali cambi di “comportamento” nel tempo di osservazione. 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 LOS superiori anche a 30 cm (Fig. 11).

CONCLUSIONI

La cresta Sud-Est del Monte Vioz e l'area dove si trova l'omonimo rifugio sono soggette a processi morfogenetici attivi, in parte riconducibili alla presenza di permafrost e alla sua evoluzione. Le misure di temperatura del suolo, condotte continuamente per 12 anni presso quattro siti distribuiti attorno al rifugio, hanno mostrato valori medi annui (MAGST) largamente al di sotto degli 0°C, confermando un bilancio termico negativo della

superficie del suolo e suggerendo la presenza di permafrost. Si è osservata una considerevole variabilità interannuale nella temperatura media del suolo e nei valori annui cumulati di temperature positive e negative che caratterizzano i siti studiati. Tale variabilità è dovuta soprattutto alle diverse condizioni di innevamento che si sono susseguite nel corso degli anni di misura, in termini di spessore del manto nevoso e di durata al suolo.

Le fessure lungo la cresta che sono state osservate nel corso dell'estate del 2022 sono riconducibili alle condizioni strutturali delle litologie che costituiscono la cresta Sud Est del Monte Vioz e alla recente deglaciazione che ha caratterizzato i versanti Est e Ovest della cresta stessa, dove erano presenti piccoli corpi glaciali fino al termine della Piccola Età Glaciale (metà dell'800 circa). La possibile accelerazione del processo osservato può essere ricondotta alla degradazione del permafrost che caratterizza il substrato e si rende particolarmente evidente durante stagioni estive molto calde come quella del 2022. Le osservazioni realizzate con l'interferometria radar nella seconda parte dell'estate del 2022 hanno confermato come i processi che caratterizzano la cresta rocciosa siano effettivamente attivi, con spostamenti in atto quantificabili fino ad alcune decine di centimetri in circa 15 giorni.

RINGRAZIAMENTI

Niccolò Dematteis (CNR-IRPI Torino) per il supporto nell'elaborazione dei dati GB-SAR.

Daniela Ferrari (Servizio Geologico della Provincia autonoma di Trento) per l'elaborazione dei dati di temperatura del suolo. Mario Casanova (Gestore del rifugio Vioz “Mantova”) per il supporto logistico fornito durante l'indagine con il GB-SAR.

Pagina a fianco: La cresta Sud Est del Monte Vioz e il rifugio Vioz “Mantova” (3535 m). Sullo sfondo la Val di Peio e le Dolomiti di Brenta.

Bibliografia

- (1) Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D. A., Schoeneich, P., Romanovsky, V. E., Lewkowicz, A. G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W. L., Christiansen, H. H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., ... Lantuit, H. (2019). Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 10(1), 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- (2) Gruber, S., & Haeberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperatures-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(2), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2006JF000547>
- (3) Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., & Betts, R. A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports*, 8(1), 2834. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>
- (4) Carturan, L., Filippi, R., Seppi, R., Gabrielli, P., Notarnicola, C., Bertoldi, L., Paul, F., Rastner, P., Cazorzi, F., Dinale, R., & Dalla Fontana, G. (2013). Area and volume loss of the glaciers in the Ortles-Cevedale group (Eastern Italian Alps): Controls and imbalance of the remaining glaciers. *Cryosphere*, 7(5), 1339–1359. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1339-2013>
- (5) Zanoner, T., Carton, A., Seppi, R., Carturan, L., Baroni, C., Salvatore, M. C., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.014>
- (6) Tarchi, D., Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny-Guasch, J., Guerri, L., & Leva, D. (2005). On the Use of Ground-Based SAR Interferometry for Slope Failure Early Warning: the Cortenova Rock Slide (Italy). In *Landslides* (pp. 337–342). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-28680-2_43
- (7) Caduff, R., Schlunegger, F., Kos, A., & Wiesmann, A. (2015). A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 208–228. <https://doi.org/10.1002/esp.3656>
- (8) Wang, Y., Song, Y., Hong, W., Zhang, Y., Lin, Y., Li, Y., Bai, Z., Zhang, Q., Lv, S., & Liu, H. (2020). Ground-Based Differential Interferometry SAR: A Review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1), 43–70. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2963169>
- (9) Dematteis, N., Giordan, D., Zucca, F., Luzi, G., & Allasia, P. (2018). 4D surface kinematics monitoring through terrestrial radar interferometry and image cross-correlation coupling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.05.017>
- (10) Bertone, A., Seppi, R., Callegari, M., Cuozzo, G., Dematteis, N., Krainer, K., Marin, C., Notarnicola, C., & Zucca, F. (2023). Unprecedented Observation of Hourly Rock Glacier Velocity With Ground-Based SAR. *Geophysical Research Letters*, 50(9), e2023GL102796. <https://doi.org/10.1029/2023GL102796>

