



Neve e Valanghe

Meteorologia alpina, Glaciologia, Prevenzione e Sicurezza in montagna

anno 2026

99



Indirizzi e numeri telefonici dei Servizi Valanghe AINEVA

REGIONE PIEMONTE

ARPA Piemonte
Dipartimento Rischi naturali e ambientali
Via Pio VII 9 - 10135 Torino
Tel. 011 19681340 - fax 011 19681341
<http://www.arpa.piemonte.it>
e-mail: dip.rischi.naturali.ambientali@arpa.piemonte.it

REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA

PRESIDENZA DELLA REGIONE
Dipartimento Protezione civile e Vigili del fuoco
Centro Funzionale e Pianificazione
Loc. Amerique, 33 - 11020 QUART (AO)
e-mail: protezionecivile@pec.regione.vda.it
Tel. 0165-776604

REGIONE LOMBARDIA

ARPA Lombardia
Settore Tutela delle Risorse e Rischi Naturali
U.O. Centro Nivometeorologico
Via Monte Confinale 9 - 23032 Bormio (SO)
Tel. 0342 914400
<http://www.arpalombardia.it>
e-mail: nivometeo@arpalombardia.it

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO

Servizio prevenzione rischi
Ufficio previsioni e pianificazione
Via Vannetti 41 - 38122 Trento
Tel. 0461 494870 - Fax 0461 238305
Bollettino Nivometeorologico
Tel. 0461 238939
Self-fax 0461 237089
<http://www.meteotrentino.it>
e-mail: ufficio.previsioni@provincia.tn.it

PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO

Ufficio Meteorologia e Prevenzione
Valanghe
Viale Druso, 116 - 39100 Bolzano
Tel.: +39 0471 416140
<https://valanghe.report>
<https://meteo.provincia.bz.it>
e-mail: meteovalanghe@provincia.bz.it
telefono info meteo:
0471 270555
0471 271177

REGIONE DEL VENETO

ARPA-Veneto Centro Valanghe di Arabba
Via Pradat 5 - 32020 Arabba (BL)
Tel. 0436 755711 - Fax 0436 79319
<http://www.arpa.veneto.it>
e-mail: cva@arpa.veneto.it

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA

Protezione civile della Regione
Nucleo Valutazione Rischio Valanghe
Servizio di Previsione e Prevenzione
Via Natisone 43
33057 PALMANOVA (UD)
Tel. 0432 926111

REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale Multirischi
Via del Colle Ameno, 5 - 60126 Ancona
Tel. 071 8067743 - Fax 071 8067709
<http://protezionecivile.regione.marche.it>
e-mail: spc.centrofunzionale@regione.marche.it

Sede AINEVA

Vicolo dell'Adige, 27
38122 Trento
Tel. 0461 230305 - Fax 0461 232225
<http://www.aineva.it>
e-mail: aineva@aineva.it

Gli utenti di "NEVE E VALANGHE"

- Sindaci dei Comuni Montani
- Comunità Montane
- Commissioni Locali Valanghe
- Prefetture montane
- Amministrazioni Province Montane
- Genii Civili
- Servizi Provinciali Agricoltura e Foreste
- Assessorati Reg./Provinciali Turismo
- APT delle località montane
- Sedi Regionali U.S.T.I.F.
- Sedi Provinciali A.N.A.S.
- Ministero della Protezione Civile
- Direzioni dei Parchi Nazionali
- Stazioni Sciistiche
- Scuole di Sci
- Club Alpino Italiano
- Scuole di Scialpinismo del CAI
- Delegazioni del Soccorso Alpino del CAI
- Collegi delle Guide Alpine
- Rilevatori di dati nivometeorologici
- Biblioteche Facoltà Univ. del settore
- Ordini professionali del settore
- Professionisti del settore italiani e stranieri
- Enti addetti ai bacini idroelettrici
- Redazioni di massmedia specializzati
- Aziende addette a: produzione della neve, sicurezza piste e impianti, costruzione attrezzature per il soccorso, operanti nel campo della protezione e prevenzione delle valanghe.

Neve e Valanghe

n 99 anno 2026

Rivista dell'AINEVA
ISSN 1120 - 0642
Aut. Trib. di Rovereto (TN)
N° 195/94NC
del 28/09/1994

Direttore Responsabile

Gianni MARIGO
Regione Veneto

Comitato di redazione:

Erika SOLERO, Giovanna BURELLI,
Matteo FIOLETTI, Walter BEOZZO, Mauro VALT, Elena
BARBERA, Igor CHIAMBRETTI, Daniel BATTOCLETTI,
Andrea DEBERNARDI, Francesco BOCCANERA,
Arianna CITA

Coordinamento Redazionale:

Erika SOLERO

Comitato scientifico editoriale:

Alessio SALANDIN, Claudio GARLATTI,
Gianni MARIGO, Michela MUNARI, Mauro GADDO,
Valentino GIORDANO, Orietta CAZZULI, Sara RATTO

Segreteria di Redazione:

ASSOCIAZIONE INTERREGIONALE
DI COORDINAMENTO E DOCUMENTAZIONE PER I
PROBLEMI INERENTI ALLA NEVE E ALLE VALANGHE
Vicolo dell'Adige, 27 - 38122 TRENTO
Tel. +39 0461 230305 - Fax +39 0461 232225
aineva@aineva.it - aineva@pec.aineva.it
www.aineva.it

Videoimpaginazione e grafica:

MOTTARELLA STUDIO GRAFICO
www.mottarella.com
Cosio Valtellino (SO)

Hanno collaborato a questo numero:

Serena Mottarella, Nadia Preghenella, Elena
Barbera, Estella Barbera, Camilla RODIGARI,
Massimo PEGANI

Gli articoli e le note firmate esprimono
l'opinione dell'Autore e non impegnano l'AINEVA.

Referenze fotografiche:

Foto di copertina: Arpa Piemonte

Sezione Neve: Servizio Prevenzione Valanghe della
provincia autonoma di Bolzano.

Sezione Valanghe: Josef Plangger collaboratore
del Servizio Prevenzione Valanghe della provincia
autonoma di Bolzano.

Sezione Ghiacciai: Arpa Piemonte

Se non diversamente specificato in didascalia, le
foto contenute negli articoli sono degli autori.

La rivista dal numero 90 è consultabile
solo in versione digitale sul sito di AINEVA.

99

Neve

NEVE SULLE DOLOMITI VENETE

Mauro Valt

MICROORGANISMI ICE-NUCLEATING E STABILITA' DEL MANTO NEVOSO

Francesca Schivalocchi

Valanghe

PREVEDERE LE VALANGHE CON IL MACHINE LEARNING

Christian Brida, Carlo Bee, Giorgio Rosatti

LA SCIENZA E LA PREVENZIONE DELLE VALANGHE

Joe Stock

Glaciologia

IL MONITORAGGIO DEI GHIACCIAI IN PIEMONTE

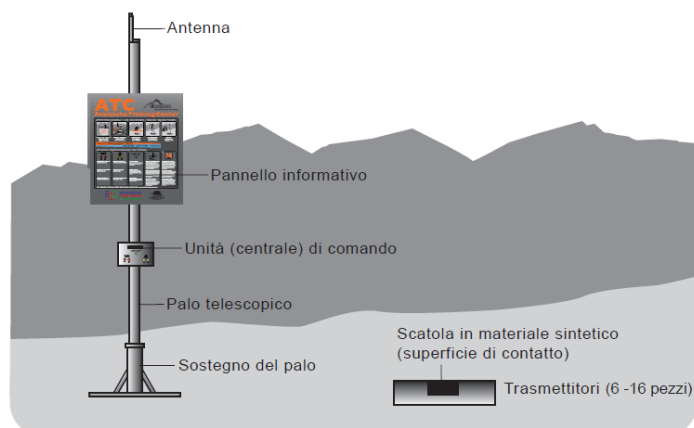
W. Alberto, D. Bormioli, M. Faletto, L. Lanteri,
L. Paro, G. Re Fiorentin, D. Viglietti & A. Salandin

TRAINING

ATC AVALANCHE TRAINING CENTER

Avalanche Training Center ATC è un impianto fisso che ha lo scopo di esercitare la ricerca di sepolti in valanga con apparecchi a.r.t.va (Apparecchio Ricerca Travolti in Valanga) e con sonde (fase di localizzazione).

L'impianto può gestire un minimo di 6 fino a un massimo di 16 trasmettitori che saranno sepolti nel campo di ricerca e che trasmettono con le medesime frequenze degli a.r.t.va in commercio. I trasmettitori possono essere attivati a distanza da centrale di comando in modo casuale (modalità esercizio) oppure manualmente (modalità esperti). Queste possibilità permettono di simulare la ricerca con scenari di seppellimento semplici o complessi (con più sepolti). **Campi di applicazione:** stazioni sciistiche, rifugi, comunità montane, scuole di sci e alpinismo.



PREVENZIONE

CP2011 & CP2022 AVALANCHE CHECKPOINTS

Gli esclusivi e versatili CP2011 e CP2022 offrono sicurezza a scialpinisti e praticanti ambiente innevato rilevando l'a.r.t.va in modalità trasmissione. Entrambi i dispositivi segnalano anche il passaggio nel caso in cui l'apparecchio di ricerca in valanga è spento o in modalità di trasmissione non attiva. CP2011 consente inoltre di registrare ogni passaggio, diventando così un sistema di conteggio persone.

Aree di applicazione: Stazioni sciistiche, rifugi, comunità montane.
Campi di applicazione avanzati per CP2011: Via ferrata, piste ciclabili, sentieri escursionistici.

info e personalizzazione pannello: professional@outback.it

A.R.T.VA.CHECK POINT

A.R.T.VA. PALA E SONDA POSSONO
SALVARE LA TUA VITA
E QUELLA DEI TUOI AMICI
THIS GEAR COULD SAVE YOUR
FRIENDS AND YOUR LIFE!

PROVA QUI IL TUO A.R.T.VA.
INTERVALLI DI 5 METRI
TRA UNO E L'ALTRO

DO YOU BEEP? CHECK IT HERE.
5 METERS INTERVALS
BETWEEN EACH OTHER

A.R.T.VA.
CHECKPOINT

CONSULTA IL
BOLLETTINO
GIORNALIERO
DELLE VALANGHE

SCAN HERE
TO CHECK
THE DAILY
AVALANCHE
BULLETIN

1 MOLTO FORTE

2 FORTE

3 MARCATO

4 MODERATO

5 DEBOLE

SOSTENUTO DA

POWERED BY

DISTRIBUITO DA

Outback 97

Via Baioni 24 - 14123 Bergamo (BG) Italy

Tel. 035361103

info@outback.it - professional@outback.it - www.outback.it

Un'estate da record. E i prossimi inverni?

L'estate del 2026 è stata la più calda mai registrata in Italia dall'inizio delle serie storiche disponibili. Sulle nostre montagne le anomalie sono state prolungate ed estreme, con un blocco anticiclonico che a tratti è parso inamovibile e che ha mantenuto lo zero termico superiore ai 4000 metri, spesso ben oltre, per intere settimane. Per i ghiacciai e per tutta la criosfera è stato un vero e proprio annus horribilis.

Gli effetti del riscaldamento globale negli ambienti di alta montagna non sono più proiezioni future, ma mera attualità. La precoce fusione della copertura nevosa stagionale già all'inizio dell'estate lascia il ghiaccio fossile privo di protezione, accelerando in maniera macroscopica i processi di ablazione, con ritiri da record, sia in termini di arretramento delle fronti sia di perdite di massa, e frequenti crolli di ghiaccio; il degrado del permafrost rende sempre più instabili i terreni di alta quota; contestualmente le temperature anormalmente elevate favoriscono la fusione del ghiaccio interstiziale nelle fratture delle rocce, con una maggiore frequenza e magnitudo dei crolli; il verificarsi sempre più frequente di precipitazioni estremamente intense determina un aumento delle colate detritiche, con ingenti danni alle strutture, spesso anche quelle turistiche.

Riferendoci proprio agli aspetti legati al turismo, ricordiamo che a metà luglio, fatto mai avvenuto in precedenza, tutti i comprensori sciistici estivi delle Alpi hanno dovuto chiudere per la totale assenza di neve e per le condizioni di pericolosità dei ghiacciai.

Un quadro di emergenza conclamata e attuale, senza poter dimenticare l'evento catastrofico di fine agosto tra Nepal e Tibet, che ci dà l'idea della potenziale distruttività di certi fenomeni, e che ha lasciato sconvolti gli amanti della montagna. Senza voler azzardare una vera e propria previsione stagionale, di cui conosciamo i limiti in termini di affidabilità, ci chiediamo a questo punto come sarà il prossimo inverno sulle nostre montagne, o meglio come potranno essere i prossimi inverni in un mondo che si sta surriscaldando e con un clima che si sta estremizzando.

Il riscaldamento globale non cancellerà il pericolo valanghe, ma probabilmente lo modificherà: potremo avere precipitazioni più intense e localizzate, in un'atmosfera più calda carica di energia e umidità, magari alternate a periodi anche lunghi di scarsità; ci aspettiamo variazioni repentine dello zero termico, con passaggi improvvisi da temperature rigide a forti anomalie termiche positive; tutto ciò si potrà tradurre in condizioni del manto nevoso più difficilmente decifrabili, aumentando per esempio la frequenza di valanghe di neve umida o di fondo anche quando ci si aspetterebbero condizioni di neve asciutta tipica delle alte quote. Aumenteranno le situazioni di pioggia su neve, anche a quote relativamente elevate, con le immaginabili conseguenze sia sulla durata del manto nevoso che sulla sua stabilità.

Per AINEVA e per tutti i Servizi previsionali una sfida che deve partire ancora una volta dalla conoscenza: conoscenza (e monitoraggio) dei cambiamenti in atto e di come questi potranno influire sulle condizioni del manto nevoso; sarà quindi fondamentale lavorare sulla formazione dei professionisti e sull'educazione degli utenti della montagna: la percezione del pericolo deve adeguarsi ad una montagna diversa e che ci pone di fronte a situazioni forse nuove.

L'estate 2026 ci lascia un monito chiaro. Quello che ci aspettavamo accadesse tra qualche decennio, o che speravamo in realtà non accadesse mai, è già realtà, e con questa realtà dovremo fare i conti anche nel nostro ruolo di previsori e di comunicatori.

Gianni Marigo

Direttore Responsabile





NEVE

▸ 6 Neve sulle Dolomiti Venete

▸ 20 Microorganismi
ice-nucleating e stabilità
del manto nevoso

NEVE sulle DOLOMITI VENETE

Mauro Valt
ARPAV-CVA, Arabba, Belluno (Italy)
mauro.valt@gmail.com

DOI: 10.82089/NEV992026_1

In recent decades, snow cover has undergone variations across the planet, partly due to rising temperatures, and climate change is already having a significant impact on the European Alps as well. Studies on snow cover have revealed that the reduction in the reliability of snow in low- and medium-altitude ski resorts is caused by warmer winter temperatures. This has also led to an increase in episodes of rain on snow, resulting in the snow cover melting early, even during the winter season.

This article analyses precipitation and snow trends in the Veneto Dolomites. Using data observed in the field, the aim is to understand the impact of climate change on the snow cover. The long historical series of some stations located in the Dolomites between 750 and 2200 m above sea level are used.

Compared to the climatic period 1961-1990, in the period 1991-2020 there was a decrease in snowfall HNwinter of almost 100 cm at an altitude of 2200 m, but also of 80-90 cm in the valley bottoms.

As regards the depth of snow on the ground (HSimed), the data clearly show the decline in snow cover in recent years, with more significant depth deficits at lower altitudes. Here, the loss of snow cover is gradual from January to March, when the snow disappears rapidly. At high altitudes, however, the deficit begins in March, due to a reduction in spring snowfall.

The reliable snow altitude in the Dolomites (LAN) is at 1,700 m, more than 200 m higher than in the 30-year period 1961-1990, but still lower than the value for the Italian Alps.

In the Dolomites, snow days, defined as consecutive days with at least 10 cm of snow on the ground (4SCD>10), have halved below 1,000 m altitude, from over 60 days to only 30-35 days.

As in the rest of the Alps, an increase in the number of days of rain on snow (ROS) has also been observed in the Dolomites, with a significant increase in the altitude of the zero isotherm during precipitation. In February, the altitude rose from around 1,000 metres in the period 1996-2005 to over 1,500 metres in the period 2016-2025.

From 2021 to 2026, a further decrease in all snow-related parameters is observed in the Dolomites.

The article also presents the trends of some historical snowfalls in 1951, 1960, 1969, 1978, 1986, 2008, 2014 and 2020.

Negli ultimi decenni la copertura nevosa ha subito delle importanti variazioni su tutto il pianeta anche a causa dell'aumento delle temperature e i cambiamenti climatici stanno già avendo un impatto significativo anche sulle Alpi europee. Gli studi sulla copertura nevosa hanno rivelato che la riduzione dell'affidabilità della neve nelle stazioni sciistiche di bassa e media quota è causata principalmente dalle temperature invernali più calde. Questo ha comportato anche un aumento degli episodi di pioggia su neve con conseguente precoce fusione del manto nevoso anche durante la stagione invernale.

Questo articolo analizza le precipitazioni e l'andamento della neve sulle Dolomiti Venete. Utilizzando i dati osservati sul campo, l'obiettivo è comprendere l'impatto dei cambiamenti climatici sul manto nevoso. Sono utilizzate le lunghe serie storiche di alcune stazioni ubicate nelle Dolomiti fra i 750 e i 2200 m di quota.

Rispetto al periodo climatico 1961-1990, nel periodo 1991-2020 si è osservata una diminuzione della precipitazione nevosa HNwinter di quasi 100 cm a 2200 m di quota, ma anche di 80-90 cm nei fondivalle. Per quando riguarda lo spessore della neve al suolo (HSimed) i dati evidenziano chiaramente il calo dell'innnevamento negli anni recenti, con deficit di spessore più significativi alle basse quote. Qui la perdita del manto nevoso è graduale da gennaio a marzo, mese in cui la neve scompare rapidamente. In alta quota, invece, il deficit inizia a marzo, a causa di riduzione delle nevicate primaverili.

La quota della neve affidabile nelle Dolomiti (LAN) è a 1700 m di quota, più elevata di oltre 200 m rispetto al trentennio 1961-1990 ma comunque inferiore al valore delle Alpi Italiane.

Nelle Dolomiti, le giornate neve, definite come i giorni consecutivi con almeno 10 cm di neve al suolo (4SCD>10) sono dimezzate al di sotto dei 1000 m di quota, da oltre 60 giorni a solo 30-35 giorni. Come sul resto delle Alpi, anche sulle Dolomiti è stato osservato un aumento dei giorni di pioggia sulla neve (ROS) con anche un importante aumento della quota delle zero termico durante le precipitazioni. Nel mese di febbraio dai circa 1000 metri di quota del periodo 1996-2005 si è innalzata ad oltre i 1500 m di quota nel periodo 2016-2025. Dal 2021 al 2026, sulle Dolomiti, si osserva una ulteriore diminuzione di tutti i parametri legati alla neve.

Nell'articolo, vengono proposti anche gli andamenti di alcune nevicate storiche del 1951, 1960, 1969, 1978, 1986, 2008, 2014 e 2020.



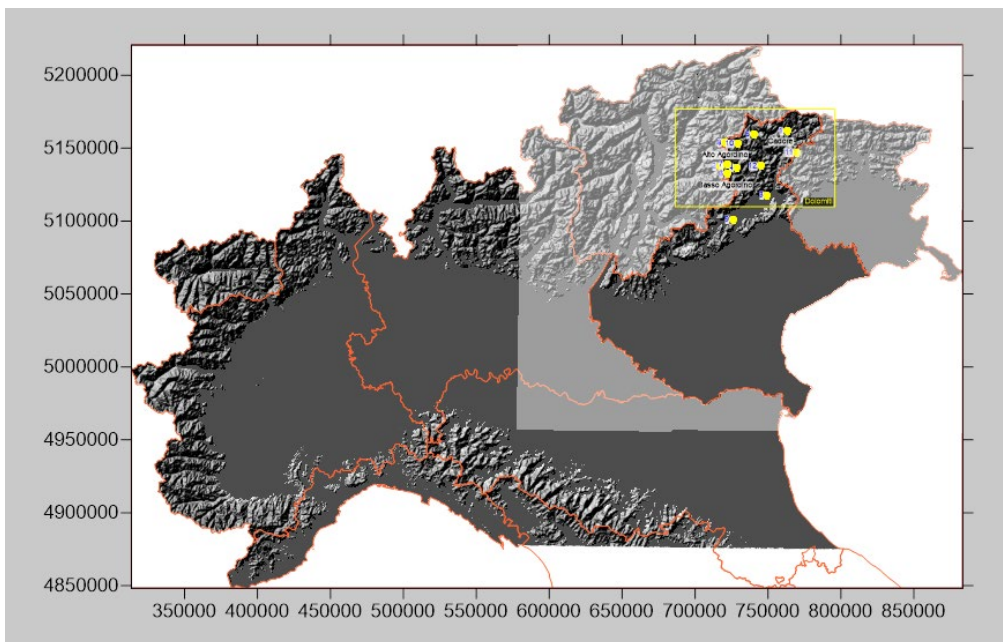
INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni la copertura nevosa ha subito delle importanti variazioni su tutto il pianeta anche a causa dell'aumento delle temperature (Notarnicola, 2022), e i cambiamenti climatici stanno già avendo un impatto significativo anche sulle Alpi europee. Gli studi sulla copertura nevosa hanno

Alcuni studi recenti hanno evidenziato che la minor durata della neve e l'aumento della temperatura, determinano una precoce maturazione dell'erba in alta montagna con maggior foraggio per gli animali (Zehnder et al., 2025). Di contro, si è osservato che la popolazione delle marmotte si sta innalzando di quota, riducendo anche il periodo del letargo (Simma et al., 2025). Infine, sono anche in aumento gli episodi di pioggia su neve (Valt, 2025) con conseguente fusione del manto nevoso nei periodi miti, e con la formazione di strati di neve gelata che possono ridurre le possibilità di pascolo di alcuni animali alpini durante l'inverno.

Oltre a questo tipo di rilevamenti con metodi manuali, nelle Dolomiti dal 1984 sono attive delle stazioni meteorologiche dota-

Figura 1 - Area oggetto del presente lavoro: le Dolomiti ricadenti nel territorio della provincia di Belluno (I) nella regione del Veneto con le stazioni utilizzate nel presente lavoro (vedere anche Tabella I).



te di sensori per misura dello spessore della neve con sistemi automatici ad ecometro o più recentemente laser. In questo caso le misure sono ripetute diverse volte a giorno (ogni 10 o 30 minuti) e viene elaborato un valore medio giornaliero di HS.

Il confronto fra le due metodologie di misura del valore di HS, unica al mattino per le misure manuali, media giornaliera per le stazioni automatiche, ha evidenziato uno scarto inferiore al 3% del valore di spessore della neve, con le variazioni maggiori nelle giornate con forte fusione o durante le nevicate (+/- 10% dello spessore) (Valt e Crepez, 2026).

Si è pertanto ritenuto che i valori di HS misurati con le due metodologie possano essere integrati ed elaborati insieme al fine di rendere più robuste le elaborazioni. Anche la neve fresca viene misurata una volta al giorno, alle ore indicate di HS e riguarda la quantità che si è accumulata nelle 24 ore precedenti e "assegnata" come precipitazione al giorno della misura. In pratica viene riportata la neve caduta ieri fra le ore 7:00 - 9:00 e le 24:00 più la neve della mattina fra le 0:00 e l'ora della misura (7:00 - 9:00).

La durata del manto nevoso al suolo (SCD) è il conteggio mensile dei giorni con almeno 1 o 5 cm di neve al suolo (HS) in diverse forme di aggregazione (mensile, stagionale, da novembre ad aprile etc.).

I dati utilizzati provengono principalmente dalla banca dati di ARPA Veneto e pubblicati sugli Annali Nivometeorologici nel periodo dal 1984 al 2022 (<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/neve/dati/stazioni-automatiche>), dagli open data (<https://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/dati-storici/meteo-idro-nivo/meteo60giorni>), Zenoldo (Matiu et al. 2021) e dai bollettini "Dolomiti Neve al suolo" <https://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/bollettini/neve/dolomiti-neve-al-suolo.pdf@@download/file>. Per definire le condizioni di contorno delle Dolomiti ricadenti in provincia di Belluno, sono state consultate anche le banche dati della Provincia Autonoma di Trento (www.Meteotrentino.it), della Provincia Autonoma di Bolzano (https://meteobrowser.eu-rac.edu/app_direct/meteobrowser/), del

Friuli Venezia Giulia (<https://omnia.meteo.fvg.it/login>) e del Servizio Meteomont dei Carabinieri Forestali (<https://meteomont.carabinieri.it/home>).

Nella Tabella I sono riportate le stazioni delle Dolomiti utilizzate, con la loro quota e coordinate e l'anno di inizio della serie storica. Nel corso degli anni, alcune stazioni manuali possono aver cambiato localizzazione all'interno dello stesso paese e non sempre è stato possibile ricostruire i metadati. Considerando la variabilità stessa del dato di neve, sono stati ritenuti validi purché la quota non sia variata di +/- 100 m di quota, l'esposizione sole/ombra sia rimasta la stessa e la distanza lineare dello spostamento non sia stata superiore ai 300 m.

ELABORAZIONI EFFETTUATE

Sono stati analizzati i dati di HS, HN e SCD di ciascuna stazione, in alcune elaborazioni aggregati per 2 fasce altimetriche: al di sotto dei 1500 m di quota, limite altimetrico per il quale le variazioni di temperatura invernali hanno un impatto maggiore e oltre i 1500 m di quota.

In base alla disponibilità del parametro sono stati definiti i valori di:

- Sommatoria stagionale di neve fresca dal 1° ottobre al 31 maggio [HN_{winter} , cm];
- Indice di spessore medio della neve al suolo calcolato come media aritmetica

sui valori disponibili delle stazioni al di sotto dei 1500 m di quota (bassa quota) [HS_{imed} , cm];

- Indice di spessore medio della neve al suolo, calcolato come media aritmetica sui valori disponibili per il raggruppamento delle stazioni al di sopra dei 1500 m di quota (alta quota) [HS_{imed} , cm];
- La quota della neve affidabile [LAN, m] espressa come la quota dove per almeno 100 giorni la neve rimane con uno spessore di 30 cm ($100SCD > 30$);
- Le giornate sulla neve [$4SCD > 10$, giorni] sono definite come i periodi di almeno 4 giorni consecutivi in cui il manto nevoso è presente con uno spessore di almeno 10 cm nei campi di misurazione. Questi limiti sono ideati per eliminare le nevicate effimere e i periodi brevi con poca neve al suolo. Il valore di $4SCD > 10$ è determinato sommando le giornate che soddisfano le 2 condizioni;
- L'andamento della quota dello zero termico alle 12 UTC in relazione alla precipitazione nella stazione di Arabba a 1600 m;
- I giorni di pioggia su neve (ROS, evento) Per ogni singolo parametro da a) ad f) sono stati determinati i valori caratteristici del
 - periodo climatico 1961-1990;
 - periodo climatico 1991-2020 (ISRPA, 2017).

e in alcuni casi l'andamento per decennio

Tab I. - Stazione utilizzata.
* lunghezza delle serie storiche diverse in funzione dei parametri neve analizzati.

Numero	Stazione	Lat	Lon.	Quota (m)	Serie storica
1	Auronzo di Cadore di Cadore	46,56	12,43	850	1951-2026
2	Lago di Cavia/Cima Pradazzo	46,36	11,82	2100	1951 (1960*) – 2026
3	Belluno	46,16	11,24	410	1972-2026
4	Cencenighe Agordino	46,35	11,97	750	1954-2026
5	Cortina d'Ampezzo	46,53	12,14	1250	1951-2026
6	Gares	46,31	11,88	1365	1971-2026
7	Falcade	46,36	11,87	1150	1951 (1997*) -2026
9	Feltre	46,03	11,90	290	1961-2026
8	Arabba	46,50	11,88	1630	1951-2026
10	Andraz	46,49	11,99	1440	1951-2026
11	Passo Mauria	46,02	11,90	1250	1951-2012
12	Forno di Zoldo	46,35	12,18	870	1951-1992

NEVE

in modo da evidenziare alcune caratteristiche invernali.

Infine, vengono illustrate alcune nevicate importanti avvenute sulle Dolomiti con i dati di HS giornaliero e con i relativi dati di HN dove disponibili.

In tutti i grafici e le tabelle l'anno di riferimento è quello idrologico: l'anno 2026 inizia il 1° ottobre 2025 e termina il 30 settembre 2026 e così per le stagioni precedenti. Parte dei dati utilizzati erano già aggregati in tabelle nelle pubblicazioni e siti consul-

tati, per altri si è provveduto ad effettuare le elaborazioni necessarie.

Inoltre, per definire gli eventi rari, è stato determinato il 10° e il 90° percentile rispetto al periodo di riferimento. Gli scarti medi che si collocano oltre tali soglie sono stati

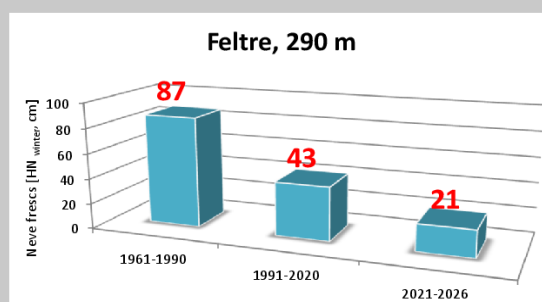
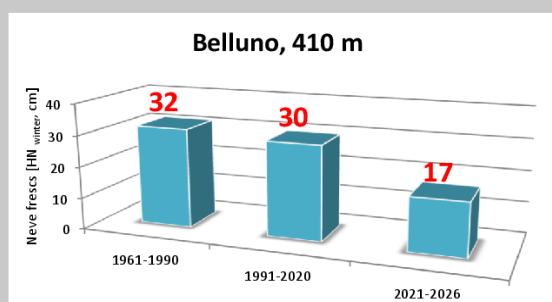
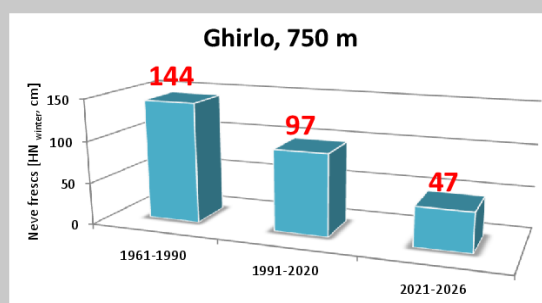
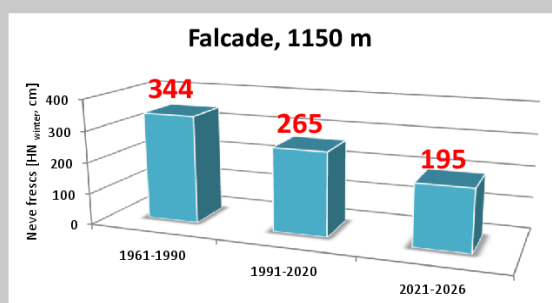
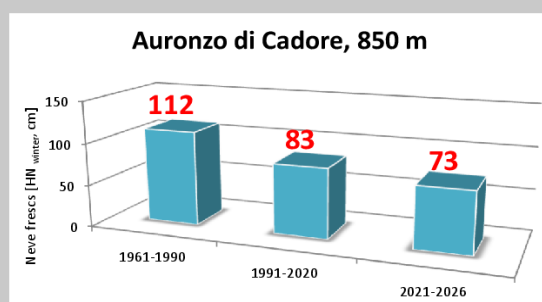
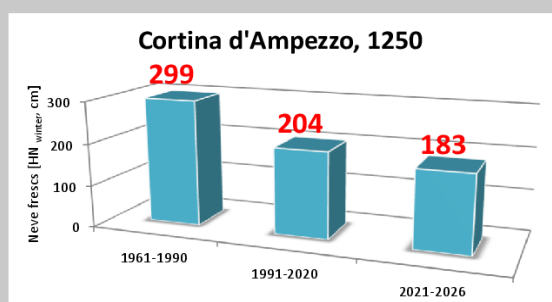
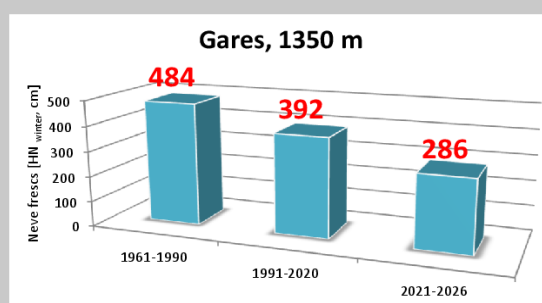
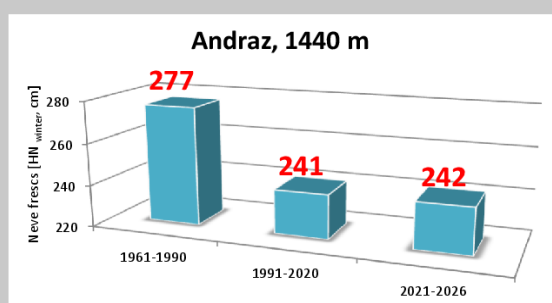
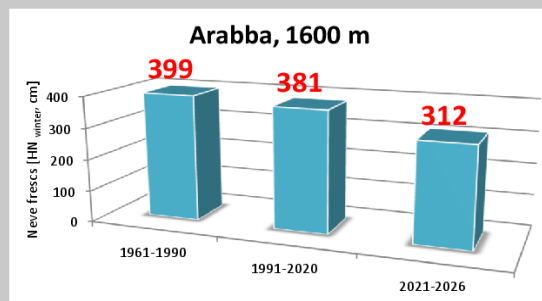
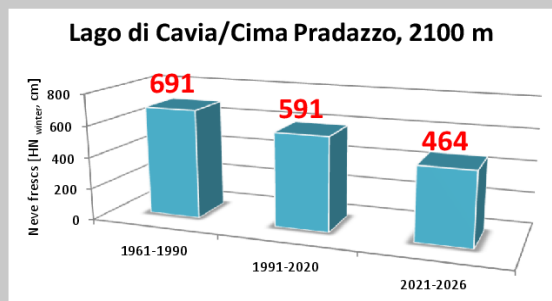


Figura 2 - Valori medi di precipitazione nevosa [HN_{winter}, cm] per i periodi climatici 1961-1990 e 1991-2020 e negli ultimi 6 anni.

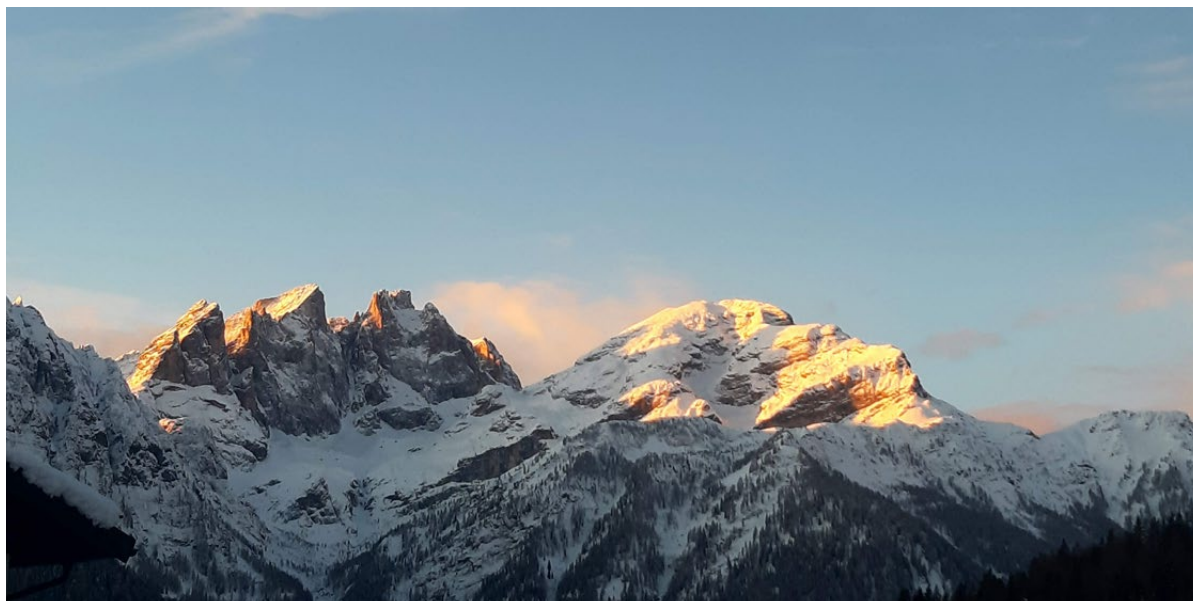


Figura 3 - Valori medi di neve al suolo (HS_{imed}) calcolato per le stazioni in quota delle Dolomiti (oltre i 1500 m di quota). La curva blu indica il trentennio 1961-1990, la curva rossa indica il trentennio recente 1991-2020, la linea tratteggiata nera indica le ultime 6 stagioni invernali.

Figura 4 - Valori medi di neve al suolo (HS_{imed}) calcolato per le stazioni a bassa quota delle Dolomiti (inferiore ai 1500 m di quota). La curva blu indica il trentennio 1961-1990, la curva rossa indica il trentennio recente 1991-2020, la linea tratteggiata nera indica le ultime 6 stagioni invernali.

considerati eventi rari. Sono stati considerati come valori rientranti nella variabilità media quelli situati fra il 1° e il 3° quartile (25% e 75%). Gli scarti medi che si collocano all'interno del 1° quartile e del 3° quartile, fino al 10° e 90° percentile, sono stati definiti eventi al di fuori della norma. Tale metodologia è stata utilizzata per la sua semplicità e per omogeneità con i lavori precedenti.

RISULTATI

a. Neve fresca (HN_{winter})

Nella Fig. 2 sono riportati i valori medi di precipitazione nevosa per periodi di 30 anni e degli ultimi 6 anni per comprendere la variazione sul lungo periodo.

Come si può osservare, nella stazione di alta quota di Lago di Cavia, lo scarto tra i due trentenni è importante, di 1 metro (-14%), come anche nella vicina stazione di Gares (-19%). Lo scarto è importante anche a Falcade a 1150 m (-23%) e a Cencenighe Agordino (-33%), ubicate come Gares e Lago di Cavia/Cima Pradazzo nel basso Agordino; nell'alto Agordino, caratterizzato da precipitazioni nevose generalmente inferiori, lo scarto fra i 2 trentenni è minore: per Arabba è del 4% e per Andraz del 13%. Per la zona più orientale della Provincia di Belluno sono disponibili i dati di Cortina d'Ampezzo (-32%) e di Auronzo di Cadore (-26%) che evidenziano anche esse un deficit di precipitazione nevosa. Nelle stazioni di fondovalle di Belluno (-6%) e Feltre (-51%) gli scarti percentuali sono

molto variabili e andrebbe fatta un'analisi esaminando le giornate con nevicate, poiché singoli eventi importanti come quelli di fine novembre del 2005 possono far variare di molto i valori finali.

Nelle ultime 6 stagioni invernali, rispetto alla media 1991-2020 il deficit risente molto della quota con un -16/18% nelle stazioni più in quota, del 48% nelle stazioni a quote inferiori ai 1000 m.

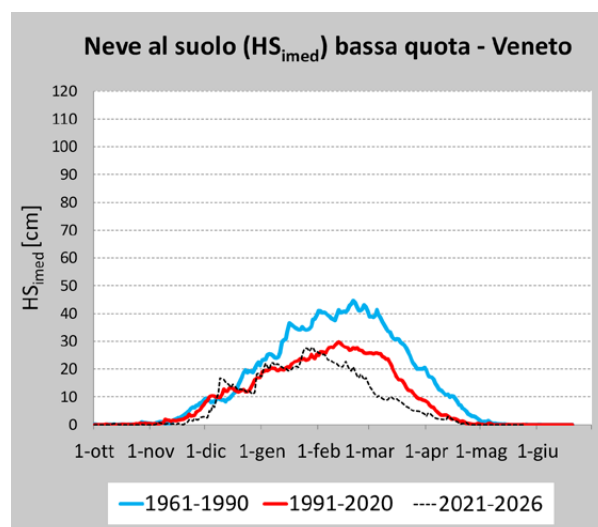
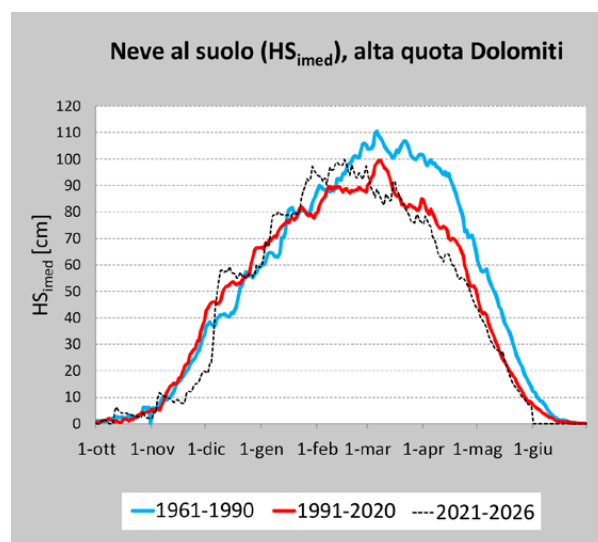
b. Neve al suolo (HS_{imed})

Per la neve al suolo (HS_{imed}) le stazioni sono state raggruppate per "bassa e alta quota" per meglio comprendere l'andamento stagionale (Fig. 3 e 4).

Nei grafici, la curva blu indica il trentennio climatico 1961-1990, periodo che coincide anche con lo sviluppo dello sci nei fondovalle delle Dolomiti e della fascia prealpina. La curva rossa rappresenta invece il trentennio recente, caratterizzato dallo sviluppo delle tecniche di innevamento programmato per sopperire la mancanza di neve, mentre la linea tratteggiata nera indica le ultime 6 stagioni invernali.

I dati evidenziano chiaramente il calo dell'innnevamento negli anni recenti, con i deficit di spessore più significativi alle basse quote. Qui la perdita del manto nevoso è graduale da gennaio a marzo, mese in cui la neve scompare rapidamente. In alta quota, invece, il deficit inizia a marzo, a causa di una netta riduzione delle nevicate primaverili.

Negli ultimi 6 anni, caratterizzati anche da



un nevoso 2021, si è assistito ad un minor innevamento in quota da febbraio ad aprile, mentre alle basse quote si è osservata una rapida diminuzione del manto nevoso a partire già da fine gennaio, molto spesso dovuta ad episodi di pioggia su neve.

LAN Quota neve sciabile - Dolomiti

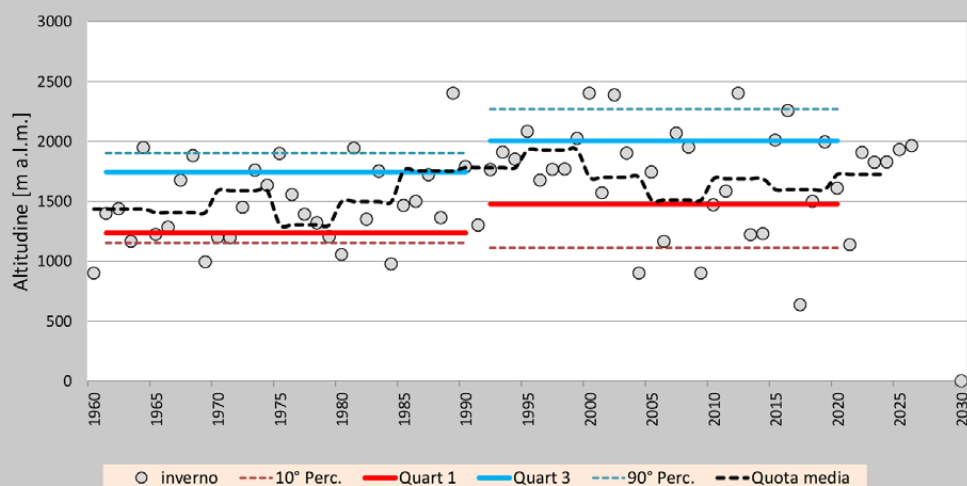
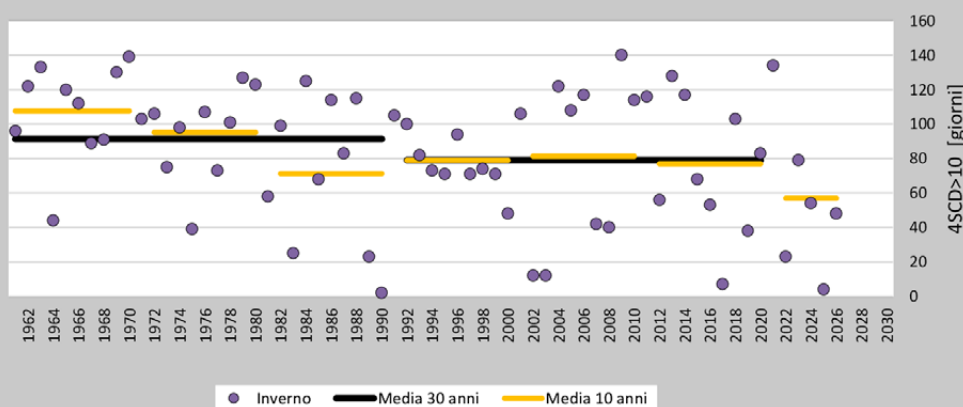
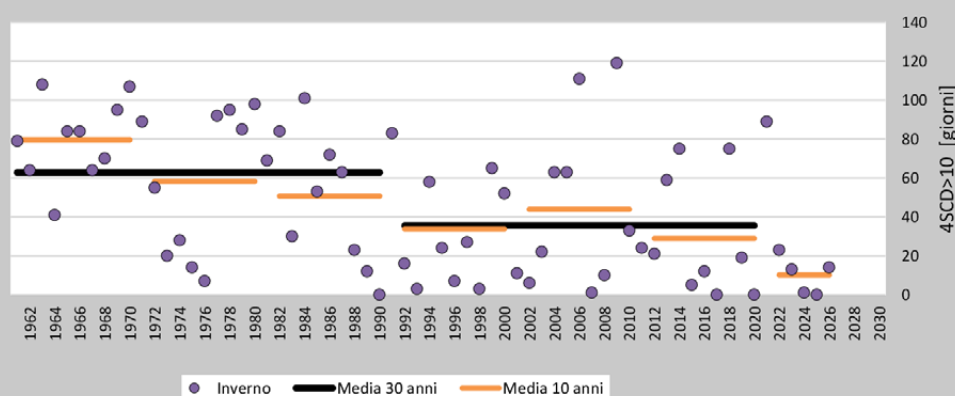
Giornate sulla neve (4 gg > 10 cm)
Cortina d'Ampezzo, 1250 mGiornate sulla neve (4 gg > 10 cm)
Auronzo, 850 m

Figura 5 - Elaborazione della quota della neve affidabile, denominata anche quota neve sciabile (LAN), per le Dolomiti.

Figura 6 - Giornate sulla neve (4SCD>10) per la stazione di misura di Cortina d'Ampezzo. Valori medi calcolati per trentennio e per decennio, nel periodo da dicembre ad aprile.

Figura 7 - Giornate sulla neve (4SCD>10) per la stazione di Auronzo di Cadore. Valori medi calcolati per trentennio e per decennio, nel periodo da dicembre ad aprile.

Periodo	Alpi	Dolomiti
1961-1990	1521 m	1497m
1991-2020	1809 m	1700 m
2021-2026	2025 m	1765 m

Tab II - Altitudine della LAN

Questi dati rappresentano valori medi su base trentennale e sono quindi molto significativi. Pur livellando le variazioni annuali - come l'alternanza tra inverni molto nevosi e altri secchi - le medie mostrano chiaramente la tendenza generale, e confermano la percezione di chi vive in montagna e che oggi ha 60-70 anni di età "c'è meno neve di una volta".

c. Neve sciabile (LAN)

La quota della affidabilità della neve naturale (LAN) per lo sci, neve sciabile, viene definita come la quota dove per una durata minima di 100 giorni, da dicembre ad aprile (DJFMA), il manto nevoso è pari ad almeno 30 cm di spessore (100SCD>30) (Beniston, 1997). Questo criterio viene utilizzato a livello internazionale per descrivere la neve anche dal punto vista di risorsa turistica: secondo Burki (2000), la sostenibilità economica di un comprensorio sciistico è garantita quando in almeno 7 stagioni invernali su 10 la copertura nevosa soddisfa tale condizione.

La quota della affidabilità della neve naturale, tuttavia, varia da regione a regione in funzione delle differenze di clima delle Alpi.

Agarwala (2007) in "Climate Change in The European Alps – Adapting Winer Tourism and Natural Hazard Management" descrive la situazione delle Alpi sulla base della letteratura scientifica dell'epoca. In Svizzera, Föhn (1990) and Laternser e Schneebeli (2003) ha definito una LAN intorno ai 1200-1300 m di quota. Wielke et al. (2004), comparando diversi parametri della neve fra Svizzera e Austria, ha ricavato risultati simili, validi anche per l'Austria occidentale. Per l'Austria orientale tenendo conto del clima più continentale (inverni più freddi nelle zone più orientali delle Alpi) la linea di base dell'affidabilità naturale della neve è inferiore di 150 m, cioè 1050 m. Per quanto riguarda la Francia, sempre Agarwala (2007), indica una LAN a 1500 m, eccetto per Isère, Savoia e Alta Savoia a 1200 m, per la Germania a 1050-1200 m e per l'Italia a 1500 m.

La LAN attuale delle Dolomiti, media degli ultimi 6 anni (2021-2026) è di 1764 m

di quota, altitudine che risente molto del valore del 2021 (1137 m) rispetto ai 5 anni recenti con una LAN oltre i 1800 m di quota (Fig. 5). Questa quota, determinata con i valori di 7 stazioni, Cencenighe Agordino, Auronzo di Cadore, Cortina d'Ampezzo, Passo Mauria, Andraz, Arabba e Lago di Cavia/Cima Pradazzo, è di poco superiore alla media del trentennio 1991-2020 pari a 1700 m, ma ben 200 m oltre il valore del trentennio 1961-1990. Il trentennio recente è caratterizzato da molta variabilità rispetto al precedente con un graduale aumento dal 1980 al 2002, come indica la media mobile di ordine 5.

Rispetto alle Alpi (Valt, 2026), la LAN delle Dolomiti è inferiore di circa 110 m nel trentennio 1991-2020 e ancor di più nel periodo recente (circa 260 m) ad indicare una maggior nevosità settoriale alle quote più basse rispetto all'andamento generale. In Tabella II sono riportati i valori riassuntivi della LAN per le Alpi e le Dolomiti.

Alcuni lavori più recenti sulla LAN hanno studiato l'impatto dell'aumento della temperatura per la Spagna (Luis Campos et al. 2018), la Svizzera (es. Schmucki et al., 2015) e per l'Austria (es. Olefs et al. 2020), indicando anche i possibili scenari futuri. Gli autori svizzeri (Föhn, 1990, Haeberli e Beniston, 1998) hanno stimato che per un incremento della temperatura media dell'aria di 1°C, la quota della LAN sarebbe aumentata di 150 m.

Valt e Cianfarra (2022) indicano un aumento di circa +1,1°C fra i 2 periodi climatici a cui corrisponderebbe un aumento di quota della LAN di circa 240 m per le Alpi italiane, pari a 218 m per 1°C di aumento della temperatura.

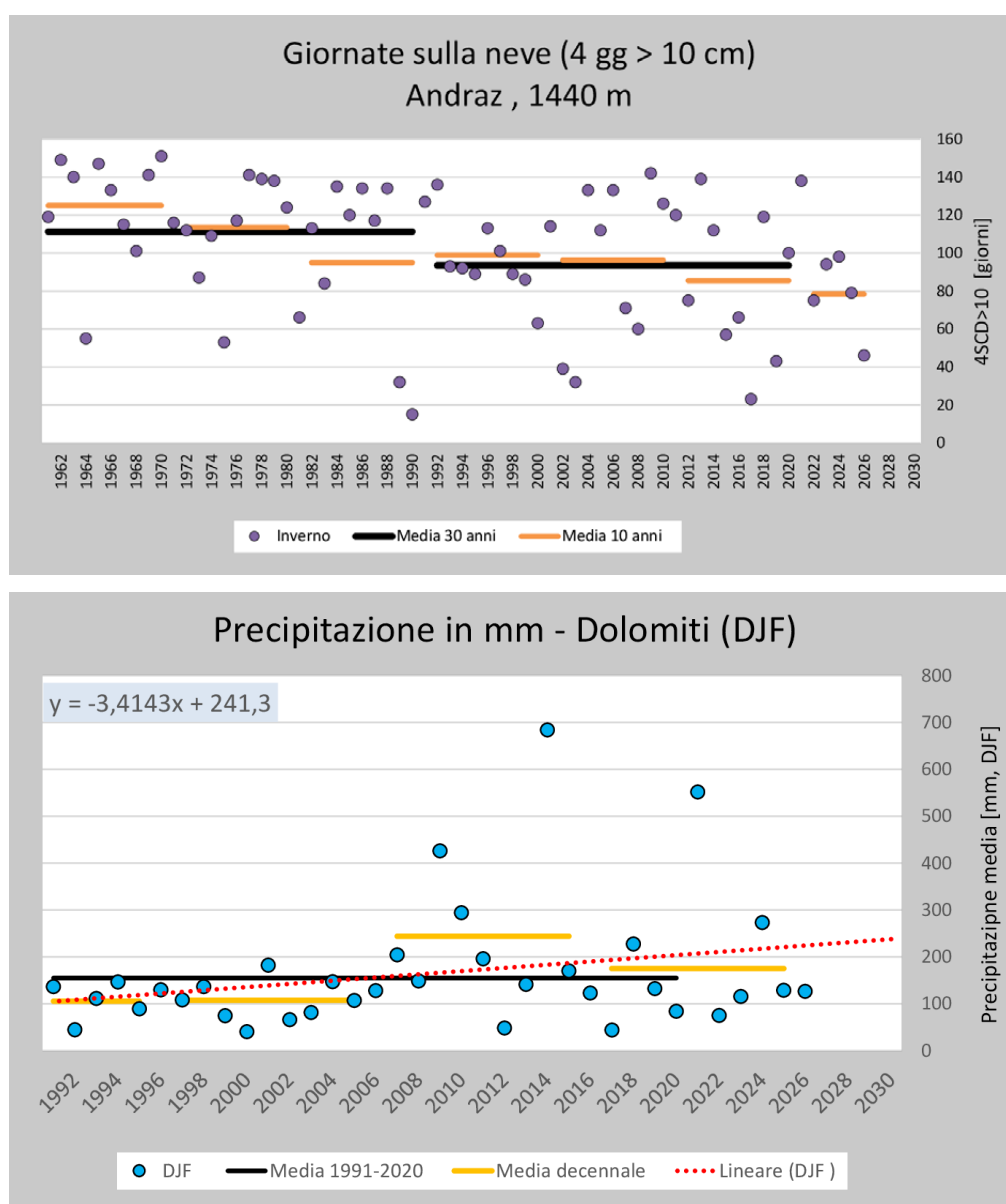
d. Giornate sulla neve (4SCD>10)

Sono state calcolate le giornate da dicembre ad aprile che soddisfano i limiti definiti per lo 4SCD>10 per alcune stazioni a bassa quota, ovvero per la fascia altitudinale dove l'aumento delle temperature, delle piogge su neve e la minor precipitazione nevosa, hanno avuto un impatto maggiore negli inverni. Sono state determinate le giornate medie per trentennio e per decennio al fine di comprendere meglio l'evoluzione.

Nella stazione di misura di Cortina d'Am-

Periodo	Auronzo di Cadore 850 m	Cortina d'Ampezzo 1250 m	Andraz 1440 m
1961-1990	63 giorni	91 giorni	111 giorni
1991-2020	33 giorni	79 giorni	94 giorni
2021-2026	10 giorni	57 giorni	78 giorni

Tab III - Dati riassuntivi dello 4SCD>10 per le stazioni campione



pezzo (Fig. 6), l'elaborazione per decenni evidenzia la maggior presenza di neve nel periodo 1961-1980, una flessione nel decennio 1981-1990 e poi una stazionarietà, per poi crollare nel periodo recente (-20 giorni).

Per la stazione di Auronzo di Cadore, a quota inferiore (Fig. 7), l'andamento è simile, con una maggior flessione nel decennio 1991-2000 caratterizzato da una generale diminuzione delle nevicate su tutto l'arco alpino e da un valore estremamente scarso nel periodo recente. Dalle 60 - 80 giornate degli anni '70 e '80 del secolo scorso, si è

passati a 10 giornate per stagione negli ultimi 6 inverni.

Anche in quota, nella stazione di Andraz a 1440 m (Fig. 8), si evidenzia una riduzione dello 4SCD>10 dai 115-125 giorni del periodo 1961-1980 al decennio più recente (2011-20) con 85 giornate. Il periodo centrale, 1981-2010 non vede grandi variazioni. In generale, fra il periodo 1961-1990 e 1991-2000, la diminuzione è del 13-15% per le stazioni di Cortina d'Ampezzo e Andraz e del 43% per Auronzo di Cadore.

In Tabella III sono riportati i dati riassuntivi delle 3 stazioni campione.

Figura 8 - Giornate sulla neve (4SCD>10) per la stazione di Andraz. Valori medi calcolati per trentennio e per decennio, nel periodo da dicembre ad aprile.

Figura 9 - Andamento delle precipitazioni medie invernali (DJF) in mm di acqua equivalente nelle Dolomiti nel periodo 1991-2026. I punti rappresentano i valori annuali, la linea rossa tratteggiata la tendenza lineare, mentre le linee orizzontali indicano la media climatica di riferimento (1991-2020) e le medie dei decenni considerati.

e. Eventi di pioggia su neve

Sulle Alpi le precipitazioni invernali, come mm di acqua equivalente, non evidenziano particolari tendenze anche se localmente, nelle Dolomiti (Fig. 9) hanno un trend positivo. Tuttavia, nel trentennio 1996-2025, gli spessori di neve al suolo si sono ridotti, la quota della neve sciabile è aumentata, la quantità di neve fresca è diminuita, così come la risorsa nivale SWE si è ridotta (Valt M., 2023). Inoltre, sono aumentati gli episodi di pioggia su neve da dicembre a febbraio (DJF) a tutte le quote (Valt M., 2025) (Fig. 10). Nelle Dolomiti, negli ultimi 10 anni (2016-2025) rispetto ai precedenti (2006-2015) il numero di giornate con precipitazioni (pioggia + neve) sono diminuite del 25 %, da una media di 25 a 19. I giorni con nevicate sono calati da 18 a 12 mentre i giorni

di pioggia sono aumentati di una unità, da 6 a 7. In questa elaborazione sono stati considerati tutti i giorni con almeno 0,2 mm di precipitazione totale e per la neve 1 cm (dati per entrambi i parametri alle ore 8:00 e riferiti alle 24 ore precedenti). Incrociando la quota dello zero termico (ZT12h) alle ore 12 UTC nella libera atmosfera misurata a Campoformido (UD) nelle giornate di precipitazione e i valori di pioggia o neve misurati nella stazione di Arabba, è stato riscontrato un aumento della ZT12h nelle giornate con precipitazioni di ben 240 m nel mese di gennaio e di oltre 420 m nel mese di febbraio (Fig. 11) rispetto al periodo 1996-2005. Nella Fig.11 i diversi valori di quota per mese e decennio. L'aumento di quota è graduale, salvo per il mese di febbraio.

Figura 10 - Numero di giornate con episodi di pioggia sulla neve (ROS) da dicembre a febbraio (DJF) sulle Alpi italiane oltre i 1500 m di quota.

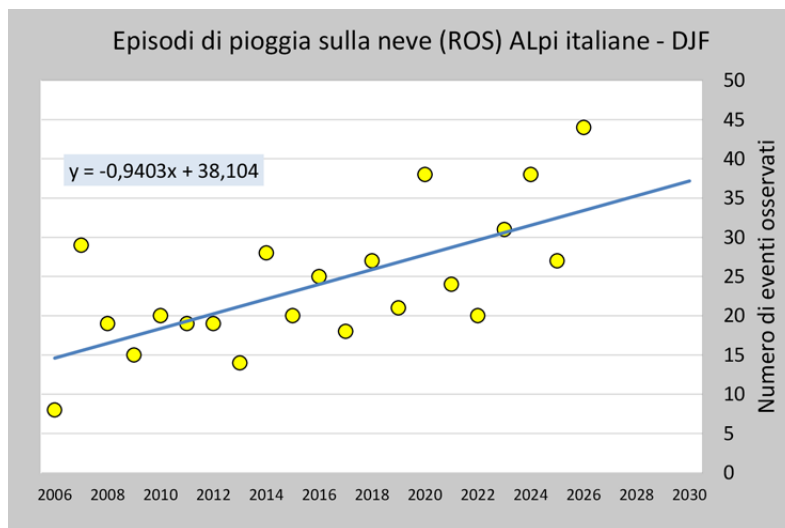


Figura 11 - Quota dello zero termico (ZT12h) alle ore 12 UTC nella libera atmosfera misurata a Campoformido (UD) nelle giornate di precipitazione (pioggia o neve misurati nella stazione di Arabba), per mese e decennio.

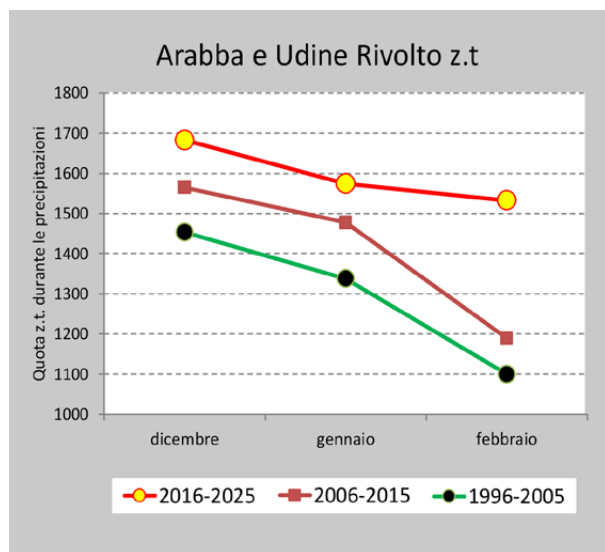
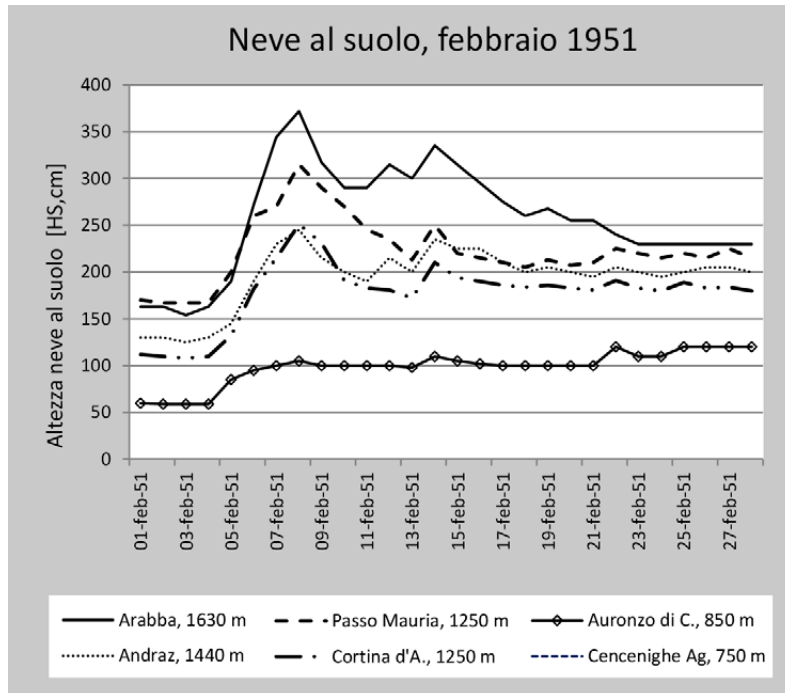


Figura 12 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 1 - 27 febbraio 1951.



ALCUNE NEVICATE DELLE DOLOMITI

In un contesto di diminuzione della precipitazione nevosa, di aumento degli episodi di pioggia e di pioggia sulla neve, di un innalzamento della quota della neve sciabile, etc., nella variabilità meteorologica del periodo attuale, alcuni inverni, anche recenti, sono stati particolarmente nevosi con eventi intensi.

Nel corso degli anni, molti eventi nevosi hanno lasciato un importante ricordo nei racconti orali, come l'abbondante nevicata del 1951 con gallerie scavate nella neve per poter uscire dalle case. Oltre al 1951, ci sono stati altri eventi molto importanti, come nel 1978 quando anche un treno fu travolto da una valanga.

Di seguito vengono proposti alcuni eventi importanti, a partire proprio dall'evento del 1951.

Febbraio 1951

Dal 6 all'8 febbraio 1951 (Fig. 12), la montagna veneta fu interessata da copiose nevicate sciroccali. I dati ufficiali evidenziano, fra il 6 e il 9 febbraio, ben 140 cm di neve fresca a Cortina d'Ampezzo, Arabba, Cencenighe Agordino, Andraz, Passo Mauria a cui seguirono altri 30-50 cm il 14 febbraio. Queste nevicate si aggiungevano ad un manto nevoso già presente con spessori importanti dovuti anche alle nevicate della seconda decade di gennaio. Le cumulate

di HN finali saranno di oltre 18 m di neve fresca sul Passo Valles prossimo a Lago di Cavia/Cima Pradazzo, 11 m a Falcade, 9 m ad Arabba e 7,50 m a Cortina d'Ampezzo (dati ufficiali).

Gennaio 1960

Anche la stagione invernale 1959-1960 è stata in generale molto nevosa con apporti complessivi di oltre 8 metri a 2000 m di quota e di quasi 6 m a Falcade e Cortina d'Ampezzo. Diversi i periodi con apporti importanti in pochi giorni: già a dicembre, a gennaio, a metà febbraio e metà marzo. Il grafico (Fig. 13) evidenzia l'evento del 15-18 gennaio, con apporti importanti anche nei fondivalle.

Gennaio 1969

La stagione 1968-1969 è stata nevosa nella norma, ma caratterizzata da un evento a gennaio particolarmente intenso. Anche in questo caso, come nel 1960, l'episodio cade prima dei "mercanti della neve", ovvero i santi "S. Romedio, S. Antonio e S. Sebastiano", così definiti nella tradizione locale. Fra il 13 e il 15 gennaio (Fig. 14) si misurano 105 cm di neve fresca ad Andraz, Arabba e Lago di Cavia/Cima Pradazzo, 125 cm a Cortina d'Ampezzo, 80 cm a Passo Mauria, mentre alle quote inferiori piove.

Gennaio - febbraio 1978

Dopo il nevoso 1977, anche l'inverno 1978 risulta nevoso e drammatico per certi versi. Dal 10 gennaio a metà febbraio (Fig. 15) si

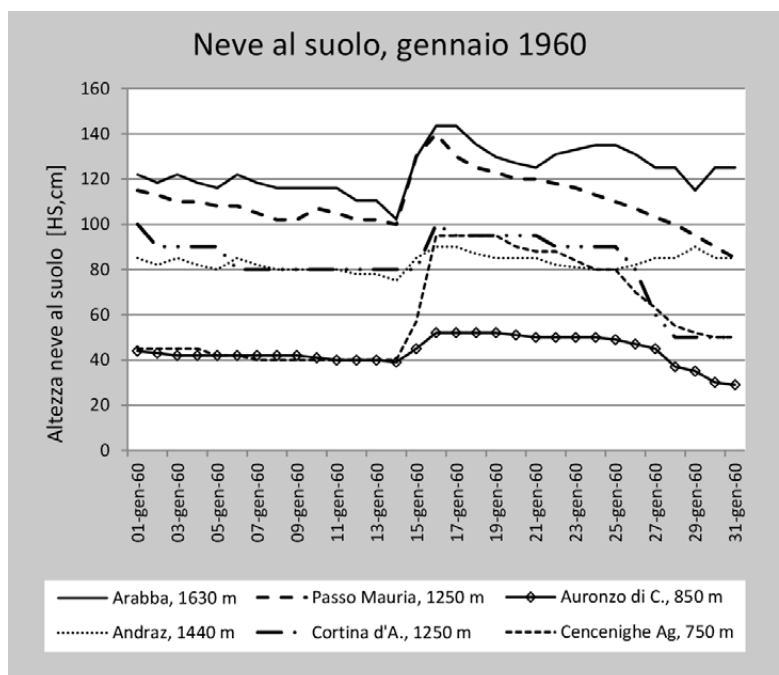


Figura 13 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 1 - 31 gennaio 1960.

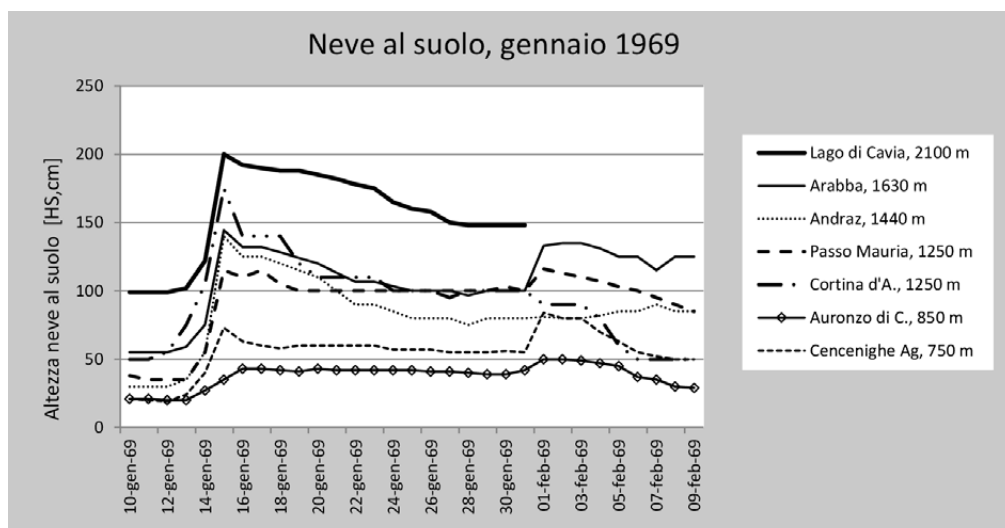
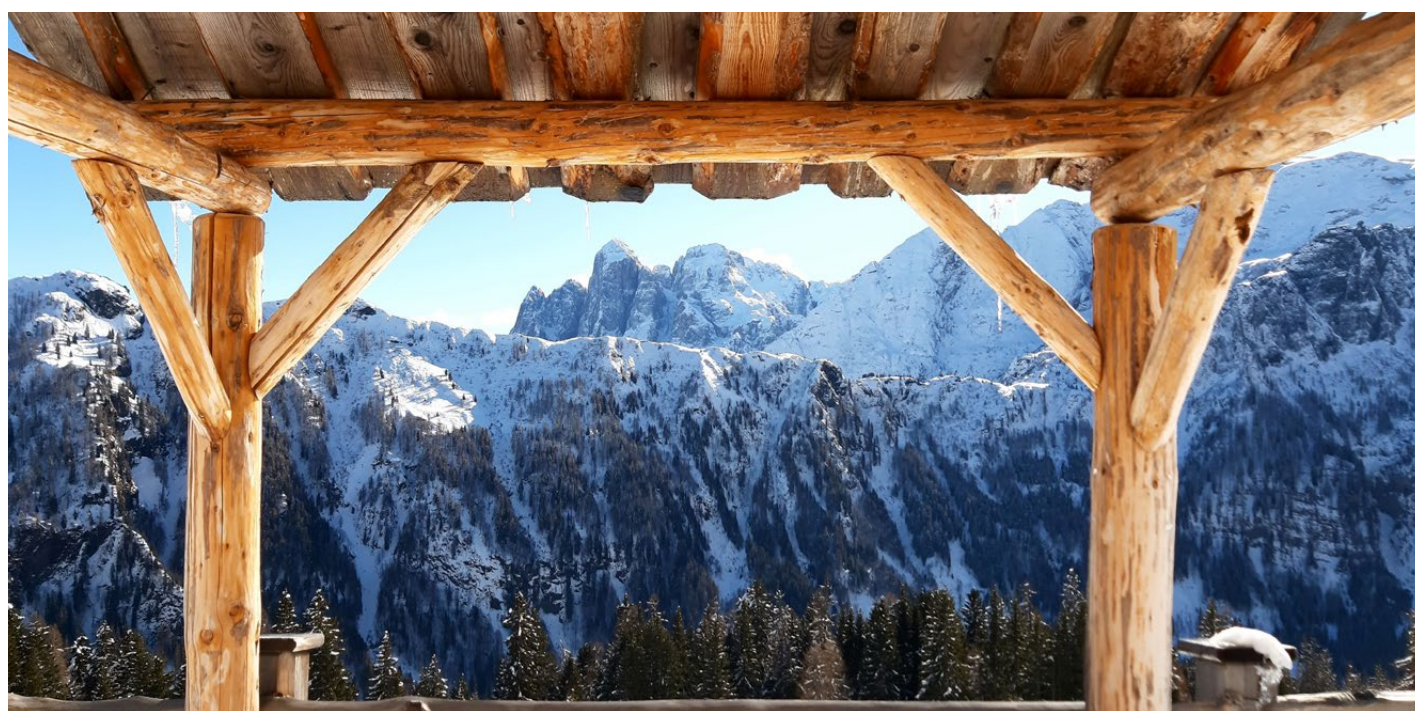
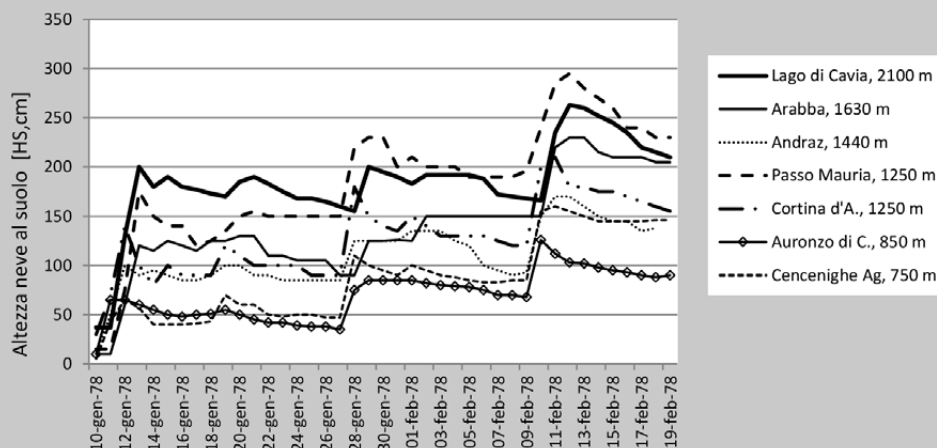


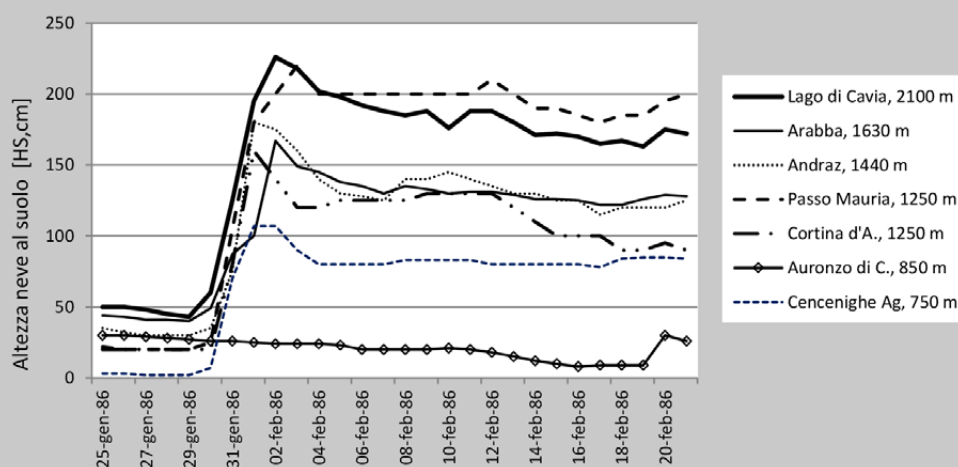
Figura 14 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 10 gennaio - 9 febbraio 1969.



Neve al suolo, gennaio-febbraio 1978



Neve al suolo, gennaio-febbraio 1986



osservano più nevicate a fondovalle, dove la neve raggiunge spessori di oltre 1 m. Le strade dell'Agordino rimangono chiuse per diversi giorni. Si ricorda la valanga che travolse il taxi al Pont dei Castiei, fra Agordo e Belluno causando 4 vittime https://archivio.unita.news/assets/main/1978/02/13/page_004.pdf, e le due valanghe che si abbatterono sul treno Calalzo-Venezia poco sopra Vittorio Veneto la sera del 10 febbraio <https://www.trenibelluno.it/2024/approfondimenti/linee/il-treno-sotto-la-slavina/>.

Gennaio - febbraio 1986

Un importante episodio è quello di fine gennaio 1986, con molte abitazioni travolte soprattutto in Alto Adige e la valanga che travolse il pulmino che stava salendo verso il Passo San Pellegrino nel Comune di Falcade (3 vittime). Fra il 28 gennaio e il 4 febbraio, (Fig. 16), vengono misurati oltre 200 cm di neve fresca a Lago di Cavia/ Cima Pradazzo, 150 cm ad Arabba, e 105 cm a Cencenighe Agordino a 750 m di quota. Anche in questo episodio l'attività valanghiva fu intensa con chiusura di molte strade per parecchi giorni.

Novembre - dicembre 2008

Nei tempi più recenti, l'evento di fine novembre - primi di dicembre (Fig. 17) del

Figura 15 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 10 gennaio - 19 febbraio 1978.

Figura 16 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 25 gennaio - 20 febbraio 1986.



2008 (stagione invernale 2008-2009) è stato particolarmente intenso. Dalla mattinata di venerdì 28 novembre diffuse precipitazioni nevose raggiungono anche i fondivalle e le località di pianura. Gli apporti nevosi sono stati mediamente 35-50 cm nella zona Dolomitica e 25-40 cm nella zona Prealpina. In pianura il manto presenta spessori variabili intorno i 10-15 cm. Nella notte tra il 29 e il 30 novembre il transito di un'ulteriore perturbazione apporta ancora 30-40 cm di neve fresca oltre i 1200 m sulle Dolomiti, e 15-30 cm a 1500 m sulle Prealpi. Fra il 30 novembre e il 1° dicembre, nuove forti precipitazioni nevose con apporti di 35-50 cm a 1500 m. Fra il 10 e il 12 dicembre, nevica ancora con apporti di 70-80 cm nelle Dolomiti settentrionali, (98 cm a Cortina d'Ampezzo) e 80-100 nelle Dolomiti meridionali.

Gennaio - febbraio 2014

L'evento di fine gennaio 2014 - inizi di febbraio (Fig. 18) è uno dei maggiori degli ultimi 100 anni. La neve fresca è molto leggera e ogni giorno nevica anche nei fondivalle 30-40 cm che si assestano rapidamente.

Dal 28 gennaio al 4 febbraio, si misurano 270 cm di neve fresca al Lago di Cavia/

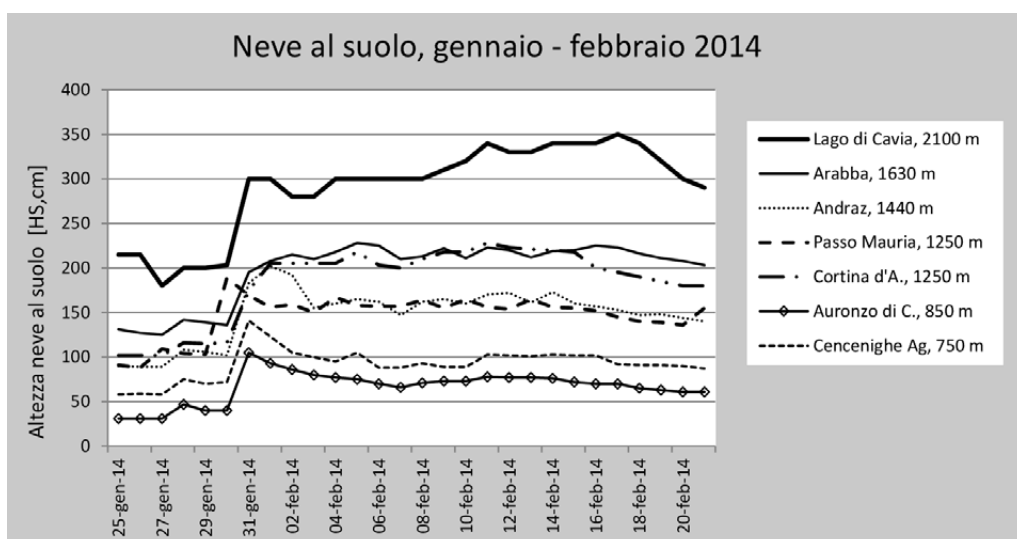
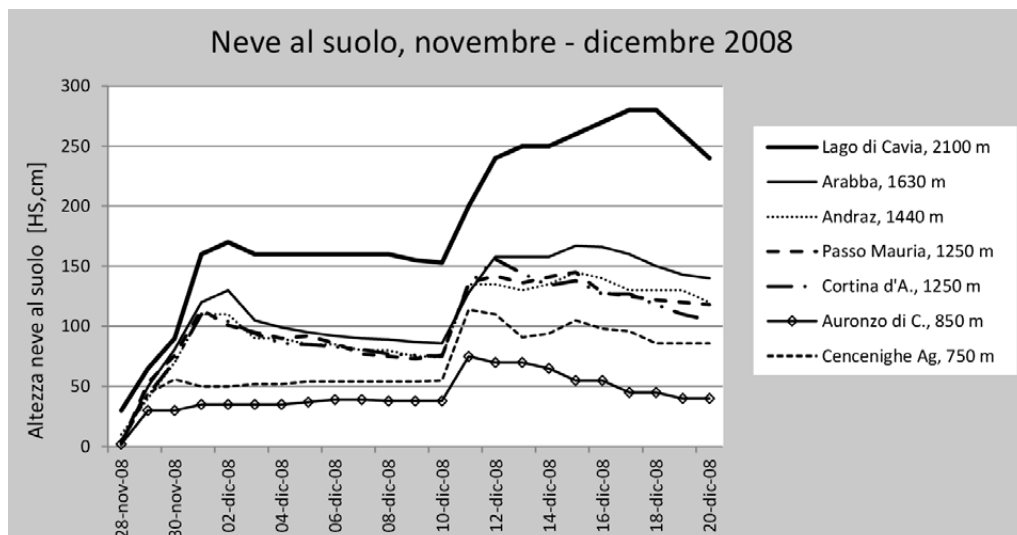


Figura 17 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 28 novembre - 20 dicembre 2008.

Figura 18 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 25 gennaio - 20 febbraio 2014.

NEVE

Cima Pradazzo, 237 cm ad Arabba, 170 cm ad Andraz, 194 cm a Cortina d'Ampezzo, 176 cm a Falcade e ben 90 cm a Cencenighe Agordino.

Durante questa stagione invernale, con le successive nevicate di marzo sono stati raggiunti anche i massimi valori di carico della neve sui tetti riguardanti il periodo 1991-2020.

Dicembre 2020

Dopo il novembre 2019 con oltre 2 m di neve fresca fra il 12 e il 25 del mese a 2000 m, anche la stagione successiva inizia con molta neve nella prima decade del mese di dicembre 2020 (Fig. 19). A Lago di Cavia/ Cima Pradazzo le nevicate apportano 187 cm di neve fresca, ad Arabba 210 cm, 150 cm ad Andraz, 130 cm a Cortina d'Ampezzo, 145 cm a Falcade e quantitativi inferiori

alle basse quote.

Oltre al singolo evento, la criticità si presenta quando le nevicate sono continue e concentrate in pochi giorni. Sulla montagna veneta, si è osservato che la viabilità subisce forti disagi quando si superano i 70 cm di neve fresca in 3 giorni (HS3d) per la difficoltà di tenere aperte le strade, specie quelle secondarie. Nelle nevicate selezionate più recenti questa soglia è stata superata per più giornate consecutive, registrando oltre 100 cm di neve fresca in 3 giorni, ad esempio a Falcade e Cortina, con picchi di 150 cm ad Arabba o i 145 cm storici nel gennaio 1985 a Cencenighe Agordino.

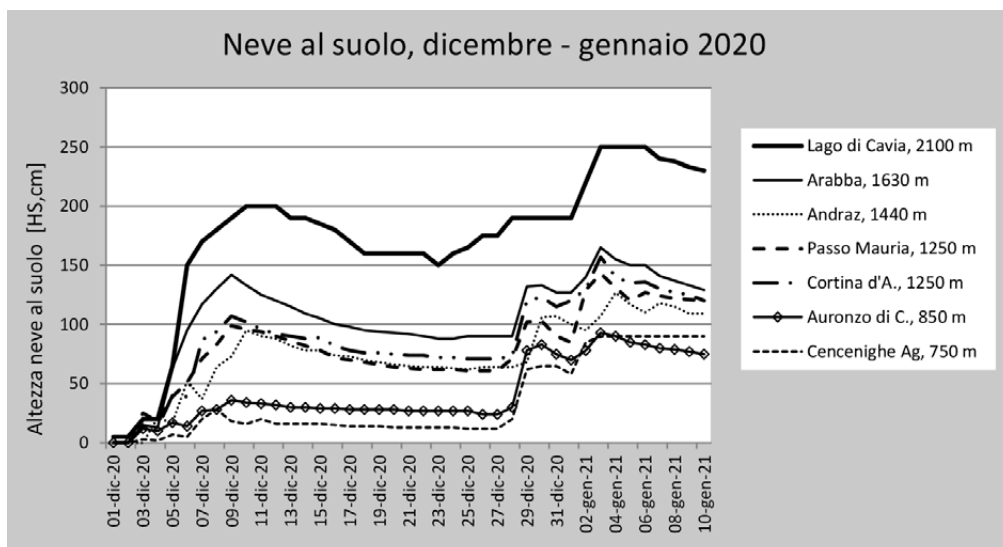
CONCLUSIONI

Nel trentennio recente, la copertura ne-

vosa è in contrazione a livello globale e questo avviene anche sulle Dolomiti Venete. Gli spessori medi del manto nevoso indicano una importante diminuzione soprattutto alle quote inferiori ai 1500 m. Alle quote elevate la riduzione è minore, ma evidenzia un deficit a partire dal mese di febbraio. Anche la precipitazione nevosa è in calo, soprattutto nei mesi di gennaio e marzo alle basse quote e a febbraio-marzo in quota. La minor neve ha determinato anche un innalzamento della quota della neve sciabile e le "giornate sulla neve" sono diminuite in modo importante soprattutto alle basse quote (-30/40 giorni).

Tali modifiche nei regimi delle precipitazioni nevose sono legate anche all'aumento degli episodi di pioggia su neve fino in alta quota durante la stagione invernale. L'aumento delle temperature medie globali ha infatti innalzato la quota del limite pioggia-neve. Il fenomeno è particolarmente evidente nel mese di febbraio negli ultimi dieci anni: la quota delle nevicate ha subito un innalzamento di quasi 500 metri, salendo dai 1000 m ai 1500 m. Tuttavia, in questo contesto, negli ultimi 20 anni sono stati osservati ben 3 inverni molto nevosi (2009, 2014, 2021) che hanno creato criticità sulle Dolomiti al pari di altri eventi documentati negli ultimi 100 anni (es. 1951, 1978, 1986) e ben presenti nella memoria storica.

Figura 19 - Altezza della neve al suolo [HS, cm] in alcune stazioni della montagna veneta. Periodo: 1° dicembre 2020 - 10 gennaio 2021.



BIBLIOGRAFIA

- ▶ Beniston, M. (1997) Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: Links to changes in largescale climatic forcings. *Clim. Chang.* 1997, 36, 281–300.
- ▶ Buerki R (2000): Klimaaenderung und Anpassungsprozesse im Wintertourismus. Ostschweizerische Geographische Gesellschaft NF H. 6, St. Gallen
- ▶ Campos Rodrigues L., Freire-González J., González Puig A. e Puig-Ventosa I. (2018). Climate Change Adaptation of Alpine Ski Tourism in Spain. *Climate* 2018, 6(2), 29; <https://doi.org/10.3390/cli6020029>
- ▶ Crespi A., Matiu M., Bertoldi G., Petitta M., e M. Zebisch. (2021). A high-resolution gridded dataset of daily temperature and precipitation records (1980–2018) for Trentino-South Tyrol (north-eastern Italian Alps). *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 2801–2818, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2801-2021>
- ▶ Cagnati A. (2003). Sistemi di misura e metodi di osservazione nivometeorologici. AINEVA, Trento, 186 pp.
- ▶ Föhn, P.M., 1990. Schnee und Lawinen. In: Schnee, Eis und Wasser in der Alpen in einer waermeren Atmosphaere, Mitteil. VAW/ETH Zuerich, Nr. 108, S. pp. 33–48
- ▶ Haeberli, W. and Beniston, M. (1998) Climate Change and Its Impact on Glaciers and Permafrost in Alps. *Ambio*, 27, 258–265
- ▶ JFC. (2018). Skipass Panorama Turismo. Situazione congiunturale Montagna Bianca Italiana. Modena. Pag. 51. www.jfc.it IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C. In: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- ▶ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. Edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, et al. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157940.
- ▶ ISPRA (2022) Valori climatici normali di temperatura e precipitazione in Italia. ISPRA, Stato dell'Ambiente 99/2022 ISBN 978- 88-448-1120-4
- ▶ Laternser, M., Schneebeli, M., 2003. Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *Int J Climatol* 23(7):733–750. doi:10.1002/joc.912
- ▶ Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., et al. (2021).. (2021) Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *Cryosphere* 15, 1343–1382. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- ▶ Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., et al. (2021). Snow cover in the European Alps: Station observations of snow depth and depth of snowfall [Data set]. Zenodo <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- ▶ Notarnicola C. (2022). Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020. *Scientific Reports* | (2022) 12:13731. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16743-w>
- ▶ OECD, 2007. Climate change in the European Alps. S. Agrawala (ed.), OECD Publications, Paris, p. 127.
- ▶ Olefs M., Formayer H., Gobiet A., Marke T., Schoner W. e M. Revesz. (2021). Past and future changes of the Austrian climate – Importance for tourism. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* Volume 34, June 2021, 100395 <https://doi.org/10.1016/j.jort.2021.100395>
- ▶ Shih, C., Nicholls, S., Holecsek, D.F., 2009. Impact of weather on downhill ski lift ticketsales. *J. Travel Res.* 47 (3), 359–372 <https://doi.org/10.1177/00472875083212>
- ▶ Schmucki E., Marty C., Fierz C., Weingartner R. e M. Lehning. (2015). Impact of climate change in Switzerland on socioeconomic snow indices. *Theoretical and Applied Climatology* 127(3–4) DOI:10.1007/s00704-015-1676-7
- ▶ Simma M., Ozgul A., Duchenne F., Ackermann G., Jenny H., Paul Müller J., Kempel A., (2025) Shifting Heights? A 40-Year Resurvey of Alpine Marmot Distribution in Response to Climate Change. *Ecologia ed Evoluzione*, 2025; 15:e71777 <https://doi.org/10.1002/ece3.71777>
- ▶ Steiger R., Posch E., Tappainer G. e Walde J. (2020) The impact of climate change on demand of ski tourism - a simulation study based on stated preferences. *Ecological Economics* 170 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106589>
- ▶ Valt M. (2025), Eventi di pioggia su neve (ROS). Neve e Valanghe, n. 98, 16-25 https://aineva.it/wp-content/uploads/Pubblicazioni/Rivista98/NV98_2.pdf
- ▶ Valt M., Cianfarra P., Valt, M. (2022). Neve e Clima sulla Alpi Italiane, Neve e Valanghe n. 96, pag.2-15. https://aineva.it/wp-content/uploads/Pubblicazioni/Rivista96/NV96_07.pdf
- ▶ Valt M. (2023) La risorsa nevosa sulla montagna veneta (SWE). Report SNPA n.36/2023–ISBN 978-88-448-1168-6, Delibera del Consiglio SNPA. 14.07.2023 Doc. n. 213/23. https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2023/07/Rapporto_clima_SNPA_2022_14_07_23.pdf
- ▶ Valt M., Crepaz G, (2026). Valori progettuali del manto nevoso per la montagna veneta, ARPAV, 30 pp
- ▶ Valt M. (2026). Andamento della stagione invernale 2025-2026 sulle Alpi italiane, Neve e Valanghe- Rendiconti stagionali, in stampa
- ▶ Wielke, L.M., Haimberger, L., Hantel, M., 2004. Snow cover duration in Switzerland compared to Austria. *Meteorol Z* 13(1):13–17. doi:10.1127/0941-2948/2004/0013-0013
- ▶ Zehnder M., Pfund B., Svoboda J., Marty C., Vitasse Y., Alexander J., Hille Ris Lambers J., Rixen C. (2025). Snow Height Sensors Reveal Phenological Advance in Alpine Grasslands. *Global Change Biology*, 2025; 31:e70195 1 of 17 <https://doi.org/10.1111/gcb.70195>

Quando la biologia incontra la nivologia MICROORGANISMI ICE-NUCLEATING e STABILITÀ del MANTO NEVOSO

Francesca Schivalocchi
PhD in ecologia microbica

DOI: 10.82089/NEV992026_2

Una nuova ipotesi di ricerca tra microbiologia e nivologia

Snowpack is traditionally studied as a physical system whose evolution is governed by meteorological conditions and snow metamorphism processes. However, it also hosts a biological component that has received relatively little attention in snow science. Some microorganisms present in the atmosphere and transported by precipitation possess ice-nucleation-active proteins (Ice Nucleation Proteins, INPs), which can promote ice formation at relatively high temperatures compared with spontaneous nucleation.

This contribution proposes an interdisciplinary hypothesis bridging atmospheric microbiology and snow science: the presence of ice-nucleating microorganisms within the snowpack could locally influence the freezing and refreezing of liquid water in snow, potentially contributing to the formation or persistence of ice crusts.

Under specific stratigraphic conditions, such crusts may represent important discontinuities within the snowpack and, when associated with the presence or subsequent formation of weak layers, may contribute to the development of stratigraphic structures relevant to snowpack stability. The proposed hypothesis is currently not supported by direct experimental evidence and therefore does not allow any effect of the biological component on snowpack stability or avalanche release to be established or quantified. However, integrating microbiological sampling, characterization of ice-nucleating activity, and snowpack analysis could help investigate potential relationships between ice-nucleating microorganisms, freezing and refreezing processes, and the evolution of snowpack stratigraphy.

Il manto nevoso è tradizionalmente studiato come un sistema fisico la cui evoluzione è regolata da variabili meteorologiche e processi di metamorfismo. Tuttavia, la neve ospita anche una componente biologica ancora poco considerata in ambito nivologico. Alcuni microorganismi presenti nell'atmosfera e nelle precipitazioni producono Ice Nucleation Proteins (INPs), proteine capaci di favorire la nucleazione del ghiaccio a temperature relativamente elevate. Il presente contributo propone un'ipotesi interdisciplinare tra microbiologia atmosferica e nivologia: la presenza di microorganismi ice-nucleating all'interno del manto potrebbe influenzare localmente i processi di congelamento e rigelo, favorendo la formazione o la persistenza di croste ghiacciate. In determinate configurazioni stratigrafiche, queste potrebbero costituire superfici di discontinuità o scorrimento e contribuire alla predisposizione del manto al distacco di valanghe. L'ipotesi non è attualmente supportata da evidenze sperimentali dirette e non consente di quantificare l'influenza della componente biologica sulla stabilità del manto. L'integrazione tra campionamento microbiologico e analisi nivologica potrebbe tuttavia permettere di verificare eventuali correlazioni tra microorganismi ice-nucleating, processi di nucleazione del ghiaccio ed evoluzione della struttura del manto nevoso.



INTRODUZIONE

Negli ultimi anni l'attenzione della ricerca scientifica si è progressivamente estesa verso il ruolo dei microorganismi - quali batteri, virus, funghi o microalghe - presenti in atmosfera nei processi meteorologici e nelle trasformazioni che avvengono una volta che essi vengono depositati nel manto nevoso. Tra questi, alcuni batteri e funghi sono in grado di produrre particolari proteine, denominate Ice Nucleation Proteins (INPs), capaci di favorire il congelamento dell'acqua a temperature relativamente elevate rispetto alla normale nucleazione spontanea.

Questi microorganismi, presenti nell'atmosfera, nelle precipitazioni nevose e nelle particelle trasportate dalle masse d'aria, potrebbero influenzare indirettamente la struttura dei cristalli e quindi del manto nevoso e, potenzialmente, la stabilità dei versanti innevati.

Sebbene il tema sia ancora poco esplorato nell'ambito nivologico, una possibile ipotesi scientifica suggerisce che la presenza di elevate concentrazioni di microorganismi ice-nucleating potrebbe contribuire, insieme ai processi fisici già noti, a modificare i processi di metamorfismo della neve, favorendo localmente la formazione di croste ghiacciate che, qualora persistano nel tempo e siano associate a idonee configurazioni stratigrafiche, potrebbero costituire superfici favorevoli allo scorri-

mento, aumentando così la predisposizione al distacco di valanghe.

COSA SONO LE ICE NUCLEATION PROTEINS?

Le Ice Nucleation Proteins (INPs) sono proteine prodotte principalmente da alcuni batteri, tra cui il più noto è *Pseudomonas syringae* (Bieber and Borduas-Dedekind, 2024; Maki et al., 1974). Queste proteine sono prodotte e rilasciate dalla cellula batterica sulla propria membrana esterna. La caratteristica più rilevante delle Ice Nucleation Proteins è la loro capacità di organizzare le molecole d'acqua in una disposizione geometrica simile a quella che si viene a formare nel reticolo cristallino del ghiaccio (figura 1). In condizioni normali, la formazione spontanea dei primi cristalli di ghiaccio richiede il superamento di una barriera energetica associata alla creazione di un nucleo stabile di ghiaccio. Le INPs riducono questa barriera energetica fornendo una superficie che favorisce l'allineamento delle molecole d'acqua e la loro aggregazione ordinata. Una volta raggiunta una certa dimensione critica, questi aggregati evolvono rapidamente in cristalli di ghiaccio.

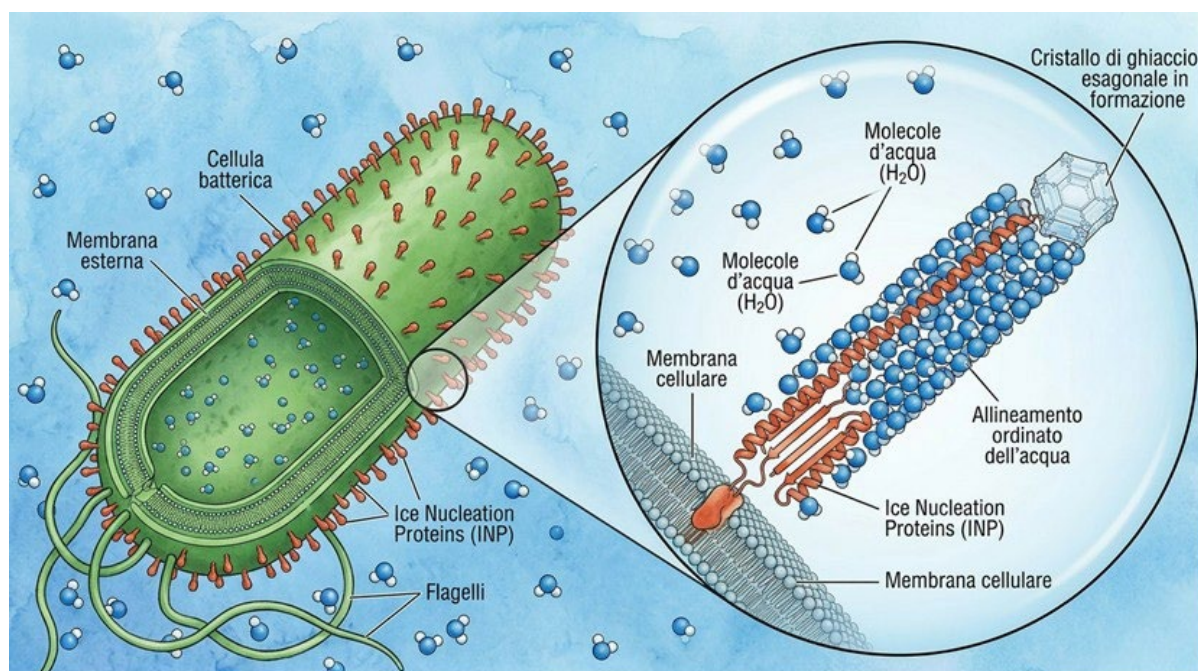
Grazie a questo meccanismo, l'inizio del congelamento può avvenire a temperature relativamente elevate, generalmente comprese tra -2 °C e -10 °C, mentre in na-

tura, senza queste proteine, l'acqua pura richiederebbe temperature inferiori a -38° C per congelare spontaneamente (Hansen et al., 2023; Roeters et al., 2021).

La presenza di nuclei di congelamento di origine biologica, come quelli associati alle INPs, modifica quindi in modo significativo questo comportamento, anticipando e favorendo il processo di congelamento. Per quanto riguarda la loro funzione biologica, sono state formulate diverse ipotesi. Una delle più accreditate suggerisce che la nucleazione del ghiaccio possa favorire il danneggiamento dei tessuti vegetali, facilitando il rilascio di nutrienti disponibili per i batteri che colonizzano la superficie delle piante (Lindow, 1983; Morris et al., 2008). Un'altra ipotesi propone che la formazione di ghiaccio favorisca il ciclo atmosferico dei batteri, facilitandone la dispersione nell'ambiente attraverso precipitazioni quali neve o grandine, che agirebbero come vettori di trasporto (Morris et al., 2008; Vali, 1995). Più in generale, si ritiene che la produzione di INPs rappresenti un adattamento ecologico vantaggioso negli ambienti soggetti a stress termico e a frequenti cicli di gelo-disgelo, sebbene il loro ruolo evolutivo non sia ancora completamente chiarito.

Le specie batteriche che producono Ice Nucleation Proteins sono diffuse in numerosi ecosistemi. Il principale habitat conosciuto è la superficie delle piante (fillosfera),

Figura 1: meccanismo di nucleazione del ghiaccio mediato da Ice Nucleation Proteins (INPs) prodotte dai batteri. Una cellula batterica produttrice di INP presenta queste proteine sulla membrana esterna. Il processo di nucleazione del ghiaccio avviene perché le INPs fungono da nucleo di congelamento, favorendo l'ordinamento delle molecole d'acqua (H₂O) nelle immediate vicinanze della superficie cellulare. Questo allineamento innesca la formazione di un nucleo di ghiaccio e promuove la crescita del cristallo a temperature molto più alte rispetto a quelle a cui congelerebbe l'acqua pura. Figura generata tramite Firefly Adobe.



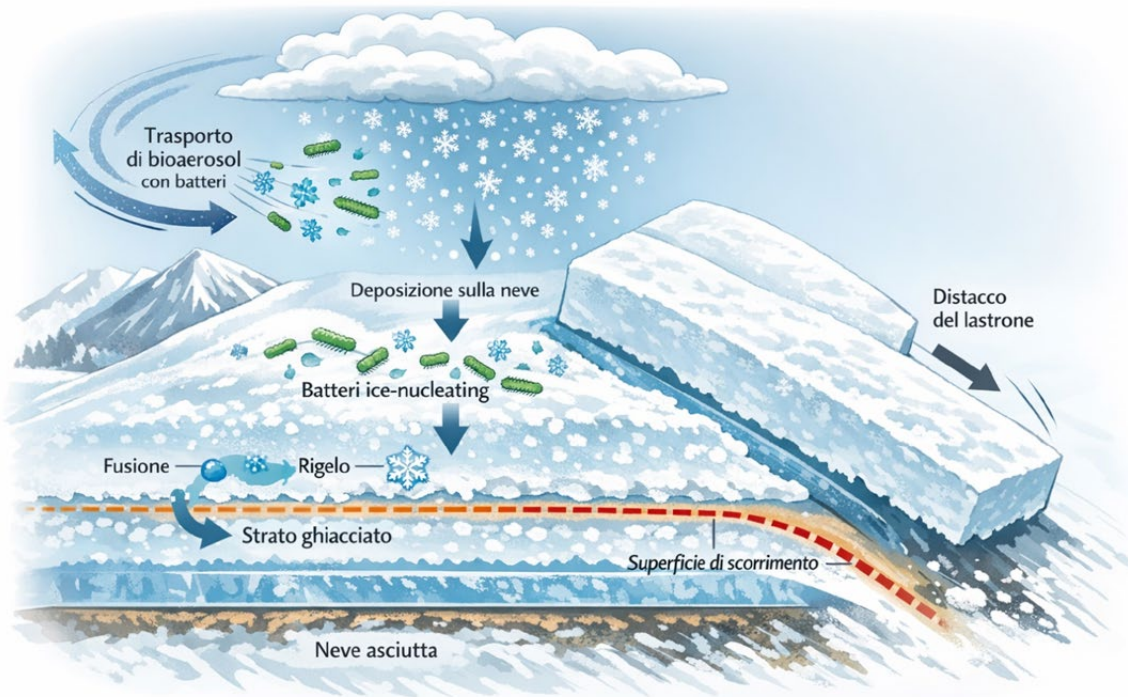


Figura 2: schema concettuale del possibile ruolo dei microorganismi ice nucleating nella formazione di superfici di scorrimento nel manto nevoso. Figura generata tramite ChatGPT.

Immagine 3: area di studio: Col du Lautaret, Francia.

dove *Pseudomonas syringae* e altre specie ice-nucleating sono particolarmente abbondanti (Hirano and Upper, 2000; Lorv et al., 2014). Ceppi batterici dotati di attività nucleante sono stati inoltre isolati da residui vegetali in decomposizione, suoli agricoli e altri ecosistemi terrestri associati alla vegetazione, suggerendo che tali ambienti costituiscano importanti serbatoi di nuclei biologici di congelamento (Hirano and Upper, 2000; Maki et al., 1974).

Le attività agricole, il vento, il sollevamento di polveri e gli spruzzi d'acqua possono successivamente trasferire questi microrganismi o frammenti cellulari contenenti INP, nell'atmosfera sotto forma di aerosol biologici. Una volta entrati nelle masse d'aria, essi possono essere trasportati per centinaia o migliaia di chilometri, contribuendo ai processi di nucleazione del ghiaccio all'interno delle nubi (figura 2). Dal punto di vista atmosferico, tali microrganismi agiscono come particelle di nucleazione (ice nucleating particles), contribuendo alla formazione di neve e grandine all'interno delle nubi. Numerosi studi hanno infatti individuato batteri che producono attivamente queste proteine nelle precipitazioni nevose, nei nuclei di grandine e negli aerosol atmosferici (Christner et al., 2008; De Araujo et al., 2019; Failor et al., 2017; Hill et al., 2014; Joly et al., 2013; Morris et al., 2008).





Immagine 4: Fase di campionamento dei microorganismi all'interno del manto nevoso, Col du Lautaret, Francia.

POSSIBILI IMPLICAZIONI PER IL MANTO NEVOSO

L'aspetto più interessante, dal punto di vista nivologico, riguarda il possibile effetto che questi microorganismi potrebbero avere una volta depositati all'interno del manto nevoso. Durante una nevicata, associata a masse d'aria ricche di particelle biologiche e microorganismi, questi possono essere incorporati nei diversi strati della neve. In presenza di oscillazioni termiche attorno a 0°C, cicli di fusione e rigelo o marcati gradienti di temperatura, le pro-

prietà ice-nucleating delle Ice Nucleation Proteins potrebbero teoricamente favorire una maggiore rapidità nella formazione di ghiaccio, la crescita di cristalli, la formazione localizzata di croste da rigelo e la creazione di superfici compatte e lisce tra strati nevosi differenti.

Sebbene questa ipotesi non sia stata dimostrata sperimentalmente e richieda ulteriori approfondimenti, è plausibile che tali effetti possano interagire con i processi fisici già noti che governano il metamorfismo della neve. Qualora favorissero la formazione o la persistenza di croste ghiacciate,

queste potrebbero contribuire alla formazione di superfici di scorrimento all'interno del manto nevoso, soprattutto nel caso di successive nevicate che si depositano sopra uno strato debole inglobato (figura 2). Dal punto di vista della stabilità del manto nevoso, è noto che la presenza di croste ghiacciate superficiali o intermedie può contribuire alla formazione di configurazioni stratigrafiche favorevoli al distacco di valanghe

In tali condizioni, la crosta costituisce un livello relativamente rigido e continuo che può influenzare la distribuzione delle tensioni all'interno del manto nevoso, favorendo l'innescò e la propagazione della frattura nello strato debole adiacente e aumentando la probabilità del distacco (Gaume et al., 2017; Van Herwijnen and Jamieson, 2007).

UN'IPOTESI ANCORA APERTA

È importante sottolineare che, allo stato attuale delle conoscenze, non esistono evidenze dirette che colleghino in modo quantitativo la presenza di microorganismi ice-nucleating all'innescò delle valanghe. La possibile relazione tra questi organismi e la stabilità del manto nevoso rappresenta per ora un'ipotesi interdisciplinare tra microbiologia, fisica della neve e nivologia. Tuttavia, il fatto che le Ice Nucleation Proteins biologiche siano tra i nuclei di congelamento più efficienti conosciuti e batteri come *Pseudomonas syringae* siano stati identificati all'interno di neve, grandine e aerosol atmosferici (De Araujo et al., 2019; Morris et al., 2008) rende questa prospettiva particolarmente interessante e meritevole di ulteriori approfondimenti.

Attualmente, i modelli previsionali impiegati in nivologia per la valutazione e l'analisi del manto nevoso e di conseguenza del pericolo valanghe si basano prevalentemente su variabili fisiche e meteorologiche, quali temperatura dell'aria, precipitazioni, vento, umidità e radiazione, per simulare l'evoluzione della stratigrafia e i processi di metamorfismo della neve. La componente biologica non è general-

mente considerata tra i parametri di input. Qualora futuri studi dimostrassero un ruolo significativo delle particelle biologiche nel processo di nucleazione del ghiaccio e nella microstruttura della neve, potrebbe risultare rilevante includerla come variabile aggiuntiva nei modelli fisici e statistici di previsione. Allo stato attuale, tuttavia, le conoscenze disponibili non consentono di quantificare in maniera affidabile l'incidenza della componente biologica sulla stabilità del manto nevoso né sulla probabilità di distacco delle valanghe.

Lo sviluppo di tecniche avanzate di campionamento microbiologico della neve, integrate con analisi del manto nevoso (figura 4), potrebbe in futuro consentire di verificare l'esistenza di eventuali correlazioni tra condizioni atmosferiche, concentrazione di particelle biologiche e formazione di specifiche strutture del manto nevoso, contribuendo così a chiarire il ruolo dei microorganismi nei processi di evoluzione della neve.

CONCLUSIONI

Tradizionalmente la neve viene studiata come un materiale fisico la cui evoluzione è influenzata principalmente da temperatura, vento, precipitazioni, umidità e radiazione. Tuttavia, il manto nevoso rappresenta anche un ecosistema complesso, popolato da microorganismi che vivono e svolgono attivamente i loro processi biologici e che possono influenzare, direttamente o indirettamente, alcuni processi fisici.

L'ipotesi che microorganismi produttori di Ice Nucleation Proteins possano contribuire, almeno in parte, ai processi che portano alla formazione di croste ghiacciate o superfici di discontinuità all'interno del manto nevoso apre una prospettiva di ricerca innovativa, ancora largamente inesplorata. Pur trattandosi di un ambito ancora speculativo, l'integrazione tra microbiologia atmosferica e nivologia potrebbe aprire nuove prospettive per comprendere i processi che regolano l'evoluzione del manto nevoso e, in futuro, contribuire al miglioramento dei modelli di previsione del pericolo valanghe.

BIBLIOGRAFIA

- ▶ BIEBER, P., BORDUAS-DEDEKIND, N., 2024. High-speed cryo-microscopy reveals that ice-nucleating proteins of *Pseudomonas syringae* trigger freezing at hydrophobic interfaces. *Sci. Adv.* 10, eadn6606. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adn6606>
- ▶ CHRISTNER, B.C., CAI, R., MORRIS, C.E., MCCARTER, K.S., FOREMAN, C.M., SKIDMORE, M.L., MONTROSS, S.N., SANDS, D.C., 2008. Geographic, seasonal, and precipitation chemistry influence on the abundance and activity of biological ice nucleators in rain and snow. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105, 18854–18859. <https://doi.org/10.1073/pnas.0809816105>
- ▶ DE ARAUJO, G.G., RODRIGUES, F., GONÇALVES, F.L.T., GALANTE, D., 2019. Survival and ice nucleation activity of *Pseudomonas syringae* strains exposed to simulated high-altitude atmospheric conditions. *Sci Rep* 9, 7768. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44283-3>
- ▶ FAILOR, K.C., SCHMALE, D.G., VINATZER, B.A., MONTEIL, C.L., 2017. Ice nucleation active bacteria in precipitation are genetically diverse and nucleate ice by employing different mechanisms. *The ISME Journal* 11, 2740–2753. <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.124>
- ▶ GAUME, J., VAN HERWIJNEN, A., CHAMBON, G., WEVER, N., SCHWEIZER, J., 2017. Snow fracture in relation to slab avalanche release: critical state for the onset of crack propagation. *The Cryosphere* 11, 217–228. <https://doi.org/10.5194/tc-11-217-2017>
- ▶ HANSEN, T., LEE, J., REICHER, N., OVADIA, G., GUO, S., GUO, W., LIU, J., BRASLAVSKY, I., RUDICH, Y., DAVIES, P.L., 2023. Ice nucleation proteins self-assemble into large fibres to trigger freezing at near 0 °C. *eLife* 12, RP91976. <https://doi.org/10.7554/eLife.91976>
- ▶ HILL, T.C.J., MOFFETT, B.F., DEMOTT, P.J., GEORGAKOPOULOS, D.G., STUMP, W.L., FRANC, G.D., 2014. Measurement of Ice Nucleation-Active Bacteria on Plants and in Precipitation by Quantitative PCR. *Appl Environ Microbiol* 80, 1256–1267. <https://doi.org/10.1128/AEM.02967-13>
- ▶ HIRANO, S.S., UPPER, C.D., 2000. Bacteria in the Leaf Ecosystem with Emphasis on *Pseudomonas syringae* — a Pathogen, Ice Nucleus, and Epiphyte. *Microbiol Mol Biol Rev* 64, 624–653. <https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.624-653.2000>
- ▶ JOLY, M., ATTARD, E., SANCELME, M., DEGUILLAUME, L., GUILBAUD, C., MORRIS, C.E., AMATO, P., DELORT, A.-M., 2013. Ice nucleation activity of bacteria isolated from cloud water. *Atmospheric Environment* 70, 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.027>
- ▶ LORV, J.S.H., ROSE, D.R., GLICK, B.R., 2014. Bacterial Ice Crystal Controlling Proteins. *Scientifica* 2014, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2014/976895>
- ▶ MAKI, L.R., GALYAN, E.L., CHANG-CHIEN, M.-M., CALDWELL, D.R., 1974. Ice Nucleation Induced by *Pseudomonas syringae*. *Appl Microbiol* 28, 456–459. <https://doi.org/10.1128/am.28.3.456-459.1974>
- ▶ MORRIS, C.E., SANDS, D.C., VINATZER, B.A., GLAUX, C., GUILBAUD, C., BUFFIÈRE, A., YAN, S., DOMINGUEZ, H., THOMPSON, B.M., 2008. The life history of the plant pathogen *Pseudomonas syringae* is linked to the water cycle. *The ISME Journal* 2, 321–334. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.113>
- ▶ ROETERS, S.J., GOLBEK, T.W., BREGNHØJ, M., DRACE, T., ALAMDARI, S., ROSEBOOM, W., KRAMER, G., ŠANTL-TEMKIV, T., FINSTER, K., PFAENDTNER, J., WOUTERSEN, S., BOESEN, T., WEIDNER, T., 2021. Ice-nucleating proteins are activated by low temperatures to control the structure of interfacial water. *Nat Commun* 12, 1183. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21349-3>
- ▶ VALI G. Principles of ice nucleation. Chapter 1. in "Biological Ice Nucleation and Its Applications" R.E. Lee Jr. and G.J. Warren editors, APS Press, St. Paul, Minnesota. pp.1 - 28. 1995.
- ▶ VAN HERWIJNEN, A., JAMIESON, B., 2007. Snowpack properties associated with fracture initiation and propagation resulting in skier-triggered dry snow slab avalanches. *Cold Regions Science and Technology* 50, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.02.004>





VALANGHE

▸ 28 PREVEDERE LE VALANGHE
CON IL MACHINE
LEARNING

▸ 38 LA SCIENZA E LA
PREVENZIONE DELLE
VALANGHE

DALL'OSSERVAZIONE NIVOLOGICA AGLI
ALGORITMI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO

PREVEDERE LE VALANGHE con il MACHINE LEARNING

Christian Brida: DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università di Trento, Trento (TN); Pejo Funivie, Pejo (TN). Contatto: bridachristian@gmail.com

Carlo Bee: ARPAV – Centro Valanghe Arabba, Livinallongo del Col di Lana (BL); DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università di Trento, Trento (TN)

Giorgio Rosatti: DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università di Trento, Trento (TN)

DOI: 10.82089/NEV992026_3

UN SUPPORTO DECISIONALE AL RISCHIO VALANGHE NEL COMPRESORIO DI PEJO

Local-scale avalanche forecasting is a complex task that requires the integration of snowpack observations, meteorological data, and forecaster expertise. This study investigates the use of machine learning and Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques as operational decision-support tools in the Pejo ski area (Trentino, Italy). Using snow and weather data collected at the Pejo Tarlenta snow field together with a historical avalanche database, a classification model based on a Support Vector Machine (SVM) was developed to estimate the probability of natural avalanche activity on a given day. The results on the test dataset show a good ability to identify avalanche days, highlighting the potential of the model as a support tool for forecasting. The application of SHAP values enabled the identification of the most influential snow and meteorological variables, improving the transparency and interpretability of the model's decision-making process. Overall, the study demonstrates how artificial intelligence can support avalanche forecasters by enhancing objectivity, transparency, and the use of historical datasets, while complementing rather than replacing professional expertise and judgment.

La previsione del pericolo valanghe a scala locale richiede l'integrazione di dati nivo-meteorologici, osservazioni sul manto nevoso ed esperienza del previsore. Questo studio valuta l'impiego di tecniche di machine learning e Explainable Artificial Intelligence (XAI) come supporto operativo nel comprensorio sciistico di Pejo (Trentino).

Utilizzando dati raccolti presso il campo neve di Pejo Tarlenta e uno storico di eventi valanghivi, è stato sviluppato un modello di classificazione basato su Support Vector Machine (SVM), capace di stimare la probabilità di attività valanghiva naturale giornaliera.

I risultati ottenuti sui dati di test mostrano una buona capacità del modello di identificare le giornate valanghive, confermando il potenziale dello strumento come supporto alle decisioni del previsore. L'applicazione degli SHAP values ha permesso di individuare le variabili più influenti nella stima del rischio, rendendo trasparente il processo decisionale del modello. Lo studio evidenzia come l'intelligenza artificiale possa affiancare il previsore, migliorando oggettività, trasparenza e valorizzazione delle serie storiche, senza sostituirne esperienza e giudizio professionale.



VALANGHE

PERCHÉ LA PREVISIONE LOCALE DELLE VALANGHE È ANCORA UNA SFIDA

La previsione del rischio valanghe rappresenta una delle attività più complesse nell'ambito della sicurezza in montagna. Ogni giorno il previsore è chiamato a integrare informazioni provenienti da fonti diverse, quali dati meteorologici, osservazioni nivologiche, rilievi sul campo e conoscenza del territorio, per valutare la

probabilità di distacchi valanghivi e supportare le decisioni operative (Schweizer et al., 2003; McClung, 2023).

Sebbene i bollettini valanghe regionali forniscano un quadro fondamentale delle condizioni di stabilità del manto nevoso (European Avalanche Warning Services, 2018), la gestione del rischio richiede spesso valutazioni a una scala molto più dettagliata. Nei comprensori sciistici, lungo le infrastrutture di trasporto o in aree particolarmente esposte, è infatti necessario tradurre le indicazioni regionali in decisioni locali riguardanti l'apertura di piste e

impianti, la pianificazione di interventi di bonifica o l'adozione di specifiche misure di sicurezza.

Queste valutazioni dipendono fortemente dall'esperienza del previsore e dalla sua capacità di interpretare l'evoluzione delle condizioni nivometeorologiche (Schweizer et al., 2003). Tuttavia, la crescente disponibilità di dati storici raccolti da stazioni automatiche e campi neve, nonché da archivi di eventi valanghivi, apre nuove opportunità per sviluppare strumenti quantitativi in grado di supportare il processo decisionale.

Negli ultimi anni, le tecniche di machine learning hanno trovato applicazione in numerosi settori delle scienze ambientali (Bellaire et al., 2017; Viallon-Galinier, 2022) grazie alla loro capacità di individuare relazioni complesse tra le variabili di fenomeni naturali, a partire da grandi quantità di dati. Anche nel campo della previsione valanghe tali approcci stanno suscitando crescente interesse (Pozdnoukhov et al., 2008; Pérez-Guillén et al., 2022; Hendrick et al., 2023), poiché consentono di analizzare simultaneamente molte variabili e di riconoscere configurazioni favorevoli all'attività valanghiva che potrebbero non essere immediatamente evidenti neanche all'occhio di un esperto.

L'obiettivo di questo lavoro è valutare il potenziale di un sistema, composto da un modello di previsione basato sul machine learning e da un metodo di interpretazione delle previsioni stesse, come ausilio all'individuazione di giornate con attività valanghiva nel comprensorio sciistico di Pejo. L'intento non è tuttavia quello di sostituire l'esperienza del previsore, ma di affiancarlo con uno strumento aggiuntivo a supporto delle valutazioni operative (Brida et al., 2025).

Il caso studio di Pejo è particolarmente adatto per testare approcci basati sui dati, poiché combina una lunga esperienza operativa sul territorio con una base dati sufficientemente estesa per l'addestramento e la valutazione di modelli di machine learning. Ciò consente di esplorare concretamente il potenziale di questi strumenti come supporto alla previsione locale del rischio valanghe.



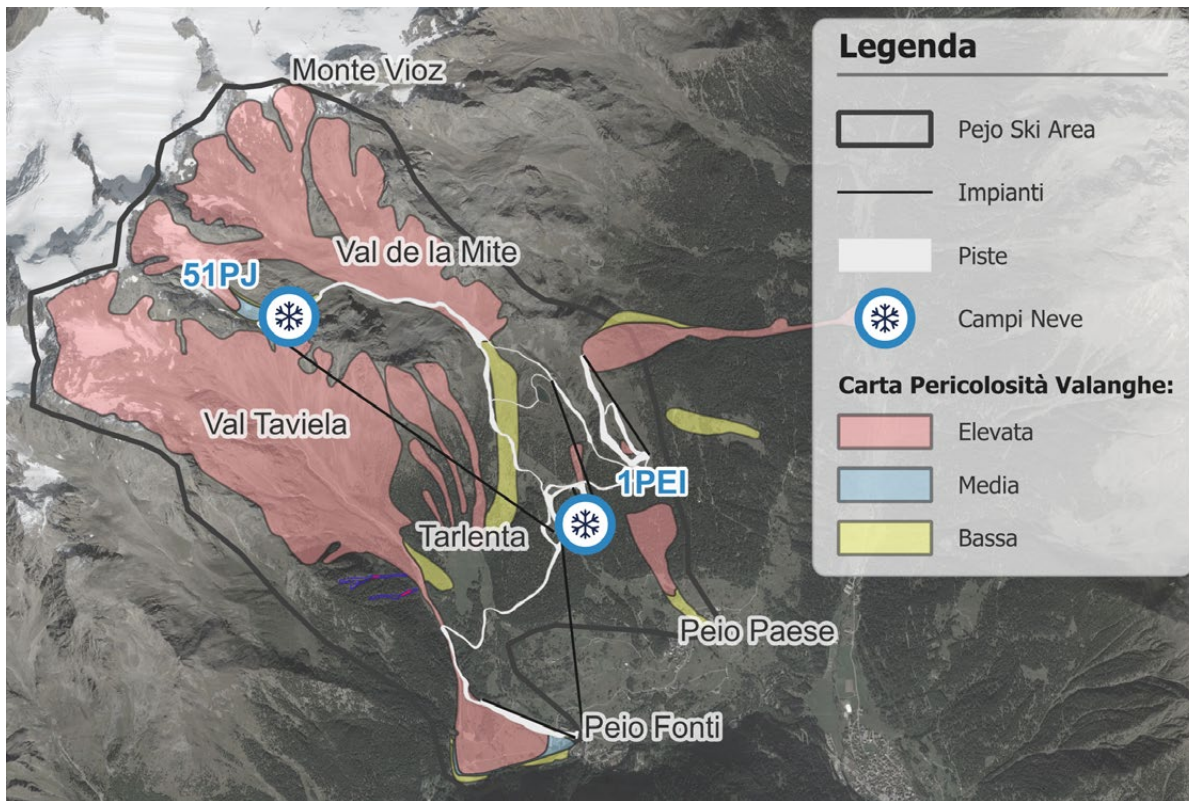


Figura 1. Area di studio del comprensorio sciistico di Pejo. Sono riportati gli impianti di risalita, le piste da sci, le principali stazioni di monitoraggio nivometeorologico e le aree soggette a pericolo valanghe.

IL CASO STUDIO DEL COMPRESORIO SCIISTICO DI PEJO

Il comprensorio sciistico di Pejo, nel Trentino occidentale, rappresenta un contesto particolarmente interessante per lo studio della previsione valanghiva a scala locale. Situato nel gruppo Ortles-Cevedale, è caratterizzato da una marcata variabilità topografica e nivologica.

La forte variabilità topografica dell'area, con versanti ripidi, diverse esposizioni e un gradiente altitudinale marcato, dai 1400 m di Pejo Fonti fino ai 3600 m della cima Taviela e del Monte Vioz, crea condizioni favorevoli a diversi meccanismi di innesco: dalla formazione di lastroni da vento agli strati deboli persistenti, fino alle valanghe di neve fresca e di neve umida tipiche delle fasi di rialzo termico (Schweizer et al., 2003; McClung, 2023).

All'interno di questo comprensorio, la Val della Mite costituisce uno dei settori più rilevanti dal punto di vista nivologico e operativo. La presenza di piste da sci, infrastrutture e aree soggette a distacchi frequenti rende questo settore particolarmente significativo dal punto di vista della gestione operativa del rischio.

Per questo motivo, nel corso degli anni è stato sviluppato un sistema di osservazione locale basato su misure nivometeorologiche continue e rilievi sul campo. Il campo neve di Pejo Tarlenta costituisce una delle principali fonti di dati per la valutazione delle condizioni del manto nevoso. Dal 1980 vengono raccolte in maniera continuativa informazioni relative alle precipitazioni nevose, alla temperatura dell'aria e della neve e alle caratteristiche del manto nevoso, fornendo una serie storica di grande valore per l'analisi e la previsione dell'attività valanghiva nel comprensorio. A questi dati si affianca un archivio storico di eventi valanghivi osservati nell'area, costruito nel corso di più stagioni invernali attraverso l'attività del servizio di prevenzione locale. Presso il campo neve di Pejo Tarlenta, dal 1980 le valanghe vengono registrate secondo il Modello 1 AINEVA (Associazione Interregionale NEve e VALanghe, 2013), mentre dai primi anni 2000 è disponibile un database più dettagliato che ne documenta posizione, tipologia e principali caratteristiche. Questi archivi rappresentano una risorsa fondamentale per lo sviluppo di modelli in grado di supportare la previsione dell'attività valanghiva, poiché consentono di associare

specifiche condizioni nivo-meteorologiche alla presenza o all'assenza di attività valanghiva naturale.

Dal punto di vista operativo, il comprensorio di Pejo rappresenta un esempio tipico di ambiente alpino in cui le decisioni devono essere prese su scala molto locale e con tempi ridotti. La variabilità delle condizioni meteorologiche e la complessità del terreno rendono infatti difficile una semplice trasposizione delle informazioni provenienti dai bollettini regionali (European Avalanche Warning Services, 2018), richiedendo invece una valutazione continua e contestualizzata del rischio.

DAL DATO ALLA PREVISIONE

Come già osservato, negli ultimi anni la crescente disponibilità di dati nivo-meteorologici raccolti nei comprensori sciistici ha aperto nuove possibilità per lo sviluppo di strumenti di supporto alla previsione del pericolo valanghe. Tuttavia, trasformare grandi quantità di osservazioni in informazioni utili per il processo decisionale non è immediato, poiché le relazioni tra condizioni meteorologiche, evoluzione del manto nevoso e attività valanghiva sono spesso complesse e difficili da interpretare.

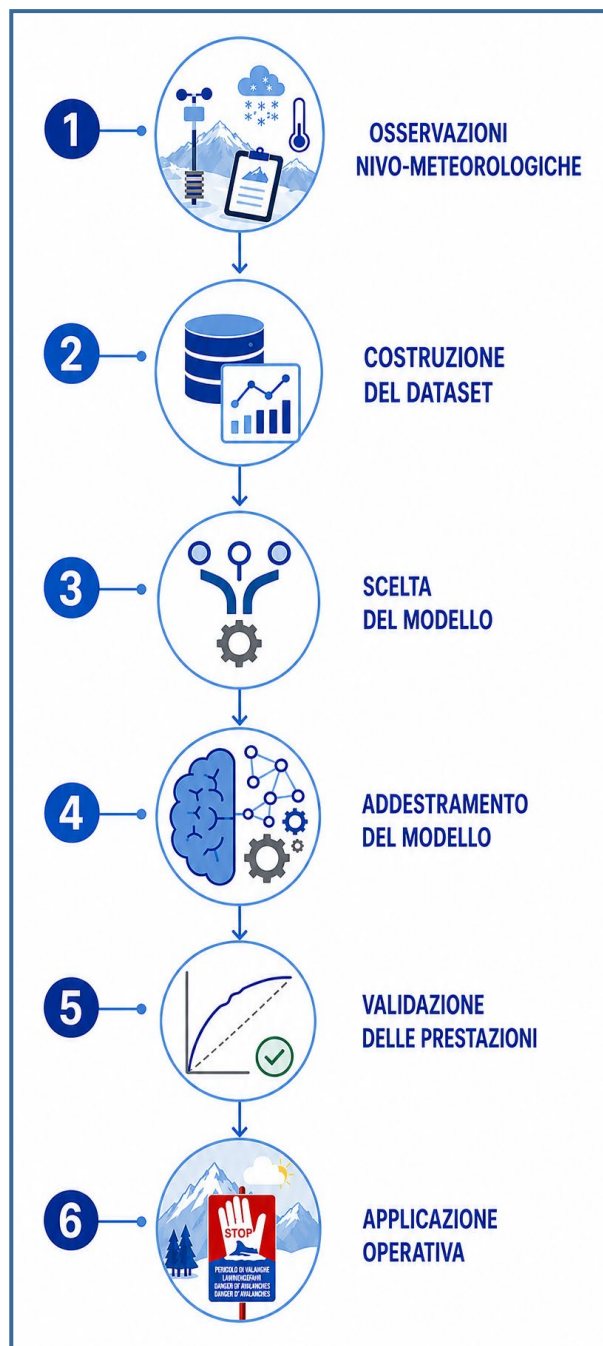


Figura 2. Schema del processo di sviluppo di un modello di machine learning: dalla raccolta dei dati nivo-meteorologici alla scelta, costruzione, valutazione e applicazione operativa del modello.

Il ruolo del machine learning e il processo di costruzione del modello

In questo contesto si inserisce il machine learning, un insieme di metodi che consente di apprendere automaticamente a partire dai dati. L'idea di base è che, invece di descrivere in modo esplicito i processi fisici che portano all'instabilità del manto nevoso, il modello analizzi esempi del passato per riconoscere situazioni simili tra loro e associare determinate condizioni alla presenza o assenza di attività valanghiva. Nel caso di questo studio, ogni giornata è descritta attraverso un insieme di informa-

zioni relative alle condizioni nivo-meteorologiche, come temperatura, precipitazioni e caratteristiche del manto nevoso e, informazione chiave, la presenza o l'assenza di attività valanghiva. Il modello associa le informazioni nivo-meteorologiche alla possibile attività valanghiva ed "impara" a distinguere quali condizioni tendono a generare giornate valanghive e quali condizioni invece non portano ad attività significativa.

Il processo di costruzione del modello può essere descritto attraverso alcune fasi fondamentali (si veda anche la Figura 2):

1. Raccolta dei dati: vengono raccolte le osservazioni disponibili e ne viene verificata la coerenza nel tempo.
2. Costruzione del dataset: i dati vengono organizzati in modo da descrivere nel modo più completo possibile le condizioni della neve e dell'atmosfera. In questa fase vengono inoltre introdotte informazioni aggiuntive che permettono di tenere conto anche dell'evoluzione delle condizioni nei giorni precedenti.
3. Scelta del modello di machine learning più opportuno: vengono confrontati diversi algoritmi e configurazioni per selezionare il modello più efficace.
4. Addestramento del modello: una parte dei dati viene utilizzata per permettere al modello di individuare le relazioni tra condizioni nivo-meteorologiche e presenza o assenza di attività valanghiva.
5. Verifica delle prestazioni: il modello viene testato su dati mai utilizzati in precedenza, per valutarne la capacità di affrontare situazioni nuove.
6. Applicazione del modello: una volta completato il processo di addestramento e valutazione, il modello può essere utilizzato per stimare la probabilità giornaliera di attività valanghiva.

Raccolta dati e costruzione del dataset

La base dati utilizzata integra le osservazioni nivo-meteorologiche raccolte presso il campo neve di Pejo Tarlenta con l'archivio storico delle valanghe registrate secondo il Modello 1 AINEVA. Il periodo analizzato copre 44 stagioni invernali, dalla stagione

1980–81 alla stagione 2023–24.

Per descrivere le condizioni giornaliere della neve e dell'atmosfera sono state considerate numerose informazioni meteorologiche e nivologiche, tra cui temperatura dell'aria, precipitazioni e altezza del manto nevoso. In totale sono stati inizialmente considerati 56 indicatori, successivamente ridotti a un insieme di 20 variabili ritenute a priori più significative per la previsione dell'attività valanghiva. Ad ogni giornata è stata poi associata la presenza o l'assenza di attività valanghiva naturale.

Ai fini dell'analisi sono state considerate esclusivamente valanghe di neve fresca e di neve umida di media e grande dimensione, cioè eventi potenzialmente rilevanti per la sicurezza delle piste. Sono stati invece esclusi eventi di piccola dimensione e valanghe a lastroni da vento, poiché fortemente legati a condizioni locali molto specifiche e difficilmente generalizzabili su scala giornaliera (Schweizer, 2003; McClung, 2023).

Nel periodo analizzato, sono risultate disponibili 5038 giornate di osservazioni, delle quali 668 associate ad almeno un evento valanghivo. Dopo una selezione basata sulla qualità e sulla completezza dei dati, sono state considerate 175 giornate effettivamente rappresentative di situazioni con attività valanghiva. A queste sono state affiancate 175 giornate senza attività, per permettere al modello di discriminare tra le due situazioni. In questo modo si è realizzato un insieme di dati "bilanciato", necessario per un buon addestramento del modello.

La scelta della Support Vector Machine

Tra i diversi metodi di machine learning disponibili, in questo lavoro è stata scelta una Support Vector Machine (SVM) (Cortes & Vapnik, 1995), una tecnica particolarmente adatta a problemi in cui è necessario distinguere tra due situazioni mutuamente esclusive.

La scelta è stata guidata da due caratteristiche principali: la capacità di lavorare efficacemente anche con dataset di dimensioni limitate, come nel caso delle osservazioni nivo-meteorologiche storiche, e la capa-

COS'È UNA SUPPORT VECTOR MACHINE?

Una Support Vector Machine (SVM) è un metodo di classificazione che impara a distinguere tra due situazioni diverse a partire da esempi osservati in passato.

Nell'esempio riportato in Figura 3, ogni giornata è descritta mediante due sole variabili: la neve fresca cumulata negli ultimi tre giorni e la temperatura massima dell'aria. I punti blu rappresentano le giornate senza attività valanghiva, mentre i punti arancioni rappresentano le giornate in cui si è verificata attività valanghiva naturale. L'obiettivo della SVM è individuare una linea di separazione che distingua nel modo più efficace possibile i due gruppi. Per farlo, il metodo massimizza la distanza tra la linea di separazione e i punti più vicini appartenenti alle due classi. Questa distanza è chiamata margine e rappresenta una misura della robustezza della classificazione. I punti evidenziati in figura sono i cosiddetti "support vector", ovvero le osservazioni che determinano la posizione della linea di separazione. Sono gli esempi più informativi per il modello, poiché si trovano più vicini al confine tra le due classi.

Quando viene analizzata una nuova giornata, il modello verifica da quale lato della linea essa si colloca e la classifica di conseguenza. Nel caso reale utilizzato in questo studio, ogni giornata è descritta da numerose variabili nivo-meteorologiche. La separazione non avviene quindi tramite una semplice linea, ma attraverso una superficie multidimensionale chiamata iperpiano, che consente di distinguere le diverse configurazioni presenti nei dati storici.

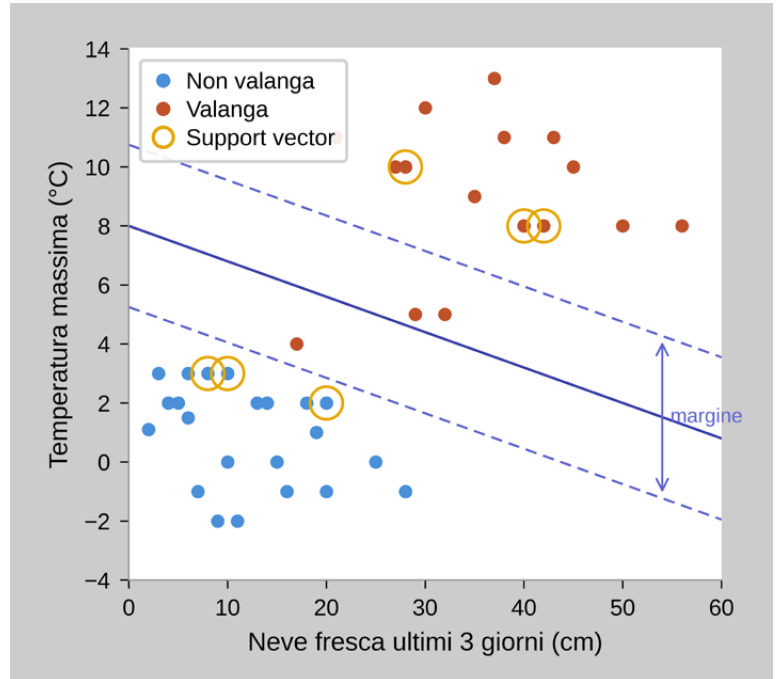


Figura 3. Esempio del funzionamento di una Support Vector Machine (SVM) in un caso semplificato. Ogni punto rappresenta una giornata descritta da due sole variabili nivo-meteorologiche (neve fresca degli ultimi 3 giorni e temperatura massima). La linea continua separa le giornate con e senza attività valanghiva; i support vector ne definiscono la posizione, mentre le linee tratteggiate delimitano il margine massimizzato dal modello.

cità di gestire relazioni complesse tra variabili, tipiche di un fenomeno influenzato dall'interazione di numerosi fattori meteorologici e ambientali.

In modo intuitivo, una Support Vector Machine può essere vista come uno strumento che, sulla base delle informazioni disponibili per una determinata giornata, è in grado di distinguere tra condizioni favorevoli e non favorevoli all'attività valanghiva. Questa capacità viene appresa a partire dai dati storici disponibili.

Addestramento e validazione sul dataset

Una volta costruito il dataset finale, le osservazioni sono state suddivise in un insieme di addestramento (75%, pari a 262 osservazioni) e in un insieme di verifica (25%, pari a 88 osservazioni). Questa suddivisione consente di valutare il comportamento del modello su dati non utilizzati nella fase di costruzione.

Il modello viene prima "allenato" utiliz-

zando le osservazioni del primo insieme, in modo da apprendere le relazioni tra condizioni nivo-meteorologiche e attività valanghiva. Questa fase porta alla valutazione dei valori dei parametri del modello. Successivamente, questo viene testato sul secondo insieme, per verificare che tali relazioni non siano valide soltanto sui dati utilizzati per l'addestramento, ma possano essere generalizzate a nuove osservazioni. Per valutare le prestazioni del modello sono stati utilizzati alcuni indicatori di sintesi che permettono di quantificare l'affidabilità delle previsioni e la capacità del sistema di distinguere correttamente tra giornate con e senza attività valanghiva. I risultati mostrano che il modello è in grado di distinguere in modo affidabile tra giornate con e senza attività valanghiva naturale. In termini concreti, su dieci giornate effettivamente valanghiva, il modello ne identifica correttamente circa otto, contenendo al tempo stesso il numero di falsi allarmi.

Su 88 giornate di test, il modello ha segnalato correttamente 31 situazioni valanghiva e ignorato correttamente 42 giornate tranquille. Ha generato 5 falsi allarmi, giornate segnalate come pericolose ma senza eventi osservati, e ha mancato 10 giornate in cui si sono verificate valanghe non previste.

I falsi allarmi, dal punto di vista operativo, possono comunque rappresentare condizioni potenzialmente instabili, nelle quali il distacco non si è verificato oppure non è stato osservato. Più critiche risultano invece le mancate segnalazioni: i 10 casi in cui il modello non ha previsto attività valanghiva effettivamente avvenuta sono spesso associati a configurazioni nivo-meteorologiche complesse o poco rappresentate nei dati storici, suggerendo la necessità di ampliare ulteriormente il dataset per migliorare la capacità del modello di generalizzare a situazioni rare. Nel complesso, i risultati indicano che il modello rappresenta uno strumento so-

Figura 4. Applicazione del modello alla stagione 2024–2025: confronto tra la probabilità stimata dal modello e le valanghe effettivamente osservate (piccole in arancione, medio-grandi in rosso). Le aree azzurre indicano i giorni con probabilità superiore a 0.5. I numeri segnalano alcuni casi particolari: (1) valanghe piccole non rilevate, (2) valanghe medio-grandi non rilevate, (3) periodo con falsi positivi

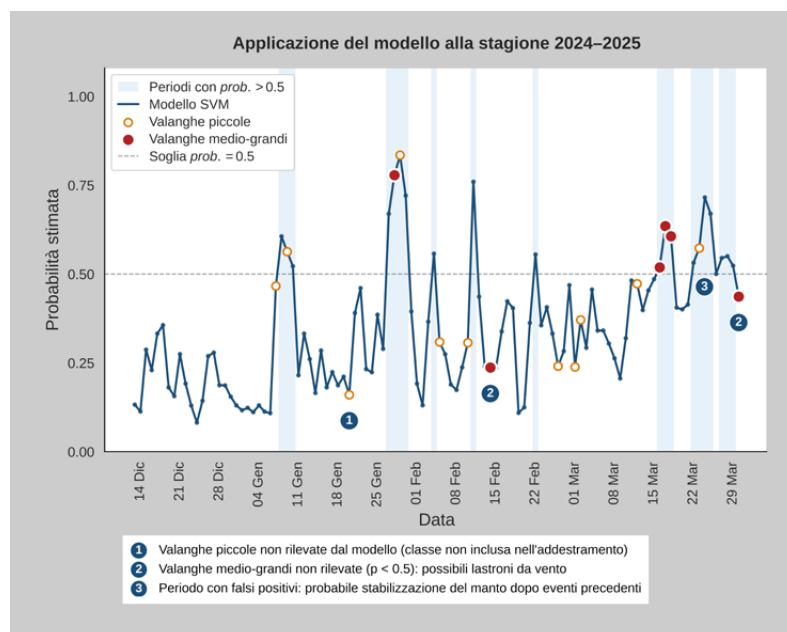
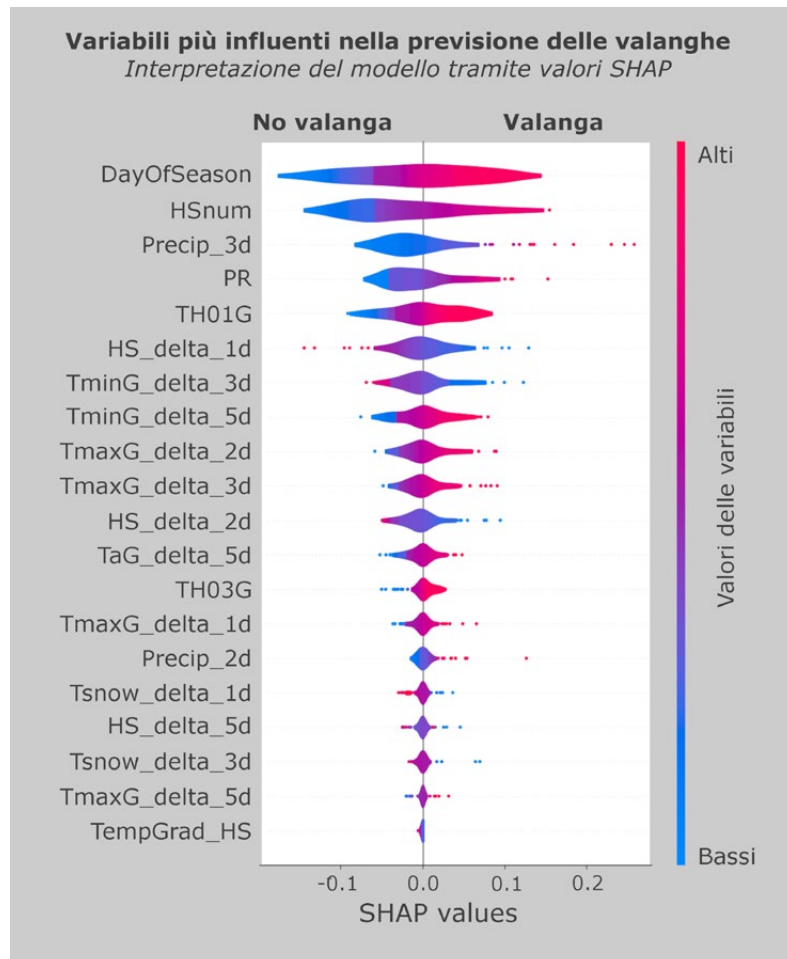


Figura 5. Variabili che il modello considera più importanti nella previsione dell'attività valanghiva. Le variabili sono ordinate in base alla loro influenza complessiva sulle decisioni del modello; i colori evidenziano valori bassi (blu) ed elevati (rosso) delle diverse grandezze considerate.



stanzialmente affidabile per supportare la valutazione del pericolo valanghe a scala locale, pur mantenendo i limiti tipici dei sistemi basati su apprendimento da dati storici.

La validazione in condizioni operative

Per verificare il comportamento del modello in un contesto più vicino alla realtà,

è stata utilizzata la stagione invernale 2024–2025, non inclusa nella fase di addestramento. Questa operazione consente di osservare come il sistema si comporta quando si trova davanti a una stagione nuova, con condizioni meteo e nivologiche diverse da quelle già viste.

Anche in questo caso (vedi Figura 4) il modello si dimostra stabile e affidabile,

riuscendo a fornire indicazioni coerenti con l'evoluzione delle condizioni osservate sul territorio. Le prestazioni restano quindi buone anche al di fuori del contesto controllato della fase di sviluppo.

Questo risultato è importante perché suggerisce che lo strumento non si limita a funzionare sui dati noti, ma mantiene una buona capacità di adattamento alla variabilità naturale delle stagioni invernali. In prospettiva, questo è un requisito fondamentale per un possibile utilizzo operativo a supporto delle valutazioni previsionali.

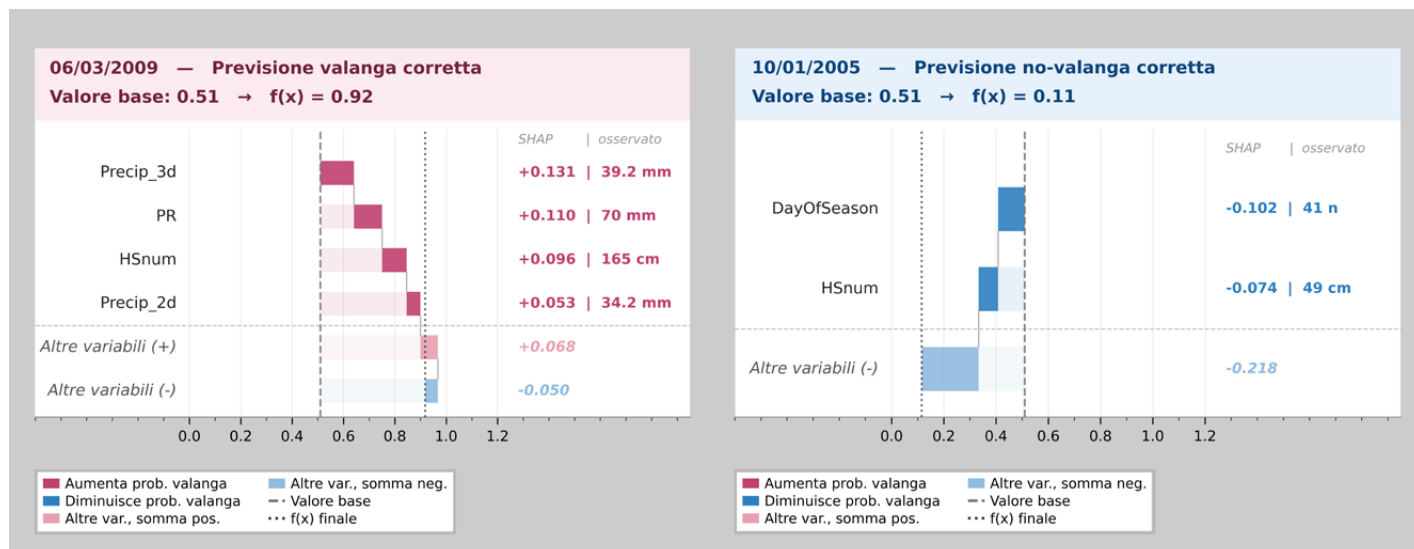
APRIRE LA SCATOLA NERA: I VALORI SHAP

Uno dei limiti più frequentemente attribuiti agli algoritmi di machine learning è quello di comportarsi come una sorta di "scatola nera": il sistema fornisce una previsione, ma non sempre è chiaro quali informazioni abbiano portato a quel risultato. Nell'ambito di un sistema di supporto alla decisione, questo rappresenta un grosso limite, perché il previsore ha bisogno non solo di una previsione, ma anche di indicazioni utili a comprendere i fattori che hanno influenzato quella valutazione. Per ovviare a tale limite, è stata utilizzata una metodologia di letteratura, denominata SHAP (SHapley Additive exPlanations) (Lundberg & Lee, 2017). I valori SHAP associati a ciascuna variabile permettono di analizzare sia le singole previsioni, individuando il contributo di ciascuna variabile a una specifica previsione, sia, aggregando i risultati, il comportamento generale del modello, evidenziando quali variabili risultano mediamente più influenti nelle previsioni.

Le variabili più importanti

Per comprendere quali fattori il sistema consideri più rilevanti nella distinzione tra giornate con e senza attività valanghiva naturale, è stata analizzata l'importanza attribuita alle diverse variabili nivometeorologiche nella fase di addestramento utilizzando i SHAP values di ciascuna di esse (Figura 5).

La variabile più importante risulta essere la stagionalità (DayOfSeason), espressa come numero di giorni trascorsi dal 1° dicembre.



Questo parametro riflette indirettamente l'evoluzione delle condizioni meteorologiche e dell'irraggiamento solare nel corso della stagione, particolarmente rilevanti per l'attività valanghiva di neve umida.

Tra i fattori più significativi compare anche l'altezza del manto nevoso (HSnum). Un manto più spesso tende infatti a ridurre l'influenza della rugosità del terreno e può favorire il movimento della neve anche in presenza di sovraccarichi relativamente modesti.

Un ruolo importante è attribuito inoltre alle precipitazioni cumulate negli ultimi tre giorni (Precip_3d), che rappresentano un indicatore diretto del carico aggiuntivo imposto al manto nevoso. Anche la penetrazione della sonda battage (PR) risulta tra le variabili più influenti, poiché fornisce informazioni sulla consistenza e sulla resistenza meccanica della neve.

È interessante notare che, da un punto di vista della fisica del processo, questi tre fattori sono strettamente collegati ai processi che controllano la stabilità del manto nevoso.

Tra gli altri fattori rilevanti figurano la temperatura della neve nei primi strati superficiali e le variazioni recenti di temperatura e di altezza del manto nevoso. Queste variabili consentono di descrivere non solo lo stato della neve in un determinato momento, ma anche la sua evoluzione nei giorni precedenti.

Le variabili più influenti sono quindi quelle che descrivono l'accumulo di neve, le condizioni termiche e l'evoluzione stagionale.

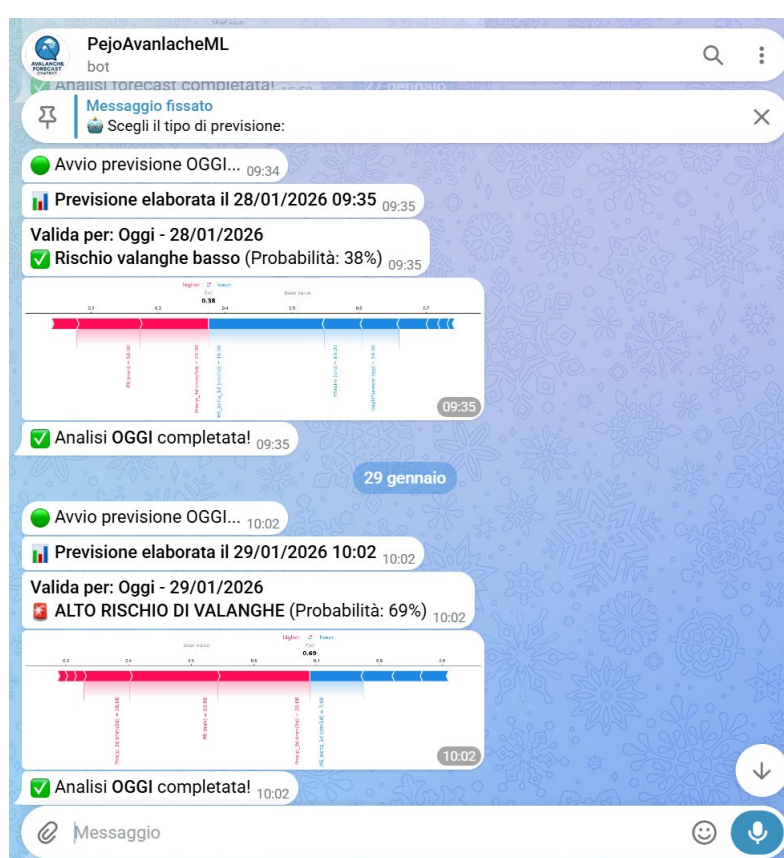


Figura 6. Due esempi di interpretazione delle previsioni fornite dal modello. I grafici mostrano i fattori che hanno contribuito ad aumentare (rosso) o ridurre (blu) la probabilità di attività valanghiva nelle due giornate analizzate. Il valore base rappresenta la previsione media del modello, mentre $f(x)$ è il risultato finale ottenuto sommando i contributi delle diverse variabili, quantificati tramite i valori SHAP.

Figura 7. Interfaccia del bot Telegram sviluppato per la consultazione operativa del modello, con visualizzazione della probabilità giornaliera di attività valanghiva naturale e relativa interpretazione dei più rilevanti fattori di rischio.

Nel complesso, i risultati appaiono coerenti con quanto riportato dalla letteratura nivologica e con l'esperienza operativa maturata nella previsione valanghe. Episodi di intensa precipitazione, rapide variazioni termiche e condizioni tipiche del periodo primaverile rappresentano infatti alcuni dei principali fattori associati all'innesco di valanghe naturali (Schweizer et al., 2003; McClung, 2023).

Comprendere le decisioni dell'algoritmo

I valori SHAP associati a ciascuna variabile

permettono anche di quantificare il contributo di ogni fattore alla previsione di una specifica giornata. Tale contributo è misurato rispetto a un valore di riferimento, corrispondente alla previsione media del modello calcolata sull'intero insieme di addestramento.

Queste indicazioni rappresentano un elemento particolarmente utile come supporto al processo decisionale del previsor: egli può infatti confrontare le osservazioni effettuate sul terreno e la propria esperienza con i risultati forniti dal modello, per giungere a una decisione più informata.

VALANGHE

L'analisi di casi specifici (vedi Figura 6) ha inoltre mostrato che le giornate classificate come favorevoli all'attività valanghiva sono generalmente caratterizzate dalla presenza simultanea di più fattori predisponenti. Questo risultato conferma come l'innesco delle valanghe naturali dipenda dall'interazione tra diverse componenti meteorologiche e nivologiche, piuttosto che dall'azione di una singola variabile.

Dalla ricerca all'operatività quotidiana

Verificata la potenzialità del modello previsionale e di quello interpretativo, l'ultimo passaggio necessario per trasformare questo strumento in un supporto operativo quotidiano alle decisioni è stato quello di renderlo facilmente accessibile e immediatamente utilizzabile da chi si occupa ogni giorno di valutazione del pericolo nel comprensorio sciistico di Pejo.

È stato quindi sviluppato un sistema automatico di consultazione basato su un bot Telegram (vedi Figura 7). Ogni mattina, dopo la raccolta e il controllo dei dati nivometeorologici provenienti dal campo neve di Pejo Tarlenta e dalle stazioni di monitoraggio, le informazioni vengono archiviate e utilizzate dal modello per elaborare una nuova previsione. Nel giro di pochi secondi, il sistema elabora automaticamente i dati disponibili e produce una previsione gior-



naliera. Il risultato viene restituito sul telefono dell'operatore sotto forma di rappresentazione grafica (Figura 7), che mostra i principali fattori che hanno influenzato la previsione e l'intensità del loro contributo: in rosso le variabili che hanno spinto verso un maggior rischio, in blu quelle che hanno spinto verso un rischio minore.

UN NUOVO ALLEATO PER IL PREVISORE

Negli ultimi decenni la previsione valanghe ha beneficiato di un progressivo aumento delle conoscenze scientifiche, della diffusione di reti di monitoraggio sempre più capillari e della disponibilità di archivi storici di dati nivo-meteorologici (Schweizer et al., 2003; McClung, 2023). Parallelamente, l'evoluzione delle tecniche di analisi dei dati ha aperto nuove opportunità per trasformare questo patrimonio informativo in strumenti di supporto alle decisioni (Pozdnoukhov et al., 2008; Viallon-Galinier et al., 2023).

Il caso studio sviluppato nel comprensorio sciistico di Pejo mostra come un approccio basato sul machine learning possa contribuire alla previsione locale del pericolo valanghe, fornendo valutazioni coerenti con le conoscenze nivologiche e sufficientemente accurate da risultare utili in un contesto operativo. Le prestazioni ottenute hanno dimostrato infatti che i dati raccolti nel corso di decenni di osservazioni possono essere utilizzati per individuare pattern ricorrenti significativi tra le condizioni nivo-meteorologiche e l'attività valanghiva naturale.

L'impiego degli SHAP values ha permesso inoltre di trasformare il modello da semplice strumento predittivo a sistema di supporto alla decisione trasparente e verificabile per il previsore. I risultati ottenuti non devono tuttavia essere interpretati come un tentativo di automatizzare la previsione valanghe. L'attività valanghiva è il risultato dell'interazione di processi meteorologici, nivologici e topografici estremamente complessi, che non possono essere descritti completamente da una singola base dati. L'esperienza del

previsore, la conoscenza del territorio e l'osservazione diretta delle condizioni del manto nevoso rimangono quindi elementi centrali e insostituibili del processo decisionale (LaChapelle, 1980; McClung, 2023). In questo contesto, i modelli di machine learning possono rappresentare un ulteriore livello di analisi, capace di affiancare il giudizio umano con informazioni oggettive, riproducibili e basate sull'analisi sistematica delle osservazioni storiche. L'esperienza maturata a Pejo suggerisce come l'integrazione tra competenze nivologiche e strumenti di intelligenza artificiale possa costituire un ambito di ulteriore sviluppo per la gestione del rischio valanghe. In definitiva, il machine learning non so-

stituisce il previsore: può però diventare un nuovo alleato, capace di trasformare i dati raccolti sul territorio in conoscenza utile e di supportare decisioni sempre più consapevoli nella gestione della sicurezza in ambiente innevato.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. Marco Salucci per la consulenza fornita nello sviluppo del modello e per il prezioso contributo tecnico all'analisi dei dati e all'implementazione dell'approccio di machine learning durante il lavoro di tesi.

Si ringrazia inoltre Giacomo Podetti per aver gentilmente messo a disposizione l'immagine aerea della Val de la Mite.

BIBLIOGRAFIA

- Associazione Interregionale NEve e VALanghe, 2013: Codice Nivometeorologico per il rilievo giornaliero. Tech. Rep
- Bellaire, S., A. van Herwijnen, C. Mitterer, and J. Schweizer, 2017: On forecasting wet-snow avalanche activity using simulated snow cover data. *Cold Regions Science and Technology*, 144, 28–38.
- Brida, C., Rosatti, G., Bee, C., & Salucci, M., 2025. Avalanche Forecasting in the Pejo Ski Area: A Data-Driven Approach Using Support Vector Machines.
- Cortes, C., and V. Vapnik, 1995: Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 20 (1), 273–297.
- European Avalanche Warning Services, 2018: European Avalanche Danger Scale. Tech. rep.
- Hendrick, M., F. Techel, M. Volpi, T. Olevski, C. Pérez-Guillén, A. V. Herwijnen, and J. Schweizer, 2023: Automated prediction of wet-snow avalanche activity in the Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 50 (1), 1–14.
- LaChapelle, E. R., 1980: The fundamental processes in conventional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 26 (94), 75–84.
- Lundberg, S. M., and S. I. Lee, 2017: A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017-Decem (Section 2), 4766–4775.
- McClung, D., 2023: The Avalanche Handbook. 4th ed., 368 pp.
- Pérez-Guillén, C., and Coauthors, 2022: Data-driven automated predictions of the avalanche danger level for dry-snow conditions in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22 (6), 2031–2056.
- Pozdnoukhov, A., R. S. Purves, and M. Kanevski, 2008: Applying machine learning methods to avalanche forecasting. *Annals of Glaciology*, 49, 107–113.
- Schweizer, J., J. B. Jamieson, and M. Schneebeli, 2003: Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41 (4).
- Viallon-Galinier, L., 2022: Combining physical modeling and machine learning to improve avalanche hazard forecasting

La SCIENZA e la PREVENZIONE delle VALANGHE

Di Joe Stock

Traduzione autorizzata dall'autore

"Il presente articolo è la traduzione italiana ufficiale, autorizzata dall'autore, del testo originale "Science and Avoiding Avalanches" pubblicato in lingua inglese sulla rivista The Avalanche Review (organo della American Avalanche Association), nei numeri 44.3 e 44.4 del 2026. Traduzione a cura di [Igor Chiambretti]."

DOI: 10.82089/NEV992026_4

Joe è una guida alpina IFMGA con sede ad Anchorage, in Alaska. Pratica l'arrampicata e lo sci da decenni, principalmente in Alaska, negli Stati Uniti occidentali, nelle Alpi, nelle Ande e in Nuova Zelanda. Attualmente si dedica all'insegnamento di corsi sulla sicurezza in valanga, alla guida sciistica in Alaska e alla guida alpina nelle Alpi. Joe ama anche scrivere, come dimostrano la sua guida sciistica per l'Alaska centro-meridionale — The Alaska Factor — e il suo libro sulla sicurezza in valanga — The Avalanche Factor. Joe ha conseguito una laurea in geografia fisica presso l'Università di Canterbury in Nuova Zelanda e un master in scienze dei bacini idrografici presso la Colorado State University. Joe trascorre il tempo libero arrampicando sotto il sole con sua moglie Cathy. I suoi libri e altri articoli sono disponibili su stockalpine.com.



TAB. 1: tabella che riassume le caratteristiche del metodo scientifico e della cultura sociale della scienza (autore Oreskes 2021)

Durante la **corsa all'oro del Klondike** nel 1889, una valanga in Alaska uccise 69 cercatori d'oro non locali (Simpson 2002). Gli aborigeni, e i pionieri che avevano imparato dagli aborigeni, si rifiutarono di percorrere quel percorso quella settimana a causa del caldo disgelo primaverile. Gli aborigeni avevano riconosciuto le pericolose condizioni valanghive grazie all'esperienza e alle conoscenze tradizionali tramandate da generazioni di vita in montagna. Oggi la maggior parte di noi non possiede **le conoscenze tradizionali** acquisite da generazioni di vita in montagna. Eppure, la nostra cultura ci spinge verso terreni pericolosi a rischio valanghe, lasciandoci in una situazione molto simile a quella dei cercatori d'oro, ignari dei pericoli, ma assetati d'oro. Come i cercatori d'oro, ci manca la saggezza degli anziani che ci tenga al riparo dal pericolo. Solo che ora abbiamo il vantaggio della scienza, del metodo scientifico e del pensiero scientifico. Questo articolo offre un'introduzione alla scienza in generale, alla scienza delle valanghe e al pensiero scientifico. L'obiettivo di questo articolo è aiutare gli appassionati di attività sportivo-ricreative in zone a rischio valanghe e i professionisti del settore a comprendere la scienza e come utilizzare il pensiero scientifico per evitare le valanghe. Questo articolo non è una pubblicazione scientifica, bensì un approfondimento basato su letture di approfondimento, discussioni con professionisti del settore valanghe e scienziati, nonché sulle mie conoscenze e opinioni personali.

DEFINIZIONI

Empirico (agg.): basato sull'esperienza o sull'osservazione.

Epistemico (agg.): relativo alla conoscenza o al suo grado di validità.

Ipotesi (s.f.): una possibile spiegazione basata su prove limitate, che funge da punto di partenza per ulteriori indagini.

Scienza (n): conoscenza, compresa quella relativa al mondo naturale, ottenuta attraverso il metodo scientifico.

Metodo scientifico (n): un sistema per perseguire la conoscenza attraverso l'esperimento, l'osservazione e la verifica delle ipotesi.

Pensiero scientifico: un modo di pensare come uno scienziato per imparare, prendere decisioni migliori e avvicinarsi alla verità.

Caratteristiche del metodo scientifico (ciò che sappiamo)	La cultura sociale della scienza (come lo sappiamo)
Empirica, basata su test e osservazione	Consenso
Falsificabile	Diversità
Segue la ragione e logica	Documentazione e condivisione
Obiettivo	Trasparenza
Iterativo	Critica
Ripetibile	Revisione tra pari
	Comunità che si autoregola

LA SCIENZA IN GENERALE

La scienza è un modo per acquisire conoscenze sul mondo naturale.

Altri modi includono l'esperienza, l'arte, la storia, la filosofia e la religione. Ciò che distingue la scienza è che segue un metodo scientifico strutturato e ripetibile (vedi punto 1 della TAB 1). In particolare, la scienza è empirica, il che significa che si basa su test e osservazioni, ed è falsificabile, il che significa che deve essere possibile dimostrare che le affermazioni sono false (vedi punto 6 della TAB 1). Ma l'uso del solo metodo scientifico non porta a una conoscenza solida, perché non esiste un unico metodo scientifico. Inoltre, gli esseri umani sono soggetti a pregiudizi. Di conseguenza, la cultura sociale della scienza (Oreskes 2021) è altrettanto importante quanto il metodo scientifico per eliminare la disonestà e la logica errata.

La scienza ha successo perché segue il metodo scientifico ed è sostenuta da una forte cultura sociale (Oreskes 2021).

Utilizziamo la scienza e ne dipendiamo in ogni aspetto della nostra vita: dalla comprensione del suolo su cui viviamo alle medicine che ci salvano la vita. Possiamo discutere sui meriti della scienza (ad esempio, la scienza nucleare ci ha portato energia a basso costo e un'arma letale), ma utilizziamo comunque le conoscenze e la tecnologia che essa ci offre.

Se usiamo questa scienza in modo intelligente, possiamo ridurre la sofferenza umana (ad esempio, prevenire le malat-

tie, rallentare il cambiamento climatico) e ridurre le nostre possibilità di rimanere intrappolati in una valanga.

Il problema principale della scienza è che **le sue conclusioni possono scontrarsi con i nostri valori**, la religione, le opinioni politiche o gli interessi economici. Questo nonostante la maggior parte delle persone negli Stati Uniti creda nella scienza e utilizzi i prodotti della scienza. Ad esempio, è facile credere nella fisica se si utilizza l'elettricità, ma è più difficile credere nella biologia evolutiva se si è religiosi. Un altro problema è che **le discussioni scientifiche assumono rapidamente un carattere filosofico**, rendendole difficili da comprendere. Possiamo solo dimostrare che le ipotesi sono sbagliate, non che sono giuste. Eh? Le teorie sono ciò che più si avvicina alla verità, ma rimangono comunque incerte. Cosa?

Questa **mancanza di comprensione della scienza** si manifesta nell'uso del termine **«scienza della neve»** quando gli appassionati di sci fuoripista osservano i cristalli in una trincea di neve. Forse stanno utilizzando una definizione più ampia di scienza, intesa sia come corpus di conoscenze che, come processo (Berkeley, edu 2025). È più probabile, tuttavia, che il loro uso dell'espressione «scienza della neve» sia dovuto proprio a una mancanza di comprensione della scienza. La scienza viene praticata dagli scienziati utilizzando il metodo scientifico. Lo scienziato esperto di valanghe Karl Birkeland afferma: *«La scienza della neve non consiste nel guardare attraverso una lente d'ingrandimento. Quello è usare la scienza della neve per svolgere*

il proprio lavoro o per comprendere meglio cosa sta succedendo. La scienza è stata quella delle persone che hanno identificato quei cristalli in origine e hanno documentato quali tipi di cristalli portavano alla formazione di strati deboli, lastroni, ecc.". **Osservare la neve** è un termine più appropriato per descrivere l'esame degli strati e dei cristalli in una buca di neve.

Sebbene non stiamo facendo scienza quando sciamo in terreni valanghivi, **utilizziamo le conoscenze sviluppate dalla scienza** per aiutarci a evitare le valanghe. Tutto, da come si staccano le valanghe a lastroni a come possiamo prendere decisioni migliori.

Jayson Simons-Jones, coordinatore dell'educazione per l'utenza sportivo-ricreativa dell'American Avalanche Association, afferma: «Se eliminassimo tutti gli studi scientifici che hanno portato alla comprensione delle valanghe, continueremmo a credere che siano causate da divinità adirate e fantasmi di montagna». Karl Birkeland fa un esempio: «Per molto tempo ci è stato insegnato che le valanghe si staccano per taglio. Sembra una cosa piuttosto scientifica e non particolarmente importante, ma in quel periodo si dava enorme importanza all'angolo del pendio e poca al distacco a distanza. Perché, eh, su un terreno pianeggiante non c'è sforzo di taglio (o forse solo un po'). I professionisti delle valanghe sapevano che era possibile provocare il distacco a distanza, ma semplicemente non veniva sottolineato. In quel periodo continuavo a sentire di persone che morivano a causa di valanghe provocate a distanza che si propagavano sopra di loro».

LA SCIENZA DELLE VALANGHE

La ricerca sulle valanghe negli Stati Uniti ha avuto inizio ad Alta, nello Utah, nel 1948 grazie al lavoro di Monty Atwater. Attualmente, gran parte di questa ricerca viene condotta grazie a piccole sovvenzioni presso università come la Montana State University, oppure con progetti collaterali da parte di ricercatori, meteorologi specializzati in valanghe, pattugliatori di piste e altre figure che operano in

ambiente nevoso. La nostra passione per lo sci, la neve e le valanghe è alla base di centinaia di studi sulle valanghe ogni anno, nonostante i fondi limitati e una media di 27 vittime all'anno.

Come la maggior parte delle scienze, la scienza delle valanghe inizia tipicamente con un'osservazione che cattura la curiosità di un operatore o di uno scienziato specializzato in valanghe. Utilizzando il **metodo scientifico**, il ricercatore sviluppa un'**ipotesi** - una potenziale spiegazione basata su prove limitate come punto di partenza per ulteriori indagini - e **raccolge informazioni attraverso l'osservazione o la sperimentazione**. L'osservazione registra i fenomeni così come si verificano naturalmente senza manipolare le variabili. Un test scientifico - chiamato anche esperimento - manipola attivamente le variabili per ridurre la distorsione e migliorare la ripetibilità. Si possono trarre conclusioni sulla base delle osservazioni e dei test. Questo processo che va dall'osservazione e dalla sperimentazione alla conclusione - dal particolare al generale - è chiamato **ragionamento induttivo** ed è fondamentale per la scienza delle valanghe e la previsione delle valanghe (LaChapelle 1980).

La scienza, e la nostra conoscenza, tendono ad accumularsi gradualmente come **scienza normale**. Raramente la scienza subisce cambiamenti di paradigma (Kuhn 1962) come la scienza rivoluzionaria, ad esempio Wegener che propose la deriva dei continenti o Brenz che propose le grandi inondazioni dell'Inland Northwest. Lo scienziato delle valanghe Ian McCammon (comunicazione personale 2025) ha affermato: «Penso che la scienza della neve si adatti meglio al modello di Kuhn di "sviluppo per accumulazione" piuttosto che alla rivoluzione episodica». LaChapelle (2005) ha scritto in *The Ascending Spiral*: «Piuttosto che vedere la nostra padronanza della scienza della neve e delle valanghe e il processo decisionale come una progressione lineare, la vedo come le stesse questioni e idee che si ripropongono più e più volte, ma ogni volta a un livello più sofisticato e tecnicamente avanzato: da qui la spirale ascendente».

Quando ho chiesto ai professionisti del settore valanghe negli Stati Uniti quali fossero **i cambiamenti paradigmatici nella scienza delle valanghe**, il punto di convergenza principale riguardava la nostra comprensione del distacco delle valanghe (ad es. Gaume 2025). Una svolta rivoluzionaria per la prevenzione delle valanghe? Forse. Latosuo (comunicazione personale 2025) ha affermato: «Trovo che i professionisti nel mondo delle valanghe siano sempre alla ricerca di soluzioni nuove e migliorate da mettere in atto (siamo tutti persone d'azione!), ma spesso si lasciano prendere dall'entusiasmo e applicano prototipi concettuali prima che il processo di revisione scientifica o il controllo di qualità abbia fatto la sua parte». Ad esempio, la comunità delle valanghe si è aggrappata alle trappole euristiche (McCammon 2004), invece che agli strumenti decisionali come suggerito da McCammon.

Forse la scienza delle valanghe è pronta per un **vero e proprio cambiamento di paradigma**, magari verso un controllo delle valanghe basato sull'intelligenza artificiale e perfezionato dal cervello umano, oppure verso un ritorno alle conoscenze tradizionali sulle valanghe che esistono da quando l'uomo ha iniziato a vivere in montagna.

DISTINZIONI NELLA SCIENZA

La scienza delle valanghe rientra sia nelle **scienze naturali (fisiche)** sia nelle **scienze umane (sociali)**. La maggior parte della ricerca sulle valanghe è stata condotta nell'ambito delle scienze naturali (Haegeli et al. 2023). Ciò è probabilmente dovuto al fatto che le scienze naturali consentono misurazioni più semplici: misurare l'inclinazione del pendio, inserire un termometro, contare le valanghe, ecc. Le scienze umane sono più difficili da misurare e da tradurre in conclusioni ripetibili. Ad esempio, come si fa a misurare in modo oggettivo la decisione di un gruppo di sciare o meno su un pendio? Come ha affermato Birkeland (comunicazione personale 2025), «Per prendere buone decisioni in ambiente fuoripista dobbiamo

Principi del pensiero scientifico comuni alla scienza e alla prevenzione delle valanghe

- 1) Utilizzare un metodo (sistema)
- 2) Utilizzare le prove
- 3) Sforzarsi di essere obiettivi
- 4) La curiosità porta alla saggezza
- 5) Non conosci la verità (ipotesi)
- 6) Falsifica (la neve stabile)
- 7) Accetta l'incertezza
- 8) Abbi fiducia nella scienza (ma verifica le previsioni)
- 9) Cambia idea
- 10) Collabora
- 11) Ripeti
- 12) Condividi i risultati

sia comprendere i processi fisici in atto, sia capire come le persone elaborano quei dati per giungere a delle decisioni».

Probabilmente le scienze umane sono oggi più importanti che mai. Ad esempio, sappiamo che il clima sta cambiando, ma non siamo in grado di spingere le persone ad agire. Allo stesso modo, disponiamo di una vasta conoscenza delle scienze naturali relative alle valanghe – come si formano e si staccano, ecc. – ma

Tab. 2 Ogni aspetto del metodo scientifico è applicabile alla prevenzione delle valanghe (Stock 1985, Elder e Birkeland 1994).

abbiamo bisogno di una maggiore scienza delle valanghe dal punto di vista umano, in modo che gli sciatori possano applicare meglio le scienze naturali esistenti per prendere decisioni migliori. Ad esempio, alcuni studi hanno dimostrato che l'attrezzatura di soccorso in caso di valanga salva vite umane; tuttavia, non tutti ne dispongono, e sono necessari ulteriori studi per capire perché. Analogamente alla distinzione tra naturale e umano, la scienza delle valanghe può essere sia **quantitativa** (numerica, oggettiva, statistica, più vicina alle scienze naturali) sia **qualitativa** (non numerica, soggettiva, basata su temi piuttosto che su statistiche, più vicina alle scienze umane). La scienziata specializzata in valanghe Eeva Latosuo (comunicazione personale 2025) ha affermato: "La ricerca qualitativa continua a essere considerata meno importante. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che è più apertamente soggettiva e non sempre si adatta al modello tradizionale di come viene fatta la scienza". McNeil afferma: "Una combinazione di tecniche di ricerca produce i migliori risultati e ci fornisce la massima comprensione del comportamento umano". Una terza distinzione riguarda **l'origine delle conoscenze sulle valanghe: esse provengono dagli studiosi del**

fenomeno o dai professionisti del settore. Gli studiosi seguono il metodo scientifico e sono sottoposti al vaglio della cultura scientifica. Possono raccogliere dati sul campo prima di analizzarli in laboratorio, oppure possono non recarsi affatto sul campo. I professionisti, invece, acquisiscono conoscenze attraverso il metodo tradizionale dell'esperienza. Entrambi i modi di acquisire conoscenze sono importanti e complementari. Da qui il sottotitolo dell'International Snow Science Workshop: "una fusione di teoria e pratica". Il consulente in materia di valanghe Dave Richards ha affermato: "Ogni buon professionista o scienziato non dovrebbe essere sempre curioso? E non potremmo soddisfare quella curiosità essendo un po' entrambi?" McNeil ha aggiunto: "Abbiamo bisogno dei professionisti per aiutare a guidare i ricercatori".

PENSIERO SCIENTIFICO ED EVITARE LE VALANGHE

Pur non facendo scienza, gli sciatori esperti di fuoripista e i professionisti delle valanghe applicano il pensiero scientifico per evitare le valanghe. Questa sorprendente quantità di punti in comune è dovuta al



fatto che sia la scienza che le valanghe sono incerte e trattano entrambe problemi astratti che non si possono toccare con mano. I principi del pensiero scientifico in questo articolo ampliano quelli di Carpenter (2022), Grant (2021) e Salovey (2018), tra cui essere curiosi, utilizzare le prove e cambiare idea.

1. Usa un metodo

Sia la scienza sia la prevenzione delle valanghe utilizzano un metodo (sistema). In questo contesto, metodo e sistema hanno una definizione simile: l'utilizzo di una serie di principi per raggiungere un obiettivo. La scienza si basa sul **metodo scientifico**, un processo che è stato perfezionato nel corso di centinaia di anni e che è ancora oggetto di dibattito e perfezionamento. Sebbene non esista un unico "metodo scientifico" universalmente accettato, di seguito sono riportate le sue idee principali (Stock 1985). Il metodo scientifico prevede la formulazione di una domanda su un argomento, solitamente ispirata da qualcosa osservato sul campo. Lo scienziato sviluppa quindi un'ipotesi che può essere verificata. Un'ipotesi è una potenziale spiegazione basata su prove limitate come punto di partenza per ulteriori indagini. Lo scienziato raccoglie quindi prove effettuando osservazioni e test su tale ipotesi. È possibile trarre conclusioni analizzando i dati. Con un numero sufficiente di conclusioni, può evolversi una teoria, ovvero un principio accettato per spiegare un fenomeno. Il metodo scientifico non è lineare, ma più caotico, con fasi che si sovrappongono e si alternano.

Proprio come gli scienziati affidabili che utilizzano il metodo scientifico, gli utenti esperti del fuoripista applicano un **sistema di prevenzione degli incidenti in valanga** (Stock 2024). Un sistema consente agli addetti alla prevenzione delle valanghe di operare giorno dopo giorno in un ambiente ad alto rischio con un numero relativamente basso di incidenti. Come per il metodo scientifico, non esiste un unico sistema di prevenzione degli incidenti in valanga universalmente accettato, ma esso include alcune varianti come quelle elencate in tabella.

Un esempio di sistema (metodo) di prevenzione degli incidenti in valanga

Pianifica la tua escursione: ad esempio, determina il pericolo di valanghe, i problemi e il terreno da evitare.

Osserva le condizioni: ad esempio, osserva le condizioni meteorologiche, il manto nevoso e i compagni, e testa il manto nevoso.

Prevedi i margini di sicurezza: ad esempio, mantieni le distanze, fermati in una zona sicura, ecc.

Comunica durante le soste nelle zone sicure: ad esempio, parla con franchezza, ascolta tutti, rispetta le opinioni contrarie, ecc.

Fai un debriefing: ad esempio, quali errori ho commesso? Come posso fare meglio la prossima volta?

2. Usare le prove

Le **prove** sono l'insieme delle informazioni disponibili che indicano se una convinzione è valida. Sono la base per trarre conclusioni sia nella scienza sia nella sicurezza nel campo delle valanghe. L'uso delle prove piuttosto che del dogma, dell'opinione popolare o della tradizione è ciò che distingue la scienza dalla pseudoscienza e dalla religione (Stock 1985).

La **raccolta di prove** per uno studio scientifico **spazia** dall'osservazione dei fenomeni così come si presentano in natura, agli esperimenti formali (test). Ad esempio, uno psicologo può utilizzare dispositivi GPS per tracciare gli sciatori e osservarne le decisioni. Oppure uno scienziato della neve può utilizzare un laboratorio a bassa temperatura per testare i cambiamenti dei cristalli. In entrambi gli esempi si tratta di raccogliere tutte le prove, e non solo quelle che supportano le proprie convinzioni.

Raccogliere prove da più fonti (triangolazione) e far sì che tali risultati convergano e si sostengano a vicenda, rafforza i risultati della ricerca e li rende più affidabili e meno distorti. Quando si è nello sci fuoripista, raccogliere più elementi di valutazione consente di prendere decisioni più obiettive in materia di valanghe. Prima di uscire a sciare, raccogliamo informazioni sulle condizioni — manto nevoso, meteo, presenza di altre persone — e poi scegliamo i terreni più sicuri da percorrere. Una volta in fuoripista, continuiamo a raccogliere informazioni sulle condizioni. Quando diversi elementi di valutazione convergono — ad esempio, le previsioni valanghe e le osservazioni sul campo — le conclusioni risultano più solide.

Le decisioni basate su prove e dati sono l'ideale, ma vanno contro la nostra **cultura**, i nostri **valori** e le nostre **convinzioni**. Ad esempio, gran parte della nazione (U.S.A.

Tab. 3 La raccolta di prove è la base per trarre conclusioni nella scienza e nella sicurezza valanghe.

Prove scientifiche	Prove relative al manto nevoso	Prove meteorologiche	Prove relative alle persone
Osservazioni Test (esperimenti)	Segnali di allarme sul manto nevoso Test sul manto nevoso Osservazioni sul manto nevoso	Stazioni meteorologiche Previsioni meteorologiche Osservazioni meteorologiche Segnali di allerta meteorologici	Dimensione del team Addestramento sulle valanghe Salute adeguata Obiettivi simili Rimanere uniti Ascoltare tutti



NdT) sostiene un'amministrazione che è anti-scienza e seleziona prove contro la vaccinazione, il ruolo degli esseri umani nel cambiamento climatico, ecc. Allo stesso modo, quando si scia fuori pista, potremmo notare segnali di pericolo che indicano che la neve potrebbe provocare una valanga, ma se diamo valore allo sciare in terreni a rischio valanghe, potremmo selezionare le prove e ignorare quei segnali di pericolo.

Il nostro disinteresse per le prove e la scienza potrebbe derivare dal fatto che il cervello umano non ragiona in termini di dati, ma di storie (Aschwanden 2024). Gli **aneddoti** - brevi racconti - sono concreti, comprensibili e rappresentano il modo in cui abbiamo imparato storicamente e continuiamo a imparare. Le storie di persone che rispettiamo, come i mentori esperti di valanghe, possono insegnarci lezioni pre-

Tab. 4 Sia la scienza sia la sicurezza in caso di valanghe hanno stabilito metodi per ridurre i bias.

ziose che non dimentichiamo, ma vanno usate con cautela. Gli aneddoti sono singole prove, non un consenso. Ignorano la legge dei grandi numeri e il ritorno alla media (Ahn 2022).

“Quando ci troviamo in una situazione in cui non vediamo valanghe né assistiamo a distacchi provocati, ci troviamo in un ambiente povero di dati. Ecco perché penso che sia così importante scavare!” - Karl Birkeland (comunicazione personale, 2025).

3. Cercare di essere obiettivi

La scienza dovrebbe essere il più obiettiva possibile, in modo da rappresentare le prove e migliorare la nostra conoscenza. Dovremmo cercare di ottenere prove oggettive. Il problema è che la scienza è fatta da esseri umani, e **gli esseri umani sono di parte**. Ad esempio, gli scienziati lavorano sodo e vogliono trovare risposte interessanti alle loro domande, quindi potrebbero tralasciare i risultati che non portano a conclusioni interessanti. I finanziamenti provenienti dall'industria privata possono influenzare gli scienziati, come nel caso dell'industria del tabacco che nega il cancro o dell'industria petrolifera che nega il cambiamento climatico. A influenzare ulteriormente la scienza sono il paradigma e la cultura in cui gli scienziati operano, come l'ignorare le conoscenze tradizionali sulle valanghe che potrebbero accettare il destino a favore del controllo della natura (ad esempio, i sistemi di controllo remoto delle valanghe).

Una nota fonte di parzialità nella scienza

delle valanghe è la **mancanza di diversità**; il settore è dominato da uomini bianchi (Mannberg e altri 2025). Ad esempio, il comitato dell'ISSW 2024 era composto esclusivamente da uomini nel campo delle scienze fisiche. La diversità nella scienza apporta una varietà di punti di vista e una maggiore forza epistemica (Oreskes 2019).

Per ridurre i bias e garantire una maggiore obiettività, la scienza impone una struttura rigorosa di autocontrollo che permea il metodo e la cultura scientifica. Ad esempio, la statistica, se utilizzata in modo obiettivo, contribuisce a evidenziare la relazione tra le variabili e fornisce un grado di validità alle prove (ad esempio, il valore p). Prima della pubblicazione, gli studi sono sottoposti a una revisione informale tra pari durante le conferenze e negli atti congressuali. Quando vengono presentati per la pubblicazione, una rivista sottoposta a revisione tra pari invia una bozza a una selezione di revisori esperti che aiutano a identificare potenziali carenze. Inoltre, i metodi di studio sono spiegati nella pubblicazione in modo che altri possano assicurarsi che sia stato utilizzato il metodo scientifico.

Proprio come la scienza, **lo sci alpinismo è pieno di occasioni in cui possono insorgere bias**: bias di conferma, bias di ancoraggio, bias dei costi irrecuperabili e tutti gli altri pregiudizi/distorsioni noti. In quanto esseri umani emotivi, che amano sciare su terreni a rischio valanghe, siamo particolarmente inclini ai bias. Le prove possono indicarci che il manto nevoso è instabile, ma tali prove vengono messe da parte dal nostro desiderio di sciare sulla neve fresca in terreni a rischio valanghe. Inoltre, la neve premia le decisioni sbagliate perché i pendii di solito non provocano valanghe, anche in condizioni di elevato rischio valanghe, quindi impariamo le lezioni sbagliate, il che aumenta i nostri bias e ci rende meno obiettivi. Poiché la semplice consapevolezza dei nostri bias non aiuta, i professionisti delle valanghe mettono in atto sistemi per ridurre le distorsioni, come la scelta di buoni compagni, la pianificazione del viaggio durante la riunione con la guida, il rallentamento e la raccolta di dati.

Metodi per ridurre il bias nella scienza	Metodi per ridurre il bias nelle decisioni relative alle valanghe
Metodo scientifico	Riunione mattutina/piano di viaggio
Diversità	Comunicazione sincera nei punti critici di decisione
Procedure standardizzate	Raccolta di prove sul campo
Metodi e dati trasparenti	Debriefing
Gruppi di controllo	
Scelta casuale dei soggetti dell'esperimento	
Revisione tra pari durante i convegni	
Pubblicazioni a più autori	
Revisione tra pari prima della pubblicazione Studi di replica	
Statistiche (ad es. p-value, statistica bayesiana)	

La difficile dicotomia quando si cerca l'obiettività è che l'**opinione è necessaria**. Un buon articolo scientifico si conclude con lo scienziato che specula sul significato dei risultati e fornisce suggerimenti per ulteriori ricerche. Quando si scia fuori pista, **i membri devono dare la loro opinione per contribuire al lavoro di squadra**.

4. La curiosità porta alla saggezza

La curiosità guida il processo scientifico. Gli scienziati abbracciano la curiosità ponendosi costantemente domande, imparando per tutta la vita e cambiando le loro opinioni alla luce di solide prove empiriche (Aschwanden 2024).

Gli scienziati sono inoltre **scettici** nei confronti di affermazioni che potrebbero mancare di prove empiriche. Vogliono comprendere la scienza in prima persona. Come afferma Karl Birkeland (comunicazione personale, 2024): «Se qualcuno dice che è stabile, siate scettici!». Questo scetticismo può dare l'impressione che gli scienziati siano arroganti, ma spesso si tratta semplicemente di curiosità. D'altra parte, sviluppare una mancanza di scetticismo – una mente aperta e ricettiva alle nuove idee e alle possibili soluzioni – migliorerà anche il tuo apprendimento. *“Se sei scettico, sii scettico nei confronti delle tue stesse ipotesi”* (Stock 1985).

Come per essere un buon scienziato, essere bravi a evitare le valanghe richiede un desiderio costante di scoprire cose nuove. L'incertezza intrinseca, la complessità e lo scarso feedback delle valanghe richiedono una curiosità incessante per raggiungere la **saggezza** e la **padronanza** delle valanghe, il livello più alto di comprensione (Hutchinson 2024). 10.000 ore di esperienza servono a poco senza curiosità.

Decenni fa, l'esperto di valanghe Rod Newcomb mi ha dimostrato come la curiosità porti alla saggezza quando ha detto: «È una buona domanda. Non lo so. Vediamo cosa dice l'*Avalanche Handbook* (McClung 2023)». Poi, sul campo, ha detto: «*Mettiamo una carica esplosiva su questo pendio e vediamo cosa succede*».



La natura complessa e poco chiara delle condizioni valanghe può portare a una pericolosa **arroganza epistemica** (orgoglio intellettuale). Chi ha molta esperienza nel fuoripista può credere di sapere più di quanto non sappia in realtà sulle valanghe. L'arroganza epistemica e lo scetticismo potrebbero, inoltre, limitare lo sviluppo di nuove idee in un campo che ha un potenziale enorme. Il mondo delle valanghe ha bisogno di curiosità, pensatori anticonformisti, idee innovative e apertura verso tali idee.

5. Non conosci la verità (formula ipotesi)

La scienza riconosce che la nostra conoscenza è limitata. Con ogni studio gli scienziati si avvicinano alla verità, ma emergono altre domande. Il concetto secondo cui non conosciamo la verità è stato formulato dal filosofo austriaco **Karl Popper** (2002). Popper sosteneva che nessun numero di avvistamenti di cigni bianchi può dimostrare che tutti i cigni sono bianchi, perché l'avvistamento di un solo cigno nero confuterebbe tale ipotesi. In altre parole,

non è possibile dimostrare che un'ipotesi o una teoria sia vera perché non è possibile esaminare tutto. Ma è possibile dimostrare che sia falsa (vedi Tab. 4).

Non conosciamo nemmeno la verità sulla neve. Possiamo testarla per tutto il giorno. A volte i dati dimostreranno chiaramente che è stabile: siamo abbastanza sicuri che non si verificherà una valanga. Ma poiché non abbiamo testato tutta il manto nevoso, non possiamo esserne certi al 100%. **Il trucco sta nel riconoscere questa incertezza intrinseca** ed esprimersi in termini incerti: «*I test suggeriscono che il manto nevoso non provocherà valanghe*».

Considera la tua visione delle condizioni valanghive come un'ipotesi (Grant 2021). Ricorda: **un'ipotesi è una spiegazione basata su prove limitate come punto di partenza per ulteriori indagini. La previsione valanghe è un'ipotesi sulle condizioni che usi per costruire la tua ipotesi sulle condizioni** (Carpenter 2022). Trattando le tue opinioni come ipotesi e riconoscendo di non conoscere la verità, è più facile cambiare rotta alla luce di nuove informazioni.

“La scienza è ciò che facciamo per evitare di mentire a noi stessi” – Richard Feynman, fisico vincitore del Premio Nobel.

6. Falsificare la neve stabile

Popper (2002) ha anche introdotto il concetto di falsificazione. Per essere vera scienza, **un'ipotesi o una teoria deve essere falsificabile**, il che significa che può essere dimostrata falsa, e quindi l'idea può essere abbandonata. La teoria secondo cui tutti i cigni sono bianchi è falsificabile perché se ne troviamo uno nero possiamo falsificare quella teoria e abbandonarla.

La capacità di falsificare un'idea è un'altra differenza — come raccogliere prove piuttosto che selezionarle — tra la vera scienza e la pseudoscienza. Ciò garantisce che la conoscenza si basi su prove empiriche (misurate) piuttosto che su credenze. Se non c'è modo di dimostrare che qualcosa

è falso, allora non può essere verificato scientificamente.

Cercare di smentire l'idea che la neve sia stabile è un atteggiamento mentale fondamentale per evitare le valanghe. Dovremmo sempre cercare la neve instabile nel tentativo di confutare la nostra convinzione che la neve sia stabile. Supponiamo che, durante la pianificazione dell'escursione, pensiamo che il pericolo di valanghe sia 1 - debole: la neve è stabile e non si formeranno valanghe. Poi, sul campo, vediamo segni di neve stabile: nessuna valanga recente, nessun whoom (rumori di assestamento). È facile trovare prove di neve stabile con l'aiuto del **bias di conferma**¹. E questo modo di pensare ha causato la morte di molti sciatori. Piuttosto, prima di avventurarsi su un terreno valanghivo, è saggio cercare la neve instabile - scavando, sondando, osservando - nel tentativo di confutare l'ipotesi della neve stabile. Non conosciamo la verità sulla stabilità della neve e sbagliare potrebbe essere fatale.

7. Abbracciare l'incertezza

L'incertezza guida la scienza e ci permette di fidarci di essa. Questa incertezza è insita nella scienza perché è fatta da esseri umani su argomenti complessi (Kampourakis e McCain 2020). Gli scienziati riconoscono di non sapere tutto e che il loro compito è proprio quello di scoprire ciò che non sanno. Anche nelle conclusioni, l'incertezza rimane. Le teorie, come quella della gravità, presentano incertezze e sono pronte ad essere aggiornate alla luce di nuove prove. Queste lacune nella nostra

conoscenza, che si tratti della conclusione di uno studio o di una teoria consolidata, sono il punto di partenza per nuove ricerche. È proprio questo abbracciare l'incertezza e l'autocorrezione che rende la scienza così potente.

Il problema è che **l'incertezza può essere interpretata erroneamente dall'opinione pubblica** come un pretesto per screditare la scienza, con conseguenze talvolta catastrofiche. Ad esempio, di fronte all'incertezza in tempo reale legata al COVID-19, molti americani hanno screditato la scienza: gli Stati Uniti rappresentano il 4% della popolazione mondiale, eppure hanno registrato il 20% dei decessi globali (Oreskes 2021). Il consenso scientifico afferma che gli esseri umani stanno causando il cambiamento climatico e che possiamo agire ora per aiutare a salvare l'umanità, eppure solo il 36% degli americani se ne preoccupa molto (Kampourakis e McCain 2020). Attualmente ci troviamo di fronte a una situazione simile con i vaccini.

La nostra difficoltà con l'incertezza potrebbe derivare dal fatto che **le persone ragionano in termini di certezze, non di incertezze**. Come esseri umani, otteniamo informazioni sufficienti e prendiamo una decisione, migliaia di decisioni ogni giorno, con sicurezza. L'incertezza residua esiste sempre, ma non possiamo passare la vita a riflettere sull'incertezza, altrimenti non ci alzeremmo mai dal letto. Inoltre, a scuola impariamo che le cose sono bianche o nere e che c'è sempre una risposta corretta e migliore a qualsiasi domanda (Kampourakis e McCain 2020). Il

Alcune tecniche per accettare l'incertezza nel fuoripista.

- 1) Riconoscere che i problemi persistenti legati alle valanghe sono incerti, inaffidabili e da evitare.
- 2) Abituarsi a dire: «Non lo so».
- 3) Aggiungere margini di sicurezza — distanziarsi, fermarsi in una zona sicura, andare altrove, ecc. — per tenere conto dell'incertezza.
- 4) Inserire indicazioni relative all'incertezza nelle previsioni valanghe, in modo che gli utenti siano più consapevoli dell'incertezza intrinseca e del livello attuale di incertezza (Latosuo et al. 2024).

¹ - Il bias di conferma o pregiudizio di conferma è un bias cognitivo secondo il quale le persone tendono a rimanere ancorate all'ambito delimitato dalle loro convinzioni acquisite, tenendo di ricondurre a tale ambito qualsiasi situazione si trovino a sperimentare. Ovvero viene dato credito solo alle informazioni che sostengono le opinioni cui si è ancorati, ignorando quelle contrarie o sostenendo che la prova contraria sia falsa, oppure, in caso di ambiguità optando per la soluzione che sostiene la teoria prescelta. Tale bias di conferma non può essere eliminato ma solamente gestito mediante l'educazione e la formazione al pensiero critico [N.d.T.].

risultato è che, negli Stati Uniti, mostrare sicurezza di fronte all'incertezza ti porterà più lontano della competenza, probabilmente il più lontano possibile.

In un certo senso, **gli sciatori fuoripista hanno abbracciato l'incertezza**. Come sarà la neve oggi? Cosa c'è dall'altra parte del passo? D'altra parte, gli sciatori devono impegnarsi ad accettare l'incertezza delle valanghe. La neve appare, bianca e soffice, e premia le decisioni sbagliate con l'assenza di valanghe e l'euforia di sciare sulla neve fresca in pendii ripidi.

Accettare l'incertezza ed esprimerla in un terreno valanghivo richiede umiltà e vera fiducia in sé stessi. Alcuni ci riescono meglio di altri. Ci vuole impegno, ma accettare l'incertezza lascia spazio alla curiosità e porta alla padronanza sulle valanghe.

8. Fidati della scienza, ma verifica le previsioni

Se la scienza è sempre incerta, perché dovremmo fidarci di essa? Dovremmo fidarci della scienza perché è fatta da esperti (Oreskes 2021). Proprio come gli elettricisti sono esperti nell'installare l'impianto elettrico di casa tua e i piloti commerciali sono esperti nel pilotare i jet. Prenderesti mai la cloche da un pilota e piloteresti tu un aereo pieno di persone basandoti solo sulle tue convinzioni? Scartare la scienza in favore delle convinzioni è forse il più grande fattore umano. Uno che mette a rischio l'umanità, non solo un singolo sciatore.

Dovremmo fidarci della scienza in particolare quando c'è un consenso scientifico (Oreskes 2021, Kampourakis e McCain 2020, Aschwanden 2024). Il consenso nella scienza bilancia i pregiudizi. Ad esempio, il consenso derivante da un articolo di revisione su un argomento basato su 30 studi individuali, o da un gruppo di esperti (ad esempio il Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici). Se le prove sono sufficienti, sarebbe irrazionale non accettarle. Nota: il tema del consenso nel processo decisionale relativo alle valanghe necessita di un ulteriore approfondimento.

Quando si raggiunge un consenso scientifico, si parla di teoria o di



scienza consolidata. Il riscaldamento globale è una scienza consolidata: è misurato e indiscutibile. Meno consolidato, con maggiore incertezza, ma pur sempre oggetto di consenso scientifico, è il fatto che gli esseri umani stiano causando il cambiamento climatico. Dovremmo ignorare il consenso scientifico a causa di questa incertezza e non fare nulla per ridurre le emissioni prodotte dall'uomo? No, la posta in gioco è troppo alta per non fidarsi degli esperti; mettiamo a rischio l'umanità. Questo segue un principio noto come **Scommessa di Pascal**, che consiste nel considerare la posta in gioco dell'errore in una decisione basata sul rischio.

La posta in gioco dell'errore quando si prendono **decisioni relative alle valanghe** è alta. Se le prove che stai raccogliendo sul campo indicano che la neve potrebbe provocare una valanga, pecca per eccesso di cautela e allontanati perché potresti morire. Allo stesso modo, se sei uno sciatore fuoripista attivo e sei sicuro al 99,9% che un pendio non provocherà una valanga, è saggio considerare la posta in gioco dell'errore e allontanarsi. **L'incertezza esiste, ma la posta in gioco è alta.**

Come gli scienziati, dovremmo **fidarci dei previsori valanghe** perché è il loro lavoro, lo svolgono bene ed è questa l'opinione comune. Quando il livello di pericolo previsto è «3 - Marcato», è pru-

dente evitare terreni complessi, anche se le nostre osservazioni indicano un pericolo «2 - Moderato» o «1 - Debole», poiché le conseguenze di un errore sono troppo gravi. D'altra parte, non vogliamo rimanere ancorati a un livello di pericolo previsto «1 - Debole» quando le osservazioni indicano un pericolo «2 - Moderato» o «3 - Marcato» (Costa 2021).

Quando si utilizza la previsione, **"dovremmo fidarci ma verificare"**. L'ex presidente Ronald Reagan rese famoso il proverbio russo ripetendolo al presidente russo Mikhail Gorbachev durante i colloqui sul disarmo nucleare. Poiché il nostro obiettivo di non rimanere travolti da una valanga è prioritario, dovremmo fidarci della previsione, ma verificarla con le nostre osservazioni. Così come non possiamo campionare ogni cigno per dimostrare che sono tutti bianchi, i previsori valanghe non possono campionare tutta il manto nevoso per dimostrare il livello di pericolo previsto. E anche se i previsori valanghe potessero campionare tutta il manto nevoso, questo sarebbe cambiato nel momento in cui ci si reca sul posto. Ciò sembra analogo al principio di indeterminazione di Heisenberg: è impossibile conoscere contemporaneamente sia la posizione che la quantità di moto di una particella con precisione perfetta.

9. Cambia idea

I bravi scienziati non si aggrappano alle proprie idee. Le idee cambiano man mano che raccolgono nuove prove, approfondiscono le loro conoscenze e si avvicinano alla verità. Lo psicologo **Daniel Kahneman** era famoso per la sua capacità di cambiare idea (Nesterak 2024): «*Mi fa piacere aver sbagliato, perché significa che ora sbaglio meno di prima*». Uno scienziato che si rifiuta di cambiare idea di fronte alle prove è destinato al bias di conferma o al bias di desiderabilità.

Sul **territorio aperto**, cambiare idea alla luce di nuove prove è importante per prendere decisioni corrette. Senza ripensare alla luce di nuove prove, si rimane ancorati a un'idea errata e si va incontro a un incidente.

L'aggiornamento bayesiano è un concetto importante per rivedere le proprie convinzioni alla luce di nuove prove, sia come metodo statistico in ambito scientifico sia come quadro decisionale in terreni valanghivi. A differenza della statistica

frequentista, che produce conclusioni più binarie (come un valore p che indica se un risultato è significativo o meno), i metodi bayesiani combinano le conoscenze pregresse con i nuovi dati per esprimere l'incertezza come grado di convinzione.

Il **pensiero bayesiano** è un approccio mentale importante per gestire l'incertezza quando si tratta di evitare le valanghe. Ad esempio, nel decidere se sciare su un pendio. Supponiamo che la tua convinzione iniziale che la neve possa provocare una valanga sia pari a 1 su 10.000, il che rientra nella tua tolleranza al rischio accettabile. Tuttavia, in prossimità della cima del pendio, un sondaggio con il bastoncino da sci rileva uno strato debole. Dopo aver aggiornato la tua convinzione a priori con questa nuova evidenza, la tua probabilità stimata che si verifichi una valanga scende a 1 su 100, un valore che non rientra nella tua tolleranza al rischio accettabile per sciare su quel pendio. Il problema è che **ci aggrappiamo con forza alle nostre convinzioni e opinioni**. Acquistiamo volentieri nuovi

sci ogni anno, ma cambiare idea su un obiettivo solo perché abbiamo notato un segnale di allarme? Non è così facile. Essere in grado di cambiare idea dimostra umiltà, sicurezza e una mentalità scientifica.

10. Collaborare

Gli scienziati di solito lavorano insieme. Il numero medio di autori di articoli scientifici sottoposti a revisione tra pari è 4,4. A volte vengono elencati più autori semplicemente per dimostrare la produttività accademica nella cultura del mondo accademico dove vale il *"pubblica o perisci"*. Anche i singoli autori si basano sul lavoro precedente di altri, come indicato nei riferimenti. Ad esempio, l'articolo di Gaume (2025) sul dibattito tra il distacco da taglio e quello anticrack in The Avalanche Review — non sottoposto a revisione tra pari — menziona numerosi colleghi che hanno contribuito. Gaume è uno dei sette autori di un articolo sottoposto a revisione tra pari su un argomento simile (Bobillier et al. 2025).

Come in ambito scientifico, i **compagni** di escursione che **collaborano in squadra** prendono decisioni migliori rispetto a uno sciatore che agisce da solo. Gli sciatori solitari rappresentano un quinto delle vittime di valanghe (McCammon e McNeil 2024). Collaborare con franchezza nei momenti decisivi permette di sfruttare la forza collettiva del gruppo per controbilanciare i pregiudizi e garantire decisioni più obiettive.

11. Iterare

La scienza è un ciclo che si autoalimenta, in cui la risposta a una domanda porta ad altre domande. Uno scienziato può concludere uno studio con una risposta alla domanda iniziale, ma nel frattempo sorgono altre domande, proprio come quando ci si trova in cima a una vetta e se ne vedono altre cinque che ora si vorrebbero sciare. Questo spinge gli scienziati curiosi e appassionati a dedicarsi a sempre più ricerche, nonostante gli orari lunghi e la scarsa retribuzione.

Come la scienza, **anche il processo di prevenzione delle valanghe è ite-**

Alcuni modi per aiutarti a cambiare idea.

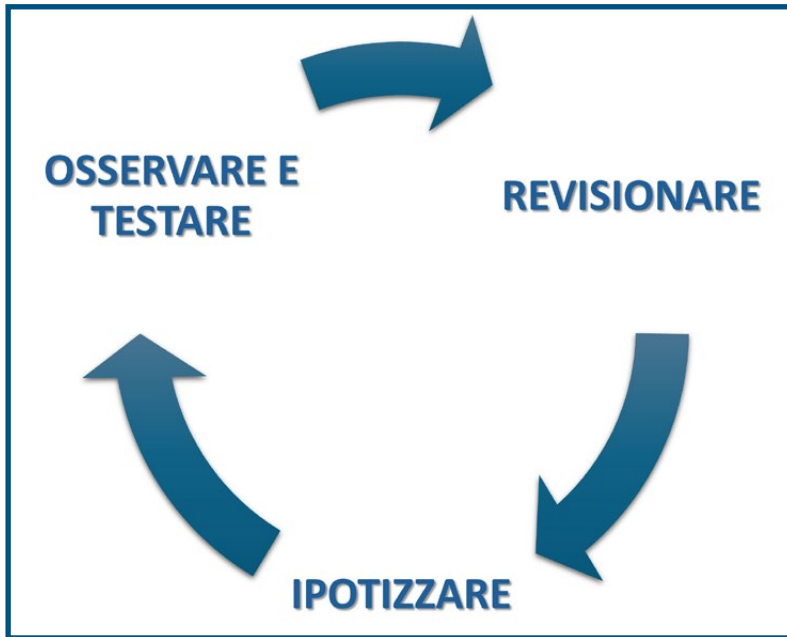
1) Sii ciò che apprezzi, non ciò in cui credi. Grant (2021) scrive: *"I valori sono i tuoi principi fondamentali nella vita: possono essere l'eccellenza e la generosità, la libertà e l'equità, oppure la sicurezza e l'integrità. Basare la tua identità su questo tipo di principi ti permette di mantenere una mente aperta sui modi migliori per promuoverli"*.

2) Crea un ambiente psicologicamente sicuro. Consenti ai tuoi partner di esprimere idee, domande, preoccupazioni o errori, sapendo che non saranno puniti o umiliati (Edmondson e Scott 2022). Un ambiente psicologicamente sicuro non significa essere accomodanti e mettere le persone a proprio agio, ma piuttosto essere sinceri e accettare il disagio.

3) Fallire con intelligenza. Le persone possono considerare il cambiare idea come un fallimento, ma il fallimento è uno spettro che va dal biasimevole, come quando si viola una prassi prestabilita, al lodevole, come nel caso della sperimentazione (Edmondson 2023). Cambiare idea e tornare indietro prima di raggiungere la vetta a causa di un brutto presentimento sulle condizioni valanghe è un fallimento (una decisione) lodevole e intelligente.

4) Riformulate l'errore come una vittoria. Fate come Kahneman (Nesterak 2024) e rendetevi conto che ogni volta che sbagliate, è un'occasione per imparare qualcosa di nuovo e avvicinarvi alla verità.

5) Evita il pregiudizio binario. Quando pensiamo velocemente, semplifichiamo per evitare la complessità, ma le cose raramente rientrano in due categorie (ad esempio, buono vs. cattivo, vero vs. falso). Rallentando possiamo considerare la gamma di possibilità (Kahneman 2011), rendendo più facile cambiare idea.



Schema del ciclo iterativo: la scienza e la prevenzione delle valanghe sono processi iterativi.

rativo. Si tratta di un ciclo ripetitivo che consiste nel formulare ipotesi sul manto nevoso, testare la neve e poi rivedere l'ipotesi sulla base delle nuove informazioni (LaChapelle 1980). Senza questo ciclo, si rimane ancorati alla propria impressione iniziale sulla neve, il che può rivelarsi fatale. Anche agli studenti dei corsi introduttivi sulle valanghe dovrebbe essere spiegato che il processo decisionale in materia di valanghe è un processo continuo. Fate attenzione allo sciatore il cui ciclo di verifica delle ipotesi si è arrestato.

12. Condividere i risultati

A meno che la scienza non sia proprietaria o segreta — ad esempio la ricetta della Coca Cola — dovrebbe essere condivisa con il pubblico e resa utile. La regola d'oro nella scienza è la condivisione in **articoli sottoposti a revisione tra pari**. Questi studi sono stati sottoposti a un rigoroso processo di revisione, in cui altri esperti del settore valutano il lavoro degli autori e accettano o rifiutano l'articolo. Se l'articolo viene accettato, viene pubblicato su una rivista scientifica affidabile, a cui altri scienziati possono fare riferimento e che possono citare. Alcuni studi scientifici sulle valanghe vengono pubblicati su riviste sottoposte a revisione tra pari come *Natural Hazards* o *Journal of Glaciology* (ad es.

LaChapelle 1980). Molti articoli scientifici si trovano nascosti in riviste che trattano argomenti diversi, come l'economia o la psicologia. Attualmente non esiste un punto di riferimento centrale per gli articoli scientifici sulle valanghe sottoposti a revisione tra pari. Abbiamo bisogno dello *Snow and Avalanche Journal*! Invece, la maggior parte della ricerca scientifica sulle valanghe raggiunge il pubblico attraverso presentazioni all'**International Snow Science Workshop**, accompagnate da una raccolta di articoli non sottoposti a revisione tra pari² negli atti della conferenza (arc.lib.montana.edu/snow-science/). Le

presentazioni e gli atti della conferenza sono un passo importante per la revisione tra pari, ma mancano della verifica degli articoli sottoposti a revisione tra pari. Sebbene la scienza delle valanghe sia importante, **è scollegata** dalla comunità pubblica delle valanghe. Gli articoli sono scritti in un formato scientifico formale - abstract, introduzione, metodi, risultati, discussione, conclusione - che è importante per il metodo scientifico, ma non scorrono come un articolo o un libro, e si perdono utili risultati di apprendimento (Hardesty 2024). Inoltre, gli scienziati scrivono spesso in terza persona, con la voce passiva, e usano un linguaggio specializzato, parole astratte e gergo - noto come "academese" - rendendo gli articoli ancora più difficili da leggere. Sebbene alcuni scienziati scrivano bene per il pubblico, molti articoli sulle valanghe rimangono inattivi, sepolti negli atti dell'ISSW o in riviste di campi apparentemente non correlati.

Un modo per avvicinare la scienza al grande pubblico consiste nel fatto che lo scienziato, o un giornalista, scriva sull'argomento utilizzando un linguaggio semplice, come si può vedere su siti quali *npr.org/sections/science* e *nytimes.com/section/science* o *scientificamerican.com*. Ad esempio, l'articolo di Gaume (2025) pubblicato su "The Avalanche Review" sulle valanghe da super-shear è scritto in modo eccellente



² - Nella realtà dal 2009 gli abstracts e gli extended abstracts presentati all'International Snow Science Workshops (ISSW) subiscono un sommario processo di revisione tra pari che stabilisce, in maniera anonima ed autonoma, quali abstracts sono considerati degni di accoglienza e se diventeranno presentazioni pubbliche o posters indipendentemente dalla scelta indicata dagli autori. Certamente tale processo di revisione tra pari non è alla stregua di quello adottato dalle più blasonate riviste scientifiche [NdT].



per la comunità che si occupa di valanghe. Un altro esempio è *The Starting Zone* (2025 - <https://avalanche.pressbooks.pub/>) di Karl Birkeland, che mira a colmare il divario tra scienziati, professionisti e appassionati di attività ricreative. Utilizzando una combinazione di fonti, tra cui articoli scientifici, articoli in linguaggio semplice, presentazioni e passaparola, le informazioni fornite dagli scienziati possono raggiungere il grande pubblico ed essere accolte con favore. Infine, **condividi le tue osservazioni** con il servizio di previsione valanghe, i partner e i colleghi. Evita il gergo, le abbreviazioni e gli acronimi come BSH o "mitigare". Sia che tu parli o scriva, usa esempi concreti e parole complete. *"Non abbiamo visto segnali di allarme, ma abbiamo riscontrato una struttura precaria intorno ai cristalli sfaccettati di Capodanno in una trincea a 4.500 piedi"*. Ci vuole impegno per condividere i risultati in modo efficace, ma ne vale la pena se avete a cuore la comunità delle valanghe.

SCIENZA E FORMAZIONE SULLE VALANGHE

Insegnare il pensiero scientifico agli studenti di valanghe non solo li aiuta a evitare le valanghe, ma contribuisce anche a una visione più ampia della comprensione e della fiducia nella scienza. Gli educatori in materia di valanghe possono insegnare

agli studenti che gran parte delle conoscenze sulle valanghe proviene dalla scienza, che la scienza si basa sul seguire un metodo e che alcuni aspetti del metodo scientifico (il pensiero scientifico) si applicano direttamente per evitare le valanghe.

CONCLUSIONE

Potremmo tornare all'epoca del Klondike e avvalerci delle conoscenze sulle valanghe tramandate da millenni. Sappiamo che funzionano, a patto di

evitare il più possibile i terreni a rischio valanghe. Ma molti di noi vogliono la neve fresca proprio su quei terreni. Per sopravvivere, ci serve qualcosa di più delle conoscenze tradizionali. La scienza è la nostra risposta.

Usare la scienza nel nostro ARTVA e sapere quali strati del manto nevoso sono sospetti ci dà un vantaggio evidente. Meno ovvio è capire come funziona la scienza, perché dovremmo fidarci di essa e come possiamo usare il pensiero scientifico per prendere decisioni migliori in caso di valanghe. Ne vale la pena, però. Non solo per evitare le valanghe, ma per il quadro più ampio della nostra sopravvivenza come esseri umani sulla Terra.

RINGRAZIAMENTI

Mille grazie per le revisioni e le discussioni, in particolare a: Eeva Latosuo, Bruce Jamieson, Dave Richards, Karl Birkeland, Kelly McNeil, Molly Stock e Roman Dial.

BIOGRAFIA

Joe è una guida alpina IFMGA con sede ad Anchorage, in Alaska. È cresciuto con genitori scienziati e ha conseguito un master in Scienze dei bacini idrografici. Joe è autore del libro **The Avalanche Factor**, disponibile su stockalpine.com.

Suggerimenti per l'insegnamento della scienza nei corsi sulle valanghe.

- 1) **La scienza è un metodo per costruire la conoscenza.**
- 2) **Gran parte delle conoscenze che utilizziamo per evitare le valanghe ci sono state fornite dagli scienziati.**
- 3) **Il pensiero scientifico ci aiuta a evitare le valanghe:**
 - 1) Utilizza un sistema (metodo) di prevenzione delle valanghe
 - 2) Utilizzate prove oggettive
 - 3) Cerca di essere obiettivo
 - 4) La curiosità sulle valanghe porta alla saggezza
 - 5) Formulate ipotesi su ciò che vedrete
 - 6) Falsare la neve stabile
 - 7) Accetta l'incertezza
 - 8) Fidati, ma verifica le previsioni
 - 9) Cambia idea
 - 10) Collabora con i tuoi compagni
 - 11) Evitare le valanghe è un processo iterativo (continuo)
 - 12) Condividi i risultati

* Osservare i cristalli in una trincea non è scienza della neve, ma piuttosto è l'utilizzo delle conoscenze scientifiche per osservare la neve.

BIBLIOGRAFIA

- ▶ Ahn, Woo-Kyoung. 2022. Thinking 101 .
- ▶ Aschwanden, Christie. 2024. Uncertain, Scientific American
- ▶ scientificamerican.com/podcast/science-talk/
- ▶ Berkeley, University of California. 2025. What Is Science?
- ▶ undsci.berkeley.edu/understanding-science-101/what-is-science/
- ▶ Bobillier, Grégoire; Trottet, Bertil; Bergfeld, Bastian; Simen-hois, Ron; van Herwijnen, Alec; Schweizer, Jürg; and Gaume, Johan. 2025. Supershear Crack Propagation in Snow Slab Avalanche Release: New Insights from Numerical Simulations and Field Measurements, Natural Hazards Earth System Sciences
- ▶ nhess.copernicus.org/articles/25/2215/2025/nhess-25-2215-2025.pdf
- ▶ Birkeland, Karl. 2024. The Starting Zone . thestartingzone-book.com
- ▶ Carpenter, Sarah. 2022. Observation Overload: How to Prioritize Data from Pits, Weather and Snowpack, Backcountry.
- ▶ Costa, Russ. 2021. Trust in Allah, But Tie Your Camel, drewhardesty.com . 16
- ▶ Edmondson, Amy C. 2023. Right Kind of Wrong: The Science of Failing Well
- ▶ Edmondson, Amy C and Scott, Kim. 2022. Follow these 4 steps to create psychological safety in your teams
- ▶ fastcompany.com/90814937/follow-these-4-steps-to-create-psychological-safety-in-your-teams
- ▶ Elder, Kelly and Birkeland, Karl. 1994. Snow Science, Necessary Instruments and the Scientific Method, The Avalanche Review 12:6.
- ▶ Gaume, Johan. 2025. Supershear Snow Slab Avalanches: Towards the End of the Shear Versus Anticrack Debate?, The Avalanche Review , 43:3.
- ▶ Grant, Adam. 2021. Think Again: The Power of Knowing What You Don't Know .
- ▶ Haegeli, Pascal; St. Clair, Anne; McNeil, Kelly; Mannberg, Andrea; and Hetland, Audun. 2023. Reflections on How to Improve the Contribution of Social Science Research to Avalanche Safety Practices, Proceedings of the International Snow Science Workshop.
- ▶ Hardesty, Drew. 2024. Meditation #60, Why Are Scientists Such Poor Messengers? drewhardesty.com
- ▶ Hutchinson, Jake. 2024. Experience, Expertise, and the Pursuit of Mastery, The Avalanche Review, 42:4
- ▶ Kampourakis, Kostas, and McCain, Kevin. 2020. Uncertainty: How it Makes Science Advance
- ▶ Kahneman, Daniel. 2011. Thinking, Fast and Slow .
- ▶ Kuhn, Thomas. 1962. The Structure of Scientific Revolutions.
- ▶ LaChapelle, Edward. 1980. The Fundamental Processes In Conventional Avalanche Forecasting, Journal of Glaciology , 29:94.
- ▶ LaChapelle, Edward. 2005. The Ascending Spiral, The Avalanche Review , 24:1.
- ▶ Latosuo, Eeva; Haegeli, Pascal; Demuth, Julie; and Greene, Ethan. 2024. Users Awareness and Response to Uncertainty Information in Public Avalanche Forecasts, Proceedings of the International Snow Science Workshop.
- ▶ McCammon, Ian; and McNeil, Kelly. 2024. Risk Management Trends in U.S. Backcountry Avalanche Accidents, Proceedings of the International Snow Science Workshop.
- ▶ McClung, David. 2023. The Avalanche Handbook , 4th edition.
- ▶ Mannberg, Andrea; Johansson, Maria; and Latosuo, Eeva. 2025. Exploring the Gendered Landscape of the Avalanche Safety Industry, Journal of Outdoor Recreation and Tourism.
- ▶ McCammon, 2004, Heuristic Traps, Avalanche News.
- ▶ Nesterak, Evan. 2024. Remembering Daniel Kahneman, Behavioral Scientist. behavioralscientist.org/remembering-daniel-kahneman-a-mosaic-of-memories-and-lessons/
- ▶ Oreskes, Naomi. 2021. Why Trust Science?
- ▶ Popper, Karl. 2002. The Logic of Scientific Discovery , second edition.
- ▶ Salovey, Peter. 2018. We Should Teach All Students in Every Discipline to Think Like Scientists, Scientific American.
- ▶ Simpson, Kirstie. 2002. The use of Traditional Aboriginal Knowledge in avalanche forecasting (Canada and Alaska). Proceedings of the International Snow Science Workshop.
- ▶ Stock, Joe. 2024. The Avalanche Factor . Stock, Molly. 1985. A Practical Guide to Graduate Research.





GLACIOLOGIA

54 IL MONITORAGGIO DEI
GHIACCIAI IN PIEMONTE

IL MONITORAGGIO DEI GHIACCIAI IN PIEMONTE

W. Alberto, D. Bormioli, M. Faletto, L. Lanteri,
L. Paro, G. Re Fiorentin, D. Viglietti & A. Salandin

DOI: 10.82089/NEV992026_5

As is known, the cryosphere of north-western Italy is out of balance with current climatic conditions.

Mass transfers from high elevations trigger cascading effects across different geomorphological environments (glacial, periglacial) and potentially involving anthropic areas.

In the context of rapid climate and geomorphological changes, Arpa Piemonte carries out annual glaciological campaigns with the aim of analysing the state of the glaciers, their evolution, and assess current instability and identify the early onset of new instabilities.

All glaciers in Piedmont are considered in the analyses: 161 glacial bodies covering a total area of 22 km², distributed across six main mountain ranges, with elevation reaching up to 4630 m on Monte Rosa. Arpa Piemonte conducts these activities in agreement with the Italian Glaciological Foundation and in accordance with the methods defined by the National Civil Protection Department.

The glacial monitoring follows a multi-scale approach, the process starts from a baseline dataset for all glaciers (unique name and code, perimeter, photos and reference year) and is updated every 2 years. Annual flyovers are planned over glaciers with high anthropic presence; the state of evolution is qualitatively assessed with respect to the previous year. Multiple annual observations and at least one annual photogrammetric survey are planned over glaciers that generate direct impacts on anthropized areas. The comparison of multi-temporal 3D models allows to recognize environmental transformations such as spatial extent, loss of ice volume, location and distribution of gravitative instabilities.

The collected data confirm the ongoing negative trend of deglaciation, with particularly effects on glaciers located below 3,200 m a.s.l. Spatial areal reduction involves 67% of glaciers since the 2022-2024 previous survey and 98% of glaciers over the last two decades.

In the context of climate change, the annual repetition of glaciological campaigns provides a solid basis for the study of the Piedmont cryosphere, strengthening the understanding of rapidly evolving geomorphological dynamics, for the early detection of instabilities at regional scale.

L'avvio sotto l'egida dell'ONU del Decennio d'azione per le scienze criosferiche (2025–2034), sforzo globale volto a potenziare la ricerca e a promuovere azioni urgenti per proteggere le aree glacializzate della Terra, rappresenta un esplicito invito per scienziati, governi e comunità di tutto il mondo a unirsi per proteggere la criosfera e salvaguardare i miliardi di persone che dipendono da essa per la propria sopravvivenza.

Arpa Piemonte accoglie la chiamata attraverso l'organizzazione di campagne glaciologiche annuali di osservazione e monitoraggio della criosfera regionale in un contesto di rapide trasformazioni climatiche ed ambientali; lo scopo delle campagne prevede l'analisi dello stato dei ghiacciai, la loro evoluzione, la valutazione delle instabilità in atto e l'identificazione precoce dell'insorgere di nuove instabilità.



L'ORGANIZZAZIONE DELLE CAMPAGNE DI RILIEVO

Dal 2022 ARPA Piemonte ha avviato campagne di osservazione e monitoraggio dell'ambiente glaciale piemontese e delle instabilità correlate, in accordo con i criteri dettati dal Gruppo di Lavoro sul rischio connesso a fenomeni di dissesto in ambiente glaciale e periglaciale, partecipato dall'Agenzia e guidato dal Dipartimento della Protezione Civile (AA.VV., 2025).

Dopo tre anni di attività, è in corso una standardizzazione delle informazioni raccolte con l'obiettivo di raggiungere e mantenere uno stato di conoscenza uniforme che rappresenta la registrazione dello stato più aggiornato possibile, il metro per definire la priorità di approfondimento e lo strumento di confronto per l'evoluzione futura dei corpi glaciali e delle aree circostanti. Il monitoraggio è articolato in più livelli di approfondimento sulla base delle dinamiche glaciali e periglaciali passate e

attuali che hanno interessato i singoli corpi glaciali, incrociate con la tipologia e la vicinanza degli elementi antropici esposti:

1. il popolamento della **baseline**, livello minimo ed uniforme di conoscenza della glaciologia piemontese, è costituita da ubicazione, nome e codice di anno e ortofoto di riferimento; la componente cartografica è sintetizzata nel livello "ghiacciai" del geoportale di Arpa Piemonte, con limiti aggiornati al 2022-2025 per tutti i corpi glaciali regionali; la rivisitazione dell'intera baseline, prodotta attraverso l'analisi di foto e ortofoto aeree, di immagini satellitari, è prevista ogni 2/3 anni;
2. il **riconoscimento qualitativo** dello stato evolutivo e delle trasformazioni avvenute nel corso dell'ultimo anno mediante confronto con la campagna precedente attraverso foto, video, note; le risultanze sono raccolte in una relazione glaciologica annuale e nelle schede che alimentano la campagna glaciologica nazionale della Fondazione Glaciologica Italiana-CGI;
3. il **confronto quantitativo** delle trasformazioni avvenute nel corso dell'ultimo anno in termini di estensione areale, volumetrica dei ghiacciai, ubicazione ed estensione delle instabilità mediante confronto di modelli 3D multitemporali; questi sono ottenuti tramite elaborazione fotogrammetrica delle immagini riprese durante i sorvoli

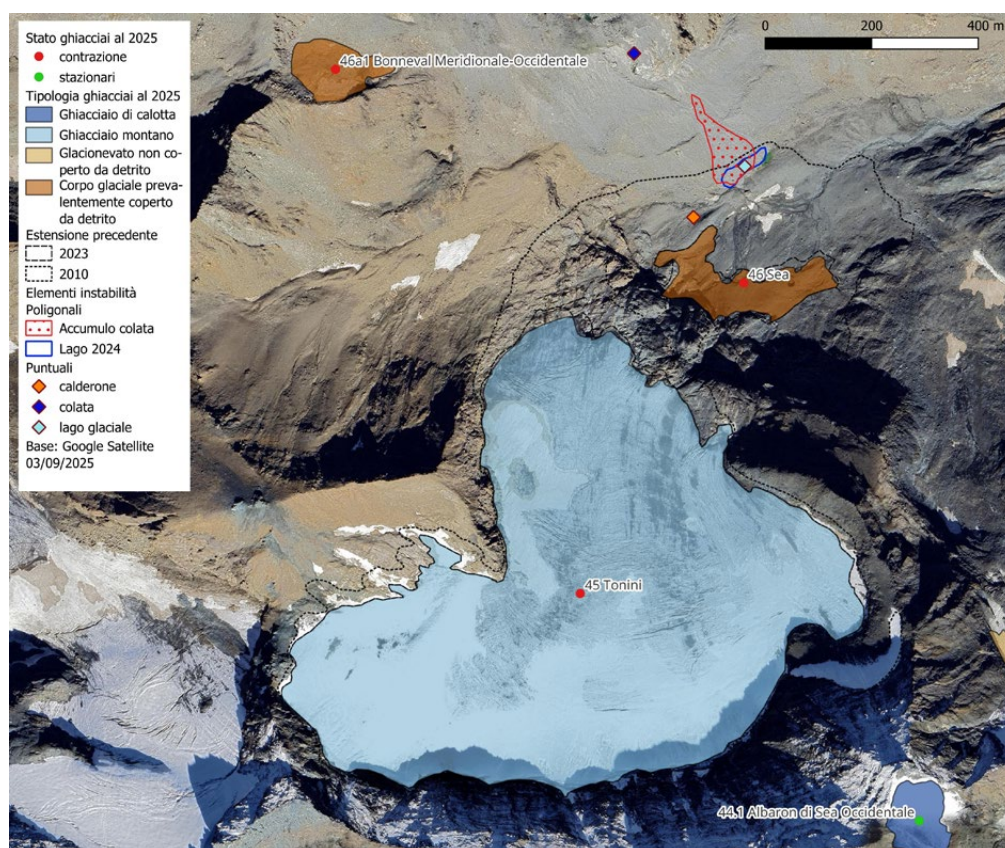
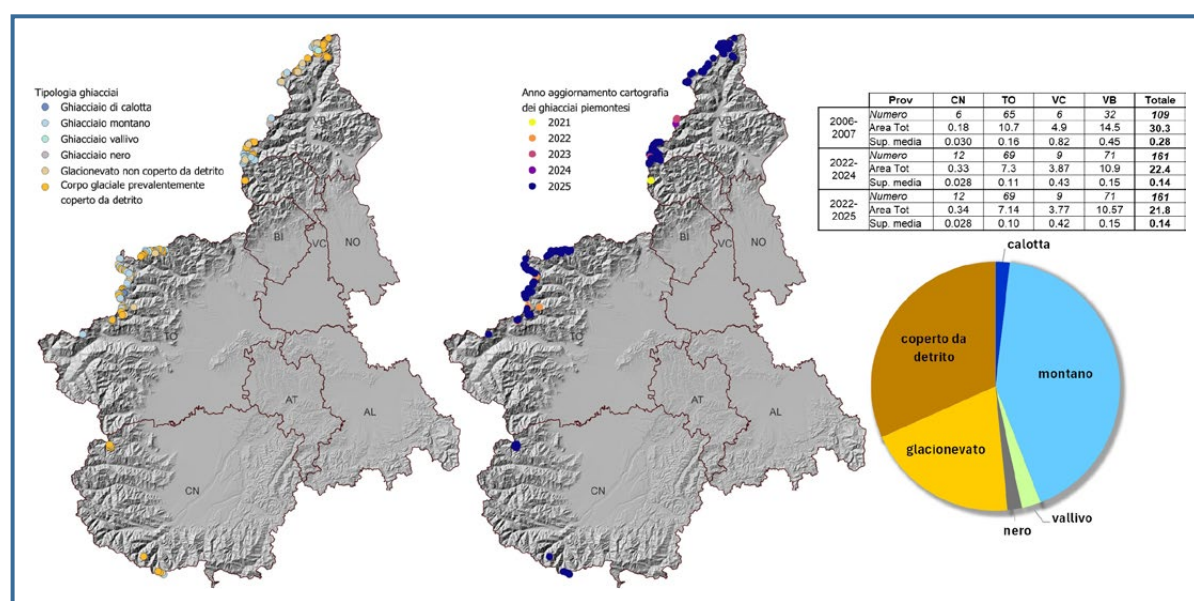


Figura 1: Esempio della baseline cartografica dei ghiacciai Tonini e Sea, alla testata della val Grande di Lanzo: sono riportati i limiti dei ghiacciai attuale e precedenti, il numero CGI, il nome e la tipologia del ghiacciaio, gli elementi di instabilità presenti, la cartografia e la data di ripresa.

Figura 2: Distribuzione e tipologia dei ghiacciai piemontesi.



secondo una procedura speditiva; le risultanze sono raccolte negli approfondimenti della relazione glaciologica annuale.

Nel complesso è risultata di grande importanza la collaborazione con gli altri enti presenti sul territorio: la CGI e il CNR-IRPI hanno arricchito le conoscenze con informazioni storiche, sull'ubicazione, sulla nomenclatura e sull'estensione dei ghiacciai e sulle instabilità geomorfologiche delle aree glaciali/periglaciali; il Parco Nazionale Gran Paradiso per i ghiacciai della Valle Orco, la Società Meteorologica Italiana per lo studio del ghiacciaio di Ciardoney. I sorvoli in elicottero sono eseguiti grazie al supporto con il Settore Protezione Civile della Regione Piemonte e con il Soccorso Alpino e Speleologico Piemontese.

IL CATASTO REGIONALE GHIACCIAI DEL PIEMONTE

In Italia, i ghiacciai hanno incominciato ad essere censiti negli anni 20 del Novecento (Porro, 1925) e al biennio geofisico 1957-1958 si deve il primo catasto corredato di cartografie di dettaglio. Nei decenni successivi, l'avvento della fotografia aerea e poi satellitare ha permesso un più rapido controllo delle variazioni glaciali. Negli ultimi anni, attraverso le campagne della CGI e poi anche di Arpa Piemonte, sono stati raccolti e omogeneizzati i dati della glaciologia piemontese. L'ubicazione e l'estensione areale aggiornata è stata cartografata grazie alla disponibilità di basi cartografiche recenti, di cui sono state utilizzate ortofoto rilevate in tarda estate, quando la copertura nevosa residua dell'inverno è al minimo e prima delle nevicate autunnali, fatto che permette di riconoscere al meglio la presenza di ghiaccio.

Il database aggiornato è disponibile sul geoportale istituzionale di Arpa Piemonte¹: il livello informativo ghiacciai contiene i poligoni dell'estensione aggiornata dei corpi glaciali e un layer puntuale che riporta l'ubicazione e la denominazione di tutti i ghiacciai compresi quelli recentemente estinti. Per un'identificazione univoca,

la denominazione e la numerazione dei ghiacciai sono in accordo e seguono quelle definite dalla CGI di cui i catasti, e in particolare la cartografia 2006-2007 (Salvatore et al., 2015), hanno rappresentato la base di partenza e il riferimento. Per la denominazione dei corpi glaciali smembrati o separati dalla massa principale si è seguito la codifica CGI, garantendo l'identificazione univoca dei singoli corpi glaciali, con unità areale minima di un ettaro.

La cartografia dell'estensione dei ghiacciai è stata redatta sulla base del riconoscimento dell'areale coperto dal ghiacciaio; in caso di copertura di neve fresca o copertura detritica sono state analizzate anche le ortofoto precedenti e, quando disponibili, le foto e le descrizioni raccolte durante le missioni di terreno. Ad ogni corpo glaciale è stata associata una tipologia che tiene conto dell'attuale stato di ciascuno:

- **Ghiacciai di calotta:** ghiacciai che ricoprono le vette.
- **Ghiacciai montani:** ghiacciai ubicati sui versanti montani.
- **Ghiacciai vallivi:** ghiacciai che raccolgono la confluenza di più colate glaciali e fluiscono all'interno di un solco vallivo.
- **Ghiacciai neri:** ghiacciai in prevalenza coperti di detrito che mostrano

evidenze di dinamica (crepacci, terminale, etc.).

- **Glacionevati non coperti da detrito:** corpi glaciali privi di dinamica, con prevalente ghiaccio affiorante.
- **Corpi glaciali prevalentemente coperti da detrito:** corpi privi di dinamica, riconoscibili solo per radi affioramenti di ghiaccio al di sotto una continua copertura detritica.

Ai poligoni sono associate inoltre informazioni sull'estensione e sulle quote massime, medie, minime di ogni corpo glaciale. Il database prevede un aggiornamento annuale, base per un efficace sistema di osservazione e controllo delle trasformazioni della criosfera.

LO STATO DEI GHIACCIAI IN PIEMONTE

Negli ultimi anni l'alta montagna piemontese ha visto alternarsi condizioni meteorologiche molto variabili; mentre le nevicate invernali hanno raggiunto estremi in senso negativo (2021/2022) e positivo (2023/2024), un fattore comune è stato il caldo estivo, ormai onnipresente. Nello stesso periodo le valli hanno sperimentato intensi eventi piovosi, talora di carattere estremo, che hanno profondamente coin-

Figura 3: Ghiaccio sepolto del ghiacciaio di Caprera, sul versante occidentale del Monviso (foto D. Bormioli, 11/10/2024).



GLACIOLOGIA

volto anche l'ambiente glaciale (si vedano i rapporti d'evento di Arpa Piemonte con una sintesi in Alberto et al., 2025).

Nelle Alpi Marittime e nelle Cozie meridionali, all'ombra dei massicci dei Gelas, dell'Argentera e del Monviso, sopravvivono i ghiacciai più meridionali delle Alpi,

ormai ridotti in piccoli corpi glaciali, talora privi di dinamica, definiti come glacionevati; la bassa quota, tutti sotto i 3000 m a parte quelli del Monviso, sottopone i ghiacciai ad intensa fusione estiva, riconoscibile nella comparsa di grotte (Figura 4) e falesie di ghiaccio; paradossalmente,

la stessa fusione ha messo in luce la presenza di ghiaccio sepolto sotto il detrito anche dove non se ne sospettava più la presenza (Figura 5).

Le Alpi Graie hanno rappresentato il luogo di elezione dell'alpinismo storico torinese e vette come la Bessanese e la Ciamarella emanano ancora oggi un forte fascino evocativo del tempo passato. L'ambiente glaciale delle alte valli di Lanzo pare aver seguito la stessa traiettoria: la calotta glaciale della Croce Rossa, un tempo rigonfia e fonte di preoccupazione per l'eventuale caduta di seracchi nel sottostante ed omonimo invaso idroelettrico, ora è appiattita all'interno del circo glaciale sotto la vetta (Figura 6). Il ghiacciaio della Bessanese ha lasciato testimonianza della sua possenza nelle magnifiche morene proprio davanti al Rifugio Gastaldi. Ora il ghiacciaio si trova ritirato all'ombra della parete Nord della Bessanese di cui il famoso spigolo Murari è stato sede di recenti crolli di roccia (Figura 7).

L'area è oggetto di monitoraggio da parte dell'Agenzia in collaborazione con il CNR-Irpi di Torino che qui ha istituito un laboratorio di alta quota per lo studio dei

Figura 4: L'intenso riscaldamento dell'estate 2023 ha generato un'ampia grotta nel ghiacciaio di Peirabroc (foto M. Faletto, 09/08/2023).



Figura 5: L'intensa ablazione dell'estate 2022 ha messo in luce la diffusa presenza di ghiaccio sepolto dal detrito lungo la sponda occidentale del Lago di Punta Fiume, Monviso; il ghiacciaio Quarnero, che occupava la conca dove sorge il lago, era dato per estinto già a inizio XXI secolo (foto D. Bormioli, 16/08/2022).





Figura 6: Vista panoramica da Nord-Est del ghiacciaio della Croce Rossa (foto W. Alberto, L. Lanteri, 26/08/2025), ripresa con teleobiettivo dal riferimento B_FR22 della Ciamarella.



Figura 7: Ghiacciaio della Bessane, a termine della stagione estiva 2025; la neve residua sopravvive in una stretta fascia a ridosso della parete Nord della Bessane che offre protezione all'irraggiamento; a sinistra l'accumulo di detrito generato dal crollo dello sperone roccioso alla base dello spigolo Murari (foto W. Alberto).

fenomeni di instabilità in alta quota.

In valle Orco il controllo dei ghiacciai è svolto in coordinamento con il Parco Nazionale del Gran Paradiso che da decenni si occupa della misura frontale dei ghiacciai, pubblicando annualmente dettagliate relazioni. Il glacialismo dell'area ha subito negli ultimi due decenni una netta riduzione areale e volumetrica, lasciando ormai pochi ghiacciai di grandi dimensioni: il Nel, separato in più corpi, il Noaschetta al cui ritiro si accompagna la formazione di laghi proglaciali (Figura 10) e il Ciardoney, oggetto di studio da parte della SMI che fornisce l'unico bilancio di massa regionale, con una serie più che trentennale.



Figura 8: Posizionamento topografico preciso della fronte della Ciamarella con tecnica GNSS differenziale, fonte ARPA Piemonte (foto L. Lanteri, 05/09/2025).

GLACIOLOGIA

Il massiccio del Monte Rosa, ed in particolare l'alta Valle Anzasca, è un caso esemplare delle tipologie di processi d'instabilità che possono svilupparsi in ambiente glaciale e periglaciale, e delle modifiche indotte dai cambiamenti climatici e am-

bientali in atto. La testata della valle è impostata nella maestosa parete Est del Monte Rosa: in passato, questa presentava una estesa copertura glaciale, libera da detrito, tanto da meritare l'appellativo di "parete himalayana". A partire dalla fine

degli anni 1980, e con rapidità crescente nel nuovo secolo, la copertura glaciale ha subito una riduzione areale, ma soprattutto volumetrica, impressionante, liberando estese aree di roccia e detrito. La rapidità e l'intensità delle trasformazioni in atto hanno determinato l'attivazione di una varietà di processi d'instabilità, che qui riassumono l'intera gamma dei fenomeni peculiari degli ambienti glaciali e periglaciali. Le trasformazioni del ghiacciaio del Belvedere sono tali da avere pochi eguali nelle Alpi e sono da richiamo per numerosi gruppi di ricerca, italiani e stranieri. Nell'area, l'Agenzia svolge periodici monitoraggi dell'evoluzione delle masse glaciali e dello stato di instabilità attraverso rilievi a terra, rilievi fotogrammetrici da elicottero, analisi di immagini satellitari. Attraverso la restituzione di modelli 3D aggiornati annualmente, si verifica l'estensione dei ghiacciai, il loro stato di evoluzione (Figura 11) con particolare attenzione alla comparsa di segni di instabilità sia delle masse di ghiaccio, sia degli speroni rocciosi. Infatti, in un'area relativamente ristretta, negli ultimi anni è stata riconosciuta una frequenza accelerata di eventi: i processi geomorfologici si attivano in quota e attraverso meccanismi di propagazione "a cascata" coinvolgono i versanti, le morene, i ghiacciai, arrivando ad interferire con le attività antropiche presenti nell'area. Eccezionale in tal senso è stata la sequenza di grandi crolli in roccia dal versante delle Locce nel

Figura 9: Versante nord della Ciamarella e sottostante ghiacciaio di Tonini, confronto tra inizio XX secolo (Cartolina viaggiata) e attuale (foto W. Alberto, 26/09/2023).



2023

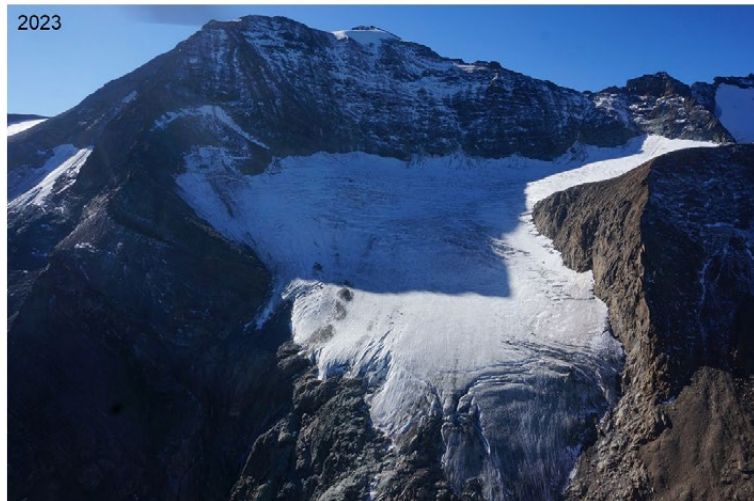


Figura 10: Lago epiglaciale presente lungo il fianco destro del ghiacciaio di Noaschetta da oltre vent'anni: la sua forma si è adattata all'evoluzione e all'abbassamento della superficie del ghiacciaio; nel 2025 la sponda in ghiaccio si presenta molto ripida, con scarpate e crepacci concentrici che denotano il processo di calving attivo (foto L. Paro, 16/09/2025).



2010, 2015, 2024 (Figura 12) i cui accumuli hanno a più riprese raggiunto l'omonimo lago; poco distante, il versante tra lo Jagerhorn e la Torre di Castelfranco ha prodotto colate detritiche in sequenza (2023, 2024): queste hanno fortemente inciso la morena laterale sinistra del ghiacciaio del Belvedere, raggiungendo e trasformando la superficie del ghiacciaio stesso, dove nel 2025 si è formato un grande inghiottitoio (Figura 13) che raccoglie i torrenti di Castelfranco e Piccolo Fillar, convogliandoli nei condotti subglaciali.

L'area del Sabbione, nelle Alpi Lepontine dell'alta Val Formazza, ampiamente glacializzata, ha visto nel XXI secolo una forte trasformazione di tutti i ghiacciai, con perdite eccezionali e smembramento dei corpi glaciali principali. Nel catasto 2006, gli 8 ghiacciai censiti occupavano una superficie complessiva di 4.8 km². Nell'aggiornamento 2025, si annovera l'estinzione del Gh. dei Camosci Orientale e i corpi glaciali censiti sono 17, per una superficie complessiva di 2.4 km², quasi dimezzata rispetto al 2006 (Figura 14). Il grande corpo del ghiacciaio Settentrionale del Sabbione, esteso per 1.4 km² nel 2006, si trova ora diviso in cinque settori separati da fasce rocciose che insieme non raggiungono gli 0.5 km²; la lingua non è più alimentata da monte e registra le maggiori perdite areali. La grande lingua del ghiacciaio Meridionale del Sabbione, ancora attivamente alimentata nel 2006, sta

perdendo gli apporti dei bacini da NW, per cui la fronte è sempre più arretrata rispetto al lago sottostante; più in quota, la separazione con il ghiacciaio del Lebendum

e con la calottina sommitale della Punta d'Arbola si ritiene ormai prossima, fatto che determinerà il definitivo smembramento del più grande ghiacciaio ossolano.

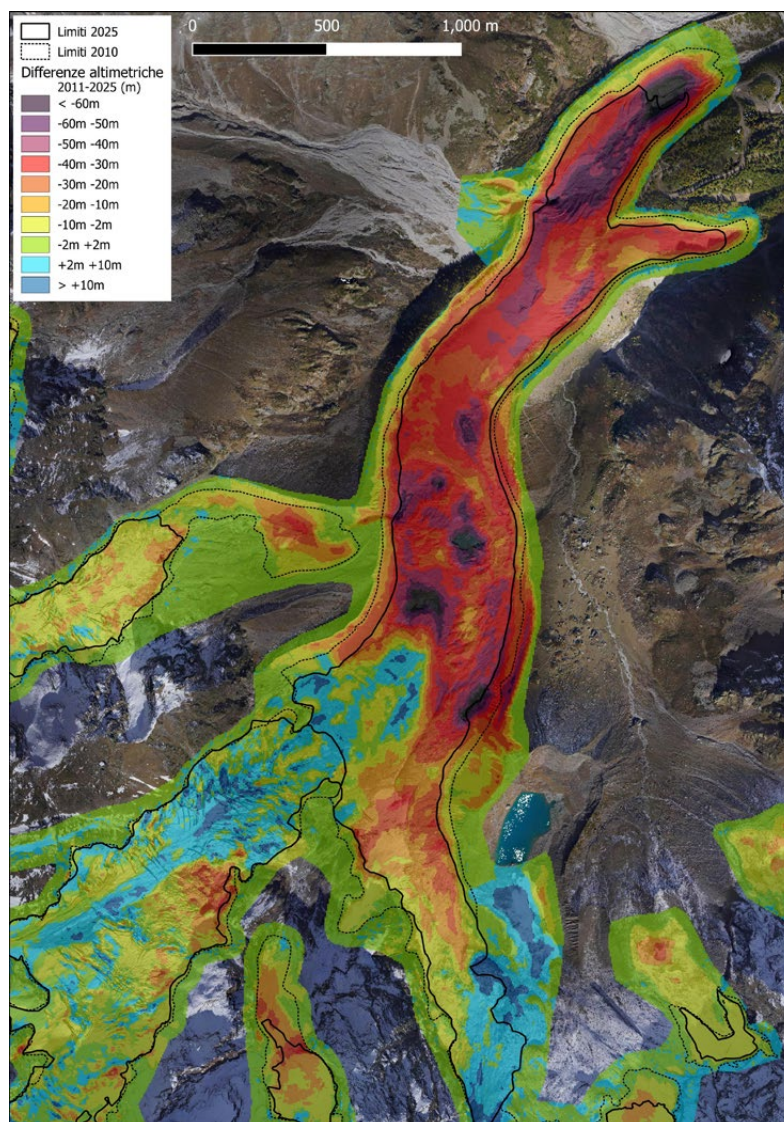


Figura 11: Variazione del ghiacciaio del Belvedere (Monte Rosa) in termini di estensione areale e quota altimetrica della superficie glaciale negli ultimi 15 anni (basi di riferimento: 2025 ortofoto e DEM Arpa Piemonte; 2011 DEM ICE Regione Piemonte; 2010 ortofoto Regione Piemonte).



Figura 12: Frana di crollo avvenuta il 26 dicembre 2024 in alta valle Anzasca. Il distacco è avvenuto poco sotto la cresta del Colle delle Locce, a circa 3300 m di quota; il materiale franato, dopo aver percorso l'intero ghiacciaio Settentrionale delle Locce, ha raggiunto l'omonimo lago mentre la polvere di roccia, ghiaccio e neve ha ricoperto l'intera conca (foto L. Tondat - Soccorso Alpino).

GLACIOLOGIA

Le cause sono da ricercarsi nel progressivo innalzamento della quota a cui la neve invernale sopravvive all'estate, per cui gran parte della superficie dei ghiacciai perde la copertura nevosa e quindi la capacità di alimentare le sottostanti lingue glaciali, che per contro vedono aumentare la copertura detritica (Figura 15).

RISULTATI

I dati raccolti nelle recenti campagne

glaciologiche confermano il trend negativo di deglaciazione delle Alpi piemontesi, con particolare effetto per i ghiacciai (o le parti di questi) posti sotto i 3100/3200 m di quota. La superficie glacializzata complessiva in Piemonte si attesta a 21.8 km², segnando un nuovo minimo nella serie storica: in riferimento alla precedente campagna (dati 2022-2024), la riduzione areale coinvolge il 67% dei ghiacciai, quota che raggiunge il 98%

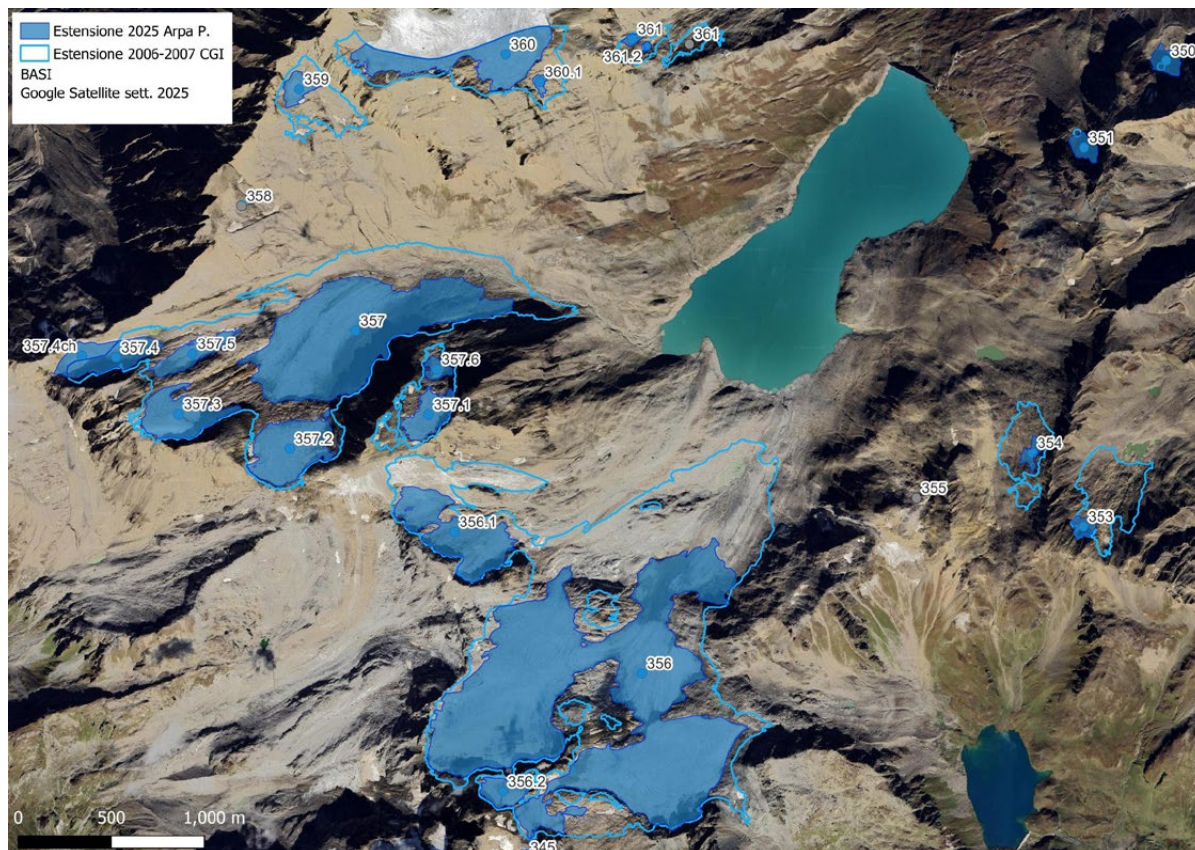
dei ghiacciai regionali se si estende l'analisi alle ultime due decadi.

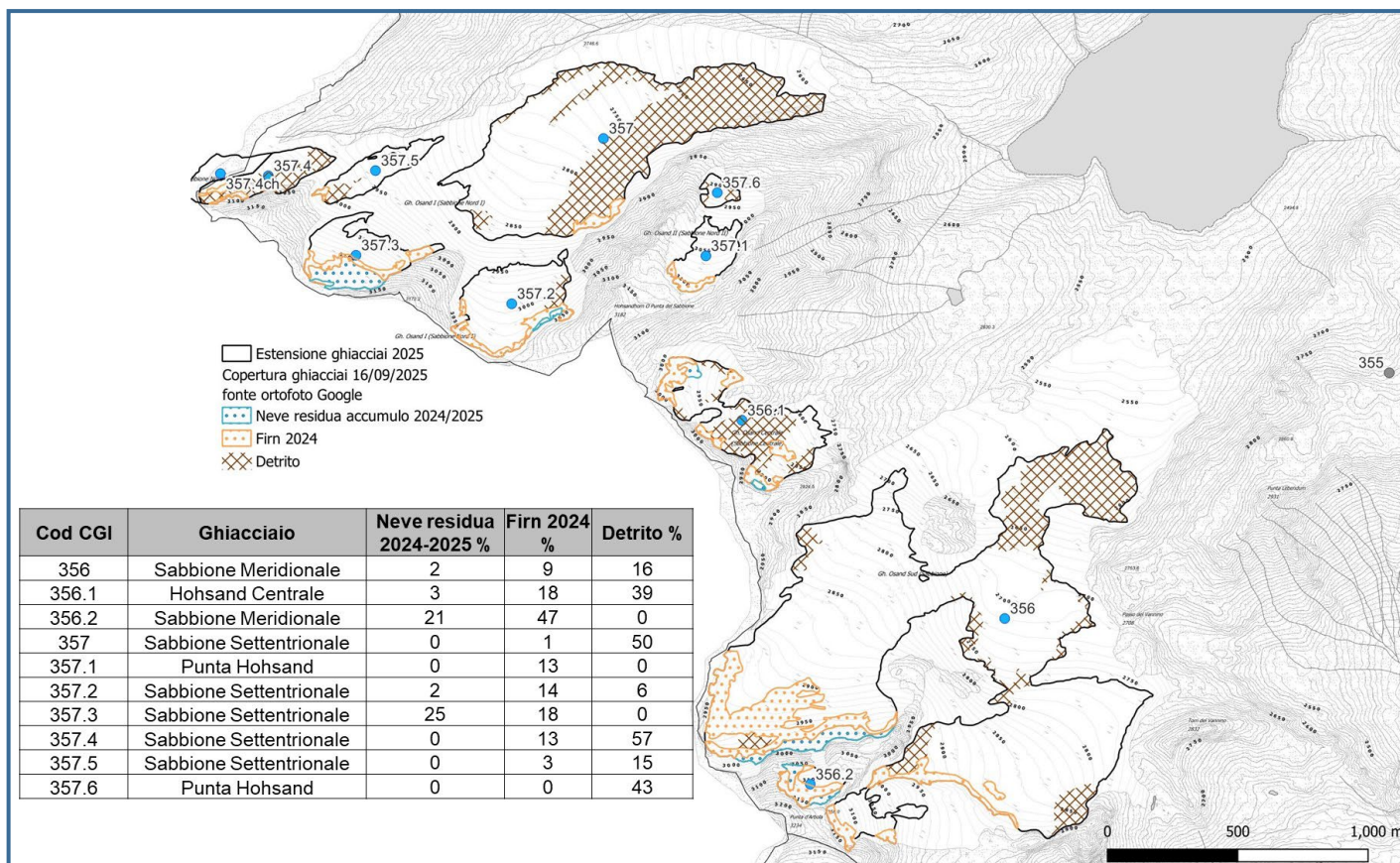
Nel contesto di cambiamento climatico, la ripetizione annuale delle campagne glaciologiche sta fornendo solide basi per lo studio della criosfera piemontese, rafforzando la conoscenza delle dinamiche geomorfologiche in rapida evoluzione, anche in ambienti difficilmente accessibili sull'intero territorio piemontese.

Figura 13: Vista da monte della grande cavità attraverso la quale i torrenti di Castelfranco e del Piccolo Fillar sono assorbiti dalla circolazione endoglaciale del ghiacciaio del Belvedere (foto M. Giardino, agosto 2025).



Figura 14: Riduzione delle masse glaciali nell'area del Sabbione, alta Val Formazza (VB); i numeri indicano la codifica CGI dei ghiacciai italiani.





BIBLIOGRAFIA

- ▶ AA.VV. (2025) - Rischio glaciale e periglaciale in ambiente alpino: un quadro Metodologico Dipartimento della Protezione Civile-Presidenza del Consiglio dei Ministri. Prima edizione in versione digitale dicembre 2025. ISBN 9791281195042
- ▶ Alberto W., Bormioli D., Faletto M., Lanteri L., Paro L., Re Fiorentin G., Viglietti D. & Salandin A. (2025). Fenomeni recenti di instabilità dell'ambiente glaciale piemontese. *Nimbus*, 93, 118-126.
- ▶ Porro, C. (1925) – Elenco dei Ghiacciai Italiani. Parma, Ufficio Idrografico del Po, 61 p.
- ▶ Salvatore, M. C., Zanoner, T., Baroni, C., Carton, A., Banchieri, F. A., Viani, C., ... & Perotti, L. (2015). The state of Italian glaciers: A snapshot of the 2006-2007 hydrological period. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 38(2), 175-198.

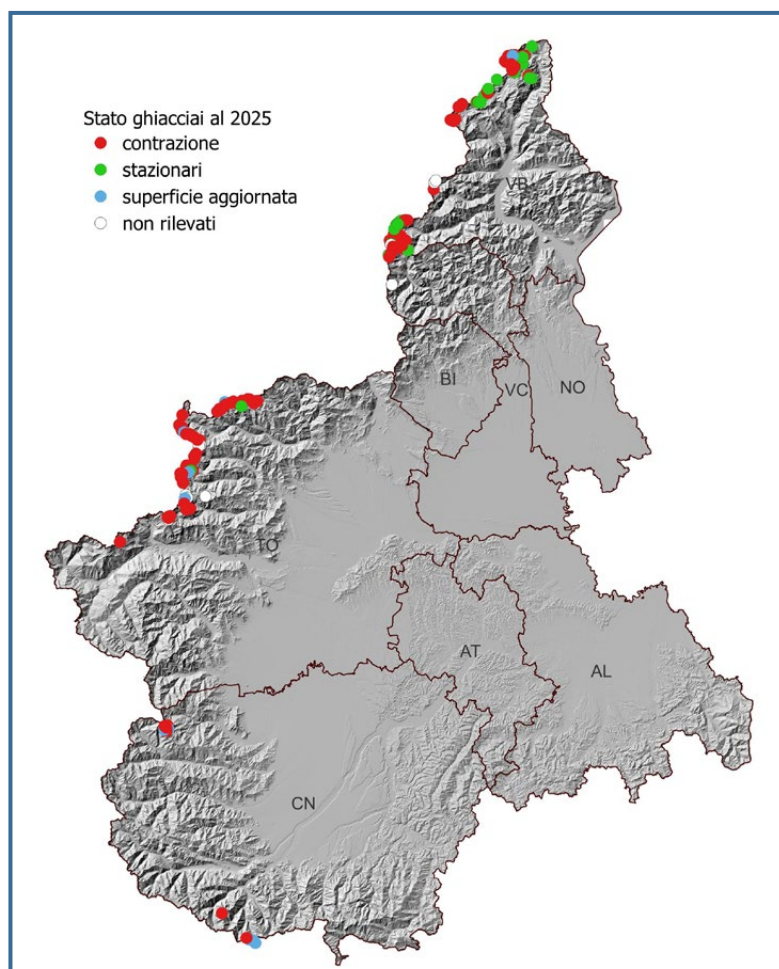


Figura 15: Analisi della copertura nevosa a fine stagione di ablazione 2025: la neve residua dell'inverno 2024/2025 risulta quasi completamente scomparsa per la maggior parte dei ghiacciai dell'area; relativamente più abbondante il residuo 2023/2024, ma comunque limitato a sottili fasce al piede delle pareti.

Figura 16: Stato dei ghiacciai a termine della campagna 2025 ed in riferimento alla precedente campagna (rilievi 2022-2024)

