

CLUB ALPINO ITALIANO

IL BOLLETTINO

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE

PERIODICO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

OTTOBRE 2026

In copertina: Grotta frontale del Ghiacciaio di Lares nel Parco Naturale Adamello Brenta - Gruppo Adamello Presanella - ph Cristian Ferrari - Ottobre 2022

CLUB ALPINO ITALIANO

IL BOLLETTINO

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE

PERIODICO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

OTTOBRE 2026

CLUB ALPINO ITALIANO
Via Petrella, 19 - 20124 Milano

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE

© 2026 - CAI - Comitato Scientifico Centrale

ISBN 978 88 7982 180 3

Proprietà letteraria riservata
Riproduzione vietata senza l'autorizzazione scritta da parte del CAI

Comitato di redazione:
Gianni Frigo, Marco Peresani, Franco Pettenati, Giovanni Margheritini

Progettazione grafica e impaginazione:
Giovanni Margheritini

Il Comitato Scientifico Centrale ringrazia, per aver effettuato la lettura critica degli articoli contenuti in questo Bollettino, il dott. Franco Pettenati dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, il dott. Marco Peresani dell'Università di Ferrara - Dipartimento Studi Umanistici: Scienze Preistoriche e Antropologiche, il dott. Claudio Smiraglia del Dipartimento Scienze della Terra dell'Università di Milano, il dott. Giuliano Bonanomi dell'Università Federico II di Napoli - Dipartimento di Agraria.

Pubblicato sul sito www.csc.cai.it nel mese di ottobre 2026
in pdf scaricabile gratuitamente

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE
(periodo 2026 - 2028)

Presidente	Gianni Frigo
Vice presidente	Marco Peresani
Componenti	Enrica Lemmi
	Giuliano Bonanomi
	Marco Menichetti
	Michele Carriero
	Franco Pettenati
Segretario esterno	Antonino Gullotta
Referenti CC e CDC	
- Consigliere centrale	Ivano Rodighiero
- Componente CDC	Mario Vaccarella

IL BOLLETTINO

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE

PERIODICO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

SOMMARIO

7 EDITORIALE

ARTICOLI SCIENTIFICI

11 Clasudio Smiraglia, Davide Fugazza, Michele Di Biase, Pietro Sella, Guglielmina Diolaiuti
L'evoluzione del Ghiacciaio Baltoro al K2 fra "*Karakoram Anomaly*" e "*Surge*" - Il contributo della fotografia diacronica e del telerilevamento
https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_01

35 Massimo Santoni, Francesca Vallongo, Cristian Ferrari
I ghiacciai visti dallo spazio - Sviluppi e prospettive dell'approccio integrato della Commissione Geologica della SAT tra telerilevamento e rilievi sul campo
https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_02

49 Andrea Securo, Renato Colucci
Il declino dei ghiacciai nelle Dolomiti dagli anni '80 a oggi
https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_03

59 Andrea Ferrari, Giovanni Cilia, Matteo Conti, Carlo Polidori, Gianalberto Losapio
Quando i ghiacciai si ritirano - Conseguenze per la biodiversità degli impollinatori, le reti trofiche e i patogeni delle api
https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_04

73 Anna Baldo
Sulle tracce del nuovo Artico - Ricerca italiana alla base "Dirigibile Italia", Ny Ålesund, Svalbard
https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_05

87 Roberta Bosu
Chi parla per l'Antartide? - Connessioni planetarie, diritti della natura e una nuova idea di diplomazia *(testo in italiano e in inglese a seguire - text in Italian and English follows)*
https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_06

INDICE PER ARGOMENTI

EDITORIALE

Prendendo a prestito la frase dal titolo di un'opera di un'autrice italiana che mi fa sempre piacere leggere, per l'emisfero boreale quella che abbiamo appena attraversato è stata senz'altro "una lunga estate crudele", forse la più crudele da quando si registrano dati meteorologici.

Scarsità di precipitazioni prolungate alternate a fenomeni estremamente intensi ma micro localizzati, temperature tropicali anche alle alte latitudini, zero termico a quattro/cinquemila metri per settimane quando non per mesi...

E allora: crolli, frane, collassi di interi versanti, *debris flow* che travolgono e seppelliscono tutto ciò che trovano lungo il loro percorso per chilometri...

Ma anche: incendi indomabili, siccità, desertificazione e carestie, migrazioni disperate...

E, nel nostro piccolo mondo alpestre: faggi e carpini che disseccano le foglie come in autunno per limitare la perdita d'acqua, mulattiere e sentieri resi impraticabili dall'erosione idrica o dalla caduta continua di materiali lungo i versanti a causa della degradazione del permafrost, rifugi costretti a chiudere perché non più in grado di garantire i servizi essenziali per l'accoglienza...

Ciò che aspettavamo nei prossimi decenni ci è già piombato addosso, con buona pace dei negazionisti e degli struzzi!

Risulta quindi quanto mai tempestivo il tema che già in primavera ci eravamo dati per questo numero del Bollettino: la criosfera, in Italia e nel Mondo.

Il primo lavoro rappresenta un contributo straordinario per la comprensione della cosiddetta *"Karakoram Anomaly"* cioè l'"anomalia del Karakorum" dove, mentre si assisteva a un generale arretramento registrato della fronte dai ghiacciai vallivi in tutto il Mondo, l'estensione della superficie glaciale sembrava aumentare allungando la copertura del ghiaccio verso valle.

In realtà anche qui il volume complessivo dei ghiacciai diminuisce ma per rilevarlo è necessario valutarne non solo la superficie, ma anche lo spessore!

Attraverso le tecniche della fotografia diacronica integrate al telerilevamento da satellite si è riusciti a dimostrare che le fronti dei ghiacciai considerati, pur soggette a oscillazioni ("*surge*"), siano rimaste sostanzialmente dov'erano nell'ultimo centinaio di anni, a fronte però di una perdita di massa glaciale sempre più importante.

Stessa superficie X minor spessore = minor volume di ghiaccio... e l'anomalia formale rientra nella norma sostanziale.

Il secondo intervento riguarda nuovi metodi che sfruttano in maniera più sofisticata, e integrata, le tecniche di analisi satellitare per determinare le variazioni areali e volumetriche dei principali ghiacciai del Nord Est delle Alpi italiane.

L'integrazione tra i tradizionali sistemi di rilevamento passivi, che lavorano sulle bande della radiazione infrarossa riflessa, con le analisi che utilizzano i sensori attivi, che operano invece su onde radar emesse dagli strumenti stessi e rilevate come "eco" restituito dalla superficie indagata, porta a significativi passi in avanti sia per quanto riguarda i problemi interpretativi generati dalla copertura nuvolosa che da quelli dovuti alla presenza di detriti rocciosi che sovente coprono la massa glaciale, rendendola spesso impossibile da rilevare con il telerilevamento classico.

La disponibilità di dati derivanti da vettori dotati di altimetri laser satellitari, come ICESat-2, sta aprendo nuove potenzialità per quantificare le variazioni di spessore dei corpi glaciali e ottenere così la famosa "terza dimensione", indispensabile per calcolarne correttamente il bilancio di massa.

"Il declino dei ghiacciai nelle Dolomiti dagli anni '80 a oggi" è l'argomento del terzo brano, che non permette illusioni: la linea di equilibrio dei ghiacciai dolomitici si è inesorabilmente alzata negli ultimi anni ai 3300 m slm. Questo significa che al di sotto di quella quota non può più formarsi ghiaccio per alimentare la zona di ablazione e visto che la Punta Penia della Marmolada, cioè la cima più alta delle Dolomiti, quota 3343 m è chiaro quale sarà il destino delle masse glaciali presenti su queste montagne. E molto prima delle peggiori previsioni fatte in precedenza.

Una piccola precisazione vale la pena di farla: mediamente le precipitazioni nevose complessive non sono diminuite! Sono state le lunghe estati calde che hanno portato alla fusione completa delle nevi invernali, così come di buona parte del ghiaccio accumulato in precedenza.

Passando al quarto studio, si espone una indagine riguardante la seriazione ecosistemica che si innesca come conseguenza della ritirata dei ghiacciai e la relativa messa a disposizione per piante e animali di superfici precedentemente coperte da essi.

I ricercatori hanno analizzato lo spazio periglaciale del ghiacciaio del Mont Miné (Vallese, Svizzera), riuscendo a identificare attraverso un gradiente spazio temporale, che si estende per oltre 2,5 km dall'attuale fronte glaciale e che esprime più di 140 anni di deglaciazione, le variazioni delle successioni ecologiche negli ecosistemi.

Si rileva come a un iniziale aumento della biodiversità nei primi decenni, dovuto al moltiplicarsi della variabilità degli habitat che porta all'ingresso di specie ad alta specializzazione e ben differenziate, corrisponda col passare del tempo l'affermarsi di strutture più omogenee ed estese ma meno complesse, dove le specie più generaliste prendono il sopravvento.

Che siano proprio i fattori di disturbo l'origine della meravigliosa varietà che ci circonda?

Nella quinta relazione vengono illustrate le attività e le ricerche che hanno luogo nel corso dell'anno alla stazione artica italiana "Dirigibile Italia", Ny Ålesund, nelle isole Svalbard, gestita dal CNR.

E il punto di vista da cui avviene la narrazione è piuttosto particolare, essendo quello della capostazione che infatti potrete vedere nelle foto impegnata nei suoi compiti: garantire la continuità delle serie storiche di rilevamento dei dati strumentali e delle osservazioni ambientali, coordinare le attività dei diversi gruppi di ricercatori presenti di volta in volta alla stazione e garantirne la sicurezza durante le uscite in ambiente aperto, rappresentare i nostri ricercatori e la nostra Nazione nei rapporti con gli enti locali e con gli altri gruppi di studiosi. Il fatto che un ruolo così impegnativo sia svolto da una giovane donna depone a favore delle pari opportunità: forse, almeno in quest'ambito, siamo più avanti di quanto comunemente si creda!

L'ultimo articolo ci porta all'altro estremo del Pianeta, in Antartide, ponendo fin dal titolo una domanda che va ben oltre il quesito che sembra venir posto: "Chi parla per l'Antartide?"

In esso si evidenzia come il continente meridionale sia tutt'altro che remoto, di come interagisca direttamente con la litosfera, l'idrosfera e l'atmosfera dell'intero sistema Terra e, conseguentemente, con la sottilissima pellicola che lo avvolge: la biosfera.

Ma quello che colpisce di più, nella lettura, è la straordinaria visione che sta alla base del quesito posto nel titolo: lo spostare il quadro di riferimento dalla gestione della natura come risorsa al riconoscimento degli ecosistemi come entità titolari di diritti.

L'idea è affascinante e meravigliosa ed è senza dubbio necessaria al cambio di paradigma che si rende indispensabile nel rapporto tra l'umanità, volutamente minuscola, e la dimora in cui vive.

È quindi con orgoglio che vi proponiamo questo numero del Bollettino del CSC, quasi una monografia sulla criosfera, dove a fianco dei problemi vi sono però anche i semi di possibili futuri.

Gianni Frigo
Presidente del Comitato Scientifico Centrale
del Club Alpino Italiano



In viaggio sull'iceberg - ph Wikimedia Commons

ARTICOLI SCIENTIFICI



Fra i seracchi del Ghiacciaio Meridionale dei Gasherbrum, colata che confluisce nel Ghiacciaio degli Abruzzi - ph Claudio Smiraglia - Spedizione Quota 8000 - 1985

https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_01

L'evoluzione del Ghiacciaio Baltoro al K2 fra "*Karakoram Anomaly*" e "*Surge*"

Il contributo della fotografia diacronica e del telerilevamento

Claudio Smiraglia[1][2][3], Davide Fugazza[2][4], Michele Di Biase[4][6][7], Pietro Sella[5], Guglielmina Diolaiuti[2][4],

1. *già Università degli Studi di Milano*
2. *Fondazione Glaciologica Italiana*
3. *Gruppo Italiano Scrittori di Montagna*
4. *Università degli Studi di Milano - UNIMI ESP*
5. *Fondazione Sella; CAI Biella*
6. *Università Ca' Foscari, Venezia*
7. *Associazione EvK2CNR*

Riassunto

Il Ghiacciaio Baltoro, uno dei maggiori ghiacciai vallivi extra-polari, rappresenta un caso di studio particolarmente significativo per analizzare l'evoluzione dei ghiacciai del Karakorum, regione nota per la presenza della cosiddetta *Karakoram Anomaly* e di frequenti fenomeni di *surge*. In questo lavoro l'evoluzione del Baltoro e di un importante suo ghiacciaio tributario (Liligo) è stata ricostruita mediante il confronto tra le fotografie storiche realizzate da Vittorio Sella durante la spedizione del Duca degli Abruzzi del 1909 e le immagini replicate da Pietro Sella nel 2024, integrate da osservazioni derivate dal telerilevamento satellitare. I confronti fotografici evidenziano una sostanziale stabilità della posizione frontale del Baltoro nell'arco di oltre un secolo, accompagnata tuttavia da una significativa riduzione dello spessore glaciale, particolarmente evidente nel settore medio-inferiore e nelle aree di confluenza con i principali ghiacciai tributari. Le analisi satellitari hanno inoltre permesso di stimare per l'estate 2023 una copertura detritica pari a circa 178,4 km², corrispondente al 22,6% della superficie del ghiacciaio. Particolarmente significativa risulta l'evoluzione del Ghiacciaio Liligo, le cui variazioni morfologiche e frontali documentano fasi alterne di avanzata e regressione compatibili con una dinamica di tipo *surge*. I risultati confermano l'efficacia della fotografia diacronica, integrata con il telerilevamento, come strumento per la ricostruzione delle trasformazioni glaciali su scala secolare e per la comprensione dell'evoluzione recente dei ghiacciai del Karakorum.

Abstract: The Evolution of the Baltoro Glacier at K2 between the "Karakoram Anomaly" and "Surge"

Baltoro Glacier, one of the largest extra-polar valley glaciers, represents an outstanding case study for investigating glacier evolution in the Karakoram, a region characterized by the so-called Karakoram Anomaly and by the occurrence of glacier surges. This study reconstructs the evolution of Baltoro Glacier and one selected tributary glacier (Liligo) through the comparison of historical photographs taken by Vittorio Sella during the Duke of Abruzzi expedition in 1909 and repeat photographs acquired by Pietro Sella in 2024, integrated with satellite remote sensing observations. The photographic comparison reveals a substantial stability of the glacier terminus over more than a century, accompanied by a marked reduction in glacier thickness, particularly evident in the middle and lower sectors of the glacier and at the confluences with major tributaries. Satellite analyses indicate that supraglacial debris covered approximately 178.4 km², corresponding to 22.6% of the glacier surface during summer 2023. The evolution of the Liligo Glacier is especially noteworthy, as its documented frontal and morphological fluctuations suggest alternating phases of advance and retreat consistent with surge-type behaviour. The results demonstrate the value of integrating repeat photography and remote sensing techniques for reconstructing century-scale glacier changes and improving the understanding of recent glacier evolution in the Karakoram region.

Introduzione

La riduzione di massa dei ghiacciai montani rappresenta uno degli indicatori più evidenti dei cambiamenti climatici in atto. I dati del *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) mostrano come la perdita di massa glaciale abbia subito una forte accelerazione negli ultimi decenni, passando da circa 100 Gt anno^{-1} nel periodo 1976-1995 a oltre 390 Gt anno^{-1} nel decennio 2016-2025 (WGMS Network, 2026; GlaMBIE team, 2025). Questa tendenza interessa la quasi totalità delle regioni glacializzate del pianeta e coinvolge anche il cosiddetto "Terzo Polo", ovvero l'insieme delle catene montuose che circondano l'Altopiano Tibetano e che ospitano la più vasta concentrazione di ghiacciai al di fuori delle regioni polari.

Fra queste regioni, il Karakorum occupa una posizione particolare. Diversi studi hanno infatti evidenziato come una parte dei suoi ghiacciai presenti condizioni di stabilità o persino deboli guadagni di

massa, in apparente contrasto con il comportamento osservato nella maggior parte delle altre aree glacializzate della Terra. Questo fenomeno è noto come *Karakoram Anomaly* (Hewitt, 2005; Farinotti *et al.*, 2020; Scott, 2024). Nella stessa regione sono inoltre diffusi i cosiddetti *surging glaciers*, caratterizzati dall'alternanza di lunghi periodi di quiescenza e brevi fasi di rapida accelerazione del flusso glaciale, con conseguenti avanzate della fronte e significative modificazioni morfologiche; è un fenomeno che viene prevalentemente attribuito a una modifica del sistema di drenaggio e di flusso delle acque subglaciali (Quincey *et al*., 2015; Davies, 2020; Ali & Hasnain, 2025). Entrambi i fenomeni testimoniano la complessità delle relazioni tra dinamica climatica e dinamica glaciale in ambiente alto-montano (Bocchiola & Diolaiuti, 2013; Minora *et al.*, 2016).

Tra i ghiacciai del Karakorum, il Baltoro rappresenta uno dei casi di studio più significativi. Oltre ad essere uno dei maggiori ghiacciai vallivi extra-polari, esso dispone infatti di un eccezionale patrimonio documentario costituito da rilievi topografici, osservazioni glaciologiche, fotografie storiche e dati satellitari raccolti nel corso di oltre un secolo di esplorazioni e ricerche scientifiche. In particolare, le fotografie realizzate da Vittorio Sella durante la spedizione del Duca degli Abruzzi del 1909 costituiscono una delle più importanti testimonianze iconografiche storiche dell'area del K2 e del Baltoro.

La fotografia diacronica (*repeat photography*) rappresenta uno strumento ampiamente utilizzato per documentare l'evoluzione dei paesaggi glaciali e delle loro caratteristiche morfologiche, consentendo confronti diretti tra immagini acquisite in epoche diverse (Byers, 2007; Nüsser & Schmidt, 2021; Smiraglia & Scotti, 2022).

Negli ultimi decenni tale approccio è stato affiancato dalle tecniche di telerilevamento satellitare, che consentono di monitorare con elevato dettaglio parametri quali variazioni areali e volumetriche, velocità di flusso, copertura detritica e distribuzione della neve residua (Kargel *et al*., 2014; Ranzi *et al.*, 2017).

In questo contesto, il presente contributo si propone di analizzare l'evoluzione recente del Ghiacciaio Baltoro attraverso il confronto tra le fotografie storiche realizzate da Vittorio Sella durante la spedizione del Duca degli Abruzzi nel 1909 e le immagini replicate da Pietro Sella nel 2024, integrando tali osservazioni con dati derivanti dal telerilevamento satellitare.

Le fotografie storiche di Vittorio Sella, integrate da fotografie replicate oltre un secolo dopo e da tecniche moderne di telerilevamento, consentono di ricostruire l'evoluzione secolare del Baltoro e dei ghiacciai tributari, evidenziando la coesistenza di apparente stabilità frontale, significativa perdita di spessore e dinamiche *surge* locali.

Area di studio e ricerche precedenti

Anche per il Karakorum fotografia diacronica e telerilevamento hanno rappresentato e continuano a rappresentare strumenti fondamentali per evidenziare i cambiamenti in atto in ambito glaciale. Fra i ghiacciai del Karakorum il Baltoro occupa sicuramente una posizione primaria. Ciò è dovuto certamente alle sue caratteristiche geomorfologiche e dimensionali.

È infatti il più esteso del Pakistan (copre una superficie di 756 km^2 e ha una lunghezza di 62 km) ed è uno dei più vasti al di fuori delle regioni polari. Le sue acque di fusione danno origine al fiume Braldu, un affluente dello Shigar, a sua volta affluente dell'Indo. Il suo settore superiore è circondato da cime elevate, alcune delle quali superano gli 8000 m; fra queste spicca sicuramente il K2, la seconda montagna più elevata della Terra (8611 m).

Il Baltoro costituisce forse il più classico esempio di "ghiacciaio vallivo a bacini composti" (Figura 1). Il suo settore superiore è formato dalla confluenza di più colate glaciali, come il Godwen-Austen che scende da Nord direttamente dal K2, e come l'Abruzzi, il Vigne e il Baltoro Sud, che scendono da Sud e da Sud-Est. La zona di confluenza si trova a circa 4600 m ed è denominata Circo Concordia. Da qui il Baltoro fluisce da Est verso Ovest ed è alimentato da numerose colate tributarie, come lo Younghusband, il Muzthag, il Trango da Nord, e il Biarchadi, lo Yermanendu e il Liligo da Sud (in realtà quest'ultimo ghiacciaio da oltre un secolo non confluisce più nel corpo principale del Baltoro). A valle del Circo Concordia la copertura detritica diviene estesa (oltre il 40% dell'area), fino a ricoprire quasi completamente la superficie del ghiacciaio nel settore inferiore, facendone quindi un tipico esempio di *debris covered glacier* o "ghiacciaio nero" (Diolaiuti *et al*., 2024).

Oltre alle sue caratteristiche geografico-fisiche, la notorietà del Baltoro è sicuramente legata alla storia della sua esplorazione e agli sviluppi della ricerca scientifica in quest'area, che ne fanno il ghiacciaio più studiato di tutto il Karakorum e forse anche dell'intero "Terzo Polo". Va anche ricordato che il Baltoro ha sempre rappresentato la via di accesso più frequentata per il campo base del K2 e per tentare la salita di questa cima, itinerario lungo il quale ogni estate transita oltre un migliaio fra escursionisti e alpinisti, accompagnati da almeno 6000 portatori, che creano un evidente impatto ambientale (Senese *et al*., 2025; Villotta, 2026).

Gli studi scientifici in campo glaciologico dedicati al Baltoro sono chiaramente numerosissimi a partire dalla seconda metà del XIX secolo. Per una sintesi si rimanda al già citato lavoro di Diolaiuti *et*

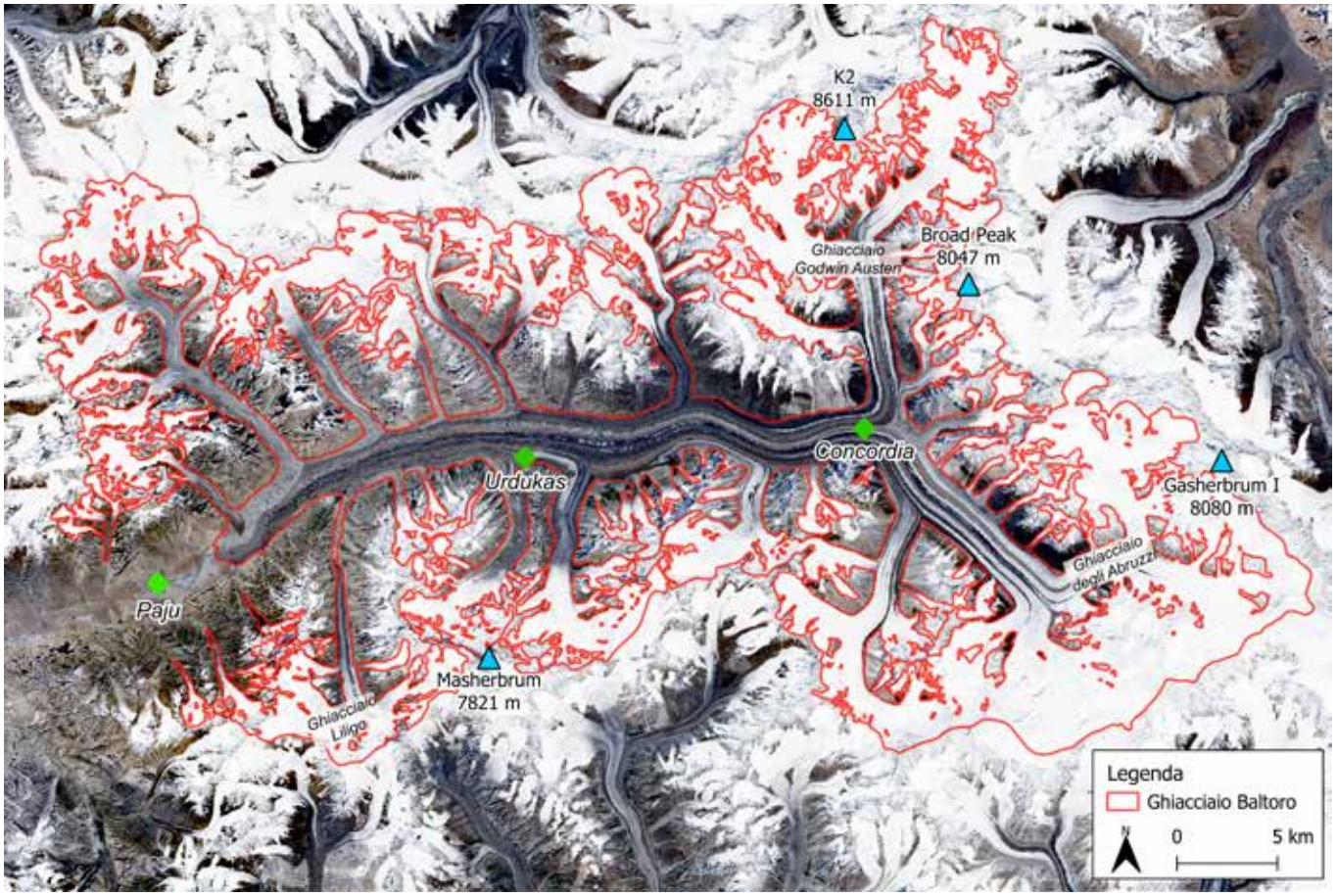


Figura 1 - Il Ghiacciaio Baltoro. Immagine satellitare del 30 agosto 2023, Sentinel 2 - elaborazione di M. Di Biase

al., 2024, che costituisce il più recente catasto dei ghiacciai pakistani. In questa sede basterà ricordare alcuni contributi fondamentali a partire dalle prime spedizioni di inizio Novecento, che univano obiettivi alpinistici e finalità scientifiche. Quelle del Duca degli Abruzzi del 1909 e del Duca di Spoleto del 1929, per esempio, produssero le prime rappresentazioni cartografiche di elevata precisione del Baltoro (Savoia Aosta & Desio, 1936); nella spedizione del 1909 inoltre le fotografie di Vittorio Sella costituirono una documentazione straordinaria di quell'area. Anche le missioni guidate da Ardito Desio della metà del XX secolo (1953-1954-1955) portarono un notevole contributo all'ampliamento delle conoscenze in vari settori scientifici (è appena il caso di ricordare che durante la spedizione del 1954 venne realizzata la prima ascensione del K2). Successivamente sul Baltoro le missioni scientifiche si moltiplicarono con studi approfonditi sull'evoluzione del ghiacciaio che si sono basati sia su ricerche dirette sul terreno sia sul telerilevamento; per quanto riguarda l'Italia numerosissime sono state le missioni scientifiche in quest'area, soprattutto nell'ambito delle ricerche organizzate dal Comitato EvK2CNR. Venne per esempio misurato con GPR (*Ground Penetrating Radar*) lo spessore del ghiaccio al Campo Base del K2 (circa 150 m) (Bishop *et al.*, 2010); venne ricostruita la sequenza delle variazioni della fronte che risultò quasi stabile da un secolo (Smiraglia *et al.*, 2007), mentre lo spessore del ghiacciaio aveva subito riduzioni anche di decine di metri (Mayer *et al.,* 2006); vennero approfondite le relazioni fra distribuzione e spessore del detrito superficiale (1,5 m verso la fronte) e fusione (che risultò di 3-6 cm al giorno) (Mihalcea *et al.*, 2008); venne quantificata la velocità del flusso glaciale con le sue differenziazioni stagionali (velocità massima 180 m all'anno poco a valle del Circo Concordia) (Wendleder *et al.,* 2024). Particolari approfondimenti sono stati riservati ai due temi citati anche nel titolo, la *Karakoram Anomaly* (KA) e i *surge*. A proposito della KA, Kenneth Hewitt, uno dei ricercatori che per primo la evidenziò e descrisse (Hewitt, 2005; 2007), scrive che in un secolo si osserva "una evidente diminuzione di spessore nei 35 km inferiori del ghiacciaio e diversi cambiamenti di dettaglio. Ma l'impressione generale è quella di una relativa situazione di stabilità. La fronte è arretrata di circa 130 m; ma si tratta di una variazione dello 0,25% in un secolo! "(Hewitt, 2010). Per quanto riguarda i *surge* va ricordato che una delle primissime segnalazioni di questo fenomeno in Karakorum si deve ad Ardito Desio (Desio, 1954). In questo articolo particolare attenzione è stata riservata ai ghiacciai tributari, soprattutto il Liligo, che nello scorso secolo fece registrare fluttuazioni di oltre 1,5 km (Pecci & Smiraglia, 2000; Diolaiuti *et al.*, 2003); fra la fine del XX secolo e l'inizio del XXI si ebbe poi una nuova fase di avanzata (Belò *et al*., 2008).

Materiali e metodi

Fotografia diacronica

La ricostruzione dell'evoluzione recente del Ghiacciaio Baltoro si è basata sul confronto fra fotografie storiche e contemporanee acquisite da punti di osservazione quanto più possibile coincidenti.

Le immagini storiche utilizzate sono principalmente quelle realizzate da Vittorio Sella durante la spedizione del Duca degli Abruzzi del 1909, integrate, ove opportuno, con ulteriori documenti fotografici provenienti da successive spedizioni scientifiche ed esplorative.

Le fotografie contemporanee sono state acquisite da Pietro Sella nel corso della spedizione organizzata dal Club Alpino Italiano - Sezione di Biella nel 2024 in occasione del settantesimo anniversario della prima ascensione del K2. La localizzazione dei punti di ripresa originari è stata ottenuta mediante analisi delle fotografie storiche, consultazione della documentazione disponibile e riconoscimento sul terreno di elementi morfologici stabili del paesaggio, quali creste, pareti rocciose, pinnacoli e altri riferimenti topografici.

Per quanto possibile, le immagini moderne sono state realizzate mantenendo analoga geometria di ripresa rispetto alle fotografie storiche, al fine di massimizzare la confrontabilità delle immagini. L'analisi è stata condotta prevalentemente in forma qualitativa, valutando le variazioni morfologiche del ghiacciaio e dell'ambiente circostante. In particolare sono stati considerati: (i) posizione della fronte glaciale; (ii) variazioni dello spessore apparente del ghiacciaio; (iii) evoluzione della copertura detritica superficiale; (iv) comparsa o ampliamento di affioramenti rocciosi; (v) modificazioni delle morene laterali e mediane; (vi) evoluzione morfologica dei ghiacciai tributari.

La fotografia diacronica non fornisce esclusivamente informazioni di carattere documentale, ma rappresenta uno strumento utile per evidenziare trasformazioni paesaggistiche e dinamiche glaciologiche che possono essere successivamente approfondite mediante tecniche quantitative (*monoplotting*) basate su fotogrammetria e modelli digitali del terreno (Wiesman *et al.*, 2012; Carturan *et al*., 2020; Altmann *et al.*, 2022).

Analisi da telerilevamento

Per integrare le osservazioni derivate dalla fotografia diacronica è stata effettuata un'analisi della copertura detritica superficiale del Ghiacciaio Baltoro mediante dati satellitari Landsat.

Sono state selezionate immagini Landsat 8 e Landsat 9 Collection 2 Level-2, già corrette radiometricamente e atmosfericamente, acquisite tra il 20 luglio e il 10 settembre 2023 e caratterizzate da limitata copertura nuvolosa. Tale intervallo temporale è stato scelto per ridurre la presenza di neve recente e rappresentare le condizioni tipiche della stagione di ablazione. Le immagini disponibili, acquisite in tre diverse date, sono state elaborate in ambiente GIS per ottenere un composito medio rappresentativo delle condizioni estive del ghiacciaio. Sull'immagine risultante è stata applicata una nuova procedura semi-automatica di classificazione che, basandosi sulle diverse emissività tra superfici, permette di distinguere il detrito sopraglaciale dal ghiaccio esposto o dalla neve. I risultati mostrano che, almeno per le immagini acquisite dai satelliti Landsat 8 e 9, questa metodologia è in grado di stimare l'estensione della copertura detritica con un livello di accuratezza paragonabile a quello della tradizionale mappatura manuale, evidenziando una differenza tra metodi pari al -5.4 %. I risultati sono stati successivamente confrontati con i principali dati disponibili in letteratura, tenendo conto delle differenze nelle immagini utilizzate, nelle procedure di classificazione e nei criteri adottati per la delimitazione dei confini glaciali.

Risultati

Il contributo della fotografia diacronica: confronto fra le fotografie di Vittorio Sella e di Pietro Sella

Come più volte accennato, l'utilizzo di fotografie dello stesso ghiacciaio riprese in periodi diversi, ha da sempre costituito uno strumento importante per mettere in evidenza le variazioni di questo essenziale componente della criosfera e dell'ambiente naturale. La documentazione fotografica dei ghiacciai costituisce da tempo una fonte preziosa per lo studio delle variazioni paesaggistiche e glaciologiche. La fotografia diacronica è divenuta, soprattutto negli anni più recenti, uno degli strumenti efficaci per comunicare ed evidenziare come i ghiacciai con la loro evoluzione siano testimoni di una crisi climatica e ambientale che sta investendo il nostro pianeta (Ferrari, 2023). Ciò che differenzia l'utilizzo tradizionale di questa tecnica rispetto all'utilizzo più moderno è probabilmente, oltre alle tecnologie fotografiche ovviamente più avanzate, l'approfondimento delle modalità di ricerca delle fonti iconografiche. È una ricerca che si configura come una vera e propria analisi scientifica delle fotografie, delle carte topografiche, dei diari di viaggio dei primi esploratori, con l'obiettivo di rintracciare i punti esatti di ripresa delle fotografie storiche. Oltre a questo, e all'utilizzo di particolari fotocamere e lenti, è necessario che le riprese vengano effettuate possibilmente nello stesso periodo dell'anno, nello stesso orario, con le stesse condizioni meteorologiche, il tutto

per garantire una rappresentazione il più possibile simile e confrontabile con quella iniziale. Sono ormai numerosi i progetti e le iniziative a livello internazionale che in tempi recenti sono stati dedicati alla fotografia diacronica di ghiacciai (si veda a questo proposito la sitografia allegata). Per quanto riguarda fotografi e ricercatori italiani, il progetto più significativo è sicuramente quello denominato "Sulle tracce dei ghiacciai", realizzato da Fabiano Ventura, fotografo romano, con una serie di missioni sulle aree glaciali più importanti della Terra fra il 2009 e il 2021. Per quanto riguarda il Karakorum e in particolare il Baltoro, la ripetizione nel 2009 della straordinaria documentazione fotografica di Vittorio Sella al seguito della spedizione del Duca degli Abruzzi del 1909 e di Massimo Terzano nella spedizione del Duca di Spoleto del 1929, ha permesso di evidenziare le trasformazioni morfologiche del ghiacciaio avvenute in un secolo, anche per quanto riguarda i citati fenomeni della *Karakoram Anomaly* e dei *surge* (Ventura, 2010; Ventura, 2022).

Più recentemente nel 2024, in occasione della spedizione organizzata dalla Sezione CAI di Biella, per il settantesimo della prima ascensione del K2, Pietro Sella, pronipote di Vittorio Sella, si è dedicato, con l'aiuto del nipote Leonardo, alla fotografia diacronica delle più significative immagini del 1909, confronto che costituisce il nucleo di questo articolo.

Le valutazioni delle variazioni frontali, in pratica l'avanzamento o l'arretramento o ancora la stabilità del limite più a valle di un ghiacciaio, hanno costituito, sin dalle primissime osservazioni sull'evoluzione del glacialismo, il dato più comunemente raccolto. Famoso da questo punto di vista il "Masso Desio", un grande blocco di gneiss situato nella piana proglaciale del Baltoro, che a partire dalla spedizione del 1913, e probabilmente anche in missioni precedenti, è servito come punto di appoggio e di riferimento per la misura delle variazioni frontali e anche per la ripetizione delle fotografie. Utilizzato ancora nel 2004, la misurazione della distanza rispetto alla fronte del Baltoro ha mostrato che fra il 1913 e il 2004 vi sono state numerose piccole oscillazioni con una riduzione complessiva di 65 m; il che porta ad affermare che il limite inferiore del ghiacciaio in quel periodo è stato praticamente stabile (Smiraglia *et al.*, 2008).

Va segnalato che da più di un decennio il "Masso Desio" non è più utilizzato come riferimento per le misurazioni glaciologiche. Il masso, le cui dimensioni si sono ridotte di molto perché in parte ricoperto da depositi fluvioglaciali, è infatti praticamente irraggiungibile a causa dell'ingrossamento dei torrenti che percorrono la piana (Figura 2).
I confronti fra le foto della fronte glaciale riprese in periodi diversi si rivelano quindi molto utili nell'evidenziare le trasformazioni che in quest'area si sono verificate, che in realtà non sono paragonabili in proporzione a quelle registrate per i ghiacciai alpini. Basterebbe per esempio pensare ai confronti fotografici del Ghiacciaio dei Forni nelle Alpi Retiche che in meno di mezzo secolo mostrano un regresso di oltre un chilometro e la transizione da "ghiacciaio vallivo a bacini composti" a "ghiacciaio vallivo" con la frammentazione in tre apparati glaciali ben separati.

In effetti nelle due foto di Figura 3, riprese poco a valle di Paju, dove è ben visibile la fronte del ghiacciaio, il confronto fra l'immagine del 1909 e quella del 2024 mostra una stabilità del limite



Figura 2 - Il Masso Desio nella piana proglaciale del Baltoro nel 2024, parzialmente sommerso dal detrito fluvioglaciale; sullo sfondo è visibile la fronte del ghiacciaio - ph da drone Ettore Zorzini

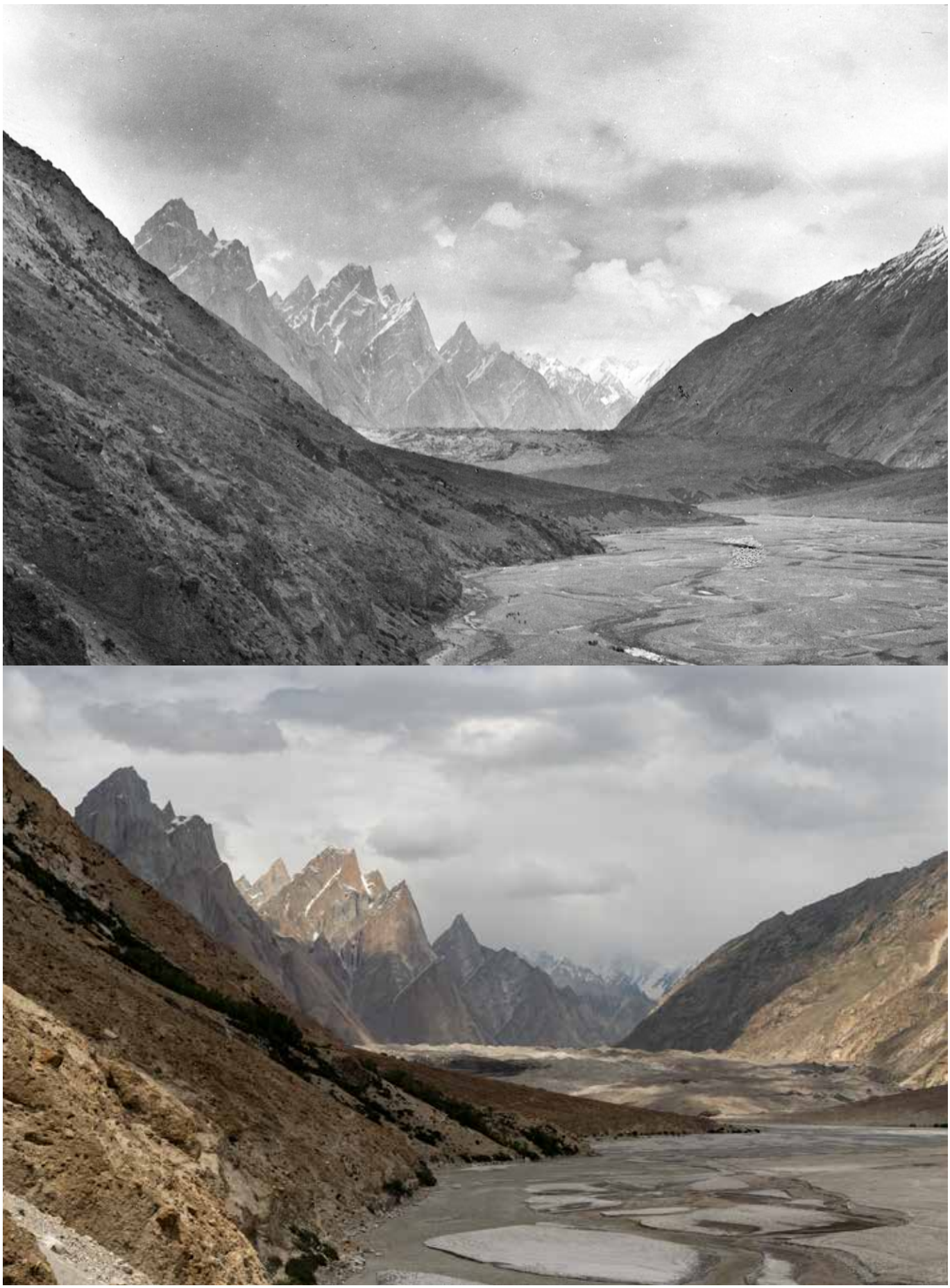


Figura 3 - La fronte del Ghiacciaio Baltoro ripresa poco a valle di Paju nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella) e nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) (coordinate N35.660203° E76.103286°). Si osservi la stabilità del limite frontale, accompagnata da una sensibile riduzione dello spessore del ghiacciaio



Figura 4 - La superficie del Baltoro quasi completamente ricoperta da detrito, nel 1909, salendo verso Urdukas (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella) e nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) (coordinate N35.711908° E76.209800°). Si osservi la evidente riduzione di spessore del ghiacciaio

frontale del Baltoro. Per esempio la localizzazione dei coni detritici che in destra e sinistra idrografica confluiscono trasversalmente nella valle del Braldu racchiudendo parzialmente la fronte, non appare sensibilmente mutata rispetto alla fronte stessa. Si nota tuttavia una chiara e sensibile riduzione dello spessore del settore inferiore del ghiacciaio, evidenziata anche dall'incremento di lunghezza dei canali detritici che si collegano al fondovalle e che spiccano con il loro colore chiaro rispetto alle fasce circostanti di rocce alterate più scure.

Salendo lungo il versante sinistro idrografico della valle che racchiude il Baltoro, un sito ben conosciuto è quello di Urdukas, posto tappa frequentatissimo a circa 4050 m sul bordo del ghiacciaio e a circa 20 km dalla fronte. Le foto della Figura 4, riprese salendo verso Urdukas, mostrano la superficie del Baltoro totalmente ricoperta di detrito, con il ghiaccio che emerge solamente dalle numerose "falesie" (*ice cliff*). Sulla destra si individua la confluenza del Ghiacciaio Trango, a sinistra appena visibile quella del Ghiacciaio Uli Biaho. In poco più di un secolo il quadro glaciologico non sembra essere particolarmente mutato. Tuttavia osservando con attenzione si constata in particolare lungo il versante destro idrografico una sensibile riduzione dello spessore del ghiacciaio, in particolare nella zona di confluenza del Trango e poco più a valle di questa; è infatti ben evidente in questa fascia l'incremento di spessore della morena laterale destra che nella foto storica era appena visibile. Anche sul versante sinistro il livello del Baltoro



appare in riduzione, seppur a livello più locale. Di certo, nella zona della ripresa fotografica, si sono incrementati in misura massiccia numero e dimensioni delle falesie, che assumono talora la classica morfologia a ripido triangolo verticale, con la conseguente riduzione della copertura detritica, accompagnata dell'incremento dell'ablazione.

Queste tipologie di evoluzione del paesaggio glaciale sono evidenti anche nella parte superiore del ghiacciaio, in particolare a monte del Circo Concordia, dove scende una delle principali colate di alimentazione che prende il nome di Ghiacciaio Godwin Austen. Poco a monte della confluenza di quest'ultimo nel Circo Concordia, sul versante destro idrografico, a una quota di poco inferiore ai 4790 m, Vittorio Sella nel 1909 riprese una delle immagini più note e spettacolari: una panoramica che abbraccia tutte le principali vette che si affacciano su Concordia, dal K2 a Nord al Mitre Peak a Sud, passando per il Broad Peak, il Gasherbrum IV, il Baltoro Kangri, il Chogolisa (Figura 5). Anche in questo caso a fronte di un paesaggio glaciale che nei suoi lineamenti generali appare quasi invariato, il confronto accurato delle due foto mostra interessanti trasformazioni. In particolare si nota la riduzione di spessore del ghiacciaio soprattutto lungo i contrafforti rocciosi al di sotto del Broad Peak e nelle zone di confluenza nel Godwin Austen dei due ghiacciai minori fra il Broad Peak e il Gasherbrum VII, insieme all'incremento di spessore dei grandi nastri scuri delle morene mediane o "galleggianti". Questi ultimi fenomeni sono ben visibili anche nella zona di confluenza sulla destra idrografica dove spicca la depressione del ghiacciaio a contatto con la parete rocciosa, mentre nella fascia centrale appare più depressa e ristretta la zona a ghiaccio vivo.

Il restringimento del ghiacciaio nelle zone di confluenza vicine alle pareti rocciose è ben osservabile anche a quote più elevate ai piedi della parete Sud del K2, nei pressi del campo base di Vittorio Sella (Figure 6 e 6/1). Qui sul versante destro idrografico gran parte della seraccata più vicina alla parete rocciosa è scomparsa; si è così ampliata la depressione ghiaccio-roccia e sono rimaste placche di ghiaccio nerastro ricoperte da un velo di detrito che spiccano rispetto al biancore della parte superiore della seraccata. Inoltre l'allineamento



Figura 5 - Il Ghiacciaio Baltoro dai pressi del Circo Concordia con le principali vette che lo racchiudono, a sinistra il K2 e il Broad Peak (pag. 18), a destra il Chogolisa e il Mitre Peak (pag. 19) nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella) e nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) - (coordinate N35.764487° E76.512610°). Si osservi la riduzione di spessore del ghiacciaio e l'incremento della copertura detritica superficiale

degli stessi blocchi rocciosi, ricercati dal fotografo per identificare il punto di scatto originale, evidenzia come tale punto posto sul ghiacciaio stesso si sia abbassato significativamente. A differenza di quanto si osserva su ghiacciai, certamente meno estesi e situati a quote inferiori, come quelli alpini, non si nota se non in misura ridottissima un incremento delle "finestre" rocciose, solitamente preludio a frammentazioni del corpo glaciale principale.

Considerazioni simili si possono fare a proposito del confronto con un'altra famosa ripresa di Vittorio Sella. Ci si riferisce all'immagine scattata a circa 5650 m nel bacino superiore del Ghiacciaio Godwin Austen in direzione SSO (Figura 7), dove spiccano le vette piramidali del K2 a destra e del Broad Peak a sinistra. Sulla parete Est del K2, a destra, si osserva un lieve incremento delle aree rocciose emergenti dal ghiaccio, più esteso sulla destra, accompagnato dalla formazione di numerosissime rigole parallele che solcano verticalmente la parete di ghiaccio. Queste ultime, che hanno sostituito la poco evidente ripida seraccata preesistente, potrebbero indicare una riduzione dello spessore di ghiaccio sulla parete. Sulla parete Nord del Broad Peak, a sinistra, non si osservano particolari mutamenti del quadro glaciologico. In effetti anche l'articolato ghiacciaio sospeso che caratterizza la parete con le sue ripide seraccate e le sue fronti sospese non mostra variazioni morfologiche sensibili. A differenza di quanto sottolineato finora, cioè un insieme di limitate trasformazioni glaciologico-ambientali, che potrebbe rientrare nel quadro della *Karakoram Anomaly*, alcuni ghiacciai confluenti hanno mostrato evidenze di intense fluttuazioni, non solo secolari, ma anche a scala temporale più ridotta. Il caso più classico è sicuramente quello del Ghiacciaio Liligo. Si tratta di un piccolo ghiacciaio (almeno secondo i parametri himalayani!) che copre una superficie di circa 17 km^2 in una valle trasversale alla valle principale del Baltoro in sinistra idrografica, a circa 7 km dalla fronte del Baltoro verso monte. Le sue variazioni frontali e geomorfologiche sono state studiate

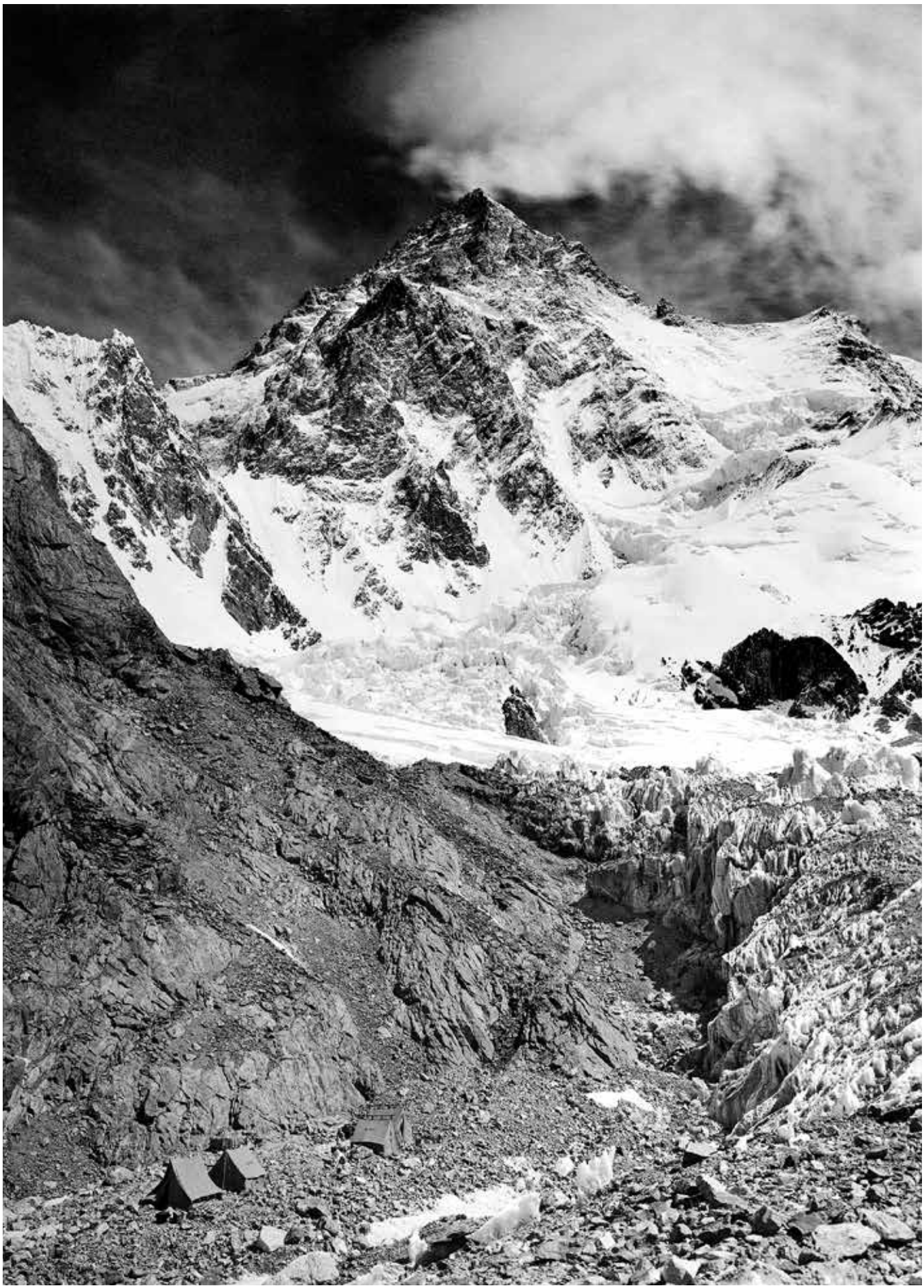


Figura 6 - La parete Sud del K2 nei pressi del campo base di Vittorio Sella nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella)



Figura 6/1 - La parete Sud del K2 nei pressi del campo base di Vittorio Sella nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) - (coordinate N35.839356° E76.509501°) - Si osservi la riduzione di spessore del ghiacciaio a livello della seraccata nel confronto con Figura 6

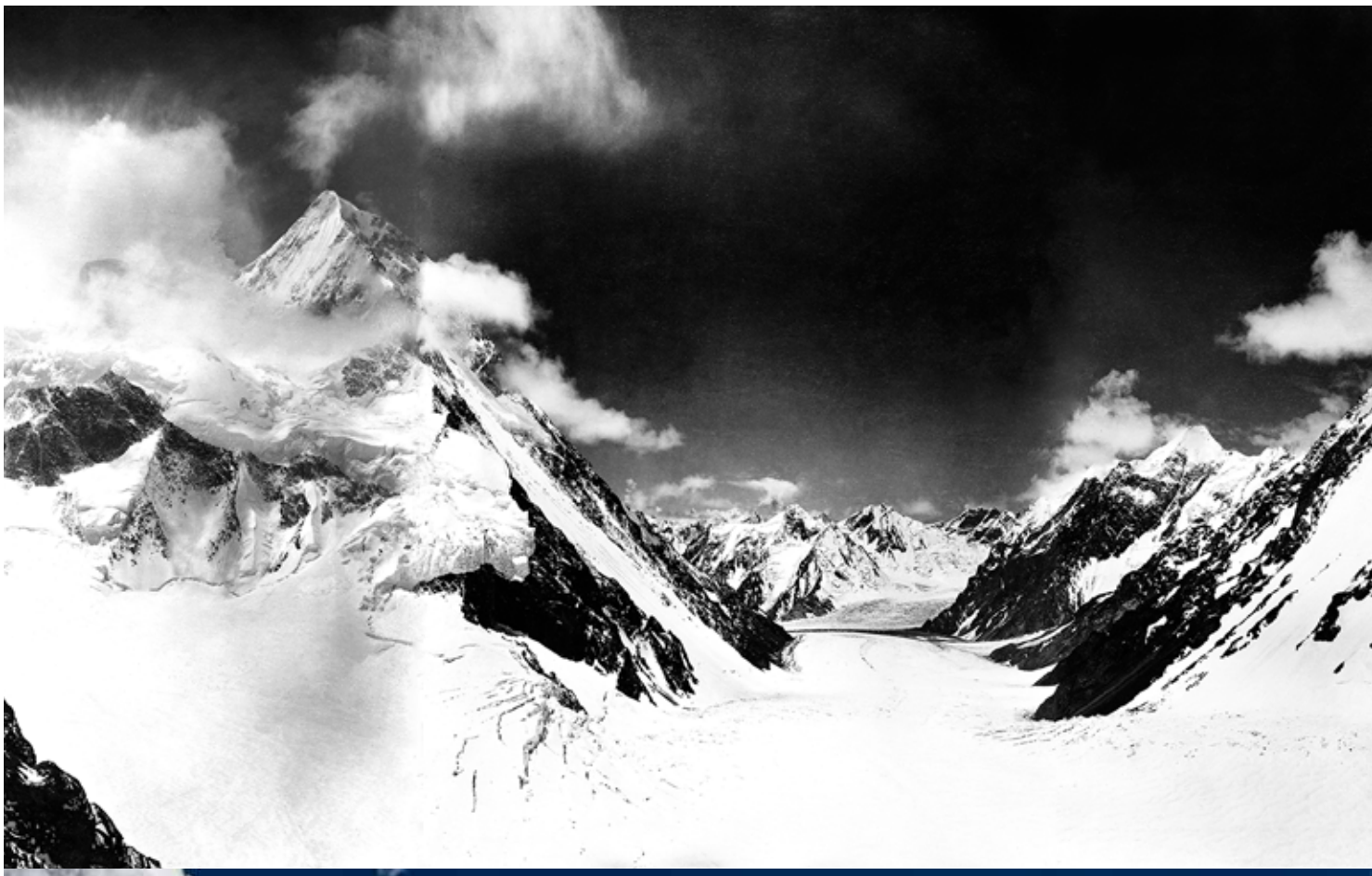
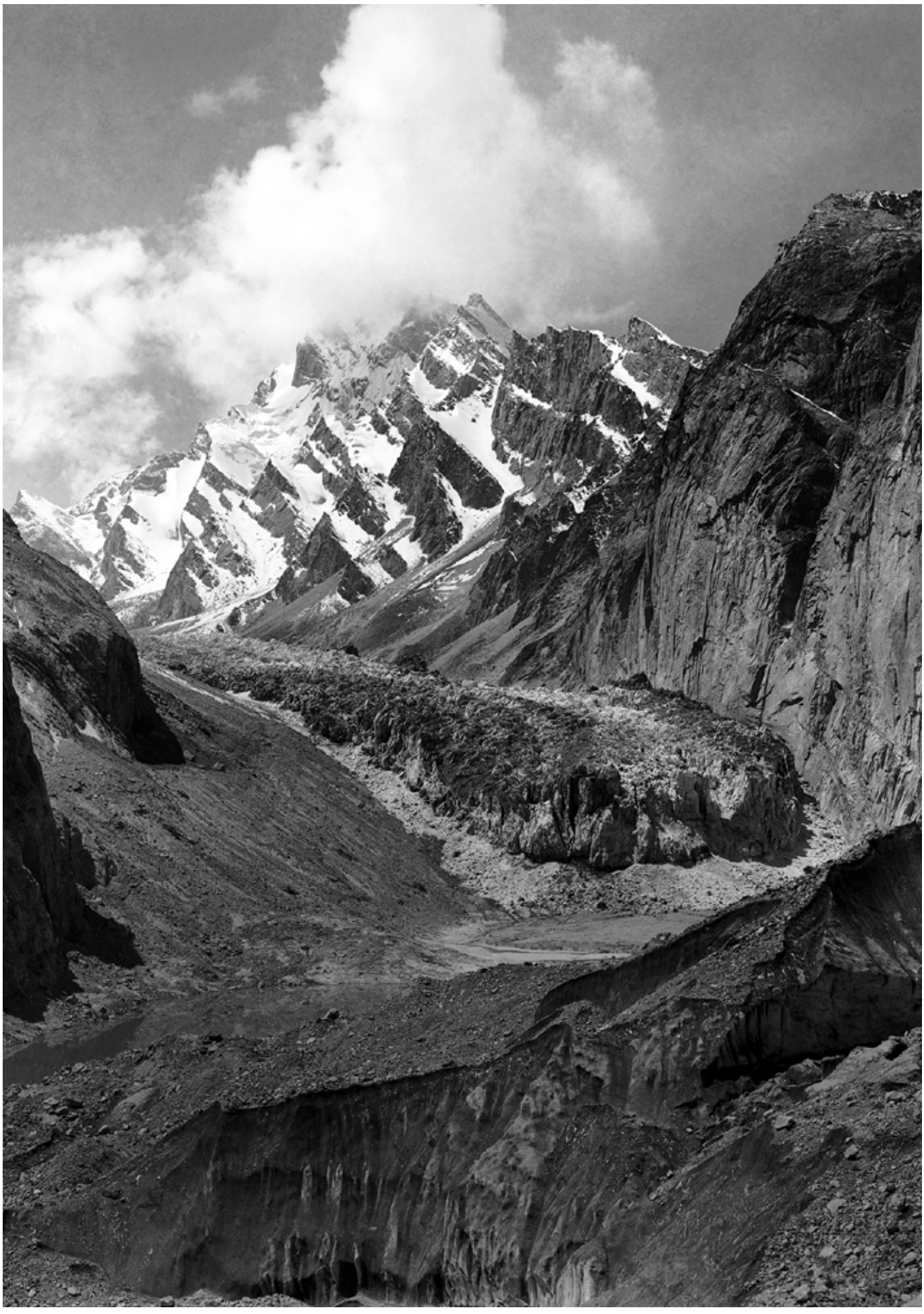






Figura 7 - Le cime del Broad Peak a sinistra (pag. 22) e del K2 a destra (pag. 23), riprese dal bacino superiore del Ghiacciaio Godwin Austen nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella) e nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) - (coordinate N35.868563° E76.564345°). Sulla parete Est del K2 si osserva un lieve incremento delle aree rocciose



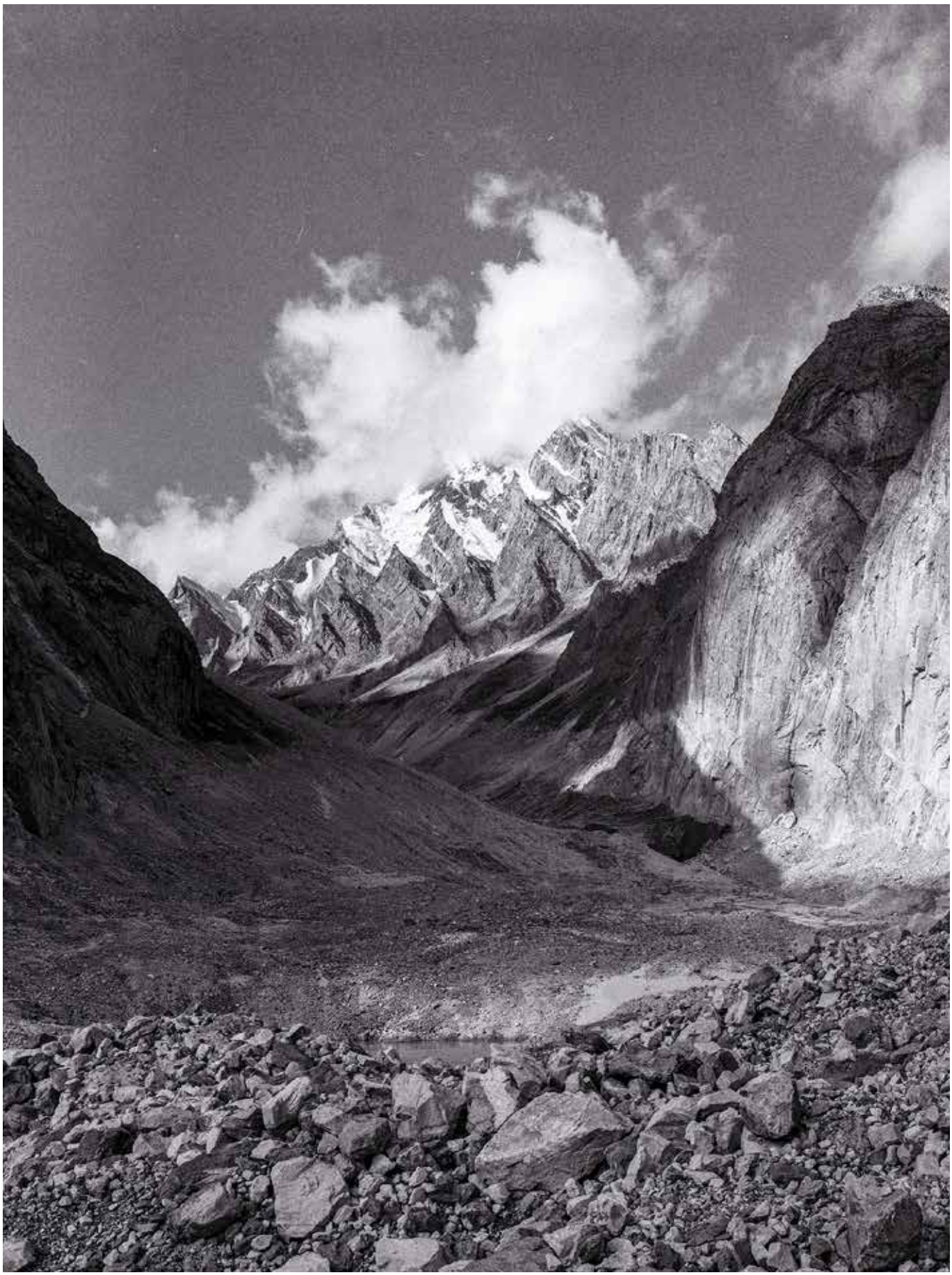


Figure 8 e 8/1 - Il Ghiacciaio Liligo visto dal Baltoro nel 1909 (a sinistra, pag. 24 - ph Vittorio Sella - © Fondazione Sella) e nel 2024 (a destra, pag. 25- ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) - (coordinate N35.716846° E76.230857°). Nella foto storica la lingua si presenta rigonfia e crepacciata, indice di una fase di rapida espansione, mentre nella foto attuale la lingua appare sensibilmente arretrata e ridotta di spessore, indicando la conclusione della fase di espansione

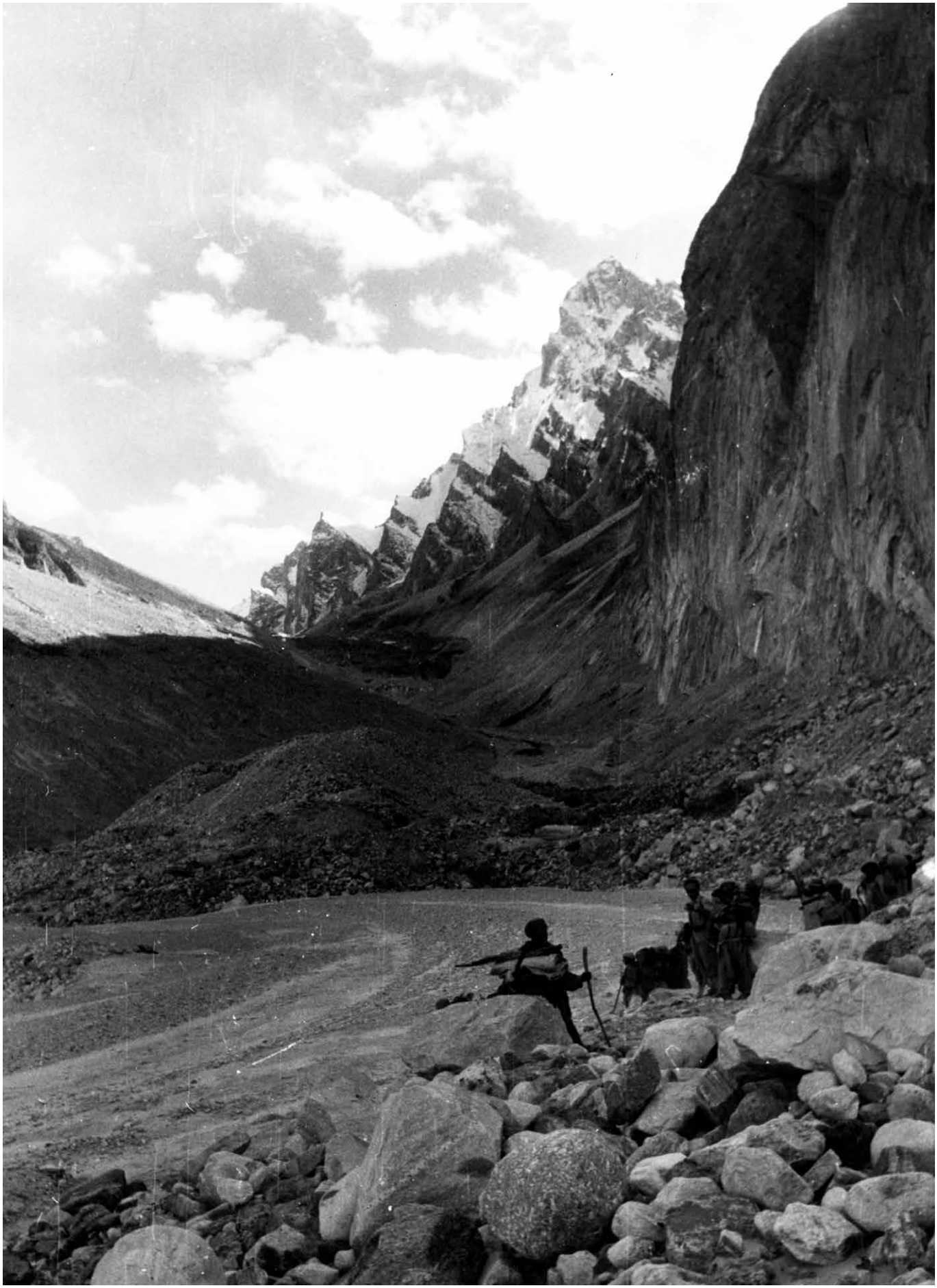


Figura 9 - Il Ghiacciaio Liligo nel 1953 visto dal Baltoro. La lingua, difficilmente individuabile, si è ridotta di lunghezza e di spessore, creando una situazione simile a quella che il ghiacciaio assumerà nel 2024 - (ph A. Desio 1953 – Archivio Fondazione Glaciologica Italiana)

con varie metodologie e fonti (documenti storici, cartografia, fotografie e rilievi di terreno, immagini da satellite) a partire dalla spedizione di William Conway del 1892 (Pecci & Smiraglia, 2000; Diolaiuti et al., 2003; Belò *et al.*, 2008).

In sintesi gli studi hanno evidenziato per il Liligo una fase di avanzata fra la fine del XIX secolo e i primi decenni del XX secolo, seguita da una fase di ritiro che è durata almeno fino all'inizio degli Anni Ottanta del XX secolo. Da quest'ultimo periodo fino all'inizio del XXI secolo il Liligo è avanzato di circa 2 km (circa 60 m all'anno) con un incremento della velocità di flusso (fino a 100 m all'anno negli Anni Novanta del XX secolo), senza però dar luogo a una vera e propria confluenza nel corpo principale del Baltoro. Questi dati, insieme alle trasformazioni morfologiche della fronte, che è divenuta una ripida falesia di ghiaccio come nella prima fase di avanzata, mentre il settore inferiore della lingua ha incrementato il proprio spessore ed è apparso totalmente crepacciato, suggeriscono un meccanismo di tipo *surge*, che si è verificato anche su molti altri ghiacciai della zona (Hewitt, 2011; Minora *et al.*, 2016). Successivamente le osservazioni indicano un periodo di quiescenza con riduzione di velocità di flusso e di spessore della lingua e incremento della copertura detritica, seguito in questi ultimi anni da un vero e proprio regresso con frammentazione della colata. L'utilizzo della fotografia diacronica permette di avere un quadro completo delle trasformazioni morfologiche del ghiacciaio (Figure 8 e 8/1) e paesaggistiche in genere, a partire dalla notissima e splendida fotografia di Vittorio Sella del 1909. L'immagine storica mostra una lingua glaciale molto estesa in lunghezza e totalmente crepacciata, mentre la fronte del ghiacciaio appare foggiata ad alta falesia, un vero e proprio muro di ghiaccio segnato da imponenti seracchi, con la base delineata da coni coalescenti creati dal crollo di frammenti di ghiaccio e di detrito, relativamente vicina al bordo del Baltoro in primo piano. In sintesi la foto fornisce il quadro di un ghiacciaio ben alimentato in rapida avanzata. La foto di Pietro Sella del 2024 mostra un quadro totalmente diverso (si utilizzi la localizzazione delle particolari strutture della parete rocciosa sulla destra della foto per facilitare il confronto). L'identificazione stessa del limite frontale appare difficoltosa, la netta falesia si è trasformata in una serie di scure *ice cliff* ben più arretrate lungo la valle, che si distinguono con difficoltà dal detrito superficiale e che sono distribuite in prevalenza solo sul versante sinistro idrografico, mentre nella zona centrale la morfologia è nettamente depressa. In sintesi un quadro di un ghiacciaio in veloce regresso che si lascia alle spalle colline detritiche con lenti di ghiaccio sepolto.



Figura 10 - Il Ghiacciaio Liligo nel 1985 visto dal Baltoro. La lingua, ben delineata ed estesa, appare di nuovo rigonfia e crepacciata, indicando una seconda fase di espansione - ph C. Smiraglia 1985 - Quota 8000



Figura 11 - Il Ghiacciaio Liligo nel 1997 visto dal Baltoro. La lingua, convessa e sensibilmente crepacciata, ha quasi raggiunto il bordo del ghiacciaio principale senza però arrivare a una confluenza - ph M. Pecci 1997

I dati già presentati e soprattutto le numerose foto riprese nell'arco di oltre un secolo mostrano tuttavia che non si è trattato di un fenomeno lineare (un'intensa fase di progresso glaciale seguita da un altrettanto intensa fase di regresso), ma di un fenomeno "pulsante", che è stato rilevato su molti ghiacciai confluenti del Baltoro e di altri ghiacciai del Karakorum (Paul, 2015; Minora *et al.*, 2016).

Una foto di Ardito Desio del 1953 (Figura 9) mostra una situazione molto simile a quella del 2024, indicando che la fase di espansione iniziata a fine Ottocento è ormai esaurita. La piana proglaciale che separa il Liligo dal Baltoro è caratterizzata da sedimenti fluviali e lacustri, mentre la fronte del ghiacciaio, appena visibile e nettamente depressa, è ben ritirata a monte delle pareti di roccia in sinistra idrografica, dopo aver abbandonato numerose lenti di ghiaccio sepolto. In una foto del 1985 di Claudio Smiraglia (Figura 10) la lingua del ghiacciaio si presenta invece ben evidente e crepacciata, con una fronte turgida e ben delineata, anche se non è ancora arrivata a sfiorare le pareti rocciose sopra citate. Si può in ogni caso ipotizzare che sia iniziata la seconda fase di espansione. La conferma si ha poco più di un decennio più tardi da una foto di Massimo Pecci (Figura11).

Il ghiacciaio, rigonfio, convesso e crepacciato, è sceso ben più a valle di quanto visibile nella foto di Vittorio Sella del 1909, e giunge a sfiorare il bordo del Baltoro.

È probabilmente il momento di maggiore avanzata di questa seconda fase di espansione, cui seguirà una fase di quiescenza e stabilità, che vedrà in ogni caso imponenti trasformazioni morfologiche della fronte, come è testimoniato dalla foto di Fabiano Ventura nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" del 2009 (Figura 12). La fronte del ghiacciaio infatti sembra avere mantenuto una posizione simile a quella precedente, ma lo spessore si è enormemente ridotto, mentre il detrito copre praticamente tutta la superficie visibile con una serie di morfologie derivanti dall'ablazione differenziale. In ogni caso non vi è stata alcuna

confluenza fra il Liligo e il Baltoro e la fase di quiescenza sarebbe cominciata nei primi anni del XXI secolo. Si arriva poi all'attuale veloce fase di regresso, come già mostrato dalla foto di Pietro Sella del 2024.

Telerilevamento: un esempio per lo studio della copertura detritica

Come già osservato, il Baltoro, nonostante la sua localizzazione in una regione lontana e talora politicamente instabile, è sicuramente uno dei ghiacciai più studiati, anche da ricercatori italiani soprattutto nell'ambito dei progetti dell'Associazione EvK2CNR, e uno dei meglio conosciuti del nostro pianeta. Molta della letteratura scientifica esistente si basa quasi esclusivamente su dati derivanti da telerilevamento (*remote sensing*) (per esempio Quincey *et al*., 2009; Gibson *et al*., 2016; Senese *et al*., 2018; Wendedler *et al*., 2018; Lhakpa *et al*., 2026). L'analisi delle immagini multi-satellitari e multi-spettrali (come Landsat, ASTER, Sentinel) offre infatti, fra l'altro, la possibilità di cartografare la distribuzione e lo spessore del detrito superficiale, di monitorare l'estensione dei laghi sopraglaciali e di quantificare la velocità superficiale (Melis *et al.*, 2024). Tenendo conto dell'importanza dello spessore del detrito, della sua estensione e della sua litologia nel condizionare l'ablazione del ghiaccio sottostante e quindi il bilancio di massa del ghiacciaio, numerosi sono gli studi basati su immagini satellitari che approfondiscono queste tematiche. A questo proposito va sottolineato che uno spessore sottile di detrito (da 2 a 5 cm) incrementa la fusione rispetto a quanto avverrebbe per il ghiaccio privo di detrito, in quanto favorisce un maggior assorbimento della radiazione solare. Al di sopra di questo valore, che si può considerare uno spessore critico e che può variare fra i diversi ghiacciai, l'ablazione del ghiaccio sottostante decresce in misura esponenziale in funzione dello spessore del detrito (Gibson *et al.*, 2017; Senese *et al*., 2018). L'estensione totale del detrito superficiale è certamente uno dei dati fondamentali per affrontare il tema degli effetti della copertura detritica sull'ablazione del ghiacciaio e sul suo bilancio di massa e a questo parametro si farà brevemente cenno in questo articolo. È tuttavia opportuno sottolineare come i dati risultanti dalle varie ricerche spesso presentino valori non coincidenti, in funzione non solo del periodo considerato, ma anche delle diverse metodologie di analisi delle immagini satellitari utilizzate e delle diverse caratteristiche delle immagini stesse, nonché dei diversi criteri di individuazione dei limiti del ghiacciaio. Anche l'area totale del Baltoro risulta alquanto diversificata fra i vari ricercatori. Si passa infatti, per limitarci ai dati più recenti, da circa 660 km^2 in Gibson *et al.*, 2016, a 849,44 km^2 in Xie *et al*., 2023, a circa 554 km^2 in Wendleder *et al.*, 2024, a 756,35 km^2 in Diolaiuti *et al.*, 2024. Per quanto riguarda l'area coperta da detrito si passa dal 22,7% dell'intera superficie (Gibson *et al.*, 2016) al 38% (Wendedler *et al.*, 2024).

A proposito dell'estensione della copertura detritica, alcuni dei ricercatori coautori di questo articolo hanno predisposto una nuova tecnica di mappatura semi-automatica basata su immagini termiche acquisite dai satelliti Landsat 8 e Landsat 9 (si veda il paragrafo sui Metodi). I risultati evidenziano che durante l'estate 2023 il Ghiacciaio del Baltoro presentava una copertura detritica pari a 178,4 km^2, corrispondente a circa il 22.6% della sua superficie complessiva che risultava di circa 788 km^2 (Figura 13).



Figura 12 - Il Ghiacciaio Liligo nel 2009 visto dal Baltoro. La lingua, totalmente ricoperta di detrito, ha perso notevolmente spessore e sta cominciando a ritirarsi all'interno della valle; la seconda fase di espansione si è conclusa - ph 2009 Fabiano Ventura - © Macromicro APS - ETS

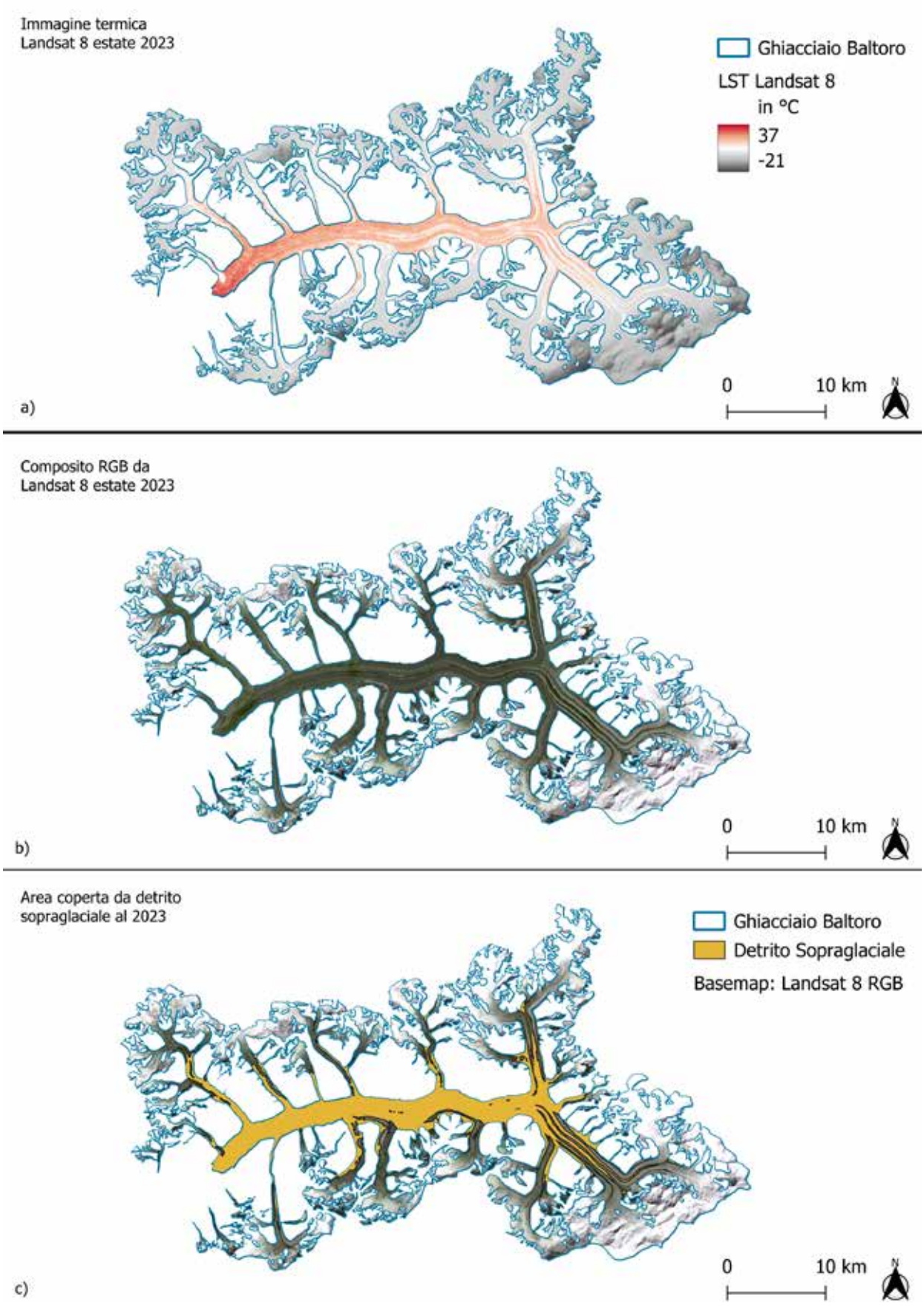


Figura 13 - La copertura detritica sopraglaciale del Baltoro: a) carta della temperatura superficiale ottenuta come composito medio delle immagini Landsat 8 disponibili durante l'estate 2023; b) immagine RGB ottenuta dalle stesse immagini Landsat 8; considerando che un'immagine multispettrale contiene informazioni acquisite in diverse porzioni dello spettro elettromagnetico e organizzate in bande spettrali, la visualizzazione RGB è ottenuta combinando le bande che coprono le porzioni del rosso, verde e blu. Così facendo si genera una rappresentazione a colori naturali della superficie; c) evidenziata in giallo, l'estensione del detrito sopraglaciale ottenuta con tecnica di image-segmentation dell'immagine termica - elaborazione di M. Di Biase, in revisione

Risultati

Il confronto tra le fotografie storiche di Vittorio Sella del 1909 e le immagini replicate da Pietro Sella nel 2024, integrato con osservazioni derivate dal telerilevamento satellitare, ha consentito di ricostruire l'evoluzione secolare del Ghiacciaio Baltoro e del Liligo, uno dei più studiati ghiacciai tributari.

Le osservazioni derivate dalla fotografia diacronica evidenziano come il Ghiacciaio Baltoro presenti un comportamento complesso, solo in parte riconducibile ai modelli di evoluzione osservati nella maggior parte delle regioni glacializzate del pianeta. Il confronto tra le immagini del 1909 e quelle del 2024 mostra infatti una sostanziale stabilità della posizione frontale, accompagnata tuttavia da una diffusa riduzione dello spessore glaciale, particolarmente evidente nel settore medio-inferiore e nelle aree di confluenza dei principali ghiacciai tributari.

Questa apparente contraddizione è coerente con numerose osservazioni effettuate negli ultimi decenni nel Karakorum e costituisce uno degli elementi caratterizzanti della cosiddetta *Karakoram Anomaly* (Hewitt, 2005; Farinotti *et al.*, 2020). Nel caso del Baltoro, la presenza di un'estesa copertura detritica, l'elevata quota dei bacini di alimentazione e il contributo nivale e valanghivo proveniente dalle pareti circostanti possono contribuire a spiegare la limitata variazione della lunghezza del ghiacciaio nonostante la perdita di volume documentata da diversi studi.

Le fotografie analizzate suggeriscono inoltre che la riduzione di spessore abbia interessato in misura diversa i vari settori dell'apparato glaciale. Essa risulta particolarmente evidente lungo i margini laterali e nelle aree di contatto con i versanti rocciosi, dove l'emersione delle morene e l'ampliamento delle depressioni ghiaccio-roccia costituiscono indicatori diretti della perdita di massa. Al contrario, nei bacini superiori e nelle zone più elevate del sistema Baltoro–Godwin Austen le modificazioni morfologiche risultano relativamente limitate, confermando una maggiore resilienza di questi settori alle variazioni climatiche recenti.

L'analisi della copertura detritica ottenuta da dati Landsat fornisce ulteriori elementi interpretativi. Il valore pari a circa il 22,6% della superficie glaciale si colloca all'interno dell'intervallo riportato in letteratura per il Baltoro. Sebbene la presenza del detrito contribuisca a ridurre l'ablazione laddove esso raggiunge spessori sufficientemente elevati, la crescente diffusione di *ice cliff*, depressioni termocarsiche e piccoli bacini d'acqua sopraglaciali osservata in diversi settori del ghiacciaio suggerisce la presenza di processi ablativi localmente molto intensi, capaci di compensare almeno in parte l'effetto isolante del detrito.

Nel complesso, i risultati ottenuti suggeriscono che il Baltoro rappresenti oggi una situazione intermedia tra la persistente influenza dei processi responsabili della *Karakoram Anomaly* e i segnali di una crescente perdita di massa osservata negli anni più recenti. Le evidenze fotografiche e i dati disponibili da telerilevamento sembrano infatti indicare che la tradizionale stabilità dei ghiacciai del Karakorum sia attualmente sottoposta a un progressivo indebolimento, in accordo con gli studi che documentano perdite di massa sempre più diffuse nel periodo successivo al 2018 (Xie *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2025).

Particolarmente significativo appare il comportamento del Ghiacciaio Liligo. La successione delle testimonianze fotografiche disponibili nel corso di oltre un secolo documenta infatti almeno due fasi di avanzata seguite da altrettante fasi di regresso. Le variazioni della posizione frontale, l'incremento temporaneo della velocità di flusso, il marcato ispessimento della lingua e la successiva fase di quiescenza risultano compatibili con una dinamica di tipo *surge*, già riconosciuta per numerosi ghiacciai del Karakorum. Il Liligo costituisce quindi un esempio particolarmente efficace dell'elevata variabilità dinamica che caratterizza i ghiacciai tributari del sistema Baltoro, anche in un contesto caratterizzato da apparente stabilità del ghiacciaio principale.

In sintesi, i risultati ottenuti confermano il valore scientifico della fotografia diacronica come strumento di analisi dell'evoluzione glaciale. L'integrazione tra documentazione fotografica storica, rilievi contemporanei e osservazioni satellitari consente infatti di ricostruire cambiamenti che si sviluppano su scale temporali pluridecennali e secolari, fornendo informazioni difficilmente ottenibili attraverso una singola metodologia.

Ulteriori sviluppi potranno derivare dall'applicazione di tecniche quantitative di fotogrammetria storica e *digital monoplotting* alle immagini di Vittorio e Pietro Sella, integrate con dati derivanti da satelliti ad alta risoluzione e da piattaforme UAV (*Unmanned Aerial Vehicle - drone*). Tali approcci potranno contribuire a quantificare con maggiore precisione le variazioni geometriche del ghiacciaio e a migliorare la comprensione della sua possibile evoluzione futura in un contesto di rapido cambiamento climatico.

Ringraziamenti

Si ringraziano Pino D'Aquila, Massimo Pecci, Federico Secchi, Fabiano Ventura, Ettore Zorzini, Fondazione Glaciologica Italiana, Associazione EvK2CNR per il materiale documentario e illustrativo cortesemente fornito.

Bibliografia

- ALI S. & HASNAIN M. (2025) - *Investigating the Karkoram Anomaly and Its Impacts on Water Supply in Pakistan.* Advance Social Science Archive Journal, 4 (1), 2386–2404. https://assajournal.com/index.php/36/article/view/723
- ALTMANN M., MIKOLKA-FLÖRY S., PFEIFER N., HAAS F., ROM J., FLEISCHER F., HECKMANN T. & BECHT M. (2022) - *Determination of glacier extents by monoplotting using historical terrestrial oblique images.* In: Rutzinger M., Anders K., Bremer M., Eltner A., Höfle B., Lindenbergh R., Mayr A., Oude Elberink S., Pirotti F., Scaioni M., Tolksdorf H. & Zieher Thomas (eds): Sensing Mountains: Innsbruck Summer School of Alpine Research 2022 – Close Range Sensing Techniques in Alpine Terrain. - Innsbruck: innsbruck university press, ISBN 978-3-99106-081-9; 3-99106-081-7
- BELÒ M., MAYER C., SMIRAGLIA C. & TAMBURINI A. (2008) - *The recent evolution of Liligo Glacier, Karakoram, Pakistan, and its present quiescent phase.* Annals of Glaciology, 48, 171–176
- BISHOP M.P., BUSH ABG., COPLAND L., KAMP U., OWEN L.A., SEONG YB. & SHRODER JR JF. (2010) - *Climate Change and Mountain Topographic Evolution in the Central Karakorum, Pakistan.* Annals of the Association of American Geographers. 100, 772–793. https://doi.org/10.1080/00045608.2010.500521
- BOCCHIOLA D. & DIOLAIUTI G. (2013) - *Recent (1980–2009) evidence of climate change in the upper Karakoram, Pakistan.* Theoretical and Applied Climatology, 113, 611–641
- BYERS A. C. (2007) - *An assessment of contemporary glacier fluctuations in Nepal's Khumbu Himal using repeat photography.* Himalayan Journal of Sciences, 4, 6, 21-26
- CARTURAN L., BONDESAN A., CARTON A., CAZORZI F., CUCCHIARO S., DE MARCO J., & PIERMATTEI L. (2020) - *The glaciated landscape across the First World War front: quantitative reconstructions based on digitized historical images and modern techniques.* Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 43, 143-155
- DAVIES B. J. (2020) - *Surging glaciers.* AntarcticGlaciers.org
- DESIO A. (1954) - *An exceptional glacier advance in the Karakoram-Ladakh region.* Journal of Glaciology, 2, I 6, 383-385
- DIOLAIUTI G., PECCI M. & SMIRAGLIA C. (2003) - *Liligo Glacier, Karakoram, Pakistan: a reconstruction of the recent history of a surge-type glacier.* Annals of Glaciology, 36, 168–172
- DIOLAIUTI G., FUGAZZA D., GALLO M. & MELIS M.T. (eds) (2024) - *The new inventory of 13,032 glaciers in Pakistan: the "Glaciers & Students" Project.* University of Milan, University of Cagliari, EvK2CNR - Pakistan, UNDP, 396 pp
- FARINOTTI D., IMMERZEEL W. W., DE KOK R. J., QUINCEY D. J. & DEHECQ A. (2020) - *Manifestations and mechanisms of the Karakoram glacier anomaly*. Nature Geoscience, 13(1), 8–16. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0513-5
- FERRARI M.A. (2023) – *Assalto alle Alpi*. Einaudi Editore, Torino, 130 pp
- GIBSON M. J., GLASSER N. F., QUINCEY D. J., A. V. ROWAN & IRVINE-FYNN T. D. (2016) - *Changes in glacier surface cover on Baltoro glacier, Karakoram, north Pakistan, 2001–2012.* Journal of Maps, 13, 2, 100–108. http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2016.1264319
- GIBSON M.J., GLASSER N.F., QUINCEY D.J., MAYER C., ROWAN A.V. & IRVINE-FYNN T.D. (2017) - *Temporal variations in supraglacial debris distribution on Baltoro Glacier, Karakoram between 2001 and 2012.* Geomorphology, 295, 572–585
- The GlaMBIE Team (2025) - *Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023.* Nature, 639, 382–388. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08545-z
- HEWITT K. (2005) - *The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the "Elevation Effect", Karakoram Himalaya.* Mountain Research and Development, 25,4, 332–340. https://doi.org/10.1659/0276-4741(2005)025[0332:TKAGEA]2.0.CO;2
- HEWITT K. (2007) - *Tributary glacier surges: an exceptional concentration at Panmah Glacier, Karakoram Himalaya*. Journal of Glaciology, 53, 181, 181–188
- HEWITT K. (2010) – In: Ventura F.: 1909-2009. *Sulle Tracce dei Ghiacciai. Un secolo di cambiamenti climatici sui ghiacciai del Karakorum.* Arti Grafiche Picene, 10-11
- HEWITT K. (2011) - *Glacier change, concentration, and elevation effects in the Karakoram Himalaya, Upper Indus Basin.* Mountain Research and Development, 31, 3, 188-200
- KARGEL J.S., LEONARD G.J., BISHOP M.P., KÄÄB A. & RAUP B.H. (eds) (2014) - *Global Land Ice Measurements from Space: Satellite Multispectral Imaging of Glaciers.* Springer, Berlin, Heidelberg, 876 pp
- LHAKPA D., LI M., TSEDAN B., YONGQING T. & CHENG B. (2026) - *Debris-covered glacier identification in the Karakoram aided by thermal remote sensing.* Science, 29, 115148; https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.115148
- MAYER C., LAMBRECHT A., BELÒ M., SMIRAGLIA C. & DIOLAIUTI G. (2006) - *Glaciological characteristics of the ablation zone of Baltoro glacier, Karakoram, Pakistan.* Annals of Glaciology, 43, 123-131
- MELIS M.T., FUGAZZA D., NAITZA L., GALLO M., DESSÌ F., CASU M., AHMAD A., BARBAGALLO B., DIOLAIUTI G., SENESE A., UL HASSAN R., ZAIB M.A., MUNIR S., HUSSAIN A. & SIMONETTI D. (2024) - *New remote sensing methodology to map the glacier extent: The new inventory of glaciers in Pakistan.* Trends in Earth Observation, 3, 46–49
- MIHALCEA C., MAYER C., DIOLAIUTI G., D'AGATA C., SMIRAGLIA C., LAMBRECHT A., VUILLERMOZ E. & TARTARI G. (2008) - *Spatial distribution of debris thickness and melting from remote-sensing and meteorological data, at debris-covered Baltoro Glacier, Karakoram, Pakistan.* Annals of Glaciology, 48, 49-57
- MINORA U., BOCCHIOLA D., D'AGATA C., MARAGNO D., MAYER C., LAMBRECHT A., VUILLERMOZ E., SENESE A., COMPOSTELLA C., SMIRAGLIA C. & DIOLAIUTI G. (2016) - *Glacier area stability in the Central Karakoram National Park (Pakistan) in 2001–2010 — the "Karakoram Anomaly" in the spotlight.* Progress in Physical Geography, 40, 5, 629–660
- NÜSSER M. & SCHMIDT S. (2021) - *Glacier changes on the Nanga Parbat 1856–2020: A multi-source retrospective analysis.* Science of The Total Environment, 785, 147321 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147321
- PAUL F. (2015) - *Revealing glacier flow and surge dynamics from animated satellite image sequences: examples from the Karakoram.* The Cryosphere, 9, 2201–2214, https://doi.org/10.5194/tc-9-2201-2015, 2015
- PECCI M. & SMIRAGLIA C. (2000) - *Advance and retreat phases of the Karakorum glaciers during the*

20th century: case studies in Braldo Valley (Pakistan). Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 21, 71-85

- QUINCEY D. J., COPLAND L., MAYER C., BISHOP M., LUCKMAN A. & BELÒ, M. (2009) - *Ice velocity and climate variations for Baltoro Glacier, Pakistan.* Journal of Glaciology. 55, 194, 1061–1071. https://doi.org/10.3189/002214309790794913
- QUINCEY D. J., GLASSER N. F., COOK S. J. & LUCKMAN A. (2015) - *Heterogeneity in Karakoram glacier surges.* Journal of Geophysical Research. Earth Surface, 120, 1288–1300. https://doi.org/10.1002/2015JF003515
- RANZI R., FUGAZZA D. & BONDESAN A. (2017) - *Studiare i ghiacciai attraverso immagini telerilevate. Dai satelliti ai droni.* In: Comitato Glaciologico Italiano, Itinerari glaciologici sulle montagne italiane. Vol. 1 – Capitoli tematici. Società Geologica Italiana, Roma, 61-66
- SAVOIA-AOSTA A. & DESIO A. (1936) - *Spedizione geografica italiana al Karakoram (1929): storia del viaggio e risultati geografici.* Milano, Bertarelli, 568 pp
- SCOTT M. (2024) - *What is the Karakoram Anomaly?* NSIDC
- SENESE A., MARAGNO D., FUGAZZA D., SONCINI A., D'AGATA C., AZZONI R.S., MINORA U., UL-HASSAN R., VUILLERMOZ E., ASIF KHAN M., SHAFIQ RANA A., RASUL G., SMIRAGLIA C. & DIOLAIUTI G.A. (2018) - *Inventory of glaciers and glacial lakes of the Central Karakoram National Park (CKNP Pakistan).* Journal of Maps, 14, 2, 189-198, https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1445561
- SENESE A., AHMAD A., MAUGERI M. & DIOLAIUTI G. A. (2025) - *Assessing the carbon footprint of the 2024 Italian K2 expedition: A path towards sustainable high-altitude tourism.* Sustainability, 17, 1, 344
- SMIRAGLIA C., MAYER C., MIHALCEA C., DIOLAIUTI G., BELÒ M. & VASSENA G. (2007) - *Ongoing variations of Himalaya and Karakoram glaciers as witnesses of global changes: recent studies on selected glaciers.* In: Baudo R., Tartari G., Vuillermoz E. (eds), Mountain Witness of Global Change. Elsevier B.V., 235-247
- SMIRAGLIA C., MAYER C., MIHALCEA C., DIOLAIUTI G., BELO' & VASSENA G. (2008) - *I ghiacciai dell'Himalaya-Karakorum: risultati e problemi nello studio delle variazioni recenti dei più grandi ghiacciai non polari.* In: Bonardi L. (a cura di), Ghiacciai montani e cambiamenti climatici nell'ultimo secolo. Servizio Glaciologico Lombardo, Milano, 149-166
- SMIRAGLIA C. & SCOTTI R. (2022) - *I ghiacciai testimoni della crisi climatica fra scienza e fotografia.* In: Ventura F., Earth's Memory. I ghiacciai, testimoni della crisi climatica. Forte di Bard-Valle d'Aosta, 20-21
- VENTURA F. (2010) - 1909-2009. *Sulle Tracce dei Ghiacciai. Un secolo di cambiamenti climatici sui ghiacciai del Karakorum.* Arti Grafiche Picene, 48 pp
- VENTURA F. (a cura di) (2022) - *Earth's Memory. I ghiacciai, testimoni della crisi climatica.* Forte di Bard-Valle d'Aosta, 227 pp
- VILLOTTA U. (2026) - Free K2 - *Baltoro Survey 2025.* CAAI-MW https://www.clubalpinoaccademico.it/news-2/baltoro-survey-2025
- WENDLEDER A.., FRIEDL P. & MAYER C. (2018) - *Impacts of Climate and Supraglacial Lakes on the Surface Velocity of Baltoro Glacier from 1992 to 2017.* Remote Sensing, 10, 1681; https://doi.org/10.3390/rs10111681
- WENDLEDER A., BRAMBOECK J., IZZARD J., ERBERT-SEDER T., D'ANGELO P., SCHMITT A., QUINCEY D.J, MAYER C. & BRAUN M.H. (2024) - *Velocity variations and hydrological drainage at Baltoro Glacier,* Pakistan. The Cryosphere, 18, 1085–1103, https://doi.org/10.5194/tc-18-1085-2024
- WGMS Network (2026) - *Global glacier mass change in 2025.* Nature Reviews Earth & Environment. https://doi.org/10.1038/s43017-026-00777-z
- WIESMANN S., STEINER L., POZZI M., BOZZINI C., BAUDER A. & HURNI L. (2012) - *Reconstructing Historic Glacier States Based on Terrestrial Oblique Photographs.* Proceedings - AutoCarto 2012 - Columbus, Ohio, USA - September 16-18
- XIE F., LIU S., GAO Y., ZHU Y., BOLCH T., KÄÄB A., DUAN S., MIAO W., KANG J., ZHANG Y., PAN X., QIN C., WU K., QI M., ZHANG X., YI Y., HAN F., YAO X., LIU Q., WANG X., JIANG Z., SHANGGUAN D., ZHANG Y., GRÜNWALD R., ADNAN M., KARKI J.& SAIFULLAH M. (2023) - *Inter-decadal glacier inventories in the Karakoram since the 1990s.* Earth System Science Data, 15, 847–867. https://doi.org/10.5194/essd-15-847-2023
- ZHOU S., SUN Z., ABOWARDA A. S., ALETOUM E., HUANG Q., LIN X. & LIU G. (2025) - *Has the Karakoram anomaly persisted over the past two decades?* GIScience & Remote Sensing, 62,1. https://doi.org/10.1080/15481603.2025.2548059

Sitografia

- Fondazione Glaciologica Italiana - https://glaciologia.it/
- Fondazione Glaciologica Italiana - https://glaciologia.it/mostra-ghiacciai-rettorato-mostra/
- UNESCO - https://glaciercasualtylist.rice.edu/
- CNR - https://dta.cnr.it/project/clic-pyramid/
- https://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/glacier-recession/glacier-status-recession-and-change-in-nepal/
- Scott - https://nsidc.org/learn/ask-scientist/karakoram-anomaly-it-real
- Davies - https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/glacier-flow-2/surging-glaciers/
- https://www.sai.uni-heidelberg.de/en/departments-and-branches/geography/research/himvid-high-mountain-visual-database-repeat-photography
- https://macromicro.it/sulle-tracce-dei-ghiacciai/



Fronte del Ghiacciaio di Lares nel Parco Naturale Adamello Brenta, Gruppo Adamello Presanella - 2022 - ph Cristian Ferrari

https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_02

I ghiacciai visti dallo spazio

Sviluppi e prospettive dell'approccio integrato della Commissione Glaciologica della SAT tra telerilevamento e rilievi sul campo

Massimo Santoni[1], Francesca Vallongo[1], Cristian Ferrari[1]

1. *Commissione Glaciologica SAT*

Riassunto

L'articolo presenta l'approccio innovativo e integrato sviluppato dalla Commissione Glaciologica della SAT (Società degli Alpinisti Tridentini) per il monitoraggio dei ghiacciai trentini, che affianca ai tradizionali rilievi sul campo l'impiego sinergico di diverse tecnologie di telerilevamento. A fronte dell'arretramento e della crescente inaccessibilità delle aree glaciali, i dati satellitari consentono un'osservazione quantitativa continua su vasta scala. Lo studio illustra l'utilizzo dei dati ottici multispettrali (Sentinel-2) per la mappatura bidimensionale e l'aggiornamento del catasto glaciale, superando le sfide legate alla copertura nuvolosa e nevosa tramite tecniche di telerilevamento. Per ovviare ai limiti dei sensori ottici, in particolare sui ghiacciai coperti da detrito, viene esplorato l'uso dei dati RADAR ad apertura sintetica (Sentinel-1): l'analisi della coerenza interferometrica si rivela infatti uno strumento chiave per quantificare la stabilità delle superfici e identificare le porzioni di ghiaccio ormai estinte. Infine, l'articolo esplora l'analisi della "terza dimensione" (le variazioni di spessore) mediante l'impiego di laser altimetri satellitari LiDAR (come ICESat-2 e GEDI). In conclusione, lo studio evidenzia come l'imprescindibile sinergia tra la visione globale offerta dallo spazio e il fondamentale lavoro di misurazione sul terreno sia essenziale per comprendere e monitorare la complessa evoluzione della criosfera alpina.

Abstract: Glaciers seen from space

This article presents the innovative and integrated approach developed by the SAT (Società degli Alpinisti Tridentini) Glaciological Commission for monitoring the glaciers in the Trentino region, which combines traditional field surveys with the synergistic use of various remote sensing technologies. In the context of glacier retreat and the increasing inaccessibility of glacial environments, satellite data provides continuous, large-scale quantitative observations. The study outlines the application of multispectral optical data (Sentinel-2) for two-dimensional mapping and updating the glacier inventory, overcoming the challenges posed by cloud and snow cover through remote sensing techniques. To address the limitations of optical sensors, particularly on debris-covered glaciers, the use of Synthetic Aperture Radar (SAR) data (Sentinel-1) is explored: the analysis of interferometric coherence proves to be a key tool for quantifying surface stability and identifying extinct ice portions. Finally, the article delves into the "third dimension" (thickness variations) by employing satellite LiDAR altimeters (such as ICESat-2 and GEDI). In conclusion, the study emphasizes that the indispensable synergy between the global view provided from space and the fundamental on-ground measurements is essential for understanding and monitoring the complex evolution of the Alpine cryosphere.

Introduzione

Nello studio dei ghiacciai i dati telerilevati sono oggigiorno uno strumento con grandi potenzialità per mappare le aree glaciali e i loro cambiamenti. Mediante l'uso di piattaforme di acquisizione satellitari, aeree e ora anche mediante droni è possibile ottenere dati su vaste aree, limitando o eliminando la necessità di recarsi direttamente sul terreno. Infatti, sempre più spesso, a causa dell'arretramento delle fronti, l'accesso a molti ghiacciai è divenuto lungo, impervio e in alcuni casi proibitivo.

A partire già dalla fine del XIX secolo la fotografia e la successiva rifotografia di porzioni di ghiacciai hanno consentito di ottenere una prima serie di dati utili per studiarne i cambiamenti nel tempo. L'informazione visiva raccolta dalla fotografia, infatti, permette di interpretare la geometria della superficie glaciale e valutarne la variazione negli anni mostrando i cambiamenti subiti dal ghiacciaio. Questo approccio, benché estremamente efficacie nel mostrare le variazioni in modo qualitativo spesso con confronti davvero d'impatto, applicare metodi quantitativi per quantificare le variazioni del ghiacciaio osservato risulta particolarmente complesso. Con la metà del XX secolo, lo sviluppo di sistemi di telerilevamento satellitare, ha consentito per la prima volta di osservare vaste aree della superficie terrestre con una regolarità fornendo quindi immagini e dati che possono essere analizzati in modo quantitativo. Si dovrà aspettare però il secondo decennio di questo XXI secolo per avere

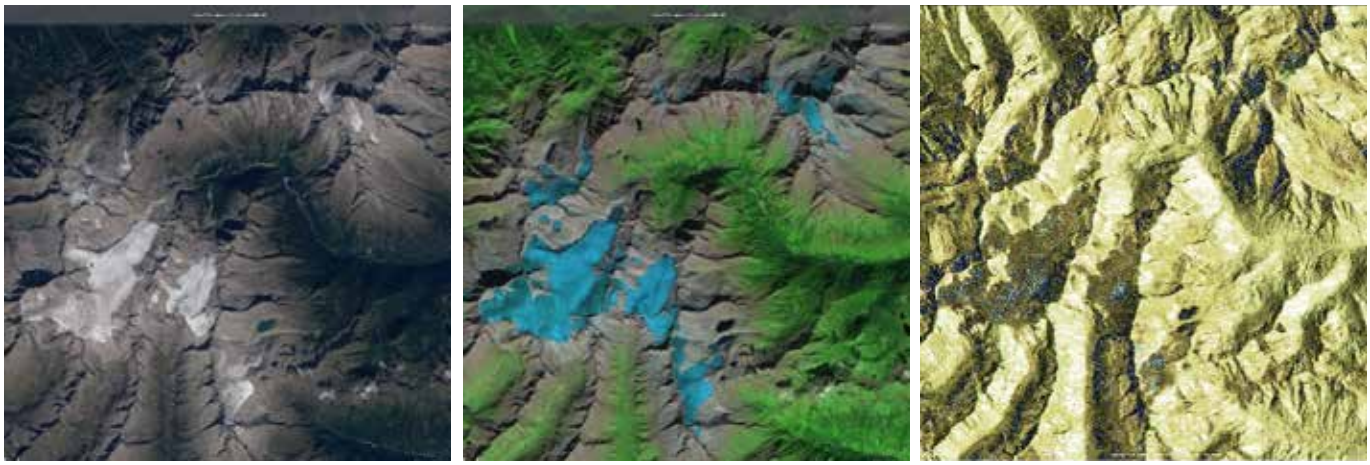
sistemi in grado di fornire dati con una risoluzione spaziale sufficientemente elevata (dell'ordine di pochi metri per pixel) e una cadenza temporale sufficientemente frequente da poter esser utilizzati in modo efficace per monitorare in modo quantitativo i ghiacciai alpini.

Se da un lato i dati ottici rappresentano l'evoluzione naturale della fotografia tradizionale fornendo immagini interpretabili anche in modo visivo diretto, il panorama del telerilevamento moderno offre una vasta gamma di dati con caratteristiche peculiari e complementari. Oltre alla semplice componente spettrale o visibile, i sensori odierni sono in grado di esplorare differenti porzioni dello spettro elettromagnetico e di impiegare diverse geometrie e principi di acquisizione, permettendo di estrarre informazioni altrimenti invisibili all'occhio umano o ai normali sensori fotografici.

Oltre alle differenze legate alla geometria di osservazione e alla piattaforma di acquisizione utilizzata, che portano a diversi compromessi per quanto riguarda la risoluzione spaziale e il tempo necessario a osservare nuovamente una data area, i sensori utilizzati in questo ambito differiscono tra loro anche per la porzione di spettro elettromagnetico utilizzato (dagli UV e luce visibile fino alle onde radio) e per la natura stessa del funzionamento del sensore che può essere attivo o passivo. I sensori attivi, infatti, emettono un segnale e ne misurano la riflessione del terreno, mentre quelli passivi sfruttano una sorgente esterna, come per esempio il Sole, per illuminare la scena osservata. Analizzando i dati telerilevati più utili allo studio dei ghiacciai si possono quindi trovare:

- Dati ottici multispettrali: dalle semplici fotografie scattate da un drone fino a dati satellitari con bande distribuite nello spettro visibile e infrarosso (Figura 1 a-b). Permettono di osservare la superficie ed estensione del ghiaccio così come la presenza di neve o firn, allo stesso tempo necessitano dell'illuminazione solare; l'eventuale nuvolosità limita la visibilità della superficie. La risoluzione a terra va da pochi cm per pixel, nel caso dei droni, fino a 10-30m/px per i sistemi satellitari più diffusi.
- Dati RADAR (RAdio Detection And Ranging) ad apertura sintetica (SAR Synthetic Aperture Radar): questi sistemi attivi emettono un impulso elettromagnetico nello spettro delle onde radio e ne misurano l'eco riflesso dal terreno (Figura 1 c). Grazie alla geometria a scansione laterale, con un'adeguata elaborazione, è possibile ottenere un'immagine della superficie. Essendo un sistema attivo e grazie alle frequenze utilizzate, non necessitano dell'illuminazione solare così come non risentono della copertura nuvolosa.
- Laser Scanner Aerei: anche in questo caso si tratta di sistemi attivi, operanti però nello spettro della luce visibile o del vicino infrarosso (detti LiDAR, Light Detection And Ranging). Grazie al fatto che spesso questi sistemi sono operati da aereo o elicottero, riescono a generare un dato che rappresenta la struttura tridimensionale del terreno osservato con un ottimo dettaglio geometrico, riuscendo a ricostruire particolari di dimensioni di un metro o meno. Se da un lato sono tra i dati più dettagliati che possono essere utilizzati per descrivere i cambiamenti delle aree glaciali, per loro natura necessitano di acquisizioni dedicate, rendendoli quindi anche molto costosi e discontinui nel tempo. In questo ambito però va notato come i recenti sviluppi riguardo l'elaborazione fotogrammetrica di immagini acquisite da drone consenta di ottenere un dato abbastanza simile a quello LIDAR, permettendo quindi di effettuare una più semplice acquisizione di elementi di questo tipo.
- Altimetri LiDAR e RADAR: sebbene simili in natura ai laser scanner aerei, l'elevata distanza del sensore dal terreno e la grande velocità di movimento dovuta all'orbita portano a ottenere una densità delle misurazioni e una risoluzione spaziale di vari ordini di grandezza superiore. Per questi motivi, generalmente i dati vengono acquisiti lungo uno o più profili nella direzione di movimento, con l'obiettivo principale di studiare le grandi masse di ghiaccio polari e le variazioni di livello degli oceani. I più recenti altimetri LiDAR presentano però un'impronta a terra nell'ordine di 20 m, che quindi li rende interessanti anche nello studio dei ghiacciai alpini.

Di pari passo con lo sviluppo tecnologico dei sensori, sempre più dataset sono stati resi di libero accesso grazie a diversi programmi realizzati dalle principali agenzie spaziali. Programmi come Landsat e MODIS realizzati da NASA e, negli anni recenti, Copernicus della Commissione Europea ed ESA hanno reso disponibili grandi quantità di dati acquisiti in modo regolare sull'intera superficie globale. Questa disponibilità di informazioni, facilmente accessibili, porta quindi una nuova sfida tecnologica volta a sfruttare in modo sinergico e quanto più automatico possibile sempre più osservazioni disponibili al fine di estrarne informazioni sempre più dettagliate e affidabili. Nel caso di dati ottici, per esempio, la disponibilità di osservazioni multiple distribuite nel tempo permette di superare i limiti posti dalla copertura nuvolosa. Vi sono quindi grandi potenzialità per la realizzazione di sistemi automatici per l'analisi delle aree glaciali alpine volti a monitorarne lo stato e l'estensione, permettendo così di coadiuvare ed estendere le classiche misure effettuate in situ.



(a) (b) (c)

Figura 1 - Esempio di dati ottici multispettrali e SAR acquisiti dai satelliti Sentinel-2 e Sentinel-1 nel settembre 2023 sull'area del gruppo Adamello e Presanella. (a) Composizione in veri colori Sentinel-2; (b) composizione falso colore delle bande nell'infrarosso di Sentinel-2; (c) composizione in falsi colori del coefficiente di riflessione superficiale del dato RADAR Sentinel-1. Contiene dati Sentinel 2023 modificati, processati con EO Browser

Il monitoraggio dei ghiacciai del Trentino: l'approccio della Commissione Glaciologica della SAT

La Commissione Glaciologica della SAT a partire dal luglio 2021 ha quindi affiancato ai tradizionali metodi di osservazione dei ghiacciai trentini, condotti dai suoi operatori già da lungo tempo, il loro monitoraggio attraverso dati telerilevati.

L'obiettivo di questo approccio integrato tuttora in fase di sviluppo è quello di fornire un quadro completo e coerente dello stato e delle dinamiche dei ghiacciai trentini, fornendo dati che possano integrare il lavoro in situ e permettere di ottenere maggiori informazioni su aree più estese con una maggiore frequenza temporale. Proprio sulla frequenza temporale, il continuo sviluppo tecnologico in questo settore apre nuove prospettive per il monitoraggio glaciale, consentendo l'acquisizione e l'analisi di lunghe serie temporali di dati che permettono di osservare i processi che caratterizzano un'intera stagione di ablazione, fornendo quindi un punto di vista diverso rispetto alle tradizionali misure in situ.

Tra i vari strumenti a disposizione grande attenzione è stata rivolta ai dati Sentinel-2, per la loro combinazione di risoluzione geometrica e temporale (Sez. 3); ai dati RADAR Sentinel-1, per la loro capacità di monitorare in modo indipendente dalle condizioni meteorologiche con elevata sensibilità a cambiamenti anche piccoli nel terreno (Sez. 4); e ai dati altimetrici LiDAR per la loro capacità di fornire informazioni tridimensionali sui ghiacciai (Sez 5).

Mappatura 2D delle Aree glaciali con Immagini Ottiche Sentinel-2

Il primo passo nello sviluppo della metodologia di monitoraggio ha riguardato la perimetrazione delle superfici glaciali, con l'obiettivo primario di fornire un aggiornamento del catasto dei ghiacciai trentini. Per questo fine, i dati ottici multispettrali forniti dalla missione Sentinel-2 si sono rivelati la scelta naturale e più idonea: la combinazione di una risoluzione spaziale di 10 metri e di un tempo di rivisita elevato consente infatti di avere a disposizione immagini in grado di delineare i corpi glaciali e di seguirne l'evoluzione nel corso della stagione ablativa.

Vengono utilizzate le immagini satellitari Sentinel-2 (Drusch *et al.* 2012) selezionate nel periodo tra il 10 agosto e il 1 ottobre di ogni anno al fine di ottenere dati con la minor copertura nevosa possibile. Le immagini impiegate sono generalmente acquisite a intervalli di 3-10 giorni, in funzione della zona e della posizione relativa dell'orbita dei satelliti. Aspetto importante da sottolineare è che la presenza di copertura nuvolosa ha reso necessario l'impiego di tecniche innovative nel campo del remote sensing al fine di ottenere una mappatura il quanto più completa e affidabile.

L'attività effettuata fino a oggi in questo settore sui ghiacciai del Trentino, si è concretizzata in un primo lavoro (Vallongo *et al.,* 2023, Figura 2) e segue metodologicamente lo studio proposto da Paul *et al.,* (Paul *et al.,* 2020) che utilizza le immagini Sentinel-2 (S2) per realizzare un nuovo inventario dei ghiacciai alpini e documentarne il continuo ritiro. Come sottolineato in quest'ultimo studio, l'accelerazione della riduzione della superficie glaciale alpina in atto dagli anni Ottanta in poi, fa sì che la risoluzione spaziale di 10 metri che offrono le immagini S2, risulti particolarmente

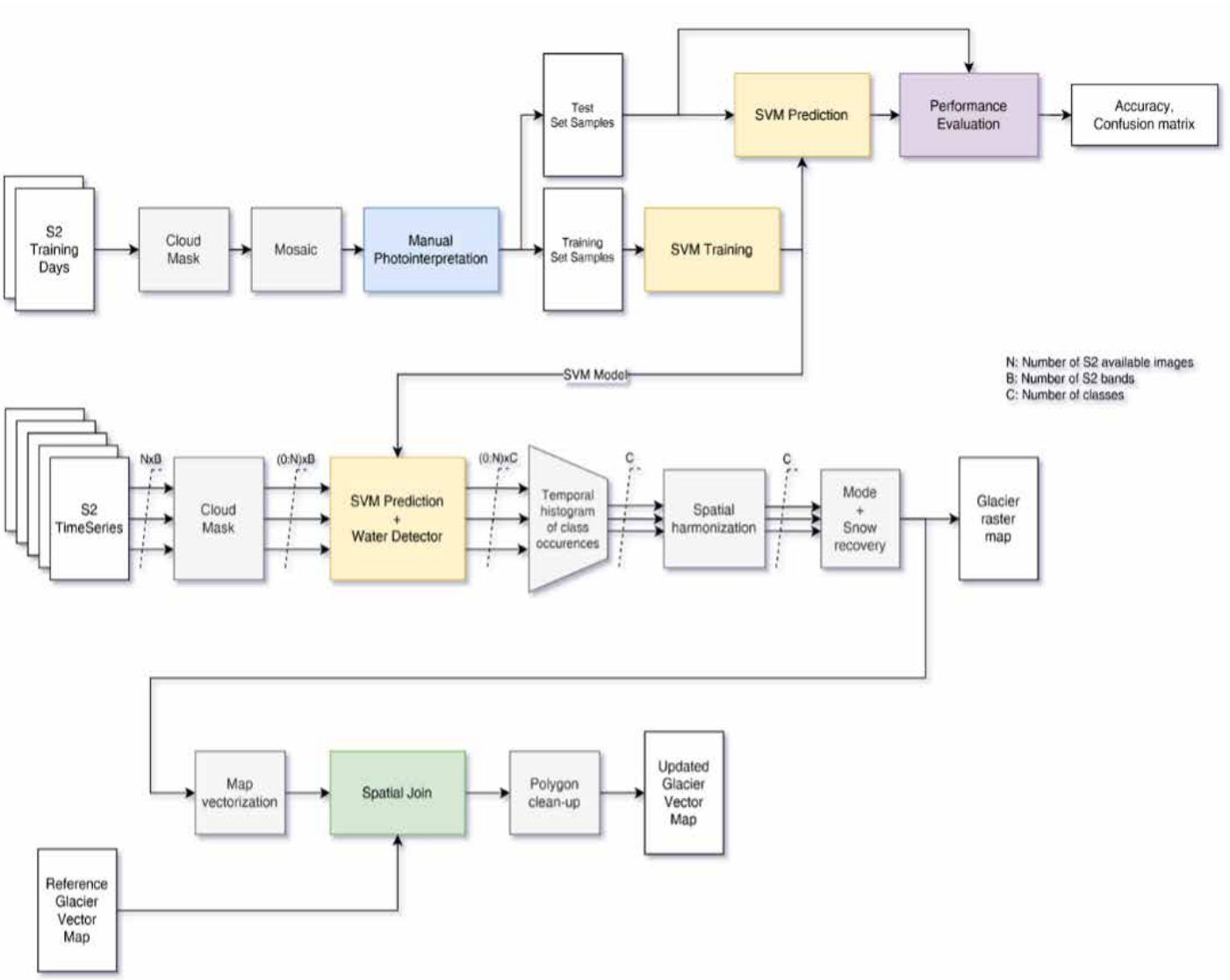


Figura 2 - Schema riassuntivo a blocchi della metodologia sviluppata per l'analsisi delle immagini Sentinel-2

utile nella modellazione e nel monitoraggio. Per l'analisi dell'arretramento dei ghiacciai trentini tramite dati telerilevati satellitari sono state scelte, come dato principale, le immagini ottiche multispettrali acquisite da Sentinel-2 MSI (*MultiSpectral Instrument*). Questa missione, lanciata nel 2015 e composta da due satelliti gemelli, ha l'obiettivo di fornire un sistema di acquisizioni di immagini con un'alta risoluzione geometrica e alta frequenza temporale per supportare i vari programmi *Copernicus* attivi in ambito di monitoraggio del terreno, del clima, delle aree marine e in risposta a situazioni di emergenza meteorologica e ambientale. Nel dettaglio, Sentinel-2 MSI è uno scanner pushbroom (quindi costituito da un sensore lineare perpendicolare alla direzione di movimento che sfrutta proprio quest'ultima per costruire un'immagine) operante in orbita polare eliosincrona, che misura la radiazione riflessa dal pianeta in 13 bande spettrali dal VNIR (visibile - vicino infrarosso) al SWIR (infrarosso a onda corta). Il campionamento spaziale a terra di queste immagini è di 10 o 20 m/pixel in funzione delle bande utilizzate. Le immagini prodotte vengono rese liberamente disponibili sul portale *Copernicus Data Space Ecosystem* e su vari sistemi di calcolo in cloud (es. *Google Earth Engine, Microsoft Planetary Compute, DIAS* ecc..). Per lo studio dei ghiacciai trentini sono stati utilizzati dati telerilevati e risorse di calcolo in *cloud* liberamente accessibili, in modo da accedere a una grande quantità di informazioni e allo stesso tempo avere accesso a un'infrastruttura adeguata in grado di gestirli. In particolare, l'elaborazione delle serie temporali di immagini Sentinel-2 è stata sviluppata in *Google Earth Engine*, mentre *Google Colab* è stato utilizzato nella parte di processing geospaziale. Anche il software che è stato utilizzato si basa in gran parte su progetti *open source*, il cui sviluppo negli ultimi anni ha raggiunto un ottimo livello.

Nel dettaglio, il metodo di analisi sviluppato utilizza un sistema di classificazione basato su tecniche di *machine learning*. Il classificatore viene preventivamente allenato con informazioni ottenute tramite fotointerpretazione e rilievi sul campo e permette di assegnare a ogni pixel di un'immagine satellitare una specifica classe (sei in tutto), indicatrice ciascuna

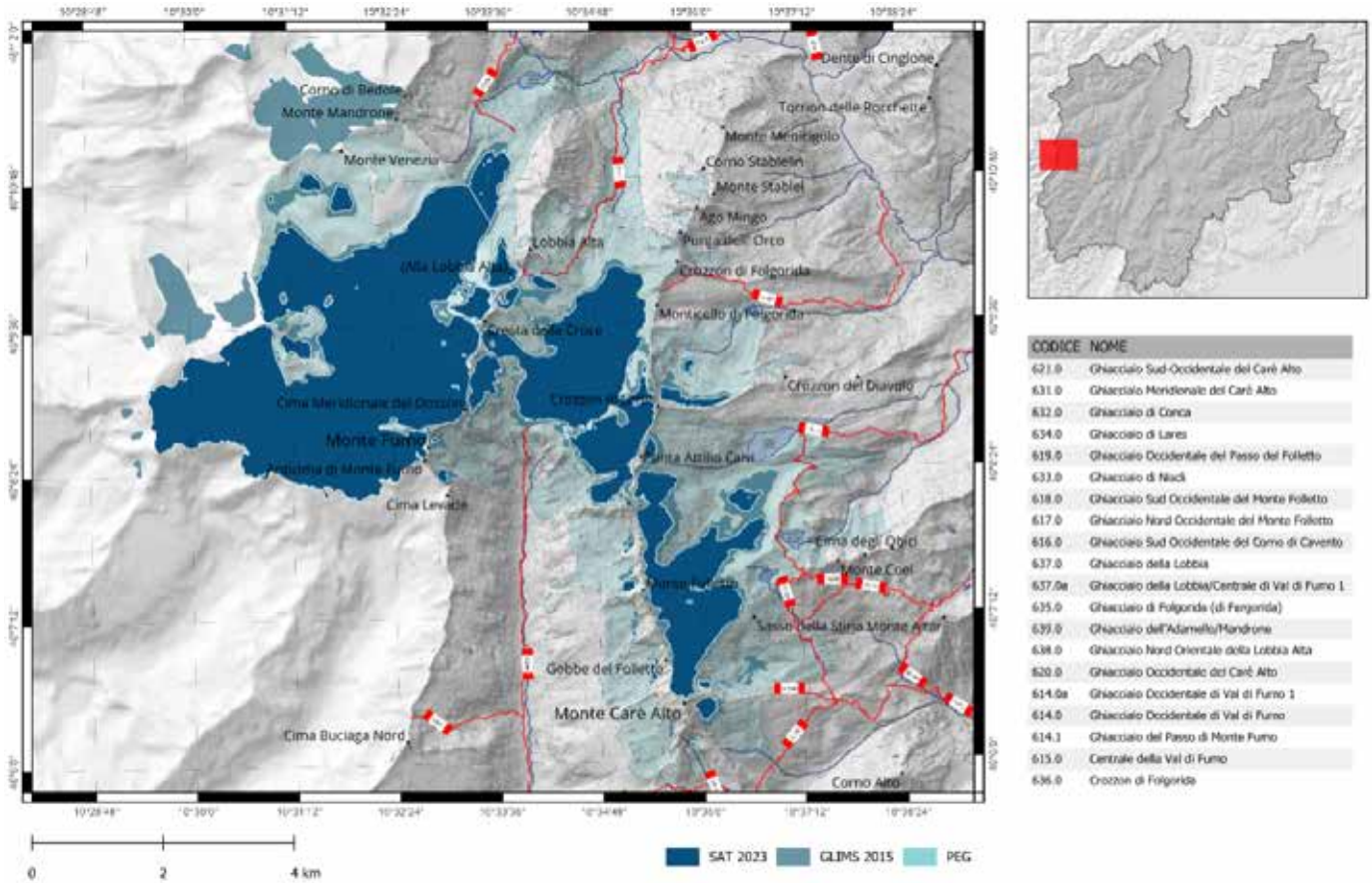
di ghiaccio, neve, firn, roccia, acqua e vegetazione. Al fine di massimizzare l'osservabilità dell'area glaciale rispetto alla copertura nevosa e nuvolosa, tale classificatore è stato applicato all'intera serie temporale di immagini multispettrali acquisite durante la stagione in analisi. In seguito, dopo aver opportunamente scartato i pixel con copertura nuvolosa, l'informazione portata dalle molte immagini acquisite nel corso della stagione viene condensata scegliendo per ogni pixel la classe con il maggior numero di occorrenze. Un ulteriore algoritmo permette inoltre di recuperare utili informazioni anche dalle aree che per parte della stagione sono state coperte da neve.

I dati così ottenuti, dopo un opportuno filtraggio, vengono vettorializzati e automaticamente associati ai poligoni di riferimento dei catasti esistenti mediante tecniche di analisi geospaziale.

Aggiornamento del Catasto Glaciologico

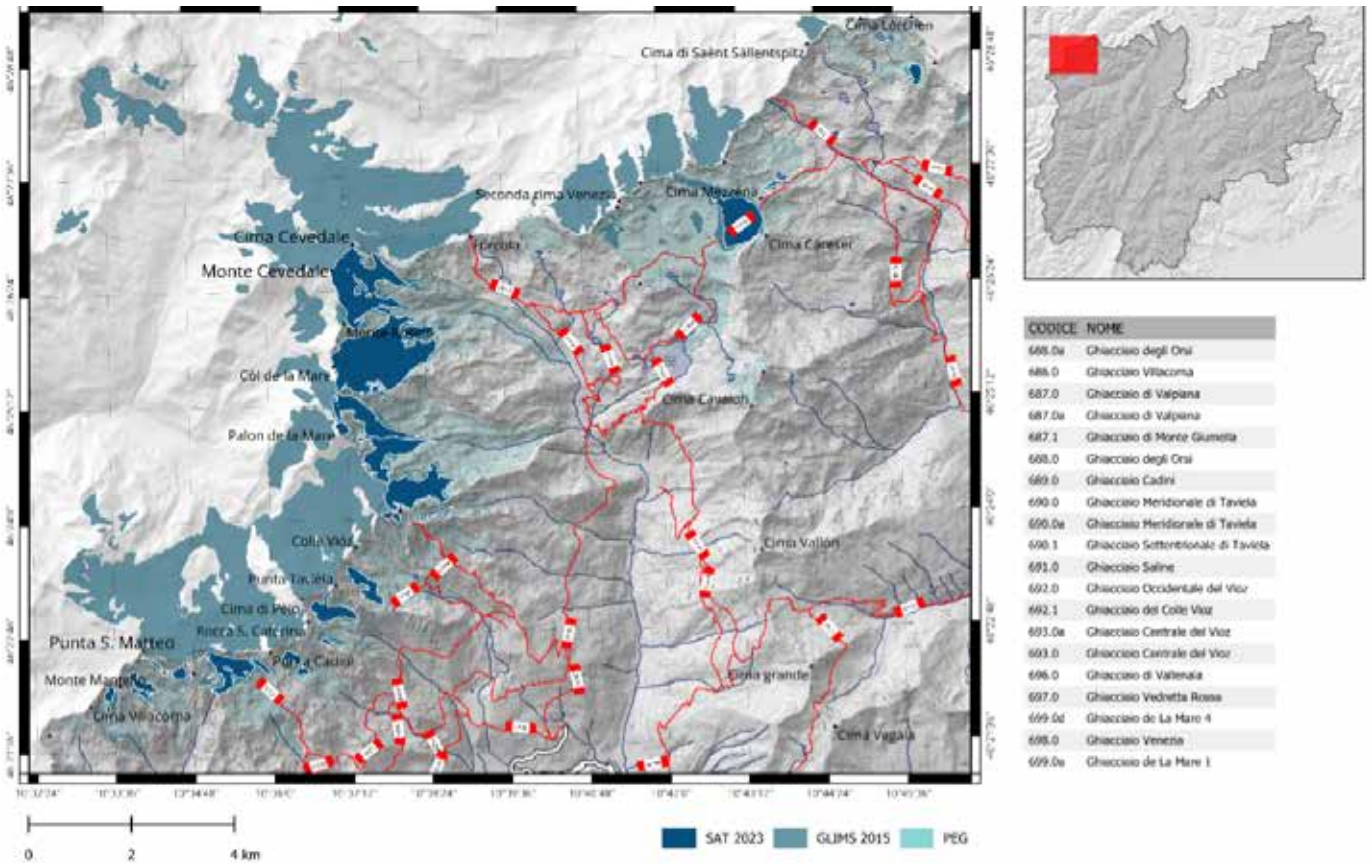
Il metodo di classificazione illustrato ha permesso di ottenere i poligoni delle aree glaciali per ogni anno con sufficienti acquisizioni da parte dei satelliti Sentinel-2. Particolare attenzione é stata posta al 2023, anno che ha visto un forte arretramento delle fronti dovuto a un inverno poco nevoso, seguito da un'estate molto calda e altrettanto povera di precipitazioni. La ridotta copertura nuvolosa e la prematura fusione della neve ha consentito l'acquisizione di numerose immagini satellitari, fattore che, come illustrato precedentemente, è d'aiuto a ottenere risultati più attendibili. I poligoni dell'anno 2023 sono stati inoltre validati visivamente mediante fotointerpretazione e confronto con altri dati ottici ad alta risoluzione disponibili (in particolare l'ortofoto aerea acquista dalla Provincia Autonoma di Trento nell'autunno 2022) integrando così le aree non osservabili da satellite, per esempio a causa della copertura detritica o a particolari condizioni di illuminazione ed ombre. Questa revisione ha portato alla generazione di un dataset poligonale rilasciato dalla Commissione Glaciologica SAT come riferimento aggiornato delle aree glacializzate in Trentino (https://doi.org/10.5281/zenodo.15306479)

La catena di elaborazione automatica è stata inoltre applicata, nel periodo 2016-2023, a tutti gli anni (Figura 7). In particolari aree, i risultati ottenuti dalla parte automatica del metodo di analisi mostrano in modo evidente la riduzione di superficie dei ghiacciai osservata negli ultimi anni anche sul campo. Di seguito si riportano alcune tavole rappresentanti in maggior dettaglio i risultati ottenuti sulle principali aree glaciali (da Figura 3 a Figura 6). È possibile apprezzare come l'approccio proposto mostri in modo evidente la riduzione di area glaciale anche su una scala temporale ridotta, in quelle aree soggette a forte fusione.



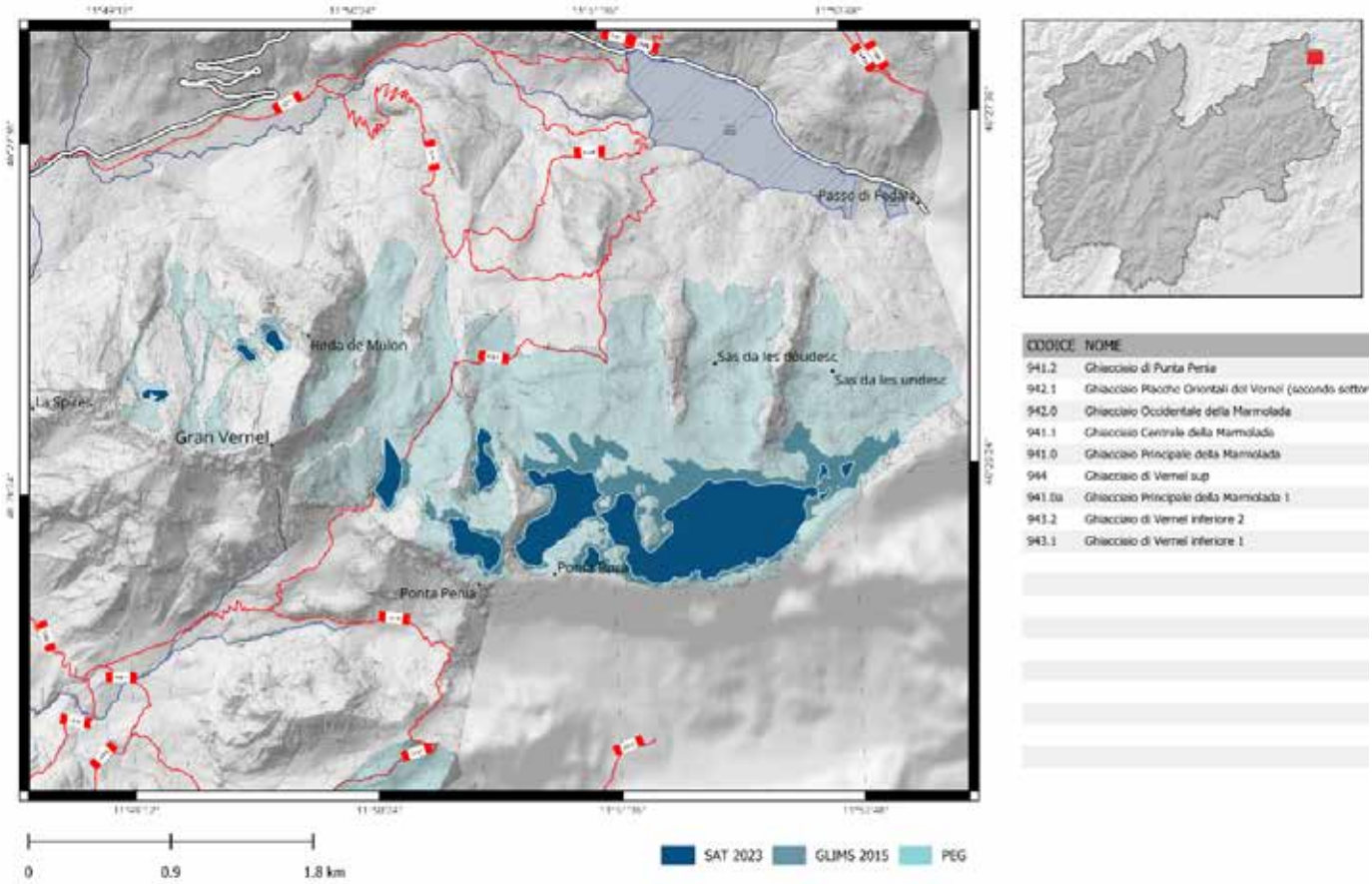
CODICE	NOME
621.0	Ghiacciaio Sud-Occidentale del Carè Alto
631.0	Ghiacciaio Meridionale del Carè Alto
632.0	Ghiacciaio di Conca
634.0	Ghiacciaio di Lares
619.0	Ghiacciaio Occidentale del Passo del Folletto
633.0	Ghiacciaio di Niscli
618.0	Ghiacciaio Sud Occidentale del Monte Folletto
617.0	Ghiacciaio Nord Occidentale del Monte Folletto
616.0	Ghiacciaio Sud Occidentale del Corno di Cavento
637.0	Ghiacciaio della Lobbia
637.0a	Ghiacciaio della Lobbia/Centrale di Val di Fumo 1
635.0	Ghiacciaio di Folgorida (di Fargorida)
639.0	Ghiacciaio dell'Adamello/Mandrone
638.0	Ghiacciaio Nord Orientale della Lobbia Alta
620.0	Ghiacciaio Occidentale del Carè Alto
614.0a	Ghiacciaio Occidentale di Val di Fumo 1
614.0	Ghiacciaio Occidentale di Val di Fumo
614.1	Ghiacciaio del Passo di Monte Fumo
615.0	Centrale della Val di Fumo
636.0	Crozzon di Folgorida

Figura 3 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Adamello Caré Alto



CODICE	NOME
688.0a	Ghiacciaio degli Orsi
686.0	Ghiacciaio Villacoma
687.0	Ghiacciaio di Valpiana
687.0a	Ghiacciaio di Valpiana
687.1	Ghiacciaio di Monte Giumella
688.0	Ghiacciaio degli Orsi
689.0	Ghiacciaio Cadini
690.0	Ghiacciaio Meridionale di Taviela
690.0a	Ghiacciaio Meridionale di Taviela
690.1	Ghiacciaio Settentrionale di Taviela
691.0	Ghiacciaio Saline
692.0	Ghiacciaio Occidentale del Vioz
692.1	Ghiacciaio del Colle Vioz
693.0a	Ghiacciaio Centrale del Vioz
693.0	Ghiacciaio Centrale del Vioz
696.0	Ghiacciaio di Vallenaia
697.0	Ghiacciaio Vedretta Rossa
699.0d	Ghiacciaio de La Mare 4
698.0	Ghiacciaio Venezia
699.0a	Ghiacciaio de La Mare 1

Figura 4 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Cevedale



CODICE	NOME
941.2	Ghiacciaio di Punta Persa
942.1	Ghiacciaio Piccolo Orientale del Vernel (secondo settor
942.0	Ghiacciaio Occidentale della Marmolada
941.1	Ghiacciaio Centrale della Marmolada
941.0	Ghiacciaio Principale della Marmolada
944	Ghiacciaio di Vernel sup
941.0a	Ghiacciaio Principale della Marmolada 1
943.2	Ghiacciaio di Vernel inferiore 2
943.1	Ghiacciaio di Vernel inferiore 1

Figura 5 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Marmolada

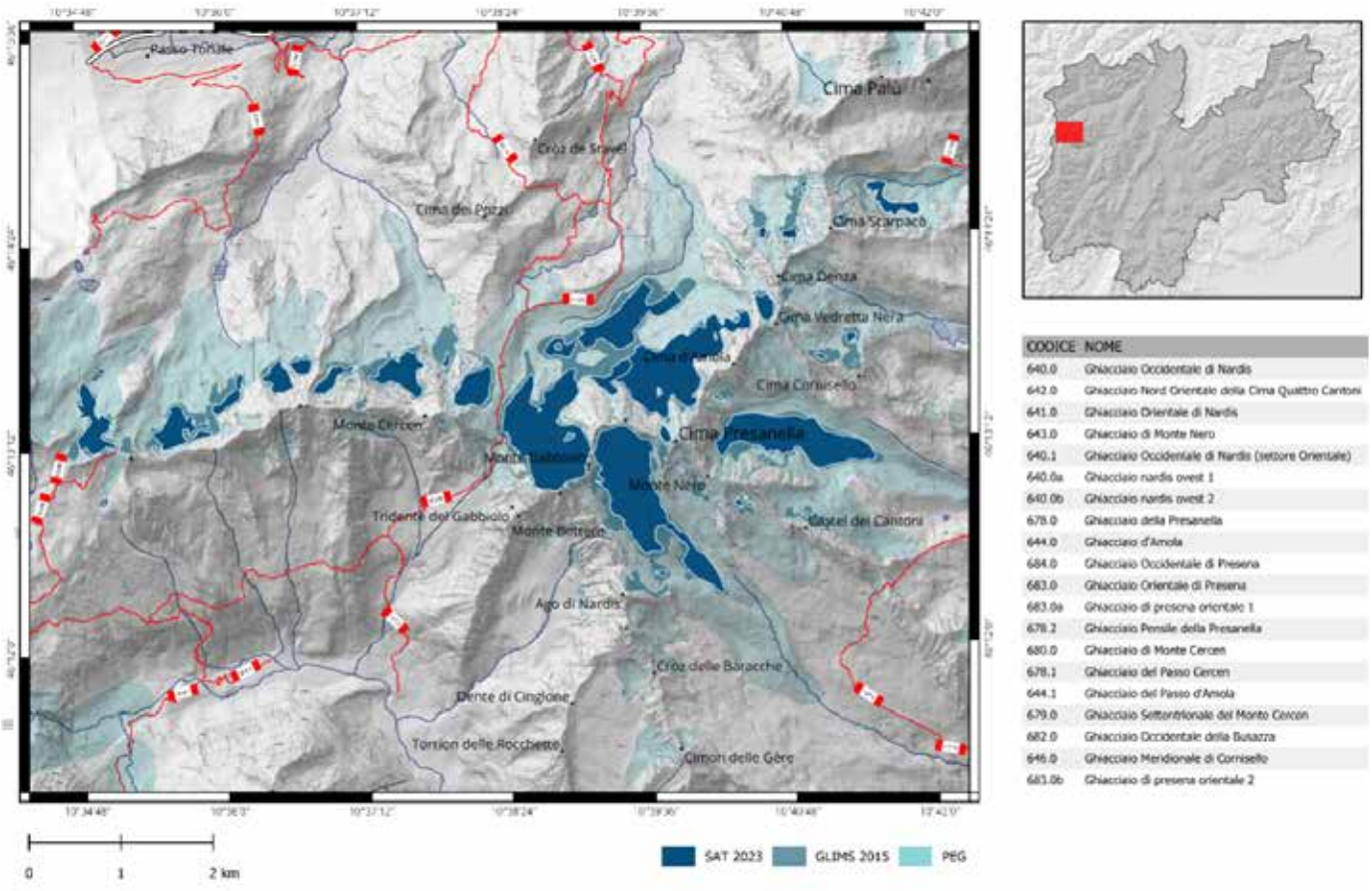


Figura 6 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Presanella

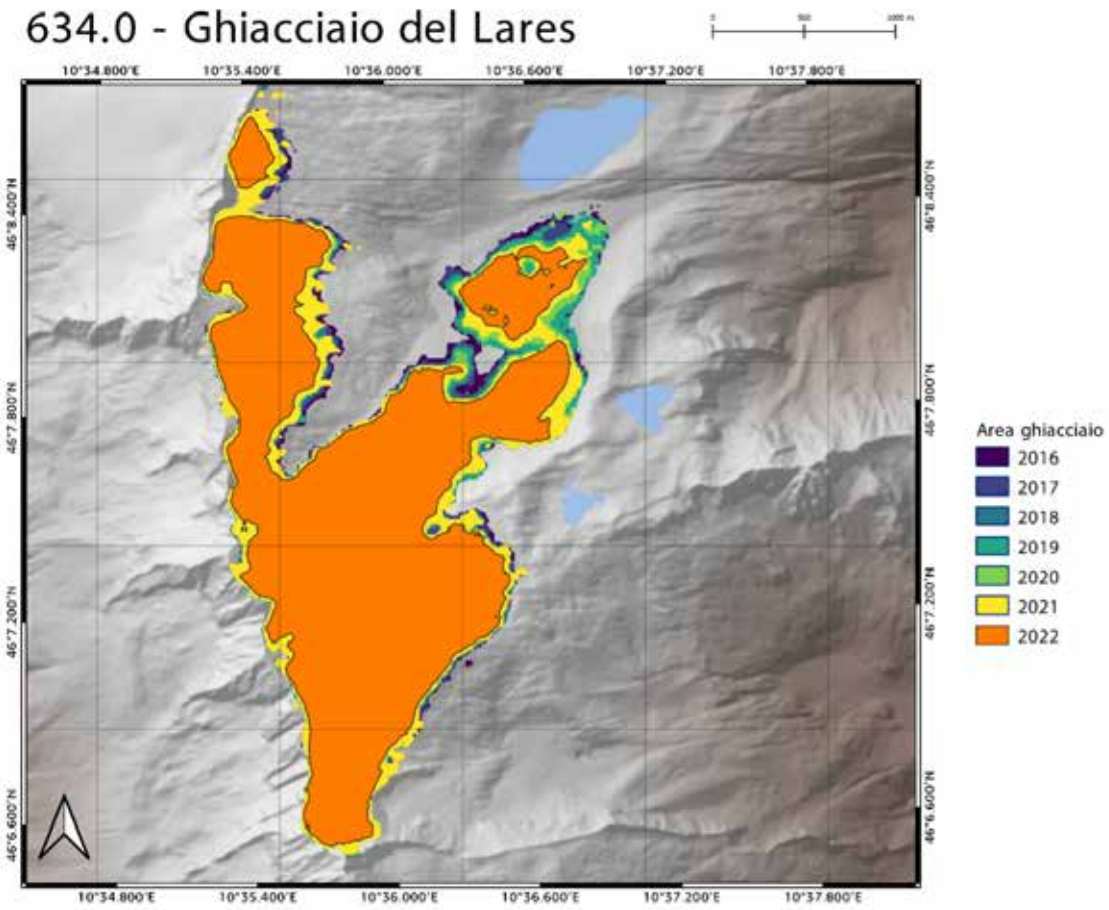


Figura 7 - Evoluzione temporale della mappa di classificazione automatica per il ghiacciaio del Lares nel periodo 2016-2022

Oltre l'Ottico: Il RADAR SAR (Sentinel-1) e la Coerenza Interferometrica

Se da un lato i dati ottici multispettrali come quelli di Sentinel-2 rappresentano lo strumento principale per la perimetrazione delle superfici glaciali, essi incontrano limiti invalicabili in presenza di copertura nuvolosa o nei ghiacciai ricoperti da detrito (debris-covered glaciers), dove la roccia superficiale nasconde il corpo di ghiaccio sottostante all'osservazione visiva. Per superare queste limitazioni si ricorre ai sensori RADAR ad apertura sintetica (SAR), in particolare a quelli a bordo della missione Sentinel-1 (Torres *et al.,* 2012).

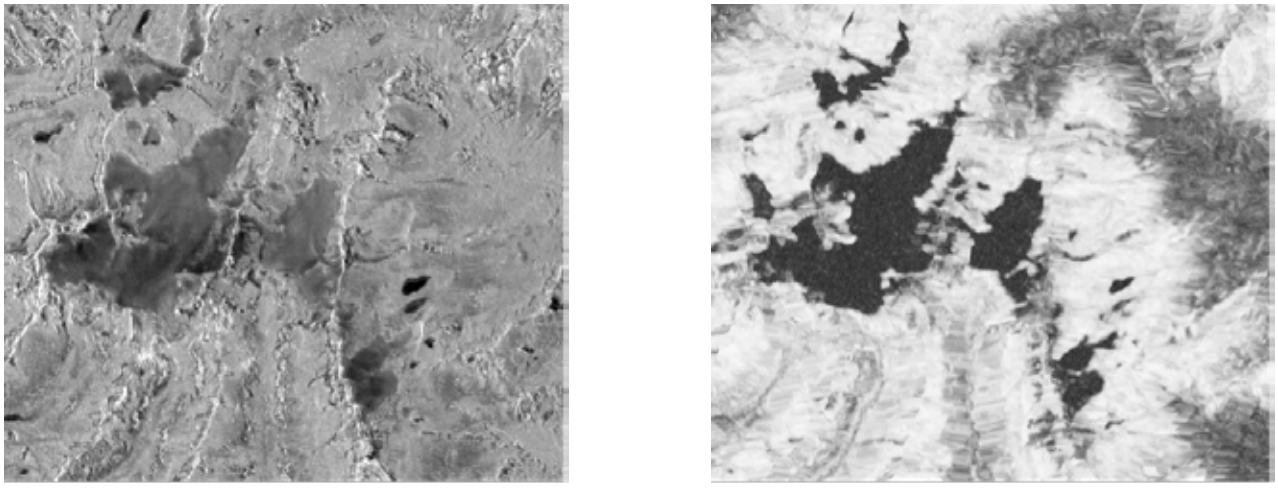
A differenza dei sensori ottici, il RADAR è un sistema attivo: emette propri impulsi a microonde (con una lunghezza d'onda di 5,6 cm per Sentinel-1) e ne misura l'eco di ritorno. Questa radiazione attraversa le nubi ed è indipendente dall'illuminazione solare, garantendo acquisizioni sia di giorno sia di notte e in qualsiasi condizione atmosferica.

L'aspetto più interessante della tecnologia SAR risiede tuttavia nell'analisi della coerenza interferometrica. Ogni impulso radar inviato dal satellite registra non solo la quantità di energia riflessa, ma anche la "fase" dell'onda elettromagnetica al momento del contatto con il terreno. Se si confrontano due immagini acquisite dalla stessa posizione orbitale a distanza di pochi giorni (per esempio a intervalli di 6 o 12 giorni), si ottiene un valore di coerenza: un indicatore prezioso che quantifica la stabilità geometrica della superficie. I valori di coerenza variano tra 0 e 1. Si osserva alta coerenza (valori vicini a 1) su superfici perfettamente stabili e immobili nel tempo (come rocce affioranti, versanti consolidati o strutture artificiali). L'eco riflessa mantiene la stessa forma d'onda, conservando la "impronta elettromagnetica" della scena. Al contrario, si registra bassa coerenza (valori vicini a 0) su superfici soggette a movimento, micro-spostamenti o trasformazioni fisiche (come lo scorrimento del ghiaccio, la fusione superficiale, il compattamento della neve o la variazione dell'umidità).

Questa metrica è di fondamentale importanza nello studio dei ghiacciai: la continua dinamica della massa glaciale e i processi di fusione estivi provocano un'alterazione costante del segnale riflesso, facendo crollare la coerenza a valori molto bassi e rendendo l'individuazione dell'area occupata dal ghiaccio molto più evidente, come mostrato in Figura 8.

Un'applicazione particolarmente promettente riguarda i ghiacciai neri o coperti da detrito. Anche se ricoperto di pietre, un ghiacciaio sottostante continua a muoversi e a fondere, determinando una bassa coerenza nel dato SAR. Quando il ghiaccio sottostante si estingue definitivamente e rimane solo materiale roccioso stabile o fermo, la coerenza interferometrica torna ad assumere valori elevati. Confrontando le mappe di coerenza elaborate lungo le stagioni estive (per esempio tra il 2023 e il 2025) è quindi possibile individuare con elevata sensibilità le porzioni glaciali che hanno perso la loro dinamica e si sono ormai estinte.

Sebbene l'elaborazione interferometrica sia storicamente complessa e computazionalmente onerosa, la recente disponibilità di algoritmi di calcolo in cloud all'interno del Copernicus Data Space Ecosystem consente oggi di generare mappe di coerenza su ampie aree in tempi ridotti, aprendo la strada a una mappatura automatizzata e complementare a quella ottica. Questa tecnica sviluppata nell'ambito del progetto ESA-CLOUDInSAR (VITO e EURAC Research 2026), viene resa disponibile nel catalogo APEx (*openEO Sentinel-1 Coherence 2026*) e apre la strada a molte applicazioni in ambito di monitoraggio ambientale.



(a) *(b)*

Figura 8 - Confronto tra immagine SAR Sentinel-1 (mosaico VV per il mese di settembre 2025) e immagine di coerenza interferometrica (massimo della serie temporale, stagione estiva 2025). Gruppo Adamello – Caré Alto. Contiene dati modificati Copernicus Sentinel 2025

Nel caso specifico della mappatura dei ghiacciai del Trentino, il confronto delle mappe di coerenza estratte dalla stagione 2023 (considerata come baseline in seguito all'aggiornamento del catasto dei ghiacciai svolto per quell'anno, vedi Sez. 3) con quelle della scorsa stagione (2025) ha permesso una stima preliminare delle aree non più coperte da ghiaccio (riportate in Tabella 1). Nel dettaglio, in questo confronto vengono valutate le aree che mostrano una bassa coerenza nel 2023 e un valore alto nel 2025, considerando quindi la casistica in cui il segnale riflesso sia ora stabile a causa dell'esaurimento della massa di ghiaccio in quella determinata area. Questo approccio differenziale è stato introdotto per eliminare dal calcolo le zone in cui il segnale SAR risulta alterato da fattori esterni al ghiacciaio, come la presenza di pareti rocciose particolarmente prominenti che limita l'osservabilità della superficie glaciale. Nonostante queste limitazioni, i risultati preliminari ottenuti sono estremamente promettenti e mostrano una buona sensibilità anche su ghiacciai coperti da detrito proprio per i movimenti comunque presenti nella massa di ghiaccio coperta. Allo stato attuale, la metodologia di segmentazione delle mappe di coerenza richiede ancora alcune evoluzioni per essere affidabile nella generazione automatica dei poligoni dei ghiacciai, nell'ottica di ridurre al minimo la necessità di revisione manuale dei risultati. Nonostante ciò, i risultati preliminari ottenuti sono molto promettenti e permetteranno ulteriori sviluppi nei mesi a venire.

Codice	Denominazione	Anno 2015 Km^2	Anno 2023 Km^2	Differenza % 2023 - 2015	Stima riduzione area 2025 - 2022
639	Ghiacciaio Adamello/Mondrone	16,30	13,98	-14,2%	-6,9%
637	Ghiacciaio della Lobbia	5,86	4,63	-21,0%	-8,6%
634	Ghiacciaio di Lares	4,17	2,82	-32,4%	-20,2%
699	Ghiacciaio de la Mare	3,52	3,00	-14,8%	-20,4%
678	Ghiacciaio della Presanella	2,60	1,83	-29,7%	-31,6%
941	Ghiacciaio principale della Marmolada	1,28	0,73	-43,0%	-27,2%
698	Ghiacciaio Venezia	1,15	0,98	-14,8%	-17,6%
640	Ghiacciaio Occidentale di Nardis	1,18	0,78	-33,9%	-28,6%
701.6	Ghiacciaio del Careser	1,04	0,63	-39,4%	-22,4%

Tabella 1 - Confronto della riduzione delle aree tra gli anni 2015 e 2023 derivata dal confronto tra la mappa dei ghiacciai 2015 (GLIMS) con quanto elaborato con la metodologia presentata in sezione 3. La stima di riduzione di area 2022-2025 è derivata dai risultati preliminari sulle mappe di coerenza interferometrica presentati in sezione 4

La terza dimensione: Laser altimetrici satellitari e variazioni di spessore

Nello studio dei ghiacciai, limitarsi all'analisi dell'area occupata dai corpi glaciali risulta quantomeno riduttivo; infatti, per ottenere il reale bilancio di massa si rende necessaria anche l'informazione riguardante la variazione di spessore del ghiaccio. Generalmente questa misura viene rilevata in loco mediante paline ablatometriche, rilievi geodetici o, più recentemente, tramite rilievi fotogrammetrici da drone. In questa fase, l'impiego di dati telerilevati è stato anche legato a esplorare la possibilità di utilizzare i dati satellitari per valutare le quote delle superfici glaciali.

La nuova generazione di laser altimetri in orbita terrestre si presta molto bene per questo tipo di analisi. ATLAS (Markus *et al.,* 2017), parte della missione ICESat-2, e GEDI (Dubayah *et al.,* 2020) installato sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), pur avendo caratteristiche di ripresa e posizionamento diversi forniscono misurazioni puntuali dell'altezza, utilizzate generalmente per tracciare differenti tipi di cambiamenti in ambito forestale, oceanografico e glaciologico (come le mutazioni dello spessore delle calotte polari, conseguenti alla loro fusione), gli effetti sull'innalzamento del livello del mare, lo spessore del ghiaccio marino e l'altezza della vegetazione forestale nei vari ecosistemi. Questa tipologia di strumenti, definiti LiDAR, permette di misurare la distanza delle superfici dallo strumento emettendo un impulso luminoso e misurando il tempo di ritorno della luce riflessa. L'operazione viene ripetuta svariate volte al secondo e, essendo in questo caso i sensori installati su satelliti in orbita, l'alta velocità di movimento della piattaforma porta a creare profili lineari di altezza.

ATLAS e GEDI presentano caratteristiche simili ma allo stesso tempo complementari: l'orbita polare estremamente stabile di ICESat-2 porta ad avere poche acquisizioni, disposte in direzione quasi nord-sud, ma estremamente fitte lungo la direzione di acquisizione. L'orbita della ISS è di per sé variabile, tuttavia, alle latitudini dell'arco alpino percorre una direzione indicativamente inclinata di circa 60° rispetto alla direzione N-S, creando quindi interessanti intersezioni con i dati ICESat-2. In Figura 9 viene mostrato un esempio di alcuni dati di questi due sensori sul Ghiacciaio del Lares (gruppo Adamello – Caré Alto).

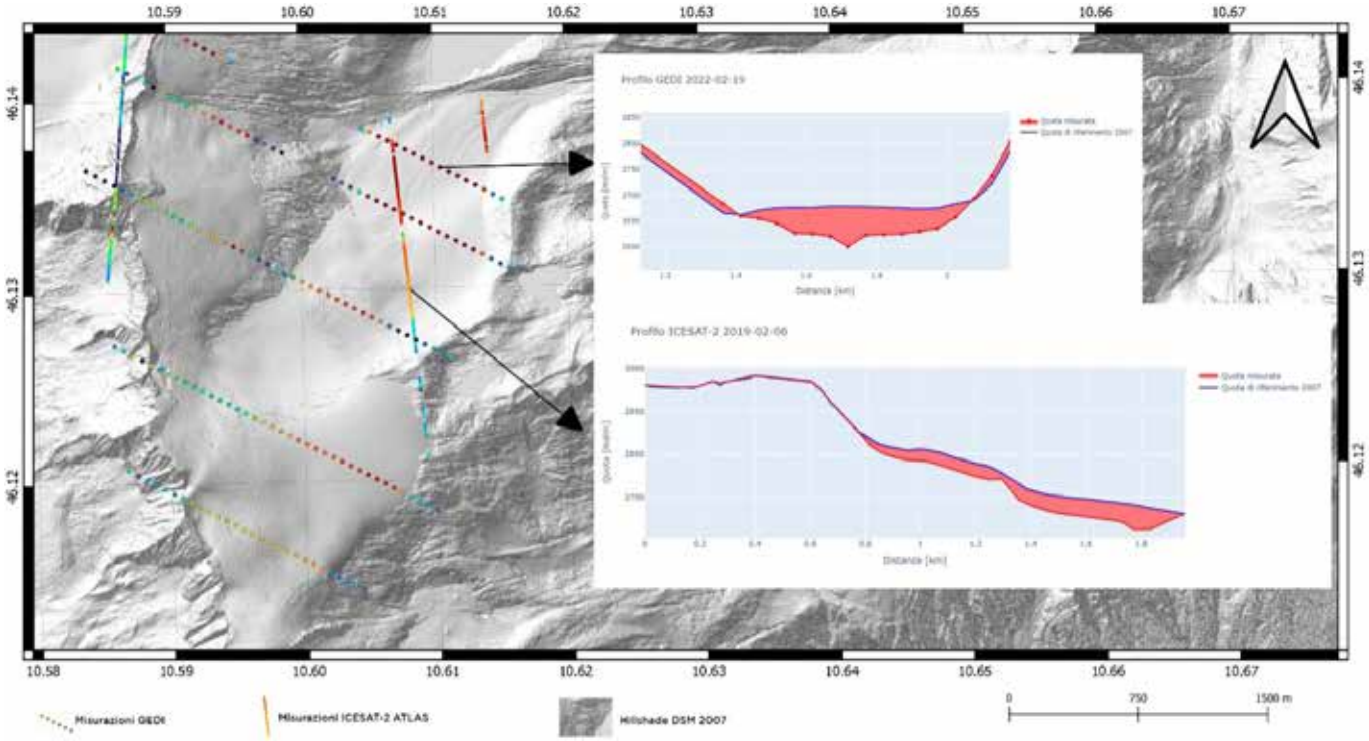


Figura 9 - Esempio di alcuni punti di misurazione ottenuti da dati LiDAR satellitari (blu- verde minor differenza, giallo- arancio -rosso maggior differenza). A sinistra due esempi di sezioni estratti da tali dati, in cui viene confrontata la misura attuale con un modello digitale del terreno di riferimento (PAT 2007)

Benché la catena di elaborazione necessaria per gestire correttamente questa tipologia di dati sia stata in gran parte realizzata, al momento non sono ancora stati integrati con le tecniche di interpolazione geospaziale necessarie per poter spazializzare le misure puntuali ottenute in questo modo con le mappe di estensione delle aree glaciali precedentemente descritte. Il lavoro che verrà realizzato nei prossimi mesi si concentrerà proprio in questa direzione, puntando a ottenere mappe che rappresentino non solo la variazione di estensione ma anche la variazione di volume delle aree glaciali.

In questa fase ancora sperimentale, gli esperimenti sono stati concentrati in un'area di studio più ridotta e composta principalmente dal Ghiacciaio del Mandrone, della Lobbia e del Lares, al fine di testare le tecniche di elaborazione in un'area che ha visto rilevanti variazioni di spessore negli ultimi anni. I dati di ICESat-2 raccolti tra il 2018 e il 2025 sono stati confrontati con i DEM degli anni 2014 e 2022, realizzati dalla Provincia Autonoma di Trento.

Nel dettaglio, la catena di elaborazione sviluppata si occupa dell'importazione dei dati, del filtraggio geografico sulle zone di interesse, della riproiezione nel sistema di coordinate di riferimento e del diretto confronto con i modelli digitali del terreno (DEM). L'obiettivo principale è comprendere la relazione tra le quote rilevate dai laser altimetri e la morfologia della superficie glaciale, fornendo così dati su cui sviluppare metodologie che permettano di estrapolare da queste osservazioni che, per loro natura, sono limitate a pochi profili discreti e a passaggi temporali discontinui, una mappa continua della variazione di spessore del ghiacciaio. Nella parte seguente di questa sezione verranno presentati alcuni esempi puntuali di dati acquisiti da ICESat-2 in zone particolarmente interessate dalla fusione glaciale, al fine di mostrare le potenzialità di questo strumento.

Un esempio di intersezione tra due diverse acquisizioni di ICESat-2 lo si può apprezzare in Figura 10. Tale confronto, effettuato utilizzando il DEM della Provincia del 2014, interessa la fronte del Mandrone e restituisce, come da legenda, valori più elevati di fusione contraddistinti dal colore rosso, valori medi con il colore giallo, mentre il colore blu ne indica la sua assenza (es. roccia). Estrapolando i dati per gli anni 2019 e 2021, si nota come ICESAT restituisca un valore di -25,43 m nel 2019 e -35,05 m nel 2021. Ciò significa che in questo arco temporale di due anni è avvenuta una fusione, ovvero una perdita di "spessore", di circa 10 metri.

In Figura 11 si osserva un ulteriore esempio in prossimità del Rifugio Caduti dell'Adamello. Sempre confrontandolo con il DEM della PAT 2014, restituisce un valore di -11 m con l'acquisizione del 2019 e -27 m con i dati acquisiti nel 2023. Valori che stanno a indicare una perdita di "spessore" pari a 16 metri nell'arco di quattro anni. Ulteriori interpolazioni spaziali basate sulla stima della funzione che descrive il gradiente di ablazione in funzione della quota e del/i DEM di riferimento, saranno oggetto di un prossimo approfondimento.

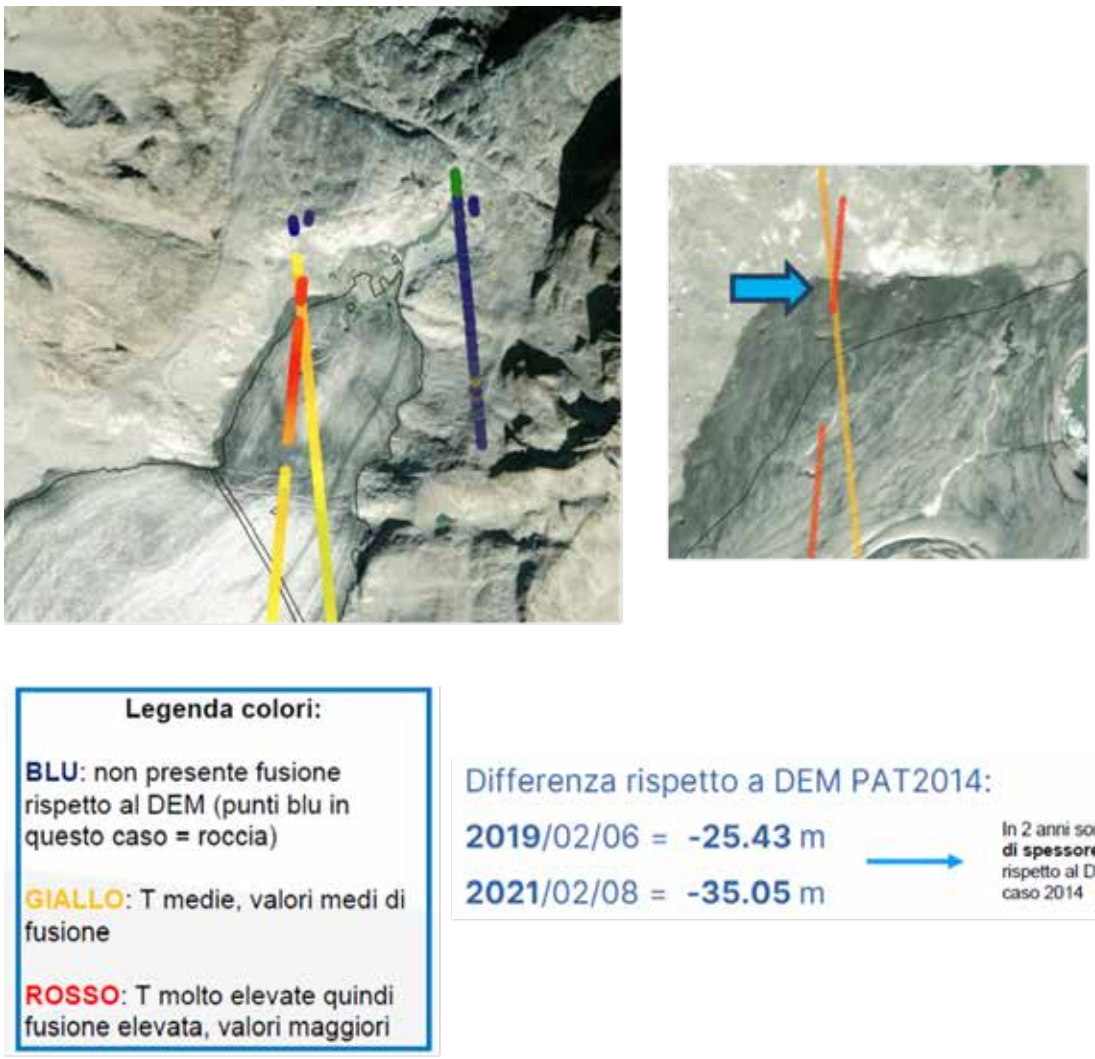


Figura 10 - Esempio di dati ICESat-2 ATLAS nei pressi della fronte del ghiacciaio del Mandrone

Conclusioni e prospettive future

L'esperienza maturata dalla Commissione Glaciologica della SAT sui ghiacciai del Trentino conferma che l'approccio integrato basato sui dati telerilevati rappresenta una svolta metodologica fondamentale per lo studio della criosfera alpina. L'utilizzo sinergico delle moderne piattaforme satellitari si è dimostrato un prezioso strumento, non per sostituire, ma per affiancare e potenziare i tradizionali rilievi effettuati sul campo dagli operatori.

La mappatura bidimensionale ottenuta con i dati ottici di Sentinel-2 ha permesso aggiornamento del catasto glaciale. Questo strumento si è rivelato particolarmente efficace e ha permesso la generazione di un dataset rappresentate l'estensione aggiornata delle aree glaciali in Trentino. Allo stesso tempo, l'integrazione con i dati RADAR di Sentinel-1 sta permettendo di superare i limiti storici dell'osservazione ottica: l'analisi della coerenza interferometrica offre infatti promettenti soluzioni per tracciare la dinamica dei ghiacciai coperti da detrito e individuare le porzioni di ghiaccio ormai estinte.

Il potenziale di queste tecnologie è tuttavia in continua espansione. Le prospettive future di questo progetto si rivolgono con forza alla "terza dimensione": l'impiego degli altimetri laser satellitari, come ICESat-2, sta aprendo nuove frontiere per quantificare le variazioni di spessore. L'obiettivo a medio termine è quello di fondere le estensioni areali satellitari, le variazioni di spessore e i dati di regressione e ablazione misurati in situ, per ottenere stime sempre più complete dei bilanci di massa. Inoltre, l'integrazione con rilievi fotogrammetrici da drone permetterà di colmare il salto di dettaglio tra i dati satellitari e le misure in situ.

In conclusione, è solo attraverso questa imprescindibile sinergia tra la visione globale fornita dallo spazio e la fondamentale, instancabile presenza sul terreno della Commissione Glaciologica, che sarà possibile continuare a documentare e comprendere con precisione la rapida e complessa evoluzione dei nostri ghiacciai.

Ringraziamenti

Questo studio della Commissione Glaciologica della SAT (Trento) è stato realizzato con il supporto di Surgiva, acqua minerale del Gruppo Lunelli.



Figura 11 - Ghiacciaio d'Agola nel Parco Naturale Adamello Brenta, Dolomiti di Brenta, fusione di fine estate 2021 - ph Cristian Ferrari



Figura 12 - Ghiacciaio della Marmolada - ph Daniela Mangiola

Bibliografia

- VALLONGO F., SANTONI M., FERRARI C., (2023) - *Analisi dell'arretramento dei ghiacciai trentini tramite dati telerilevati satellitari* – NIMBUS, 89, 16-25, ISSN: 1122-4339
- PAUL F., RASTNER P., AZZONI R., DIOLAIUTI G., FUGAZZA D., LE BRIS R., NEMEC J., RABATEL A., RAMUSOVIC M., SCHWAIZER G., SMIRAGLIA C., (2020) - *Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 Earth Syst*. Sci. Data, 12, 1805–1821 - https://doi.org/10.5194/essd-2019-213
- DRUSCH, M., DEL BELLO, U., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P., MARTIMORT, P., MEYGRET, A., SPOTO, F., SY, O., MARCHESE, F., BARGELLINI, P. (2012) - *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36 - https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026
- TORRES, R., SNOEIJ, P., GEUDTNER, D., BIBBY, D., DAVIDSON, M., ATTEMA, E., POTIN, P., ROMMEN, B., FLOURY, N., BROWN, M., TRAVER, I.N., DEGHAYE, P., DUESMANN, B., ROSICH, B., MIRANDA, N., BRUNO, C., L'ABBATE, M., CROCI, R., PIETROPAOLO, A., HUCHLER, M., ROSTAN, F. (2012) - *GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24 - https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028
- MARKUS, T., NEUMANN, T., MARTINO, A., ABDALATI, W., BRUNT, K., CSATHO, B., FARRELL, S., FRICKER, H., GARDNER, A., HARDING, D. (2017) - *The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation.* Remote Sensing of Environment, 190, 260–273 - https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029
- DUBAYAH, R., BLAIR, J.B., GOETZ, S., FATOYINBO, L., HANSEN, M., HEALEY, S., HOFTON, M., HURTT, G., KELLNER, J., LUTHCKE, S., et al. (2020) - *GEDI is the first spaceborne lidar optimized to measure ecosystem structure*. Pubblicato come "The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography." Science of Remote Sensing, 1, 100002. https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002
- VITO, EURAC RESEARCH, ESA CLOUDINSAR PROJECT (2026) - *Sentinel-1 SAR Coherence [openEO algorithm]*. APEx Algorithm Catalogue. https://algorithm-catalogue.apex.esa.int/apps/sentinel1_sar_coherence (ultimo accesso: 2026-07-19).
- EUROPEAN SPACE AGENCY (2026) - *Sentinel-1 InSAR processing with openEO in CDSE. EO Science for Society*. https://eo4society.esa.int/2026/05/18/sentinel-1-insar-processing-with-openeo-in-cdse/ (ultimo accesso: 2026-07-19).
- CLOUDINSAR PROJECT (2026) - s1-workflows: *Collection of Sentinel-1 workflows and tests using ESA SNAP [software repository]*. GitHub. https://github.com/cloudinsar/s1-workflows (ultimo accesso: 2026-07-19)



Figura 1 -Ghiacciaio Antelao Superiore nel settembre 2023 - ph A. Securo

https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_03

Il declino dei ghiacciai nelle Dolomiti dagli anni '80 a oggi

Andrea Securo[1][2], Renato R. Colucci[2][3]

1. *Università Ca' Foscari*
2. *Istituto di Scienze Polari (ISP) del CNR*
3. *Società Meteorologica Alpino-Adriatica*

Riassunto

I piccoli ghiacciai delle Dolomiti sono in rapida contrazione, ma la loro ridotta estensione e il terreno impervio in cui si trovano rendono difficile il monitoraggio da satellite, a cui si aggiunge l'assenza di rilievi sul campo a cadenza annuale. Riprocessando campagne fotografiche aeree acquisite fra gli anni Ottanta e i primi anni Duemila e combinando quest'ultime con rilievi da drone (2023) e da LiDAR via elicottero (2010, 2014) abbiamo ricostruito le variazioni di volume dei ghiacciai Dolomitici durante gli ultimi quarant' anni. Nei monti pallidi, i ghiacciai montani - quindi dotati di movimento gravitativo - sono scesi da svariate decine a sole dodici unità, alcune delle quali arrivano dalla frammentazione del Ghiacciaio della Marmolada. I risultati mostrano una drammatica riduzione dello spessore di ghiaccio dagli anni Ottanta, con un terzo della perdita complessiva verificatasi nell'intervallo tra il 2010 e il 2023. Sebbene i tassi di fusione locali varino e rimangano leggermente meno severi rispetto alla media alpina generale, non passerà molto tempo prima che le Dolomiti perdano del tutto i loro ghiacciai. Il sito più celebre e di maggior estensione, ovvero il Ghiacciaio della Marmolada, rappresenta da solo oltre il 66% del volume di ghiaccio perso nell'intera regione.

Abstract: The decline of the Dolomites glaciers since 1980s

Small glaciers in the Italian Dolomites are rapidly shrinking, yet standard satellites struggle to monitor them due to their small size and steep terrain and in situ monitoring is not performed on a yearly basis. By pairing historical aerial photographs (1980s–2010s) with high-precision drone mapping and LiDAR surveys (2010, 2014, 2023), we have reconstructed the first long-term record of glaciers change in the region, where active glaciers have dropped from dozens down to just 12. The results show dramatic ice loss since the 1980s, with one-third of the overall elevation loss occurring in the short period between 2010 and 2023. Although local melting rates vary and remain slightly less severe than the broader Alpine average, a single site – the Marmolada glacier – accounts for 66% of the region's total lost ice volume. It won't be too long for the Dolomites to loose all their mountain glaciers.

Introduzione

La crisi climatica globale sta impattando anche le catene montuose europee, dove il riscaldamento atmosferico procede a ritmi superiori alla media globale. Nelle nostre Alpi, questo aumento termico ha generato una delle più imponenti contrazioni volumetriche e areali dei ghiacciai registrata su scala planetaria, con una riduzione che sfiora il 40% del volume glaciale nel solo periodo compreso tra il 2000 e il 2023. Tale rapida perdita di massa è guidata non solo dalle temperature crescenti, ma anche da profonde mutazioni nei pattern di circolazione atmosferica, che influenzano la distribuzione delle precipitazioni, i tassi di umidità e l'accumulo nevoso invernale. Sebbene il territorio alpino sia storicamente la culla della glaciologia moderna e vanti sistemi di monitoraggio e telerilevamento all'avanguardia, permangono settori caratterizzati da una disponibilità di dati quantitativi estremamente frammentaria.

Le Dolomiti, situate nel settore sud-orientale delle Alpi, rappresentano un esempio emblematico di questa carenza scientifica. In questo territorio dalla straordinaria complessità geografica, socio-economica e paesaggistica, i piccoli ghiacciai di montagna situati al di sotto della linea di equilibrio ambientale, in passato spesso chiamata linea delle nevi perenni, stanno subendo una rapidissima degradazione. Il monitoraggio di queste piccole masse glaciali tramite telerilevamento satellitare convenzionale risulta estremamente complesso a causa delle ridotte dimensioni di questi corpi glaciali e dell'aspra topografia circostante. Queste limitazioni e la difficoltà di raggiungere alcuni di questi siti hanno lasciato l'area dolomitica priva di record storici continui.

La ricostruzione storica della presenza glaciale nelle Dolomiti rivela un declino ininterrotto che affonda le sue radici nelle prime osservazioni sistematiche della fine del XIX secolo. Il primo studio organico sul glacialismo dolomitico risale agli anni Ottanta dell'Ottocento e fu redatto dal geografo austriaco Eduard Richter. Successivamente, tra il 1893 e il 1909, il geografo italiano Olinto Marinelli condusse un'indagine pionieristica e dettagliata su trentanove ghiacciai della regione Dolomitica, arricchendo la letteratura scientifica con fotografie, cartografie topografiche e dati quantitativi che costituiscono ancora oggi la prima vera panoramica completa della criosfera dolomitica all'alba del XX secolo. Nei decenni successivi, le informazioni sono confluite principalmente negli inventari dei ghiacciai italiani pubblicati nel 1925 dal Generale Porro, nel 1962 dal Comitato Glaciologico Italiano e nel 2015 nell'ultimo Catasto

aggiornato, redatto da Smiraglia e Diolaiuti. L'analisi comparativa di questi cataloghi evidenzia discrepanze e ritardi nell'aggiornamento dei dati locali. Per esempio, alcune masse glaciali segnalate come estinte nell'inventario del 1962 mostravano ancora la presenza di ghiaccio residuo nel catasto del 2015, sebbene quasi completamente prive della loro componente dinamica.

I dati storici evidenziano come alla fine degli anni Cinquanta le Dolomiti ospitassero ancora trentatré ghiacciai montani attivi, per una superficie complessiva di oltre 8 Km^2. Un'indagine parziale condotta dall'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV) nel 2009 su ventisette corpi glaciali, che rappresentavano circa il 72% della superficie glaciale totale dell'epoca, ha rivelato un dimezzamento dell'estensione areale tra il 1910 e il 2009.

Con dati risalenti allo stesso anno, il catasto nazionale (pubblicato nel 2015) ha censito cinquantuno corpi glaciali dolomitici, coprenti una superficie totale di poco superiore ai 5 Km^2 ed equivalente all'1,4 % dell'intera area glacializzata italiana.
Di questi cinquantuno corpi, solo tredici venivano classificati come ghiacciai montani veri e propri, mentre ben trentotto erano ormai ridotti a semplici glacionevati, con una presenza diffusa di copertura detritica abbondante o totale su diciotto apparati.

Negli ultimi decenni, la contrazione si è ulteriormente inasprita, riducendo a soli nove i ghiacciai attivi, alcuni al limite della classificazione, sopravvissuti nell'intera regione dolomitica. Il numero può eventualmente salire se vengono considerati i nuovi settori formatisi dalla frammentazione del Ghiacciaio della Marmolada.

Lo studio

Per colmare questo vuoto conoscitivo e quantificare con precisione i cambiamenti volumetrici avvenuti negli ultimi quarant'anni nelle Dolomiti, uno studio scientifico condotto dal nostro team in collaborazione con altri ricercatori dell'Istituto di Scienze Polari ha integrato metodologie di telerilevamento ad altissima risoluzione con l'analisi climatologica locale. I rilievi moderni, effettuati a partire dal 2010 e conclusi nel 2023, si sono avvalsi di droni e di rilievi da elicottero. Le variazioni topografiche antecedenti al 2010 sono state invece ricostruite applicando algoritmi fotogrammetrici alle immagini aeree storiche d'archivio risalenti al periodo tra il 1980 e i primi anni Duemila. Questo approccio metodologico ha permesso di ricostruire modelli digitali della superficie ad altissima risoluzione di tutti i ghiacciai attualmente attivi nelle Dolomiti e di calcolarne il bilancio di massa geodetico, stimando quindi la perdita totale di questi ghiacciai in m^3 d'acqua. Per comprendere i fattori climatici sottostanti a questa evoluzione, i dati telerilevati sono stati correlati con le registrazioni

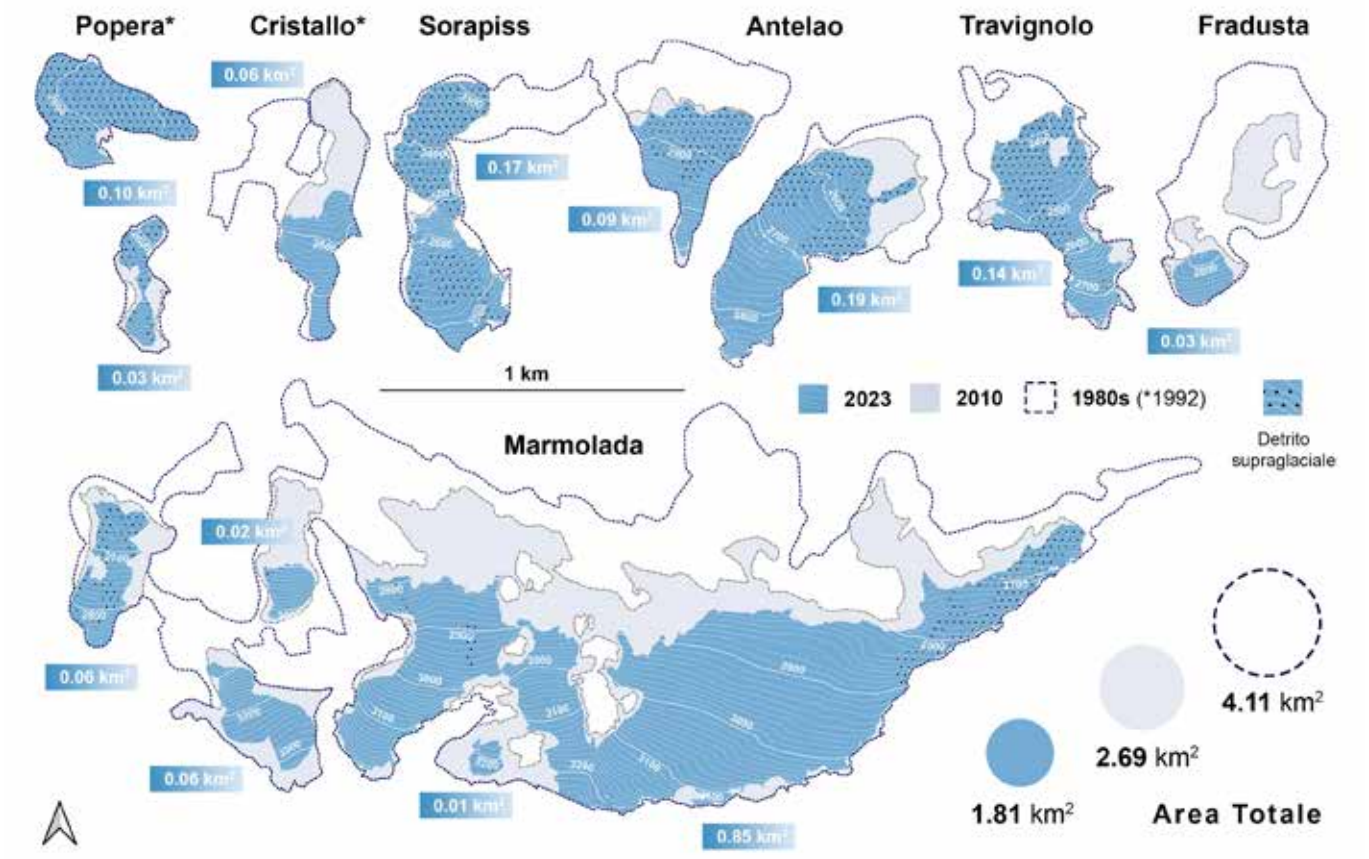


Figura 2 - Variazioni areali dei ghiacciai delle Dolomiti: anni '80, 2010 e 2023 - immagine modificata da Securo et al., 2025

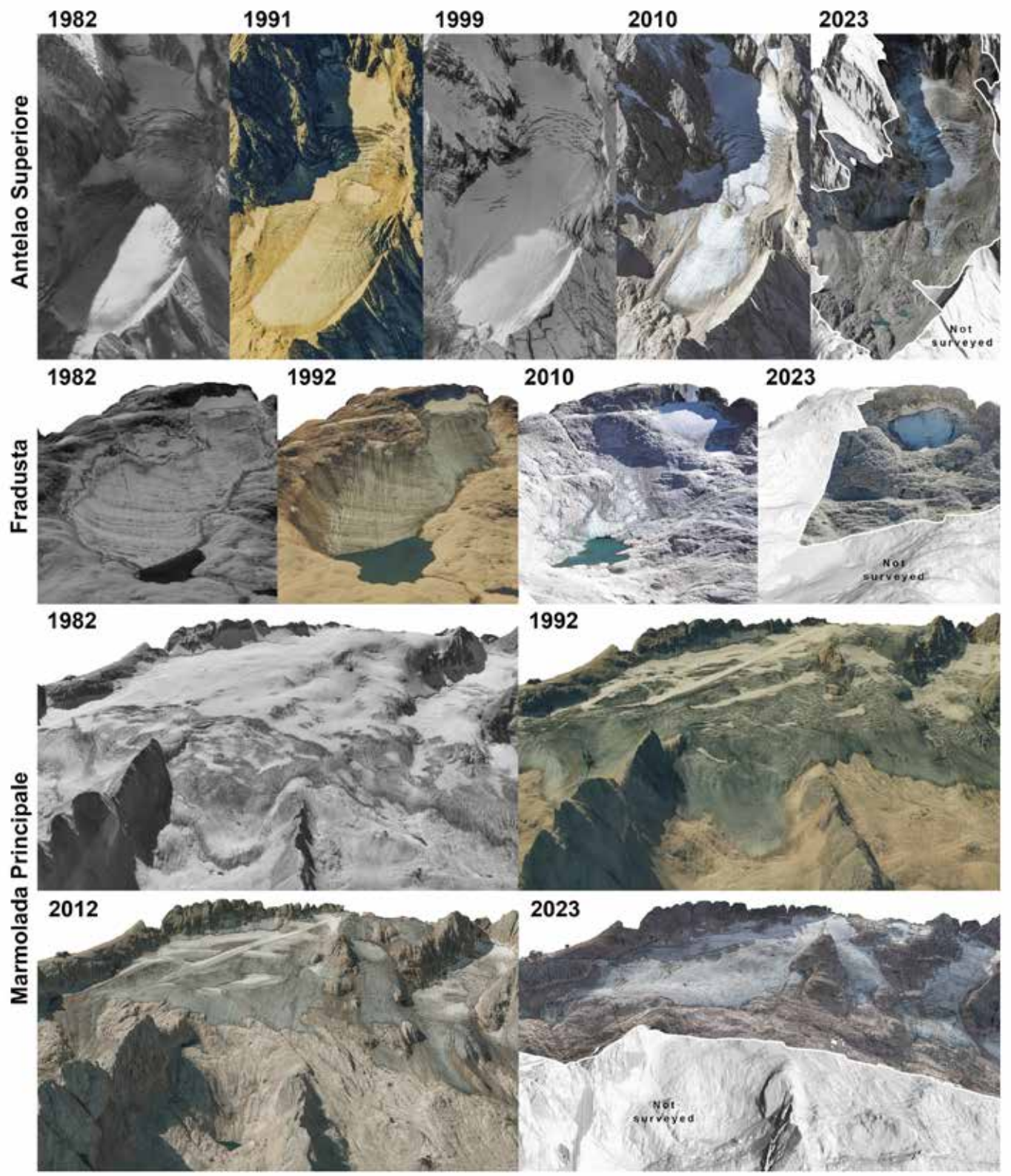


Figura 3 - Ricostruziuoni 3D di alcuni ghiacciai delle Dolomiti fra gli anni '80 e il 2023: Antelao Superiore, Fradusta e Marmolada Principale - immagine modificata da Securo et al., 2025

termiche e pluviometriche provenienti da venti stazioni meteorologiche automatiche della rete ARPAV e due stazioni gestite dalla Provincia Autonoma di Bolzano, garantendo un'adeguata copertura spaziale dei sei gruppi montuosi (Popera, Cristallo, Sorapiss, Antelao, Marmolada e Pale di San Martino) che ospitano i ghiacciai superstiti.

I risultati ottenuti

I risultati delle elaborazioni indicano una contrazione drammatica sia in termini areali che volumetrici. L'estensione areale complessiva dei ghiacciai montani nelle Dolomiti è passata da 4,1 Km^2 negli anni Ottanta a soli 1,8 km^2 nel 2023, registrando un decremento netto del 56%.



Figura 4 - Antelao Superiore nel settembre 2023 - ph A Securo



Figura 5 - Dettaglio di alcuni crepacci del Ghiacciaio del Travignolo, sulle Pale di San Martino - ph A. Securo



Figura 6 - Ghiacciaio del Travignolo (Pale di San Martino) nel settembre 2025. Si noti l'importante copertura detritica nella porzione frontale del ghiacciaio, dove vi è anche un piccolo lago proglaciale - ph A. Securo



Figura 7 - Placca di ghiaccio residua del Ghiacciaio della Fradusta nel settembre 2025 - ph A. Securo

Il processo di fusione ha mostrato una preoccupante accelerazione nell'ultimo sotto-periodo analizzato, compreso tra il 2010 e il 2023, durante il quale si è consumata una perdita del 33% della superficie glacializzata in soli tredici anni. Questa stima rappresenta peraltro una valutazione prudenziale per difetto della perdita reale della criosfera dolomitica, poiché dal conteggio finale sono esclusi tutti quei ghiacciai che, presenti negli anni Ottanta, si sono estinti, sono stati sepolti dal detrito o sono stati declassati a glacionevati privi di movimento nell'ultimo quarantennio. La perdita totale di ghiaccio di ghiacciaio nell'intero periodo di osservazione ammonta a circa 105 milioni di m^3 di ghiaccio.

L'analisi dello spessore dei medesimi corpi glaciali evidenzia un assottigliamento verticale generalizzato di eccezionale gravità. La variazione media della quota della superficie topografica dei ghiacciai dolomitici ha registrato un calo di oltre cinque metri nel corso degli anni Ottanta, seguito da un tracollo di quattordici metri tra gli anni Settanta-Novanta e il 2010, e da un ulteriore decremento di oltre nove metri tra il 2010 e il 2023. Il bilancio cumulativo finale rileva una perdita media di spessore pari a 28,6 metri, un valore impressionante che equivale all'altezza di un edificio di nove o dieci piani. Di questa perdita di spessore verticale, il 33% è avvenuto nell'intervallo temporale recente tra il 2010 e il 2023. I ghiacciai che hanno subito i tassi di assottigliamento più estremi sono la Marmolada, la Fradusta e l'Antelao Superiore, i quali hanno visto ridursi lo spessore del proprio ghiaccio di oltre cinquanta metri in corrispondenza delle rispettive fronti glaciali.

Il Ghiacciaio della Marmolada, che rappresenta la massa glaciale più estesa dell'intera regione dolomitica con una superficie residua di circa 1 km^2 registrata nel 2023, costituisce il fulcro di questa catastrofe ambientale, avendo contribuito da solo al 66% della perdita volumetrica e di massa complessiva dell'intera area di studio. Già nel 2019, una ricerca condotta dall'Università di Trieste insieme al CNR aveva evidenziato una drastica riduzione dello spessore della Marmolada pari al 30% nel solo decennio tra il 2004 e il 2014. Tale studio aveva teorizzato che, ai tassi di fusione correnti, il ghiacciaio sarebbe andato incontro a frammentazione e successiva estinzione entro circa



Figura 8 - Porzione superiore del Ghiacciaio Alto di Popera (Dolomiti di Sesto) in cui si nota la forte presenza di detrito e qualche placca di firn - ph A. Securo



Figura 9 - Ghiacciaio della Marmolada Principale nel luglio 2026. Sullo sfondo la stazione di Punta Rocca - ph A. Securo



Figura 10 - Dettaglio sulla fronte del Ghiacciaio della Marmolada nel luglio 2026 - ph A. Securo



Figura 11 - Alcuni settori del Ghiacciaio della Marmolada nel luglio 2026. In alto a sinistra la zona del distacco della valanga di ghiaccio e roccia del luglio 2022, ora diminuito in spessore sensibilmente - ph A. Securo



Figura 12 - Fronte del Ghiacciaio della Marmolada nel luglio 2026 - ph A. Securo

trent'anni, anche in presenza di una teorica stabilizzazione dei parametri climatici. Il riscaldamento dell'ultimo decennio ha smentito questa ipotesi cautelativa, accelerando ulteriormente il declino. I successivi rilievi geofisici e glaciologici, intensificati specialmente a seguito del catastrofico distacco della valanga di ghiaccio e roccia avvenuto il 3 luglio 2022, confermano queste osservazioni.

Negli ultimi quarant'anni i ghiacciai delle Dolomiti hanno mostrato una risposta particolare al riscaldamento globale: a partire dagli anni Novanta, infatti, il loro ritmo di fusione è risultato meno accentuato – in termini relativi – rispetto alla media del resto dell'arco alpino. Questa maggiore resilienza è dovuta innanzitutto alla loro dimensione ridotta e a favorevoli fattori microclimatici e topografici locali. Le profonde nicchie montuose in cui sono oramai ritirati tutti i ghiacciai dolomitici, eccetto la Marmolada, li proteggono dalla radiazione solare diretta. A questo si aggiungono le valanghe che vi accumulano importanti surplus di neve e la copertura di detriti rocciosi che agisce come uno schermo termico, isolando il ghiaccio.

I dati meteorologici analizzati nel periodo 1985-2023 spiegano i motivi del collasso dei ghiacciai: un deciso riscaldamento estivo, con temperature cresciute di 0,4-0,6 °C a decennio. Se fino al 2000 prevalevano le stagioni fredde, nei decenni successivi si sono concentrate le estati più calde in assoluto, con lo storico picco massimo toccato nel 2003 e la sola eccezione fresca del 2014. In parallelo, anche le precipitazioni invernali sono leggermente aumentate, con gli anni più nevosi registrati in prevalenza dopo il 2008 e culminati nel record del 2014. Tuttavia, il rialzo termico ha nettamente sopraffatto l'incremento della neve, segnando la transizione verso un clima regionale più caldo e umido che accelera la fusione del ghiaccio. Sul fronte della neve in quota, in questo caso sopra i 1900 metri, la quantità totale annua non mostra un calo di lungo termine, ma un aumento delle annate estreme: si alternano infatti annate eccezionalmente nevose (come il 2014) ad altre molto secche (come il 2023), in cui il manto nevoso è rimasto sotto la media fino alla tarda primavera.

Nonostante la gravità del ritiro glaciale, alcune masse residue conservano ancora oggi visibili segni di movimento (es. crepacci) e sono dei perfetti esempi di piccoli ghiacciai alpini (es. Antelao Superiore, Marmolada Principale, Sorapiss Occidentale). Vi sono poi una serie di ghiacciai ancora oggi definiti come montani che sono al limite della classificazione, sia per dimensioni che per movimento. Esempi sono Fradusta Superiore o Popera Pensile, che potrebbero a brevissimo essere considerati dei glacionevati.

Conclusioni

Come visto in precedenza, l'andamento climatico di lungo termine ha inesorabilmente innalzato la quota della linea di equilibrio ambientale nella regione dolomitica di circa trecento metri negli ultimi quarant'anni, posizionandola attualmente a un'altitudine vicina ai 3300 metri sul livello del mare. Poiché la vetta più elevata delle Dolomiti, Punta Penia sulla Marmolada, raggiunge un'altitudine massima di soli 3343 metri, la quasi totalità della superficie ghiacciata dolomitica si trova oggi situata al di sotto del limite di sopravvivenza climatica. Significa che la neve non può più resistere fino a fine stagione al di sopra dei corpi glaciali e permetterne la sopravvivenza a medio-lungo termine. Anche ipotizzando uno scenario di stabilizzazione climatica basato sulle temperature degli ultimi trent'anni, senza ulteriori incrementi termici futuri, la scomparsa definitiva dei ghiacciai delle Dolomiti si verificherà nell'arco dei prossimi decenni, lasciando spazio a masse detritiche con ghiaccio sepolto o a corpi periglaciali privi di dinamica.

Bibliografia

- ARPAV: *Dati ambientali,* https://www.arpa.veneto.it (ultimo accesso: 2024-02-28)
- BONDESAN, A. FRANCESE, R. G.: *The climate-driven disaster of the Marmolada Glacier (Italy)*, Geomorphology, 431, 108687, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108687
- CASTIGLIONI, B. (1925) - *Alcuni ghiacciai nelle Dolomiti e il loro ambiente orografico e climatico,* Bollettino C.A.I., 42, 323–379
- CIBIEN, M., FERRARESE, L., MENEGHEL, F., (2007) - *The Glaciers of Mount Antelao (Dolomites, Italy) since the Little Ice Age,* Geogr. Fis. Din. Quat., 30, 131–139
- COLUCCI, R. R. (2016) - *Geomorphic influence on small glacier response to post-Little Ice Age climate warming: Julian Alps, Europe, Earth Surf. Proc. Land.*, 41, 1227–1240 - https://doi.org/10.1002/esp.3908
- COLUCCI, R. R., GUGLIELMIN, M. (2015) - *Precipitation-temperature changes and evolution of a small glacier in the southeastern European Alps during the last 90 years*, Int. J. Climatol., 35, 2783–2797, https://doi.org/10.1002/joc.4172
- PAUL, F., RASTNER, P., AZZONI, R. S., DIOLAIUTI, G., FUGAZZA, D., LE BRIS, R., NEMEC, J., RABATEL, A., RAMUSOVIC, M., SCHWAIZER, G., SMIRAGLIA, C. (2020) - *Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2, Earth Syst. Sci.* Data, 12, 1805–1821- https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020
- SECURO, A., GOBBO, C. D., BACCOLO, G., BARBANTE, C., CITTERIO, M., BLASI, F. D., MARCER, M., VALT, M., COLUCCI, R. R., (2024) - *The Glaciers of the Dolomites: last 40 years of melting,* Zenodo [data set], https://doi.org/10.5281/zenodo.11109783
- SMIRAGLIA, C., DIOLAIUTI, G., AZZONI, R.,(2015): *Il nuovo catasto dei ghiacciai italiani = The new italian glacier inventory*, EvK2CNR, ISBN 9788894090802



https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_04

Quando i ghiacciai si ritirano

Conseguenze per la biodiversità di impollinatori, le reti trofiche e i patogeni delle api

Andrea Ferrari[1], Giovanni Cilia[2], Matteo Conti[3], Carlo Polidori[4], Gianalberto Losapio[3]

1. Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze Agrarie, ambientali e alimentari
2. Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA) - Centro di Ricerca Agricoltura e Ambiente di Bologna (CREA-AA)
3. Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Bioscienze
4. Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali

Riassunto

Il ritiro dei ghiacciai rappresenta una delle manifestazioni più evidenti del cambiamento climatico globale, un fenomeno che sta trasformando profondamente gli ecosistemi alpini. Le aree recentemente "liberate" dal ghiacciaio costituiscono laboratori naturali ideali per comprendere come biodiversità, interazioni ecologiche e trasmissione di patogeni rispondano ai cambiamenti climatici. In questo testo vengono sintetizzati i risultati di tre recenti studi condotti lungo la fronte del Ghiacciaio del Mont Miné (Vallese, Svizzera), attraverso un gradiente di successione ecologica che copre oltre 140 anni di deglaciazione. Le ricerche hanno analizzato come il ritiro glaciale influenzi la diversità di piante e impollinatori, la struttura delle reti di impollinazione e la diffusione di patogeni associati alle api. I risultati mostrano che il ritiro dei ghiacciai innesca un processo a due fasi: inizialmente, la colonizzazione da parte delle piante aumenta la biodiversità e la complessità delle interazioni ecologiche, ma nel lungo periodo l'espansione di arbusti e foreste riduce gli habitat aperti e determina un declino della diversità di specie di piante e impollinatori. Parallelamente, le reti di impollinazione diventano progressivamente meno robuste e passano da configurazioni ricche di interazioni specializzate a strutture dominate da poche specie generaliste. L'analisi dei patogeni evidenzia inoltre una distribuzione differente tra api domestiche e api selvatiche, suggerendo che la condivisione delle risorse floreali possa influenzare le loro opportunità di trasmissione. Nel complesso, i risultati indicano che il ritiro glaciale non modifica soltanto la composizione delle comunità biologiche, ma anche le relazioni ecologiche tra livelli trofici, ovvero tra i produttori, i consumatori di primo livello e i loro parassiti, con impatti sul funzionamento degli ecosistemi alpini. Comprendere questi cambiamenti è fondamentale per sviluppare strategie di conservazione della biodiversità efficaci in un contesto di rapido riscaldamento climatico e di progressiva scomparsa dei ghiacciai alpini.

Abstract: When glaciers retreat

Glacier retreat is one of the most visible manifestations of climate change in mountain regions and is profoundly reshaping Alpine ecosystems. Newly exposed glacier forelands provide natural laboratories to investigate how biodiversity, ecological interactions and pathogen dynamics respond to environmental change. This article synthesizes the results of three recent studies conducted along the Mont Miné glacier foreland (Swiss Alps), covering more than 140 years of ecological succession following deglaciation. The studies examined how glacier retreat affects plant and pollinator diversity, pollination network structure, and the distribution of bee-associated pathogens. Our findings reveal a two-phase process. In the early stages of succession, plant colonization promotes increases in biodiversity and interaction diversity. In the long term, however, the expansion of shrubs and forests reduces the availability of open habitats, leading to declines in both plant and pollinator diversity. At the same time, pollination networks become less robust, shifting from structures rich in specialised interactions towards configurations increasingly dominated by generalist species. Pathogen screening further revealed contrasting distributions between managed honey bees and wild bees, suggesting that the sharing of floral resources may influence opportunities for their pathogen transmission. Overall, glacier retreat affects not only the composition of biological communities, but also the ecological relationships – at least among three trophic levels (producers, consumers and parasites) – and the processes that underpin ecosystem functioning. These findings highlight the importance of understanding ecological network dynamics in rapidly changing mountain environments and provide valuable insights for the conservation of Alpine biodiversity in a warming world.

Introduzione

Gli ecosistemi montani rappresentano importanti riserve idriche, custodiscono habitat unici e offrono rifugio a numerose specie adattate a condizioni ambientali estreme. Tra questi ambienti, le aree glaciali e periglaciali costituiscono alcuni degli ecosistemi dinamici e particolarmente sensibili agli effetti del cambiamento climatico. Comprendere come queste trasformazioni influenzino la biodiversità alpina è oggi una delle grandi sfide dell'ecologia contemporanea.

Il ritiro dei ghiacciai è uno dei sintomi più evidenti del cambiamento climatico in corso (Marzeion *et al.,* 2014, Roe *et al*., 2017). Negli ultimi decenni, l'aumento delle temperature globali ha accelerato la fusione dei ghiacciai in tutto il mondo e le proiezioni indicano che una parte consistente dei ghiacciai attualmente esistenti potrebbe scomparire entro la fine del secolo (Moore *et al.,* 2009, Stibal *et al.*, 2020). Quando un ghiacciaio arretra, nuove superfici di terreno vengono progressivamente "liberate" dal ghiaccio e diventano disponibili per la colonizzazione da parte di piante, animali e microorganismi. Si avvia così un processo noto come successione ecologica, durante il quale le comunità biologiche si sviluppano e cambiano gradualmente nel tempo, fino a raggiungere una comunità duratura detta climax (Whittaker 1993, Chapin *et al.,* 1994, Bradley *et al.,* 2014, Eichel 2019). In una prima fase aumentano il numero di specie vegetali e di insetti impollinatori, creando un temporaneo incremento della biodiversità.
Tuttavia, questa fase è destinata a cambiare: con il proseguire del ritiro glaciale e la scomparsa degli habitat pionieri, molte specie specializzate vengono progressivamente sostituite da specie più generaliste, con possibili conseguenze sulla diversità biologica. Questo fenomeno, assieme alla progressiva scomparsa dei ghiacciai, sta trasformando profondamente il modo in cui le specie di animali e piante vivono e interagiscono tra loro (Cauvy-Fraunié *and* Dangles 2019, Ficetola *et al.,* 2021, Losapio *et al.,* 2021a).

Tra gli organismi che rispondono a questi cambiamenti vi sono gli insetti impollinatori, un gruppo fondamentale per il funzionamento degli ecosistemi terrestri. Sebbene le api (*Hymenoptera: Anthophila*) siano gli impollinatori più noti, in alta quota come in altri ambienti, il trasporto del polline è svolto anche da numerosi altri insetti, tra cui farfalle e falene (*Lepidoptera*), coleotteri (*Coleoptera*) e ditteri come i sirfidi (*Diptera: Syrphidae*) (Inouye 2020; McCabe *and* Cobb 2021). Attraverso le loro visite ai fiori, questi animali permettono la riproduzione di gran parte delle piante selvatiche e contribuiscono al mantenimento degli habitat montani (Kaufmann *and* Raffl 2002; Vater *and* Matthews 2013; Erschbamer *and* Caccianiga 2016; Losapio *et al.,* 2016). Nelle Alpi, dove le stagioni favorevoli sono brevi e le condizioni ambientali spesso estreme, le relazioni tra piante e impollinatori rappresentano uno degli elementi chiave per la conservazione della biodiversità.

L'Italia costituisce un *hotspot* di diversità europeo per le api, accogliendo oltre 1000 specie diverse, su un totale di circa 2000 registrate in Europa (Reverté *et al.* 2023). Sebbene la diversità di api raggiunga i massimi valori negli ambienti xerici mediterranei, gli ecosistemi alpini costituiscono un importante bacino di diversità, in particolare per le specie adattate ai climi freddi come i bombi (*Bombus*) (Gentili *et al.,* 2020; Stibal *et al.,* 2020; Bosson *et al.,* 2023; Zavatta *et al,.* 2026). All'interno di questo gruppo è utile distinguere tra l'ape domestica (*Apis mellifera*) e le api selvatiche. La prima è allevata in colonie che possono contare decine di migliaia di individui; grazie alla gestione apistica, svolge un ruolo essenziale nell'impollinazione di molte colture agricole (Khalifa *et al.,* 2021).
Le api selvatiche comprendono invece migliaia di specie per la maggior parte solitarie, che nidificano nel terreno, nel legno morto o in cavità naturali, o costruiscono nidi di fango. Pur essendo meno conosciute, sono spesso impollinatrici molto efficienti e contribuiscono in modo determinante alla riproduzione delle piante spontanee e al mantenimento della biodiversità vegetale (Wagner *et al.,* 2021, Lima *et al.,* 2022). La conservazione di entrambe le componenti, domestica e selvatica, è oggi una priorità, soprattutto alla luce del declino che molte popolazioni di impollinatori stanno registrando a livello globale.

Le piante e i loro impollinatori formano complesse reti di interazioni che sostengono la riproduzione delle prime (attraverso l'impollinazione) e la nutrizione delle seconde (e nel caso delle api anche la riproduzione, considerando che il polline viene raccolto per crescere le larve), e contribuiscono quindi al sostentamento di interi ecosistemi (Bascompte *and* Jordano 2014). La progressiva ritirata dei ghiacciai, tuttavia, altera profondamente le comunità vegetali, con potenziali effetti sugli insetti impollinatori. Comprendere come il cambiamento climatico modifichi tali reti è quindi essenziale per prevedere il futuro della biodiversità alpina (Thompson 2005, Schleuning *et al.,* 2012, Dalsgaard *et al.,* 2017).

Un altro aspetto sempre più rilevante riguarda la diffusione di agenti patogeni tra impollinatori. Negli ultimi anni numerosi studi hanno mostrato che alcuni patogeni (virus, funghi, protozoi) molto comuni nell'ape domestica possono essere rinvenuti anche nelle api selvatiche e in altri insetti impollinatori (Fürst *et al.,* 2014, Alger *et al.,* 2019a, Nanetti *et al*., 2021, Cilia *et al.,* 2022, 2023). La trasmissione può avvenire indirettamente attraverso i fiori, che fungono da veri e propri punti di incontro tra specie diverse (Yanez *et al.,* 2012, 2020, Mazzei *et al.,* 2014, 2019, Burnham *et al.,* 2021, Power 2024). Quando più impollinatori visitano le stesse risorse floreali aumenta conseguentemente il rischio di trasmissione di questi patogeni (Alger *et al.,* 2019b, Burnham *et al.,* 2021, Figue*roa et al., 2020, Poesmans et al., 2021, Tiritelli* et *al.,* 2024). Di conseguenza, qualsiasi fattore in grado di modificare la disponibilità di fiori può influenzare anche la diffusione di tali patogeni. I ghiacciai in ritirata rappresentano quindi un laboratorio naturale ideale per studiare come il cambiamento climatico stia modificando contemporaneamente diversità di impollinatori, reti ecologiche e dinamiche di trasmissione dei patogeni.

Analizzando diverse fasi della successione ecologica lungo le aree liberate dal ghiaccio, è possibile osservare non solo come gli ecosistemi alpini si presentano oggi, ma anche come potrebbero evolvere in futuro.

Per comprendere questi processi abbiamo analizzato le comunità di piante e impollinatori presenti lungo un gradiente di ritiro del Ghiacciaio Mont Miné, nelle Alpi svizzere (Cantone Vallese). In particolare, abbiamo testato tre ipotesi:

1. Il ritiro dei ghiacciai modifica nel tempo la diversità delle piante, degli impollinatori e delle loro interazioni, con un aumento iniziale di diversità seguito da una riduzione nelle fasi più avanzate della successione.
2. Tali cambiamenti alterano la struttura e la capacità delle reti di impollinazione di resistere alla perdita di specie.
3. Le modifiche nella composizione delle comunità e nelle interazioni tra impollinatori favoriscono anche variazioni nella presenza e nella diffusione dei patogeni associati alle api, in particolare dove c'è più competizione per le risorse fiorali.

Questo lavoro è la sintesi di tre differenti pubblicazioni scientifiche che qui sono riportate in maniera sintetica, ma che per approfondimenti sono consultabili:

1) *Glacier retreat triggers changes in biodiversity and plant–pollinator interaction diversity* (Tu *et al.*, 2024), 2) *Glacier retreat decreases mutualistic network robustness over spacetime* (Conti *et al.*, 2025), 3) *Unshared on the top: strong segregation of pathogen communities between western honey bees and wild bees in a retreating glacier foreland* (Ferrari *et al.*, 2026).

Materiali e metodi

Aree di studio: la ricerca è stata condotta sul pendio anteriore del Ghiacciaio del Mont Miné, nella regione della Val d'Hérens, nel cantone svizzero del Vallese (46,05935° N, 7.54849° E); uno dei sistemi glaciali meglio documentati delle Alpi. Dalla fine della Piccola Era Glaciale, a metà del XIX secolo, il ghiacciaio si è ritirato di oltre 2,5 chilometri, liberando progressivamente nuove superfici che sono state colonizzate da piante e animali (Matthews, 1992). Il piedimonte del Mont Miné può essere suddiviso in quattro fasi di arretramento del ghiacciaio, che vanno da praterie pionieristiche frammentate a foreste chiuse, come definito dalle morene depositate negli anni: 1989 (*Stage* 1), 1925 (*Stage* 2), 1900 (*Stage* 3) e 1864 (*Stage* 4) (Figura 1). Per ciascuna fase sono state selezionate quattro parcelle (A–D) per condurre le attività sul campo. Le parcelle di campionamento sono state selezionate in modo casuale sulla sponda destra del pendio Nord del ghiacciaio, a un'altitudine compresa tra 1892 e 1985 metri sul livello del mare, in modo da escludere eventuali effetti legati all'altitudine. Gli *stages* erano, in media, distanziati di almeno 700 metri; tale distanza rappresenta la massima separazione fattibile tra fasi di successione ecologicamente distinte in questo sistema, al fine di garantire la massima separazione spaziale possibile.

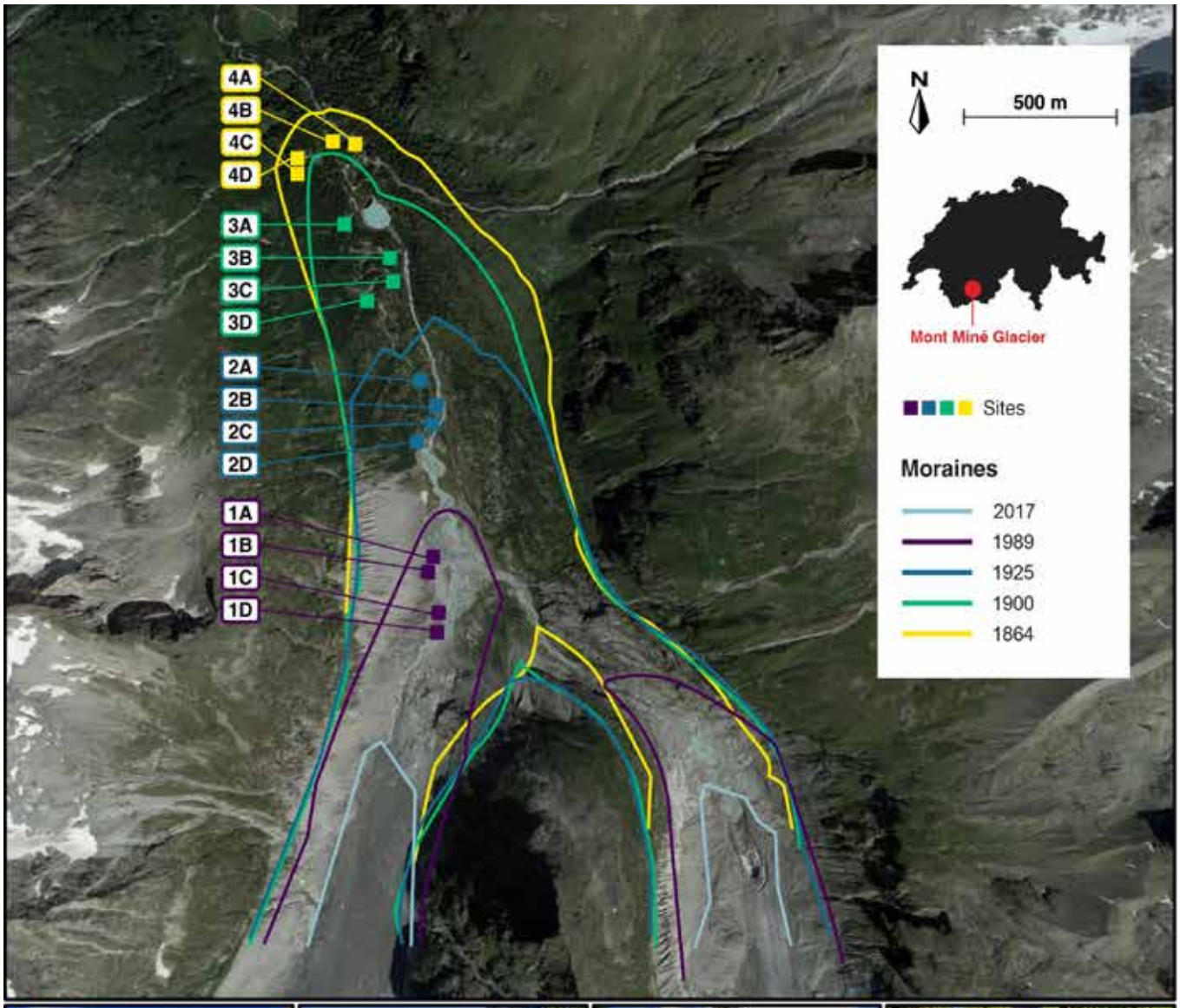
Questo approccio, noto come *space-for-time substitution*, consente di utilizzare le differenze spaziali tra gli stadi come una rappresentazione delle possibili trasformazioni che gli ecosistemi alpini subiscono nel tempo in risposta al cambiamento climatico.

Campionamento e identificazione degli insetti: i campionamenti sono stati effettuati durante le stagioni di fioritura del 2022 e del 2023, tra la metà di giugno e la fine di luglio, periodo in cui l'attività degli impollinatori alpini raggiunge il suo massimo (Tu *et al.,* 2024; Conti *et al*., 2025; Ferrari *et al*., 2026). Per ridurre l'effetto delle condizioni meteorologiche, le osservazioni sono state svolte esclusivamente nelle giornate soleggiate e con vento limitato. In ciascuno dei quattro stadi di successione sono stati selezionati quattro siti di studio (A-D), per un totale di sedici aree campione distribuite lungo il gradiente di deglaciazione. All'interno di ogni sito sono state realizzate osservazioni standardizzate lungo transetti e aree di campionamento permanenti, registrando tutte le visite degli insetti ai fiori. Una visita è stata considerata un'interazione di impollinazione quando l'insetto entrava in contatto con gli organi riproduttivi della pianta.

Per ogni osservazione è stata annotata la specie vegetale visitata e, quando necessario, gli insetti sono stati catturati mediante retino entomologico o aspiratore per consentirne l'identificazione in laboratorio. Le piante sono state determinate a livello di specie utilizzando la flora di riferimento della Svizzera (*Flora Helvetica*), mentre gli insetti sono stati identificati mediante chiavi tassonomiche specialistiche. Nel caso di gruppi particolarmente complessi, soprattutto tra le api selvatiche, l'identificazione è stata confermata tramite tecniche di DNA *barcoding*.

Complessivamente sono state censite oltre cento specie di piante in fiore e migliaia di interazioni tra piante e impollinatori appartenenti a numerosi gruppi tassonomici, tra cui api, bombi, sirfidi, farfalle, falene e coleotteri.

Ricostruzione delle reti piante-insetti: le osservazioni raccolte sul campo sono state utilizzate per ricostruire le reti di impollinazione presenti nei diversi stadi della successione glaciale. In queste reti, le piante e gli impollinatori sono rappresentati come nodi collegati dalle interazioni osservate durante





Stage 1
1.976m a.s.l.

Datazione morene
1989

Stage 2
1,963m a.s.l.

Datazione morene
1925

Stage 3
1,949m a.s.l.

Datazione morene
1900

Stage 4
1,895m a.s.l.

Datazione morene
1864

Figura 1 - Mappa dell'area antistante il Ghiacciaio del Mont Miné in Svizzera, che mostra le aree di campionamento (A–D) e le fasi (1–4) indicate con colori diversi. Di seguito sono riportati alcuni esempi degli ambienti campionati per ciascuna fase, includendo altitudine e datazione media delle morene

il foraggiamento. L'analisi delle reti ha permesso di descrivere come cambiano nel tempo il numero delle interazioni, il grado di specializzazione delle specie e il livello di connessione dell'intera comunità.

Oltre ai tradizionali indici di rete, è stata analizzata la frequenza dei cosiddetti motivi di rete (*network motifs*), piccoli schemi ricorrenti di interazioni che rappresentano i "mattoni fondamentali" con cui si costruiscono le reti ecologiche. Questo approccio ha consentito di comprendere se il ritiro glaciale favorisca reti dominate da specie specialiste oppure da specie più generaliste.

Per valutare la stabilità delle reti è stata inoltre stimata la loro robustezza ecologica, ossia la capacità di mantenere il proprio funzionamento in seguito alla perdita progressiva di specie vegetali. In pratica, sono stati simulati scenari di estinzione per verificare quanto le comunità di impollinatori risultassero vulnerabili ai cambiamenti ambientali associati al riscaldamento climatico.

Infine, sono stati analizzati i ruoli strutturali delle singole specie vegetali all'interno delle reti, per capire se alcune piante rivestano una funzione particolarmente importante nel mantenimento delle interazioni tra organismi. Maggiori specifiche sono dettagliate in Tu *et al.,* 2024 e Conti *et al.*, 2025.

Screening molecolare dei patogeni: per studiare la diffusione di patogeni tra api domestiche e api selvatiche è stato selezionato un sottoinsieme di individui raccolti durante le attività di campo. Ogni esemplare è stato analizzato singolarmente mediante tecniche molecolari in grado di rilevare la presenza e la quantità di specifici microrganismi.

Le indagini si sono concentrate sui principali patogeni associati alle api a livello mondiale. In particolare, sono stati ricercati i virus delle ali deformi (*Deformed Wing Virus, DWV-A* e *DWV-B*), il virus della paralisi cronica (*Chronic Bee Paralysis Virus, CBPV*), il virus della paralisi acuta (*Acute Bee Paralysis Virus, ABPV*), il microsporidio *Nosema ceranae* (un fungo unicellulare) e il tripanosomatide *Lotmaria passim* (un protozoo flagellato).

Oltre alla presenza dei patogeni, è stata quantificata la loro abbondanza all'interno degli individui positivi, consentendo di confrontare differenti specie di api e differenti stadi della successione glaciale. Per alcuni virus è stata inoltre verificata la replicazione attiva all'interno dell'organismo ospite, un'informazione importante per distinguere una vera infezione da una semplice contaminazione acquisita durante la visita ai fiori.

L'integrazione tra dati molecolari e dati ecologici ha permesso di valutare se la condivisione delle stesse risorse floreali da parte di api domestiche e api selvatiche possa facilitare la circolazione dei patogeni nelle comunità di impollinatori alpini. Maggiori specifiche sono dettagliate in Ferrari *et al.*, 2026.

Analisi statistica: i dati raccolti sono stati analizzati mediante diversi approcci statistici volti a descrivere le variazioni della biodiversità e delle interazioni ecologiche lungo il gradiente di deglaciazione.

In particolare, sono stati valutati gli effetti del tempo trascorso dal ritiro del ghiacciaio sulla ricchezza di specie vegetali e di impollinatori, sulla complessità delle reti di impollinazione, sulla robustezza delle comunità ecologiche e sulla presenza dei patogeni.

Sono inoltre stati confrontati i diversi stadi della successione (che rappresentano l'età del ritiro del ghiacciao) per verificare se le differenze osservate fossero maggiori di quelle attese casualmente. L'insieme di questi approcci ha consentito di integrare prospettive complementari, dalla biodiversità delle comunità fino alla salute degli impollinatori, fornendo una visione complessiva degli effetti del ritiro glaciale sugli ecosistemi alpini.

Risultati

Biodiversità e reti di impollinazione lungo il gradiente di ritiro glaciale

Nel corso dello studio sono state censite oltre 100 specie di piante in fiore, più di 1500 interazioni pianta-impollinatore e numerosi gruppi di insetti appartenenti a otto ordini. Tra questi, ditteri, api, bombi, sirfidi e formiche risultano i visitatori floreali più frequenti (Figura 2).

La ricchezza di specie vegetali aumenta nelle prime fasi della successione ecologica per poi diminuire negli stadi più avanzati. Un andamento analogo è stato osservato per molte componenti della comunità di impollinatori. Gli stadi intermedi del gradiente glaciale (stadi 2 e 3, corrispondenti a circa 66 e 111 anni dalla deglaciazione) sono i più ricchi sia in termini di specie vegetali sia di impollinatori (Figura 3). Anche la diversità delle interazioni mostra un andamento simile. Nelle prime fasi della successione, le visite riguardano numerose specie vegetali caratteristiche degli ambienti pionieri, mentre negli stadi più avanzati una quota crescente delle interazioni si concentra su poche specie dominanti. In particolare, nello stadio finale caratterizzato da vegetazione forestale, gran parte delle visite è risultata associata a *Rhododendron ferrugineum* (Figura 4).

Nel complesso, i risultati confermano un andamento non lineare della biodiversità lungo il gradiente di ritiro glaciale, con un picco negli stadi intermedi seguito da una progressiva riduzione nelle fasi più mature della successione.

Cambiamenti nella struttura e nella robustezza delle reti ecologiche

L'analisi delle reti di impollinazione evidenzia profonde differenze tra i diversi stadi della successione

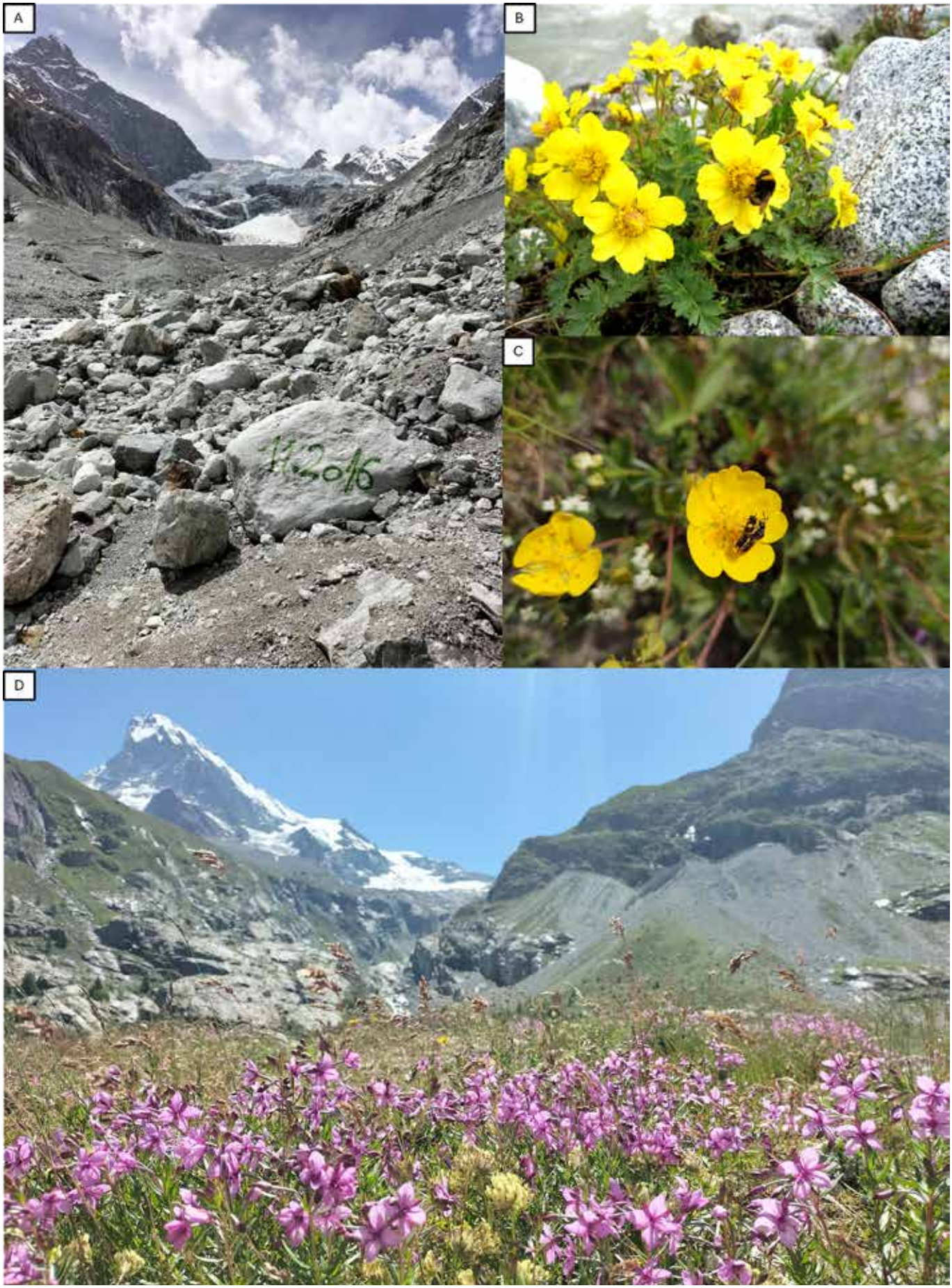


Figura 2 - Esempio di alcuni ambienti, fauna e flora dell'area studio: Ghiacciaio del Mont Miné e posizione della morena frontale nel 2016 (A) (ph G. Losapio); bombo visita i fiori dell'ambretta strisciante (Geum reptans) (B) (ph G. Losapio); coppia di api su un fiore di ranuncolo (C) (ph G. Losapio); prateria alpina con epilobio (Epilobium fleischeri) (D) (ph G. Losapio)

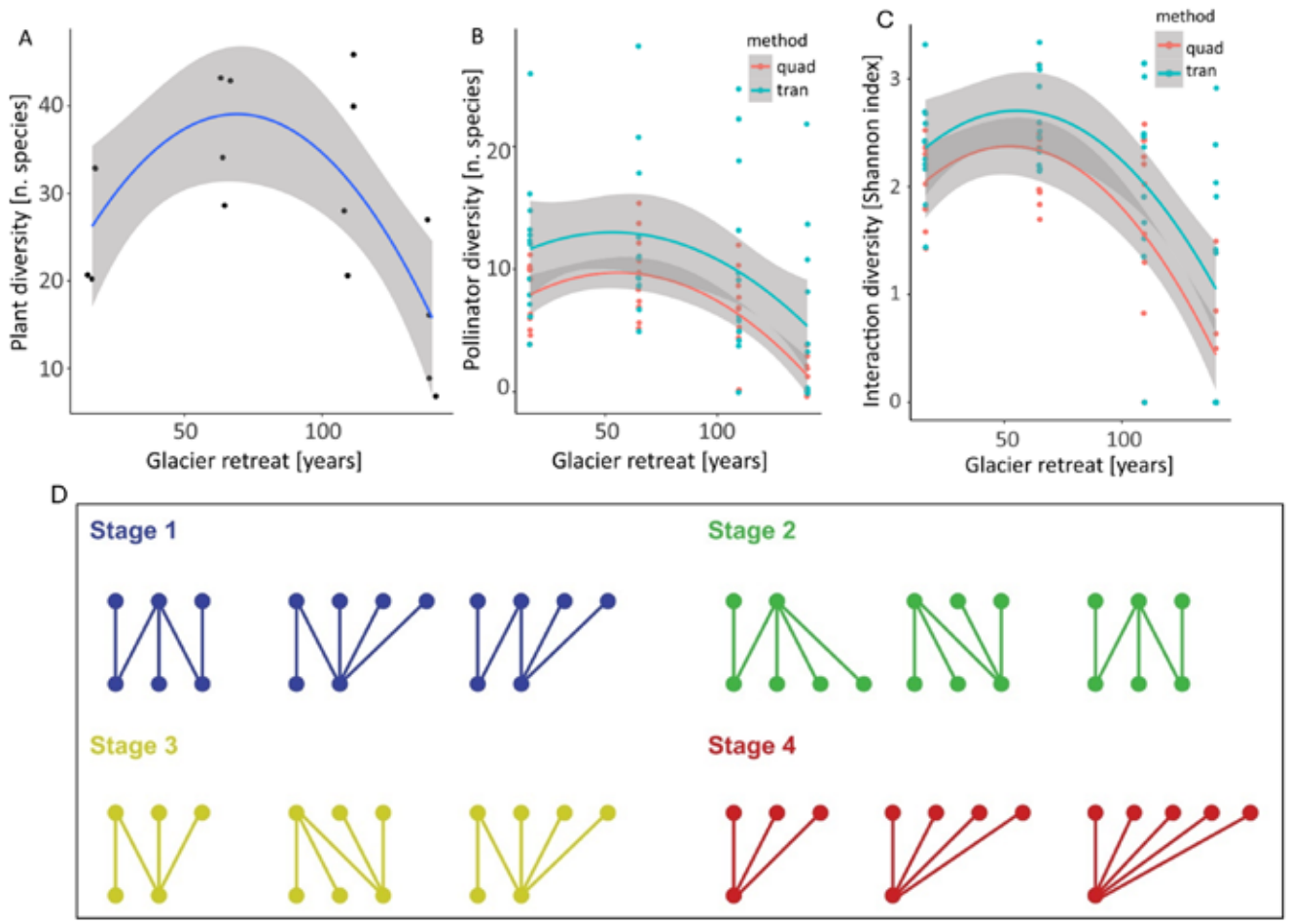


Figura 3 - Impatto del ritiro dei ghiacciai sulle comunità vegetali e sugli impollinatori: (A) effetti del ritiro dei ghiacciai (asse x) sulla diversità delle piante (numero di specie; asse y); (B) effetti del ritiro dei ghiacciai (asse x) sulla diversità degli impollinatori (numero di specie; asse y). Le comunità di impollinatori sono state analizzate utilizzando due metodi di campionamento complementari: quadrati di campionamento (rosso) e transetti (blu); (C) relazione tra la diversità delle piante (numero di specie; asse x) e la diversità degli impollinatori (numero di specie; asse y) lungo il gradiente di ritiro dei ghiacciai; (D) motivi più comuni riscontrati nelle diverse fasi del ritiro glaciale. Rappresentazione schematica delle reti di interazione pianta-impollinatore osservate nelle quattro fasi del ritiro glaciale (Stage 1-4). I nodi inferiori rappresentano le specie vegetali, mentre i nodi superiori rappresentano gli impollinatori; ciascuna linea rappresenta un'interazione osservata tra una specie vegetale e un impollinatore. Le linee non sono orientate e non rappresentano la direzione dell'interazione. Il colore dei nodi e delle linee identifica la fase del ritiro glaciale: blu = Stage 1, verde = Stage 2, giallo = Stage 3 e rosso = Stage 4. La posizione dei nodi è utilizzata esclusivamente per facilitare la visualizzazione della rete e non rappresenta una misura di abbondanza, importanza o distanza ecologica. Il numero e la disposizione delle connessioni mostrano la struttura delle interazioni pianta-impollinatore nelle diverse fasi del ritiro glaciale

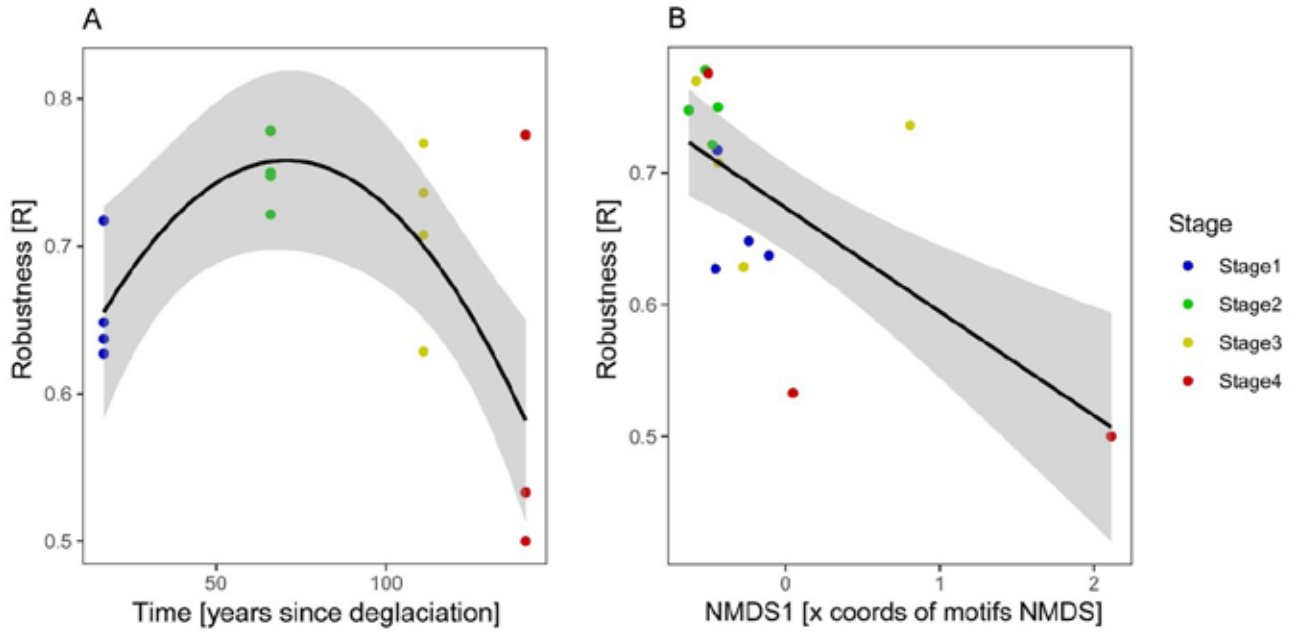


Figura 4 - Relazione tra il ritiro dei ghiacciai e la robustezza delle reti ecologiche: relazione tra il ritiro dei ghiacciai e la robustezza della rete (A) e relazione tra il primo asse dell'NMDS della prevalenza dei motivi e la robustezza della rete (B).

glaciale. Circa il 45% dei motivi di rete (*network motifs*) osservati è significativamente più frequente rispetto a quanto atteso casualmente.

Con il procedere della successione si osserva uno spostamento da reti caratterizzate da interazioni più specializzate e fortemente connesse verso configurazioni dominate da specie generaliste e da connessioni più deboli. Questo cambiamento è particolarmente evidente nello stadio finale, dove le interazioni sono fortemente concentrate attorno a poche specie vegetali dominanti (Figure 3 e 4).

Le simulazioni di estinzione, inoltre, mostrano che

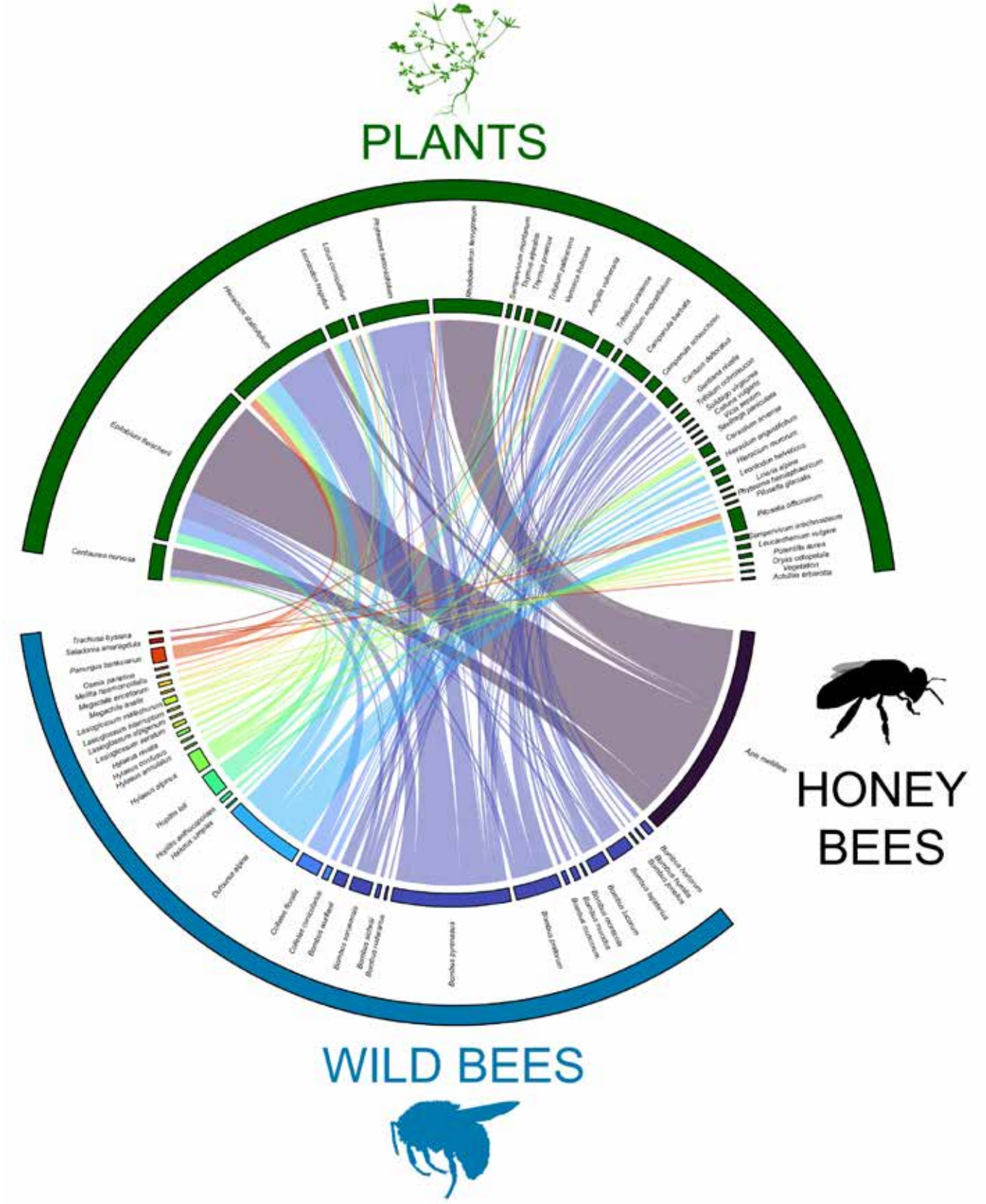


Figura 5 - Rete bipartita globale api-piante. Le piante sono rappresentate in verde nella parte superiore, mentre le api, con colori distintivi per ciascun genere, sono rappresentate nella parte inferiore

la robustezza delle reti non rimane costante nel tempo. La capacità delle comunità di resistere alla perdita di specie raggiunge i valori più elevati negli stadi intermedi della successione e diminuisce progressivamente nelle fasi più avanzate. Lo stadio forestale finale è il meno robusto tra quelli analizzati (Figura 3 e 4).

Diffusione dei patogeni nelle comunità di api

Nel biennio di campionamento sono state analizzate 335 api appartenenti a 36 specie, di cui 230 api selvatiche e 105 api domestiche (*Apis mellifera* L.). L'ape domestica ha un comportamento di foraggiamento fortemente concentrato: l'88% degli individui osservati visitava soltanto tre specie vegetali (*Epilobium fleischeri*, *Rhododendron ferrugineum* e *Centaurea nervosa*). Al contrario, il 70% delle specie vegetali visitate dalle api è frequentato esclusivamente da api selvatiche (Figura 5).

Le analisi molecolari hanno evidenziato una distribuzione differente dei patogeni tra l'ape domestica e le api selvatiche. I virus ABPV e CBPV e il tripanosomatide *Lotmaria passim* sono stati rilevati esclusivamente in *Apis mellifera*. Il microsporidio patogeno *Nosema ceranae* è invece risultato ampiamente diffuso in entrambi i gruppi, essendo stato rilevato in 160 delle 230 api selvatiche e in 61 delle 105 api domestiche analizzate. Tutti gli individui esaminati sono risultati positivi a un'infezione attiva da DWV. Tuttavia, le due principali varianti virali hanno mostrato una distribuzione distinta: DWV-A è stato rilevato esclusivamente nelle api selvatiche, mentre DWV-B è stato rilevato soltanto nelle api domestiche (Figura 6). Le abbondanze virali più elevate sono state osservate negli stadi intermedi del gradiente glaciale, che corrispondono anche alle aree con la maggiore ricchezza floristica e la più elevata diversità di impollinatori. Al contrario, non sono emerse differenze significative associate alla dimensione corporea, al comportamento sociale o alla tipologia di nidificazione delle api (Figura 7).

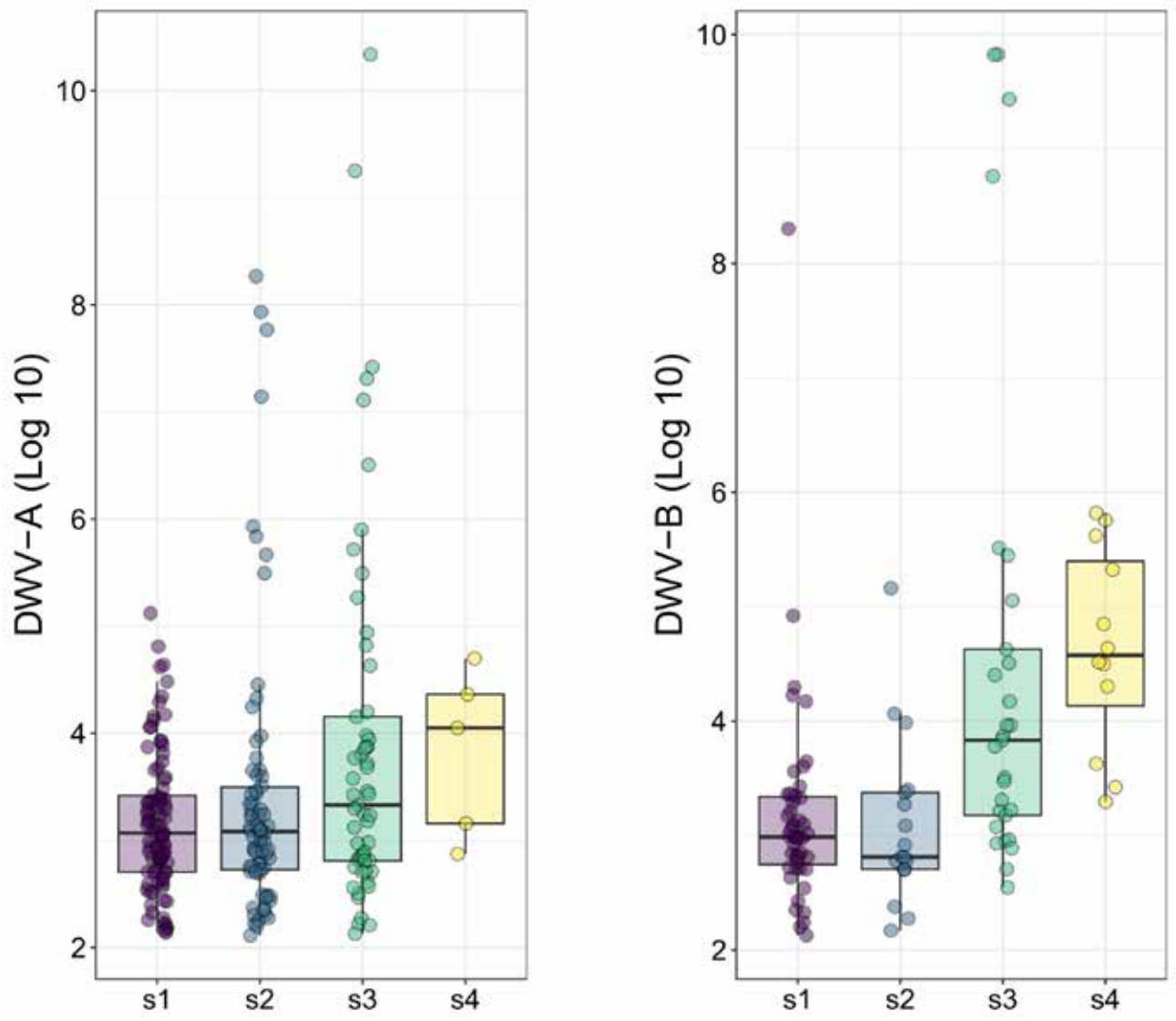


Figura 6 - Boxplots che mostrano le differenze in termini di abbondanza di DWV-A (api selvatiche) e abbondanza di DWV-B (api mellifere) nei diversi stadi del ritiro del ghiacciaio. L'abbondanza è espressa come numero di copie di DNA/RNA sottoposto a trasformazione Log10

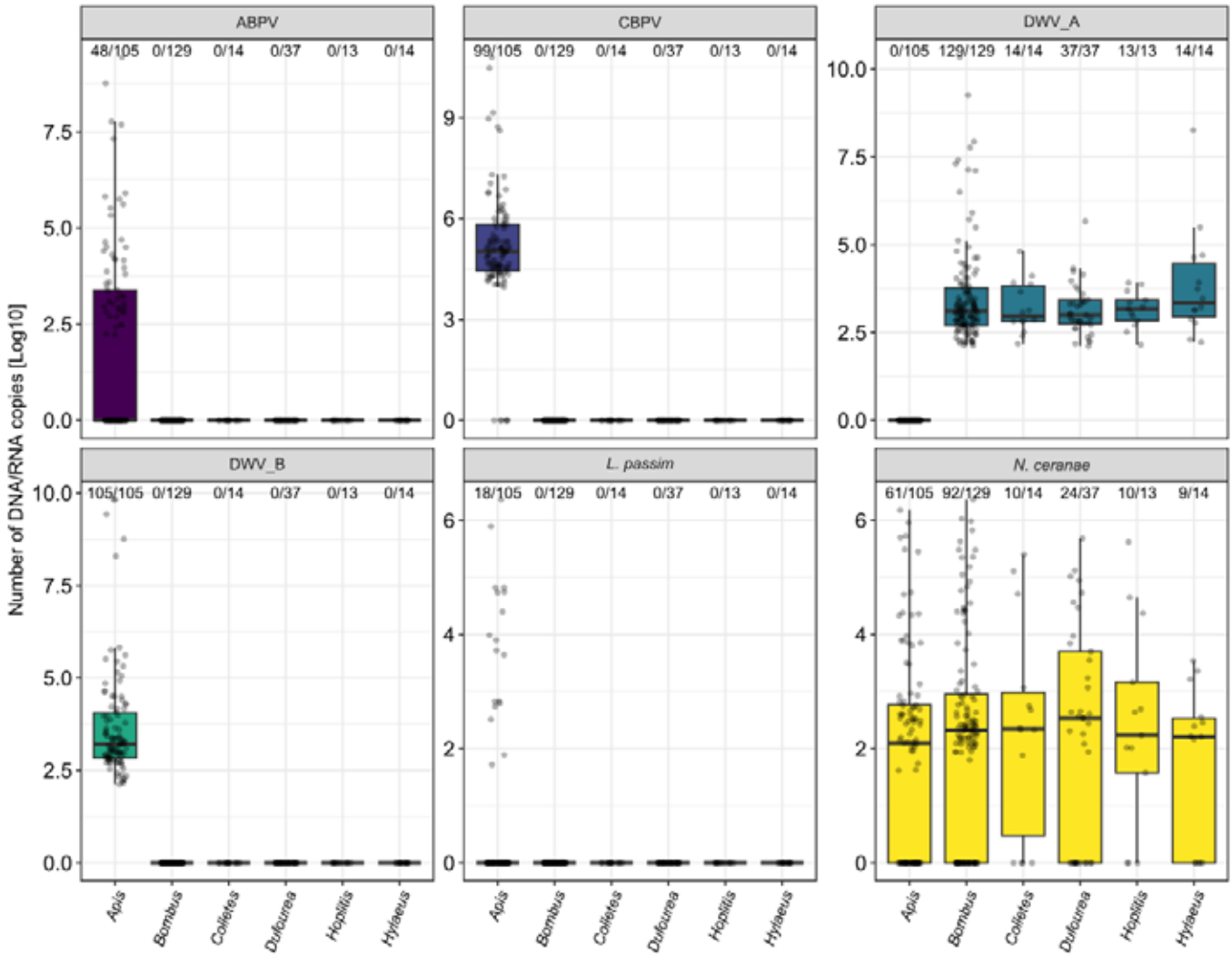


Figura 7 - Boxplots dell''abbondanza (numero di copie di DNA/RNA trasformato in Log10) dei sei agenti patogeni rilevati nelle specie di api più abbondanti. (A) ABPV, (B) CBPV, (C) DWV-A e (D) DWV-B, (E) Lotmaria passim, (F) Nosema ceranae. Viene riportato il numero di individui positivi sul totale di quelli testati

Discussione

Seppure il ritiro dei ghiacciai sia un fenomeno globale di grande importanza, per questo molto studiato da geologi e climatologi, a oggi si sa ancora poco sulle conseguenze per la biodiversità e le reti ecologiche (Roe *et al.,* 2017; Bosson *et al.,* 2023; Cook *et al*., 2023).

Il ritiro dei ghiacciai modifica la biodiversità e le interazioni tra piante e impollinatori

I nostri risultati confermano che il ritiro dei ghiacciai agisce come un processo a due fasi. In una prima fase, la scomparsa del ghiaccio libera nuovi spazi che vengono rapidamente colonizzati da piante pioniere, creando habitat ricchi di risorse floreali. Questa espansione iniziale della vegetazione favorisce a sua volta l'aumento degli impollinatori e delle interazioni ecologiche. Le aree di età intermedia lungo la fronte glaciale hanno infatti mostrato la maggiore ricchezza di piante e impollinatori. Questi ambienti ospitano comunità particolarmente diversificate, nelle quali coesistono specie tipiche delle fasi iniziali della successione e specie caratteristiche degli stadi più avanzati. Di conseguenza, le reti di impollinazione raggiungono qui il massimo livello di complessità e diversità (Gentili *et al.,* 2020; Stibal *et al.,* 2020; Bosson *et al.,* 2023; Milner *et al.,* 2017; Cauvy-Fraunié *and* Dangles 2019).

Tuttavia, questo incremento della biodiversità risulta temporaneo. Con il passare dei decenni, la progressiva espansione di arbusti e foreste riduce la disponibilità di habitat aperti e favorisce la sostituzione delle specie pioniere con poche specie dominanti. Nello stadio più avanzato della successione gran parte delle interazioni si concentra attorno a un numero limitato di piante, in particolare il rododendro ferrugineo (*Rhododendron ferrugineum*) (Delarze *et al.,* 2015; Price *et al*., 2021; Burga *et al.,* 2010; Lambiel *et al.,* 2016).

Questi risultati indicano che i ghiacciai svolgono anche un ruolo fondamentale nel mantenimento della biodiversità. La loro presenza genera infatti una continua creazione di habitat giovani che

sostengono comunità biologiche particolarmente ricche e dinamiche. Se il ritiro glaciale dovesse proseguire fino alla completa scomparsa dei ghiacciai, gli habitat pionieri verrebbero progressivamente perduti e molte specie chiave potrebbero subire un forte declino a causa dell'omogeneizzazione dell'habitat e della competizione da parte delle specie tardive (Caccianiga *et al.,* 2006; Inouye 2020; Junker *et al.,* 2020; Fickert 2020; Anthelme *et al.,* 2021; Losapio *et al*., 2021a).

I cambiamenti della biodiversità alterano la struttura e la stabilità delle reti ecologiche

Il cambiamento osservato nelle comunità biologiche non riguarda soltanto il numero di specie presenti, ma anche il modo in cui queste interagiscono tra loro. L'analisi delle reti di impollinazione ha mostrato che il ritiro glaciale è associato a una progressiva perdita di interazioni specializzate e a un aumento relativo delle interazioni dominate da specie generaliste. In altre parole, le reti tendono a diventare sempre più semplificate e dipendenti da un numero ridotto di specie che interagiscono con molti partner diversi (Losapio *et al.,* 2016, 2021b; Vitasse *et al.,* 2021). A prima vista questo risultato potrebbe sembrare controintuitivo. Spesso le specie generaliste vengono considerate importanti per la stabilità degli ecosistemi, poiché sono in grado di utilizzare numerose risorse. Tuttavia, nel nostro caso l'aumento del peso delle specie generaliste non deriva dall'aggiunta di nuove interazioni, bensì dalla progressiva scomparsa delle specie specializzate. È proprio questa perdita di diversità ecologica che porta a reti meno robuste (Brosi *et al.,* 2016; Alexander *et al.,* 2015).

Le simulazioni hanno confermato questa interpretazione. La capacità delle reti di resistere alla perdita di specie raggiunge il massimo negli stadi intermedi della successione, dove la biodiversità e la diversità delle interazioni sono più elevate. Al contrario, la robustezza diminuisce sensibilmente negli stadi più maturi, rendendo l'intero sistema più vulnerabile a ulteriori perturbazioni.

Le modifiche nelle interazioni tra impollinatori influenzano anche la diffusione dei patogeni

I risultati relativi ai patogeni evidenziano come la struttura delle reti ecologiche possa influenzare non soltanto la biodiversità, ma anche la trasmissione di patogeni delle comunità di impollinatori.

L'ape domestica (*Apis mellifera*) e le api selvatiche hanno mostrato un utilizzo delle risorse floreali solo parzialmente sovrapposto. Molte specie vegetali sono risultate frequentate esclusivamente da api selvatiche, mentre le api domestiche hanno concentrato gran parte della loro attività su poche specie particolarmente attrattive. Questa segregazione nelle risorse utilizzate si riflette anche nella distribuzione dei patogeni.

Alcuni agenti patogeni sono stati rilevati esclusivamente nell'ape domestica, mentre altri sono risultati ampiamente diffusi in entrambe le componenti della comunità. In particolare, il microsporidio parassita *Nosema ceranae*, che causa problemi di spopolamento e collasso delle colonie gestite, è stato trovato sia nelle api domestiche sia nelle api selvatiche, confermando la sua elevata capacità di diffondersi tra specie differenti (Ravoet *et al.,* 2014, Ngor *et al.,* 2020, Piché-Mongeon *et al.,* 2024, Tiritelli *et al.,* 2024; Graystock *et al,* 2016, Cilia *et al.,* 2022).

L'aspetto forse più interessante riguarda però il legame tra la diversità di api e piante e l'abbondanza dei patogeni. I livelli più elevati di alcuni virus sono stati osservati proprio negli stadi intermedi del gradiente glaciale, caratterizzati dalla maggiore diversità di piante e impollinatori. Comunità più ricche offrono infatti maggiori opportunità di contatto tra individui e una maggiore probabilità di condivisione delle risorse floreali. Ciò evidenzia come diversità e diffusione dei patogeni siano processi strettamente collegati. I fiori rappresentano infatti punti di incontro tra specie diverse e possono agire come veri e propri "*hub ecologici*" attraverso i quali microrganismi e virus vengono trasferiti da un impollinatore all'altro (Alger *et al.,* 2019b, Figueroa *et al.,* 2019, Yañez *et al.,* 2020, Burnham *et al.,* 2021).

Nel complesso, i nostri risultati suggeriscono che la limitata sovrapposizione delle risorse floreali possa rappresentare una barriera naturale alla diffusione dei patogeni tra api domestiche e api selvatiche nelle comunità alpine studiate. Tuttavia, il cambiamento climatico sta modificando rapidamente la distribuzione delle piante e degli impollinatori e queste barriere potrebbero diventare meno efficaci in futuro (Proesmans *et al.,* 2021; Piot *et al.,* 2022; Zavatta *et al.,* 2026).

Conclusioni

Il ritiro dei ghiacciai sta trasformando profondamente gli ecosistemi alpini. Se nelle prime fasi della deglaciazione si osserva un aumento della biodiversità e della complessità delle interazioni ecologiche, nel lungo periodo la progressiva scomparsa degli habitat pionieri porta a una riduzione della diversità biologica, a reti ecologiche meno robuste e a nuove dinamiche di diffusione dei patogeni. I ghiacciai non sono quindi soltanto indicatori del cambiamento climatico o una riserva idrica: la loro presenza contribuisce direttamente al mantenimento di habitat, di specie e di interazioni che sostengono il corretto funzionamento degli ecosistemi montani. Comprendere come queste reti biologiche si trasformino nel tempo è fondamentale per prevedere il futuro della biodiversità alpina e per sviluppare strategie di conservazione efficaci in un mondo sempre più caldo e privo di

ghiacciai. In questo contesto, la tutela e valorizzazione degli ambienti alpini di alta quota, delle comunità vegetali pioniere e delle reti di impollinazione emergono come una delle principali sfide per la conservazione della biodiversità nelle nostre future Alpi.

Ringraziamenti

Siamo grati al personale del *Service des forêts, de la nature et du paysage* del Cantone Vallese, e in particolare a Camille Pitteloud, per aver concesso i permessi e per il supporto tecnico. Ringraziamo gli studenti e le studentesse del *Biodiversity Change group*, in particolare Bao Ngan Tu e Nora Khelidj, per tutto l'eccellente lavoro svolto nel progetto.

Finanziamenti

Gli studi sono stati finanziati dalla *Swiss National Science Foundation* (PZ00P3_202127) e nell'ambito del progetto – "MITEX – *Mitigating socio-ecological impacts of glacier extinction*" – Codice Progetto P2022N5KYJ – CUP G53D23006250001, Bando PRIN 2022 PNRR, finanziato dall'Unione Europea – *NextGenerationEU* nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) – Missione 4, Componente 2, Investimento 1.1.

Bibliografia

- ALEXANDER J. M., DIEZ J. M. and LEVINE J. M. (2015) - *Novel competitors shape species' responses to climate change*. – Nature 525: 515–518
- ALGER S. A., BURNHAM P. A., BONCRISTIANI H. F. and BRODY A. K. 2019a - *RNA virus spillover from managed honeybees (Apis mellifera) to wild bumblebees (Bombus spp.)* – PloS One 14: e0217822
- ALGER, S. A., BURNHAM, P. A. and BRODY, A. K. (2019b) - *Flowers as viral hot spots: honey bees (Apis mellifera) unevenly deposit viruses across plant species* – PLoS One 14: e0221800
- ANTHELME F., CAUVY-FRAUNIÉ S., FRANCOU B., CÁCERES B., DANGLES O. (2021) - *Living at the edge: increasing stress for plants 2–13 years after the retreat of a tropical glacier*. Front Ecol Evol 9:584872
- BASCOMPTE J. and MELIÁN C. J. (2005) - *Simple trophic modules for complex food webs* - Ecology 86: 2868–2873
- BOSSON JB., HUSS M., CAUVY-FRAUNIÉ S., CLÉMENT JC, COSTES G, FISCHER M, POULENARD J, ARTHAUD F. (2023) - *Future emergence of new ecosystems caused by glacier retreat*. Nature 620:562–569
- BRADLEY J. A., SINGARAYER J. S. and ANESIO A. M. (2014) - *Microbial community dynamics in the forefield of glaciers* - Proc. R. Soc. B 281: 20140882.
- BROSI B. J. (2016) - *Pollinator specialization: from the individual to the community* – New Phytol. 210: 1190–1194
- BURGA CA., KRÜSI B., EGLI M., WERNLI M., ELSENER S., ZIEFLE M., FISCHER T., MARVIS C. (2010) - *Plant succession and soil development on the foreland of the Morteratsch glacier (Pontresina, Switzerland): straight forward or chaotic?* Flora 205(9):561–576
- BURNHAM P. A., ALGER S. A., CASE B., BONCRISTIANI H., HÉBERT-DUFRESNE L. AND BRODY A. K. (2021) - *Flowers as dirty doorknobs: deformed wing virus transmitted between Apis mellifera and Bombus impatiens through shared flowers.* – J. Appl. Ecol. 58: 2065–2074
- CACCIANIGA M., LUZZARO A., PIERCE S., CERIANI RM., CERABOLINI B. (2006) - *The functional basis of a primary succession resolved by CSR classification*. Oikos 112(1):10–20.
- CAUVY-FRAUNIÉ S. AND DANGLES O. (2019) - *A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat*. – Nat. Ecol. Evol. 3: 1675–1685.
- CHAPIN F. S., WALKER L. R., FASTIE C. L. AND SHARMAN L. C. (1994). *Mechanisms of primary succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska*. – Ecol. Monogr. 64: 149–175
- CILIA G., FLAMINIO S., ZAVATTA L., RANALLI R., QUARANTA M., BORTOLOTTI L. AND NANETTI A. (2022) - *Occurrence of honey bee (Apis mellifera L.) pathogens in wild pollinators in northern Italy*. – Front. Cell. Infect. Microbiol. 12: 907489
- CILIA G., FLAMINIO S., RANALLI R., ZAVATTA L., NANETTI A., BORTOLOTTI L. and BOGO G. (2023) - *Presence of Apis mellifera pathogens in different developmental stages of wild Hymenoptera species*. – Bull. Insectol. 76: 147–154
- COOK SJ., JOUVET G., MILLAN R., RABATEL A., ZEKOLLARI H., DUSSAILLANT I. (2023)- *Committed ice loss in the European Alps until 2050 using a deep-learning-aided 3D ice-flow model with data assimilation*. Geophys Res Lett 50:e2023GL105029
- DALSGAARD B., SCHLEUNING M., MARUYAMA P. K., DEHLING D. M., SONNE J., VIZENTIN-BUGONI J., ZANATA T. B., FJELDSÅ J., BÖHNING-GAESE K. and RAHBEK C. (2017) - *Opposed latitudinal patterns of network-derived and dietary specialization in avian plant–frugivore interaction systems*. – Ecography 40: 1395–1401
- DELARZE R., GONSETH Y., EGGENBERG S., VUST M. (2015) *Lebensräume Der Schweiz*. 3. Aufl. –Ott Verlag, Bern, p 456
- EICHEL J. (2019) - *Vegetation succession and biogeomorphic interactions in glacier forelands. Geomorphology of proglacial systems*. – In: Heckmann T. and Morche D. (eds), Geography of the physical environment. Springer
- ERSCHBAMER B, CACCIANIGA MS. (2016) - *Glacier forelands: lessons of plant population and community development*. In: Cánovas FM, Lüttge U, Matyssek R (eds) Progress in botany, vol 78. Springer, Cham, pp 259–284
- FICETOLA G. F., MARTA S., GUERRIERI A., GOBBI M., AMBROSINI R., FONTANETO D., ZERBONI A., POULENARD J., CACCIANIGA M. S. and THUILLER,W. (2021) - *Dynamics of ecological communities following current retreat of glaciers*. – Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 52: 405–426
- FICKERT T. (2020) - *Common patterns and diverging trajectories in primary succession of plants in Eastern Alpine glacier forelands*. Diversity 12:191
- FIGUEROA L. L., GRAB H., NG W. H., MYERS C. R., GRAYSTOCK P., MCFREDERICK Q. S., MCART, S. H. (2020) - *Landscape simplification shapes pathogen prevalence in plant–pollinator networks* - Ecol. Lett. 23: 1212–1222
- FÜRST M. A., MCMAHON, D. P., OSBORNE J. L., PAXTON R. J., BROWN, M. J. (2014) - *Disease associations between honeybees and bumblebees as a threat to wild pollinators* - Nature 506: 364–366.
- GENTILI R. *et al.* (2020) - *Glacier shrinkage and slope processes create habitat at high elevation and microrefugia across treeline for alpine plants during warm stages* - CATENA 193:104626
- GRAYSTOCK P., BLANE E. J., MCFREDERICK Q. S., GOULSON D., HUGHES W.O. (2016) - *Do managed bees drive parasite spread and emergence in wild bees?* - Int. J. Parasitol. Parasites Wildl. 5: 64–75.
- JUNKER RR., HANUSCH M., HE X., RUIZ-HERNÁNDEZ V., OTTO J-C., KRAUSHAAR S., BAUCH K., GRIES-

SENBERGER F., OHLER L-M., TRUTSCHNIG W. (2020) *Ödenwinkel: an Alpine platform for observational and experimental research on the emergence of multidiversity and ecosystem complexity.* Web Ecol 20(2):95–106

- KAUFMANN R., RAFFL C. (2002) *Diversity in primary succession: the chronosequence of a glacier foreland.* In: Körner C, Spehn EM (eds) Mountain diversity: a global assessment. CRC Press, Boca Raton, pp 177–190
- KHALIFA S. A. M., ELSHAFIEY E. H., SHETAIA A. A., ABD EL-WAHED A. A., ALGETHAMI A. F., MUSHARRAF S. G., ALAJMI M. F., ZHAO C., MASRY S. H. D., ABDEL-DAIM M. M., HALABI M. F., KAI G., AL NAGGAR Y., BISHR M., DIAB M. A. M., EL-SEEDI H. R. (2021) - *Overview of bee pollination and its economic value for crop production* - Insects 12: 688
- LAMBIEL C., MAILLARD B., KUMMERT M., REYNARD E. (2016) - *Geomorphology of the Hérens valley (Swiss Alps)*. J Maps 12(1):160-172
- LIMA M. A. P., CUTLER G. C., MAZZEO G., HRNCIR M. (2022) - *The decline of wild bees: causes and consequences* - Front. Ecol. Evol. 10: 1027169
- LOSAPIO G., GOBBI M., MARANO G., AVESANI D., BORACCHI P., COMPOSTELLA C., PAVESI M., SCHÖB C., SEPPI R., SOMMAGGIO D., ZANETTI A,. CACCIANIGA M. (2016) - *Feedback effects between plant and flower-visiting insect communities along a primary succession gradient* - Arthropod-Plant Interact 10(6):485–495
- LOSAPIO G., NORTON HASDAY E., ESPADALER X., GERMANN C., ORTIZ-SÁNCHEZ FJ., PONT A., SOMMAGGIO D., SCHÖB C. (2021b) - *Facilitation and biodiversity jointly drive mutualistic networks* - J Ecol 109(5):2029–2037
- LOSAPIO G., CERABOLINI B. E. L., MAFFIOLETTI C., TAMPUCCI D., GOBBI M., CACCIANIGA, M. S. (2021a) - *The consequences of glacier retreat are uneven between plant species.* – Front. Ecol. Evol. 8: 616562
- MARZEION B., COGLEY J. G., RICHTER K., PARKES D. (2014) - *Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes* - Science 345: 919–921
- MAZZEI M., CARROZZA M. L., LUISI E., FORZAN M., GIUSTI M., SAGONA S., TOLARI F., FELICIOLI A. (2014) - *Infectivity of DWV associated to flower pollen: experimental evidence of a horizontal transmission route* - PloS One 9: e113448
- MAZZEI M., CILIA,G., FORZAN M., LAVAZZA A., MUTINELLI F., FELICIOLI A. (2019) - *Detection of replicative Kashmir bee virus and black queen cell virus in Asian hornet Vespa velutina (Lepelieter 1836) in Italy* -Sci. Rep. 9: 10091
- MCCABE LM., COBB NS. (2021) - *From bees to flies: global shift in pollinator communities along elevation gradients* - Front Ecol Evol 8:626124.
- MILNER AM., KHAMIS K., BATTIN TJ., BRITTAIN JE., BARRAND NE., FÜREDER L., CAUVY-FRAUNIÉ S., GÍSLASON GM., JACOBSEN D., HANNAH DM., HODSON AJ., HOOD E., LENCIONI V., ÓLAFSSON JS., ROBINSON CT,. TRANTER M., BROWN LE. (2017) *Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems.* PNAS 114(37):9770–9778
- MOORE R. D., FLEMING S. W., MENOUNOS B., WHEATE R., FOUNTAIN A., STAHL K., HOLM K., JAKOB, M. (2009) - *Glacier change in western North America: influences on hydrology, geomorphic hazards and water quality* - Hydrol. Process 23: 42–61
- NANETTI A., BORTOLOTTI L., CILIA G. (2021) - *Pathogens spillover from honey bees to other arthropods* - Pathogens 10: 1044
- NGOR L., PALMER-YOUNG E. C., BURCIAGA NEVAREZ R., RUSSELL K. A., LEGER L., GIACOMINI S. J., PINILLA-GALLEGO M. S., IRWIN R.E., MCFREDERICK Q. S. (2020) - *Cross-infectivity of honey and bumble bee-associated parasites across three bee families* - Parasitology 147: 1290–1304
- PICHÉ-MONGEON V., GUZMAN-NOVOA E. (2024) - *Pathogen spillover from honey bees (Apis mellifera L.) to wild bees in North America* - Discov. Anim. 1: 33
- POWER K., CILIA G., RAGUSA E., RIZZO R., BORTOLOTTI L., MAIOLINO P. (2024) - *Occurrence of Nosema ceranae, Ascosphaera apis and trypanosomatids in Vespa orientalis Linneus 1771* - J. Invertebr. Pathol. 206: 108168
- PRICE B., HUBER N., GINZLER C., PAZÚR R., RÜETSCHI M. (2021) *The Habitat Map of Switzerland v1*- EnviDat
- PROESMANS W., ALBRECHT M., GAJDA A., NEUMANN P., PAXTON R. J., PIOZ M., POLZIN C., SCHWEIGER O., SETTELE J., SZENTGYÖRGYI H., THULKE H. H. (2021) - *Pathways for novel epidemiology: plant–pollinator–pathogen networks and global change* - Trends Ecol. Evol. 36: 623–636
- RAVOET J., DE SMET L., MEEUS I., SMAGGHE G., WENSELEERS T., DE GRAAF D. C. (2014) - *Widespread occurrence of honey bee pathogens in solitary bees* - J. Invertebr. Pathol. 122: 55–58
- ROE G., BAKER M., HERLA F. (2017) - *Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change* - Nat. Geosci. 10: 95–99
- SCHLEUNING M. *et al.* (2012) - *Specialization of mutualistic interaction networks decreases toward tropical latitudes* - Curr. Biol. 22: 1925–1931
- STIBAL M., BRADLEY J. A., EDWARDS A., HOTALING S., ZAWIERUCHA K., ROSVOLD J., LUTZ S., CAMERON K. A., MIKUCKI J.A., KOHLER T.J., ŠABACKÁ M., ANESIO A.M. (2020) - *Glacial ecosystems are essential to understanding biodiversity responses to glacier retreat* - Nat. Ecol. Evol. 4: 686–687
- THOMPSON J.N. (2005) - *The geographic mosaic of coevolution* - Univ of Chicago Press
- VATER A.E., MATTHEWS J.A. (2013) - *Testing the 'addition and persistence model' of invertebrate succession in a subalpine glacier-foreland chronosequence* - Fabergstølsbreen, southern Norway. Holocene 23:1151–1162
- VITASSE Y., URSENBACHER S., KLEIN G., BOHNENSTENGEL T., CHITTARO Y., DELESTRADE A., MONNERAT C., REBETEZ M., RIXEN C., STREBEL N., SCHMIDT BR., WIPF S., WOHLGEMUTH T., YOCCOZ NG., LENOIR J. (2021) - *Phenological and elevational shifts of plants, animals and fungi under climate change in the European Alps* - Biol Rev 96(5):1816–1835
- WAGNER D.L., GRAMES E.M., FORISTER M.L., BERENBAUM M. R., STOPAK, D.(2021) - *Insect decline in the Anthropocene: death by a thousand cuts* - Proc. Natl Acad. Sci. 118: e2023989118
- WHITTAKER R. J. (1993) - *Plant population patterns in a glacier foreland succession: pioneer herbs and later-colonizing shrubs* - Ecography 16: 117–136
- YAÑEZ O., JAFFÉ R., JAROSCH A., FRIES I., MORITZ R. F., PAXTON R.J., DE MIRANDA J.R. (2012) - *Deformed wing virus and drone mating flights in the honey bee (Apis mellifera): implications for sexual transmission of a major honey bee virus* - Apidologie 43: 17–30
- ZAVATTA L., TIRITELLI R., MAGAGNOLI S., VETTORAZZO E., MOVALLI C., CAROTTI G., COVIELLO M., VITERBI R., CERRATO C., MAISTRELLO L., BURGIO G., SOMMAGGIO D., CILIA G. (2026) - *Shared pathogens among honey bees, wild bees and hoverflies in mountain ecosystems* - Sci Rep 16, 22151



Foto aerea del ghiacciaio Sveabreen che si tuffa nel ghiaccio marino che ricopre il Nordfjorden - ph Anna Baldo

https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_05

Sulle tracce del nuovo Artico

Ricerca italiana alla base "Dirigibile Italia", Ny Ålesund, Svalbard

Anna Baldo[1][2]

1. *Istituto di Scienze Polari (ISP) del CNR*
2. *Sezione CAI di Marostica*

Riassunto

Questo articolo offre una panoramica completa delle attività scientifiche svolte durante tutto l'anno presso la stazione artica italiana "Dirigibile Italia" a Ny-Ålesund, nelle isole Svalbard (79° N). Gestita dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), la base funge da polo internazionale per il monitoraggio ambientale a lungo termine e per la scienza del sistema Terra in un'area dell'Alto Artico soggetta a un rapido riscaldamento. Le attività di ricerca seguono un preciso ciclo stagionale dettato dalla luce polare e dalle condizioni climatiche. Le attività invernali si concentrano sulla chimica degli aerosol atmosferici, sulla termodinamica dello strato limite e sul trasporto a lunga distanza di inquinanti, avvalendosi di strutture permanenti quali l'Osservatorio Gruvebadet e la Torre Amundsen-Nobile per lo studio dei cambiamenti climatici (CCT).
La ricerca primaverile verte su idrologia della neve, glaciologia, contaminanti emergenti (come PFAS e black carbon) e sul degrado delle informazioni paleoclimatiche contenute nelle carote di ghiaccio a causa della percolazione dell'acqua di fusione. La stagione estiva vede uno spostamento dell'interesse verso l'ecologia terrestre, le dinamiche dello strato attivo del permafrost, la modellazione dei flussi di CO2, le reti trofiche delle acque dolci e il monitoraggio oceanografico nel Kongsfjorden. Infine, in autunno, i ricercatori sfruttano la notte polare per studiare la fisica dell'alta atmosfera, la scintillazione ionosferica, le dinamiche aurorali e i flussi di raggi cosmici. Nel loro insieme, questi dataset multidisciplinari e relativi a diverse stagioni evidenziano come l'amplificazione artica e il riscaldamento invernale stiano trasformando l'ambiente polare, rendendo Ny-Ålesund un sito cruciale per comprendere le future traiettorie del cambiamento climatico globale.

Abstract: On the trail of the new Arctic

This article provides a comprehensive overview of the year-round scientific activities conducted at the Italian Arctic station "Dirigibile Italia" in Ny-Ålesund, Svalbard (79° N). Managed by the National Research Council of Italy (CNR), the base operates as an international hub for long-term environmental monitoring and Earth system science in a rapidly warming High Arctic. Research operations follow a distinct seasonal cycle driven by polar light and climate conditions. Winter activities focus on atmospheric aerosol chemistry, boundary-layer thermodynamics, and long-range transport of pollutants via permanent facilities such as the Gruvebadet Observatory and the Amundsen-Nobile Climate Change Tower (CCT). Spring research centers on snow hydrology, glaciology, emerging contaminants (e.g., PFAS, black carbon), and the degradation of paleoclimate records in ice cores due to meltwater percolation. The summer season brings a shift toward terrestrial ecology, active-layer permafrost dynamics, CO2 flux modeling, freshwater trophic webs, and oceanographic monitoring in Kongsfjorden. Finally, researchers in autumn leverage the polar night to investigate upper-atmosphere physics, ionospheric scintillation, auroral dynamics, and cosmic ray fluxes. Collectively, these multi-seasonal and interdisciplinary datasets highlight how Arctic amplification and winter warming are reshaping the polar environment, positioning Ny-Ålesund as a critical site for understanding the future trajectories of global climate change.

Ny Ålesund e la base Dirigibile Italia

La parola Artico è intimamente connessa al significato di settentrione. La sua etimologia risale al greco antico e al significato letterale di "dell'Orsa", motivo per cui tutt'oggi indica i territori a Nord, nella direzione astrale indicata dall'Orsa Minore. Più precisamente, l'Artico include tutte quelle terre e quei mari posti al di sopra di una linea immaginaria che si attesta alla latitudine di 66° 34' N, ovvero il Circolo Polare Artico.

Al fine di studiare queste aree apparentemente remote del mondo, le cui caratteristiche influenzano direttamente la vita alle medie latitudini, l'Italia gestisce una base di ricerca scientifica in uno degli arcipelaghi artici. La stazione italiana si trova a Ny Ålesund, un insediamento situato a ridosso del 79° parallelo Nord, nell'arcipelago delle Svalbard. Il villaggio sorge sulla penisola Brøggerhalvøya, affacciata sul Kongsfjorden e attraversata da una linea montuosa popolata di ghiacciai vallivi. Ny Ålesund si trova ai piedi del monte Zeppelinfjellet, poco a Est della piana formata dal fiume Bayelva nella sua corsa verso il mare a partire dalle fronti

glaciali dell'Austre e Vestre Brøggerbreen. Nato all'inizio del Novecento come villaggio minerario fondato dalla *Kings Bay Coal Company* per lo sfruttamento dei giacimenti di carbone nelle vicinanze, il sito si è distinto fin da subito come punto di appoggio strategico per le grandi esplorazioni polari. Da qui, Roald Amundsen partì per due storiche spedizioni aeree verso il Polo Nord: la prima nel 1925, a bordo degli idrovolanti N-24 e N-25, e la seconda nel 1926 con il dirigibile Norge. Proprio da Ny Ålesund, nel giugno del 1928, lo stesso Amundsen decollò per un'estrema missione di soccorso alla ricerca dell'equipaggio del dirigibile Italia, comandato da Umberto Nobile, un volo dal quale l'esploratore norvegese non fece più ritorno. Oggi tale impresa viene ricordata mediante un busto di Amundsen posto al centro del villaggio di fronte alla base norvegese e nel nome scelto per la base artica italiana: Dirigibile Italia.

Dopo l'evacuazione del villaggio durante la Seconda Guerra Mondiale, le attività estrattive ripresero fino al tragico incidente minerario del 1962, che portò alla chiusura definitiva dei giacimenti di carbone. A partire dagli anni Settanta, il villaggio ha vissuto una progressiva riconversione, trasformandosi in un centro di riferimento per la ricerca scientifica internazionale. Le vecchie case dei minatori sono state gradualmente ristrutturate e ampliate per ospitare laboratori e alloggi e nuove sedi di ricerca sono state costruite nel rispetto del patrimonio culturale del luogo, sotto la direzione dell'autorità norvegese sull'arcipelago rappresentata dal Governatore delle Svalbard.

A oggi, il villaggio intero costituisce una stazione di ricerca la cui logistica e operazioni sono tuttora gestite da *Kings Bay*, i cui impiegati risiedono nel villaggio al pari del personale tecnico delle stazioni e dei ricercatori.

Nel villaggio sono presenti istituzioni di dieci paesi: oltre all'Italia e alla Norvegia, il cui personale tecnico lavora alla *Sverdrup Station,* sono presenti la Germania e la Francia con svariate strutture per accogliere i ricercatori e l'Osservatorio situato ai margini del villaggio, il Giappone con la *Japanese Research Station*, il Regno Unito con la *UK Arctic Research Station*, i Paesi Bassi con la *Arctic Station* dell'Università di Groningen, la Corea del Sud con la *Dasan Station*, la Cina con la *Yellow River Station* e l'India con la stazione *Himadri*.

In questo contesto si inserisce la base Dirigibile Italia, costruita nel 1997. La struttura è gestita dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e le attività scientifiche sono coordinate dal Dipartimento Scienze del Sistema Terra e Tecnologie per l'Ambiente, in particolare attraverso l'Istituto di Scienze Polari (ISP).

Oggi Ny Ålesund rappresenta un laboratorio a cielo aperto di primario interesse per l'osservazione



Figura 1 - Tracce del passato minerario di Ny Ålesund; il trenino che trasportava il carbone fino alle rive del fiordo giace ora immobile all'entrata del villaggio - ph Anna Baldo



Figura 2 - Estratto di Toposvalbard, la mappa interattiva delle Svalbard gestita e aggiornata dal Norwegian Polar Institute: veduta della penisola Brøggerhalvøya affacciata sul Kongsfjorden (in alto) e ingrandimento su Ny Ålesund e la piana formata dal fiume Bayelva (in basso).

dei cambiamenti climatici, per il monitoraggio ambientale e per lo studio delle scienze naturali nell'Artico. Nonostante la collocazione remota, la località vanta un'accessibilità logistica favorevole in quanto è connessa alla città principale dell'arcipelago da tratte marine con cadenza bimestrale, e tratte aeree che raggiungono il villaggio una volta a settimana nei mesi invernali e due nei mesi estivi. Inoltre, Ny Åesund offre una rete infrastrutturale avanzata che supporta oltre venti istituti di ricerca internazionali impegnati in programmi di monitoraggio a lungo termine. La base Dirigibile Italia è da qualche anno operativa senza interruzioni per tutti i dodici mesi dell'anno. L'edificio



Figura 3 - Ny Ålesund dall'alto durante l'atterraggio, veduta verso nord-ovest, primavera 2025 - ph Anna Baldo



Figura 4 - Volo settimanale di collegamento per Longyearbyen, il Dornier 228 della Lufttransport in atterraggio sulla pista di Ny Ålesund - ph Anna Baldo

unisce sotto lo stesso tetto la zona di lavoro e l'area abitativa: la prima comprende l'ufficio del capostazione, uno spazio di lavoro condiviso per i ricercatori, magazzini per l'attrezzatura scientifica, il vestiario per l'ambiente artico e diversi laboratori (umido, tecnico, officina e chimico con camera pulita); la seconda ospita le camere da letto e una zona giorno con cucina e salotto.

L'affluenza dei ricercatori segue la stagionalità polare. Con il ritorno della luce al termine della notte polare a metà febbraio, la base comincia ad animarsi e ospita per otto mesi l'avvicendarsi di team scientifici che sostano mediamente per una o due settimane. La frequenza delle spedizioni raggiunge il picco nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto), per poi ridursi progressivamente in



Figura 5 - La base artica Dirigibile Italia in primavera, con una delle motoslitte utilizzate dei glaciologi e relativa slitta per il traino dei campioni - ph Mauro Mazzola

autunno, fino allo svuotamento quasi totale entro ottobre all'arrivo della successiva notte polare. Ad assicurare la continuità operativa durante tutto l'anno è il capostazione, unico residente permanente all'interno della struttura, i cui compiti comprendono il proseguimento di alcune serie di campionamento anche nei mesi invernali.

Il ruolo del capostazione

Le mansioni del capostazione si articolano su tre fronti principali:

- Continuità scientifica: assicura il proseguimento delle serie storiche di dati e delle campagne di campionamento continuative a beneficio dei vari gruppi di ricerca nazionali e internazionali durante l'intero arco dell'anno, compresi i mesi invernali. Le principali serie storiche sono quelle di composizione atmosferica, stratigrafia e chimica del manto nevoso mediante *snowpit* (buca di neve) e campionamento superficiale dell'acqua del fiordo.
- Supporto logistico e sicurezza: coordina le uscite sul campo (*fieldwork*), ne supervisiona la pianificazione strategica e garantisce il costante contatto radio con i team operativi. Gestisce inoltre supporto in termini di sicurezza relativi nel caso di incontro con l'orso polare, per cui è debitamente addestrato all'uso del fucile e della pistola di segnalazione secondo le linee guida delineate dal Governatore delle Svalbard.
- Rappresentanza e relazioni istituzionali: funge da punto di riferimento per la comunità scientifica locale e la società di gestione *Kings Bay*, partecipando al coordinamento tra i responsabili delle differenti stazioni e rappresentando l'Italia nei rapporti con le altre nazioni presenti a Ny Ålesund.

Nell'ambito del monitoraggio a lungo termine, tra le mansioni principali del capostazione rientrano la manutenzione della strumentazione scientifica e la conduzione dei campionamenti presso le infrastrutture gestite dall'Italia all'esterno del centro abitato. Nello specifico, il CNR coordina le attività di due osservatori chiave situati nei dintorni di Ny Ålesund:

- Osservatorio di Gruvebadet: situato a circa un chilometro a sud del villaggio all'interno dell'ex edificio destinato alle docce dei minatori, è attivo dal 2010 ed è dedicato allo studio della composizione atmosferica. Gestito dal CNR in collaborazione con diversi atenei italiani e partner internazionali, tra cui il *Korea Polar Research Institute* (KOPRI), gli istituti polari francese e tedesco operanti nella stazione artica congiunta (AWIPEV), il *Norwegian Polar Institute* (NPI) e l'Università di Helsinki, l'edificio è dotato di un tetto calpestabile per l'alloggiamento di

teste di prelievo e campionatori atmosferici. Le ricerche supportate dall'osservatorio spaziano dalla caratterizzazione chimica e dimensionale del particolato atmosferico allo studio della formazione delle nubi e delle proprietà di diffusione della radiazione. Le indagini si sono inoltre estese all'analisi del manto nevoso superficiale nelle aree limitrofe all'osservatorio e alle interazioni atmosfera-neve, con particolare attenzione agli effetti della deposizione di particolato sui processi di fusione.

- *Amundsen-Nobile Climate Change Tower* (CCT): collocata a 1,2 km a Ovest del villaggio e inaugurata nel 2009, la torre consiste in un traliccio metallico alto 34 metri progettato per lo studio dello strato limite atmosferico e degli scambi di energia e massa con la superficie.

La torre è equipaggiata con sensori disposti a quattro differenti altezze per il rilevamento continuo dei parametri meteorologici standard (temperatura, umidità, direzione e velocità del vento) ed equipaggiamenti dedicati al monitoraggio delle proprietà fisiche e termiche del suolo e della neve nelle aree limitrofe. Oltre a gestire tali stazioni di monitoraggio permanente, il capostazione accoglie presso la base i ricercatori affiliati a diversi enti di ricerca i cui progetti hanno ottenuto l'approvazione operativa. L'ambiente artico vanta un'ampia eterogeneità nelle tematiche d'indagine, ma la fattibilità e la pianificazione di ogni attività di ricerca è strettamente vincolata alla stagionalità artica e, di conseguenza, anche la base ospita diversi team di ricercatori a seconda della stagione.



Figura 6 - L'osservatorio atmosferico Gruvebadet in primavera, con il monte Zeppelinfjellet sullo sfondo e il relativo osservatorio Zeppelin gestito da NPI - ph Marco Casula



Figura 7 - Amundsen-Nobile Climate Change Tower (CCT), fotografata sulla via del ritorno da un campionamento di neve nei pressi del fiume Bayelva, primavera 2025 - ph Marek Levray

Inverno

Durante la notte polare, l'assenza di irraggiamento solare diretto, le temperatura che possono raggiungere i -30 °C e le perturbazioni artiche, che abbassano ancora di più la temperatura percepita mediante l'effetto del *windchill*, rendono difficoltosi campionamenti in campo aperto e a grande distanza dalla base, per cui la Dirigibile Italia offre ospitalità a ricercatori che operano all'interno degli osservatori permanenti o in aree limitrofe al villaggio, come per esempio nell'ambito del monitoraggio atmosferico. I primi gruppi raggiungono la base solitamente nel mese di febbraio, quando nelle ore adiacenti al mezzogiorno la luce comincia a trapelare oltre l'orizzonte durante il crepuscolo civile. In questo periodo le attività si concentrano sulla manutenzione profonda degli strumenti adibiti alle serie storiche o all'ampliamento di tali serie con campagne complementari di breve durata.

Il campionamento sistematico condotto a Gruvebadet permette di caratterizzare la provenienza, le proprietà fisiche e la distribuzione dimensionale del particolato artico, integrando le misurazioni di assorbimento e diffusione della radiazione (Lupi *et al*., 2016). Sul fronte chimico, le analisi ioniche ed elementari consentono di tracciare le sorgenti dei componenti dell'aerosol, dai contributi marini e biogenici ai traccianti di combustione, e di ricostruire i meccanismi di trasporto a lunga distanza dalle medie latitudini durante la stagione invernale e primaverile (Giardi *et al*., 2016). A queste indagini si affianca lo studio dei contaminanti organici e della materia organica dell'aerosol, esteso anche all'analisi dei processi di deposizione e all'interazione con il manto nevoso durante gli eventi di pioggia su neve (*rain-on-snow*) (Barbaro *et al*., 2026).

Nello stesso periodo, la base ospita ricercatori che si occupano dello strato limite planetario e degli scambi di energia tra superficie e atmosfera presso la CCT. La struttura consente di monitorare continuamente i profili verticali di temperatura, umidità e vento su quattro livelli, misurando direttamente i flussi di calore sensibile e latente e il bilancio radiativo, fornendo parametri essenziali per comprendere l'accoppiamento termico tra il suolo innevato e la bassa atmosfera artica durante la notte polare (Mazzola *et al*. 2016).

Per entrambi questi osservatori, la cooperazione con NPI è fondamentale in quanto il centro di ricerca norvegese gestisce un osservatorio meteorologico e di composizione atmosferica situato sulla cresta sommitale dello Zeppelinfjellet (556 m), il monte situato a Sud del villaggio.

L'interazione tra i team di ricercatori italiani e norvegesi permette di confrontare il comportamento dell'atmosfera a livello del mare e in quota, un confronto importante soprattutto nei mesi invernali dove, in assenza di venti dominanti, l'atmosfera può separarsi in uno strato limite planetario estremamente stabile e atmosfera libera al di sopra, inibendo flussi tra i due strati con conseguenze meteorologiche e sulla distribuzione degli inquinanti (Markowski *and* Richardson 2011).



Figura 8 - La capostazione (Anna Baldo) di ritorno dalla visita giornaliera a Gruvebadet, raggiunto con gli sci attorno alle 12:00 locali, inizio febbraio 2025 - ph Lukas Monrad-Krohn

Primavera

L'arrivo della primavera svela l'arcipelago coperto da un bianco manto nevoso, sopra il quale le giornate si allungano rapidamente fino a raggiungere il giorno polare verso la metà di aprile. La neve e i ghiacciai delle Svalbard diventano quindi raggiungibili mediante l'utilizzo di motoslitte e la base offre ospitalità principalmente a nivologi e glaciologi.

Per studiare l'evoluzione del manto nevoso attorno a Ny Ålesund sia durante il singolo anno idrologico che da un anno all'altro, nei pressi di Gruvebadet è stato implementato un sistema automatico di monitoraggio continuo, la *Automated Snow Station*, in grado di rilevare in tempo reale le proprietà fisico-chimiche e stratigrafiche del manto nevoso e le variabili climatiche essenziali (Scoto *et al.,* 2023). Su questo strato stagionale si concentrano diverse indagini chimiche: per esempio, lo studio delle fragranze a uso personale e degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) ha dimostrato l'azione congiunta del trasporto atmosferico a lunga distanza e dell'impatto umano locale (Vecchiato *et al.,* 2018). Tra questi spiccano alti livelli di retene, direttamente legati alla polvere di carbone rimasta sul sito dopo i passati decenni di attività mineraria. In questo contesto si inseriscono anche altri progetti in corso in questi stessi anni, quali per esempio analisi sulla presenza di sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) sia note che sconosciute, volte a chiarire la trasformazione fotochimica e la mobilizzazione dovuta agli eventi di pioggia su neve. Parallelamente, gli studi sulla deposizione di *black carbon* da combustibili fossili si propongono di stimare l'effetto di inscurimento della superficie glaciale, processo che accelera l'assorbimento di radiazione e la fusione, mentre la ricerca su additivi delle plastiche, residui di pneumatici e anticorrosivi mira a estendere il monitoraggio ai contaminanti emergenti presenti su neve, suolo e permafrost.

Spostandosi negli *icefield* interni dell'arcipelago, le grandi masse nate dall'unione di vari flussi glaciali sovrastanti la topografia, le analisi della chimica della neve e del ghiaccio offrono tradizionalmente indicatori paleoclimatici utili per ricostruire le variazioni del clima del passato. Tuttavia, il rapido aumento delle temperature legato al cambiamento



Figura 9 - Analisi della stratigrafia del manto nevoso durante una snowpit sul Midtre Lovénbreen, aprile 2025 - ph Marek Levray

climatico e rinforzato dall'amplificazione artica sta mettendo a rischio la conservazione stessa di queste informazioni registrate nel ghiaccio. Un recente studio condotto su carote di ghiaccio estratte dall'Holtedahlfonna, un ghiacciaio nell'entroterra dell'arcipelago, ha evidenziato come l'intensificarsi della fusione estiva provochi la percolazione dell'acqua attraverso gli strati di neve, dilavando i segnali chimici e isotopici accumulati negli ultimi decenni e degradando velocemente l'archivio paleoclimatico (Spolaor *et al.,* 2024). In continuità con queste indagini, le attuali ricerche sul campo puntano a colmare le lacune nei dati storici causate da questi processi di fusione e a comprendere l'evoluzione della composizione isotopica dell'ossigeno nei nuclei glaciali residui.

Estate

Con l'arrivo dei mesi estivi e la scomparsa del manto nevoso, le attività si spostano sul terreno al di fuori del villaggio, nei bacini d'acqua dolce e nel fiordo su cui si affaccia Ny Ålesund, il Kongsfjorden o Fiordo del Re. L'estate rappresenta il picco operativo per le indagini biologiche, ecologiche e oceanografiche e il periodo di massima occupazione della stazione artica.

Sulla terraferma, lo sgelo estivo riattiva la vegetazione polare. Tra le varie attività di ricerca, il monitoraggio ecofisiologico della flora (per esempio delle specie *Dryas octopetala* e *Saxifraga oppositifolia*) mediante indicatori di flussi gassosi ed emissioni di composti organici volatili (VOC) analizza come il riscaldamento globale e l'inverdimento (*greening*) modifichino le risposte funzionali delle piante artiche (Volterrani *et al.,* 2025). Al contempo, lo sgelo stagionale dello strato attivo del permafrost, ovvero lo strato superficiale del terreno che annualmente attraversa cicli di gelo e disgelo, guida le dinamiche dell'idrologia superficiale e sotterranea e degli scambi gassosi tra l'atmosfera e la superficie. Nello specifico, le variazioni locali nell'umidità del suolo e nella vegetazione introducono un'ulteriore sorgente di variabilità nei bilanci di scambio di CO_2 all'interfaccia suolo-vegetazione-atmosfera (Magnani *et al.,* 2022). Di conseguenza, questi studi su scala locale mirano a ridurre le incertezze nei modelli previsionali e valutare se la tundra artica, sottoposta a rapido riscaldamento, agirà come serbatoio o sorgente di carbonio nei prossimi decenni.

Nei bacini d'acqua dolce attorno al villaggio, invece, le ricerche analizzano la struttura delle reti



Figura 10 - Veduta sulla piana del fiume Bayelva e il Vestre Brøggerbreen, di ritorno da un campionamento di suolo superficiale, agosto 2025 - ph Anna Baldo

trofiche lacustri. Lo studio degli isotopi stabili (per esempio di carbonio e azoto) sulla fauna invertebrata e sui pesci di lago ha rivelato una forte variabilità spaziale e temporale nelle catene alimentari, evidenziando la vulnerabilità delle comunità lacustri artiche di fronte all'alterazione delle risorse trofiche primarie causata da variazioni climatiche (Calizza *et al.,* 2016).

Spostandosi dalla terraferma al mare, nel Kongsfjorden il continuo apporto di acqua dolce derivante dalla intensa fusione dei ghiacciai e dal deflusso dei fiumi proglaciali impatta sulla salinità, la temperatura e la circolazione delle masse d'acqua, influenzando l'intero ecosistema del fiordo (Aliani *et al.*, 2016). In questo ambiente in rapida trasformazione, i cetacei vengono studiati come vera e propria specie sentinella. Infatti, l'uso del monitoraggio acustico passivo permette di tracciare i cambiamenti nelle rotte migratorie e nei comportamenti alimentari dei grandi mammiferi marini in risposta al riscaldamento delle acque (Papale *et al.,* 2023). Tra gli ambiti in cui si sono svolti i più recenti campionamenti, è debito menzionare lo studio dell'arrivo, sulla scorta di più miti acque atlantiche, di specie ittiche non autoctone e di cosiddette specie "alla porta" (*door knocker species*), il cui monitoraggio molecolare e morfologico consente di individuare precocemente fenomeni di colonizzazione e alterazione della fauna locale. Infine, recenti campagne si sono focalizzate sullo studio del microbioma dei pesci artici, che permette di valutare come i batteri simbiotici e intestinali rispondano allo stress termico e alle variazioni ambientali.

Autunno

Con il progressivo svanire della luce solare e l'ingresso nella notte polare, le attività sul terreno aperto diminuiscono, lasciando spazio alla base Dirigibile Italia, a ricercatori dediti a sfruttare le condizioni ideali per indagini dedicate all'alta atmosfera e allo spazio vicino. L'assenza dell'irraggiamento solare diretto, infatti, minimizza le interferenze sulla ionosfera e facilita l'osservazione dei fenomeni aurorali e dei raggi cosmici.

Per comprendere gli effetti delle tempeste geomagnetiche e della dinamica solare sulle telecomunicazioni e sui sistemi di navigazione satellitare (GNSS), è in fase di sviluppo una rete coordinata di ricevitori software (SDR) ad alta latitudine, che consentirebbe il monitoraggio continuo in tempo reale della scintillazione ionosferica.

A queste rilevazioni si affiancano le osservazioni del sistema di monitoraggio aurorale coordinato lungo il traliccio geomagnetico artico tra Svalbard e Groenlandia. L'analisi ottica simultanea dell'ovale aurorale permette infatti di studiare la risposta e la dinamica dei moti di convezione ionosferica durante le sub-tempeste geomagnetiche (Massetti *et al.,* 2002).

Infine, la posizione geografica di Ny Ålesund, collocata a ridosso del Polo Nord magnetico, offre una finestra privilegiata per la fisica delle particelle laddove lo scudo magnetico terrestre è più debole.

A tale campo di studi afferiscono le attività del progetto PolarquEEEst, che, mediante l'installazione di telescopi di tracciamento basati su scintillatori plastici e fotomoltiplicatori al silicio (SiPM), permette la misura ad alta precisione del flusso e dell'asimmetria dei muoni cosmici secondari a latitudini estreme, fornendo dati sulla componente di alta energia delle radiazioni spaziali (Abbrescia *et al.,* 2020).



Figura 11 - L'aurora notturna torna visibile sopra la base Dirigibile Italia all'arrivo della notte polare, ottobre 2025 - ph Anna Baldo

Il nuovo Artico

Questo articolato mosaico di indagini, che spazia dalla chimica della neve e dei ghiacciai allo studio dello strato limite atmosferico, dalle dinamiche degli ecosistemi terrestri e marini fino alla fisica dell'alta atmosfera, restituisce un quadro corale e dettagliato dell'Artico contemporaneo.

Le evidenze raccolte sul campo, in ambiente glaciale, terrestre o marino, mostrano come la regione polare stia cambiando sulla spinta di un riscaldamento globale che, in queste aree, risulta essere amplificato rispetto alle medie latitudini (Previdi *et al.,* 2021). Gli anni più recenti hanno inoltre confermato che tale riscaldamento non si limita a manifestarsi solamente durante i mesi estivi, ma che altera in modo pervasivo anche l'equilibrio della stagione fredda.

L'incremento in frequenza e intensità di anomali periodi caldi durante la notte polare, unitamente al ritiro della criosfera terrestre, alla degradazione della criosfera marina e del permafrost, testimonia la transizione verso un regime climatico e ambientale nuovo per queste latitudini (Bradley *et al.* 2025).

In questa fase di rapida trasformazione, l'Artico manifesta una complessa riorganizzazione interna, in cui le alterazioni nei bilanci d'energia, nella circolazione marina e negli scambi di calore con le medie latitudini ridefiniscono direttamente gli equilibri dell'ecosistema polare.

I rilievi e le serie storiche di dati raccolti a Ny Ålesund rappresentano quindi un archivio fondamentale per provare a comprendere i meccanismi che regolano la regione artica, la sua evoluzione a lungo termine e gli impatti che avrà sul resto del pianeta.



Figura 12 - Campionamento settimanale di neve nei pressi di Gruvebadet, svolto in collaborazione tra CNR, AWIPEV e NPI, tardo febbraio 2025 - ph Fieke Rader

Bibliografia

- ABBRESCIA M., AVANZINI C., BALBI G., *et al.,* (2020) - *Results from the PolarquEEEst Missions* - Journal of Physics: Conference Series 1561 (1): 012001- https://doi.org/10.1088/1742-6596/1561/1/012001
- ALIANI S., SCIASCIA R., CORNESE I., *et al.,* (2016) - *Characterization of Seawater Properties and Ocean Heat Content in Kongsfjorden, Svalbard Archipelago* - Rendiconti Lincei 27 (1): 155-62 - https://doi.org/10.1007/s12210-016-0544-4
- BARBARO E., ARDINI F., BECAGLI S., *et al.,* (2026) - *Drivers of Aerosol Variability in the High Arctic: Insights from Integrated Observations at Gruvebadet and Zeppelin (Ny-ÅLesund)* - EGUsphere, April 9, 1-37 - https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-1467
- BRADLEY J.A., MONCAYO MORALES L., GALLO G., *et al,.* (2025) - *Svalbard Winter Warming Is Reaching Melting Point* - Nature Communications 16 (1): 6409 - https://doi.org/10.1038/s41467-025-60926-8
- CALIZZA E., COSTANTINI M.L., ROSSI D., PASQUALI V., CAREDDU G., ROSSI L. (2016) - *Stable Isotopes and Digital Elevation Models to Study Nutrient Inputs in High-Arctic Lakes* - Rendiconti Lincei 27 (1): 191-99 - https://doi.org/10.1007/s12210-016-0515-9
- GIARDI F., BECAGLI S., TRAVERSI R., *et al.,* (2016) - *Size Distribution and Ion Composition of Aerosol Collected at Ny-Ålesund in the Spring–Summer Field Campaign 2013* - Rendiconti Lincei 27 (1): 47-58 - https://doi.org/10.1007/s12210-016-0529-3
- LUPI A., BUSETTO M., BECAGLI S., *et al.,* (2016) - *Multi-Seasonal Ultrafine Aerosol Particle Number Concentration Measurements at the Gruvebadet Observatory, Ny-Ålesund, Svalbard Islands* - Rendiconti Lincei 27 (1): 59-71- https://doi.org/10.1007/s12210-016-0532-8
- MAGNANI M., BANESCHI I., GIAMBERINI M.S., RACO B., PROVENZALE A. (2022) - *Microscale Drivers of Summer CO2 Fluxes in the Svalbard High Arctic Tundra* - Scientific Reports 12 (1): 763. https://doi.org/10.1038/s41598-021-04728-0
- MARKOWSKI P., RICHARDSON Y. (2011) - *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes* - John Wiley & Sons
- MASSETTI S., ORSINI S., CANDIDI M., KAURISTIE K. (2002) - *Dayside Pulsed Aurora Intensifications, Observed by ITACA during Constant Interplanetary Magnetic Field Bz ~ 0 and By << 0* - Journal of Geophysical Research: Space Physics 107 (A9): SMP 19-1-SMP 19-11- https://doi.org/10.1029/2001JA009204
- MAZZOLA M., VIOLA A.P., LANCONELLI C., VITALE V. (2016) - *Atmospheric Observations at the Amundsen-Nobile Climate Change Tower in Ny-Ålesund, Svalbard* - Rendiconti Lincei 27 (1): 7-18 - https://doi.org/10.1007/s12210-016-0540-8
- PAPALE E., PELAGATTI M., PEDRAZZI G., BUSCAINO G. (2023) - *Occurrence and Patterns of Fin Whale Songs Reveal Alternative Migration Strategies in Svalbard Islands, Norway* - Scientific Reports 13 (1): 4436. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31665-x
- PREVIDI M., SMITH K.L., POLVANI L.M. (2021) - *Arctic Amplification of Climate Change: A Review of Underlying Mechanisms* - Environmental Research Letters 16 (9): 093003 - https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29
- SCOTO F., PAPPACCOGLI G.L., MAZZOLA M., *et al.,* (2023) - *Automated Observation of Physical Snowpack Properties in Ny-Ålesund* - Frontiers in Earth Science 11 (March) - https://doi.org/10.3389/feart.2023.112398
- SPOLAOR A., SCOTO F., LAROSE C., *et al.,* (2024) - *Climate Change Is Rapidly Deteriorating the Climatic Signal in Svalbard Glaciers* - The Cryosphere 18 (1): 307-20 - https://doi.org/10.5194/tc-18-307-2024
- VOLTERRANI C., AUGUSTI A., PALLOZZI E., D'ALÒ F., BRUGNOLI E., GAVRICHKOVA O. (2025) - *The Arctic Tundra: Key Drivers of the Carbon Cycle under Changing Climate* - Conferenza CNR IRET 2025: Risultati e Prospettive per La Gestione Integrata Degli Ecosistemi Del Futuro - https://iris.unive.it/bitstream/10278/5105490/1/ABSTRACT_BOOK_IRET_2025.pdf



Figura 1 - Nuotare a casa - ph royalty-free

https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_06

Chi parla per l'Antartide?

Connessioni planetarie, diritti della natura e una nuova idea di diplomazia

di Roberta Bosu[1][2][3][4]

1. *Ambasciatrice del Patto Europeo per il Clima per la Commissione Europea*
2. *IUCN - membro del Comitato di comunicazione ed educazione*
3. *Istituto Europeo di Design (IED) di Milano - docente del corso di "Comunicazione sulla sostenibilità"*
4. *Global Campaign Lead for Antartctic Rights*

Riassunto

Chiamiamo l'Antartide "il continente più remoto", ma la parola è fuorviante. L'Oceano Australe assorbe una quota sproporzionata del calore e del carbonio di origine antropica; le acque intermedie che si formano attorno all'Antartide trasportano i nutrienti che alimentano gran parte della produttività biologica degli oceani del mondo; le acque di fondo antartiche ossigenano fino al 40% del volume oceanico globale; e per effetto gravitazionale la fusione della calotta antartica innalza il livello del mare più lontano da sé che nelle sue vicinanze, colpendo in modo sproporzionato le coste dell'emisfero settentrionale, Mediterraneo compreso. L'Antartide è dunque legata ai ghiacciai, alle montagne, ai laghi e ai fiumi di tutto il pianeta da una rete di connessioni fisiche misurabili. A questa rete fisica corrisponde una rete giuridica in formazione: dal fiume Whanganui alla laguna del Mar Menor, fino alla montagna Taranaki Maunga riconosciuta persona giuridica nel gennaio 2025, il movimento per i diritti della natura sta costruendo precedenti. L'iniziativa *Antarctic Rights* propone di applicare questo paradigma alla scala di un intero continente. L'articolo espone le basi scientifiche di queste connessioni, il percorso della campagna e uno scenario: come cambierebbe la diplomazia planetaria se l'Antartide avesse una voce propria.

Abstract: Who speaks for Antarctica? – A continent that is not far away: planetary connections, rights of nature and a new idea of diplomacy

We call Antarctica "the most remote continent", but the word misleads. The Southern Ocean absorbs a disproportionate share of anthropogenic heat and carbon; the intermediate waters forming around Antarctica carry the nutrients that fuel much of the world ocean's biological productivity; Antarctic Bottom Water oxygenates up to 40% of the global ocean volume; and through gravitational effects, melting of the Antarctic ice sheet raises sea level more in distant regions than nearby, disproportionately affecting Northern Hemisphere coasts, including the Mediterranean. Antarctica is thus bound to the glaciers, mountains, lakes and rivers of the entire planet by a network of measurable physical connections. A parallel legal network is emerging: from the Whanganui River to the Mar Menor lagoon, to Taranaki Maunga recognised as a legal person in January 2025, the rights of nature movement is building precedents. The Antarctic Rights initiative proposes applying this paradigm at the scale of an entire continent. This article sets out the scientific basis of these connections, the campaign's trajectory, and a scenario: how planetary diplomacy would change if Antarctica had a voice of its own.

testo in Italiano, segue in Inglese - text in Italian and English follows

Premessa

Mi occupo di comunicazione strategica ambientale e di traduzione della conoscenza scientifica in campagne, narrazioni e strumenti di partecipazione pubblica. Lavoro all'intersezione tra ricerca, politiche ambientali e società civile: il mio compito è rendere comprensibili questioni complesse senza ridurne la portata, e contribuire a trasformare le evidenze in consapevolezza, dibattito e azione.

Da alcuni anni coordino Antarctic Rights [1], una campagna globale nata nel 2021 da una domanda che allora sembrava quasi provocatoria: e se riconoscessimo all'Antartide i diritti della natura?

I dati e le analisi che seguono si basano sulla letteratura glaciologica e oceanografica e sul lavoro delle comunità scientifiche che studiano il continente antartico. Il mio contributo non è sovrappormi a quelle competenze, ma metterle in dialogo con il diritto, la comunicazione, la governance e l'immaginario collettivo. Perché conoscere non basta: occorre anche decidere che cosa quelle conoscenze ci chiedono di fare.

La parola sbagliata

Vorrei partire da una parola con cui litigo tutti i giorni: **remoto**. L'Antartide viene raccontata come il posto più lontano della Terra, e quell'immagine fa più danni di quanto si creda, perché ci lascia pensare che quello che succede laggiù resti laggiù. Invece no. L'Antartide è uno degli organi centrali del sistema vivente che chiamiamo pianeta, e ha a che fare con il ghiacciaio che avete visto arretrare in quest'estate torrida, con il fiume che attraversa la vostra città, con il lago dove siete andati a camminare la domenica. Il collegamento è fisico e si può misurare.

Le connessioni: cosa dice la scienza

L'Antartide fertilizza gli oceani del mondo.

È forse la connessione meno nota e la più sorprendente. Attorno all'Antartide, la Corrente Circumpolare porta in superficie acque profonde ricchissime di nutrienti. Parte di queste acque non viene consumata sul posto: viene spinta verso nord e sprofonda poco a nord del Fronte Subantartico, formando le Acque Modali Subantartiche e le Acque Intermedie Antartiche. Sono masse d'acqua che viaggiano per decenni sotto la superficie: una decina d'anni per arrivare a est del Madagascar, una quarantina per riemergere all'equatore. Quando riaffiorano, restituiscono azoto e fosforo alle zone illuminate di oceani lontanissimi. Uno studio pubblicato su Nature nel 2004 [2] ha stimato che il canale delle Acque Modali Subantartiche possa alimentare fino a tre quarti della produzione biologica degli oceani a nord dei 30° di latitudine sud. È una stima ricavata da modelli, non una misura diretta, e non vale ovunque: il Pacifico settentrionale ha un suo percorso di ritorno indipendente, alimentato dal rimescolamento verticale. Ma per il resto il quadro tiene. Detto altrimenti: una parte consistente del fitoplancton dell'Atlantico, del Pacifico equatoriale e dell'Indiano — e quindi dei pesci che ne dipendono, e delle economie costiere che ne vivono — respira grazie a un processo che comincia attorno all'Antartide.

L'Antartide assorbe il calore e il carbonio che produciamo altrove.

L'Oceano Australe occupa circa un quarto della superficie oceanica mondiale, ma tra il 1970 e il 2017 ha incassato dal 35 al 43% di tutto il calore accumulato dagli oceani nei primi duemila metri — e negli anni più recenti la sua quota è salita oltre il 45%. Cattura inoltre circa il 40% della CO_2 di origine umana che finisce negli oceani [3].

Una parte di quel calore e di quel carbonio non resta lì: le correnti li trasportano verso Nord e li ridistribuiscono nel resto del pianeta. È un servizio che nessuno ha chiesto e nessuno paga, e che sta cambiando la chimica di quelle acque e la loro stessa struttura fisica.

L'Antartide ossigena gli abissi.

Lungo le piattaforme continentali si formano acque fredde, dense e cariche di ossigeno che sprofondano fino al fondale e da lì si distribuiscono sotto tutti gli oceani: sono le acque di fondo antartiche, e occupano fino al 40% del volume oceanico globale [4]. Sono la cella inferiore della circolazione di rovesciamento, il ramo profondo del sistema che rimescola calore, carbonio, ossigeno e nutrienti nel pianeta.

Vent'anni di osservazioni raccontano che questa massa d'acqua si sta riscaldando, addolcendo e deossigenando, e che si sta contraendo: circa il 3% di volume perso tra il 2002 e il 2023, con un tasso di perdita quadruplicato dopo il 2015. Un modello ad alta risoluzione proietta, sotto scenario ad alte emissioni, un rallentamento del rovesciamento abissale del 42% entro il 2050 [5]. Un abisso che si deossigena è un problema per gli ecosistemi profondi di ogni latitudine, e a quella profondità niente si ripara in fretta.

La fusione dell'Antartide alza il mare soprattutto lontano da sé.

Questa è la connessione che uso più spesso quando parlo in Europa, perché rovescia l'intuizione.

Una calotta glaciale è così massiccia da attrarre gravitazionalmente l'oceano attorno a sé: vicino a una grande calotta il livello del mare è più alto della media proprio per effetto di quell'attrazione.

Quando la calotta perde massa, l'attrazione si indebolisce, il mare nelle vicinanze si abbassa e l'acqua si ridistribuisce verso le latitudini opposte, dove il livello sale sopra la media globale. Nel campo lontano l'innalzamento può superare del 20-25% il valore che ci si aspetterebbe distribuendo l'acqua di fusione in modo uniforme.

Il risultato, per chi vive in Europa, è questo: la Groenlandia è troppo vicina. Fondendosi, alza il mare dei Paesi Bassi meno della media mondiale, perché la sua attrazione gravitazionale sull'acqua del Mare del Nord viene meno.

L'Antartide fa il contrario: è abbastanza lontana da spingere l'acqua esattamente qui, e la stessa cosa vale per Venezia, per il delta del Po, per le pianure costiere italiane. Il ghiaccio che conta davvero, per un olandese o un veneziano, è quello dall'altra parte del pianeta [6].

L'Antartide è l'archivio con cui leggiamo tutti gli altri ghiacci.

Nel gennaio 2025, a Little Dome C, il progetto europeo Beyond EPICA–Oldest Ice ha completato una perforazione di 2800 metri, fino al substrato roccioso. Ne è uscita la registrazione continua più lunga mai ottenuta del clima terrestre: circa 1,2 milioni di anni. Il coordinamento scientifico è dell'Istituto di Scienze Polari del CNR; la logistica è stata dell'ENEA e della rompighiaccio Laura Bassi, nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide.

Quella carota è il metro con cui si misura il resto. Le bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio conservano la composizione dell'atmosfera di allora, e permettono di dire quanto anidride carbonica c'era, quanto faceva caldo, con che ritmo si alternavano glaciazioni e periodi interglaciali. Senza quella scala temporale, il ritiro di un ghiacciaio alpino resta un dato isolato: sappiamo che il ghiaccio fonde, ma non abbiamo un termine di paragone per dire se è successo altre volte, e a quale velocità.

È l'Antartide stessa a fornire queste informazioni.

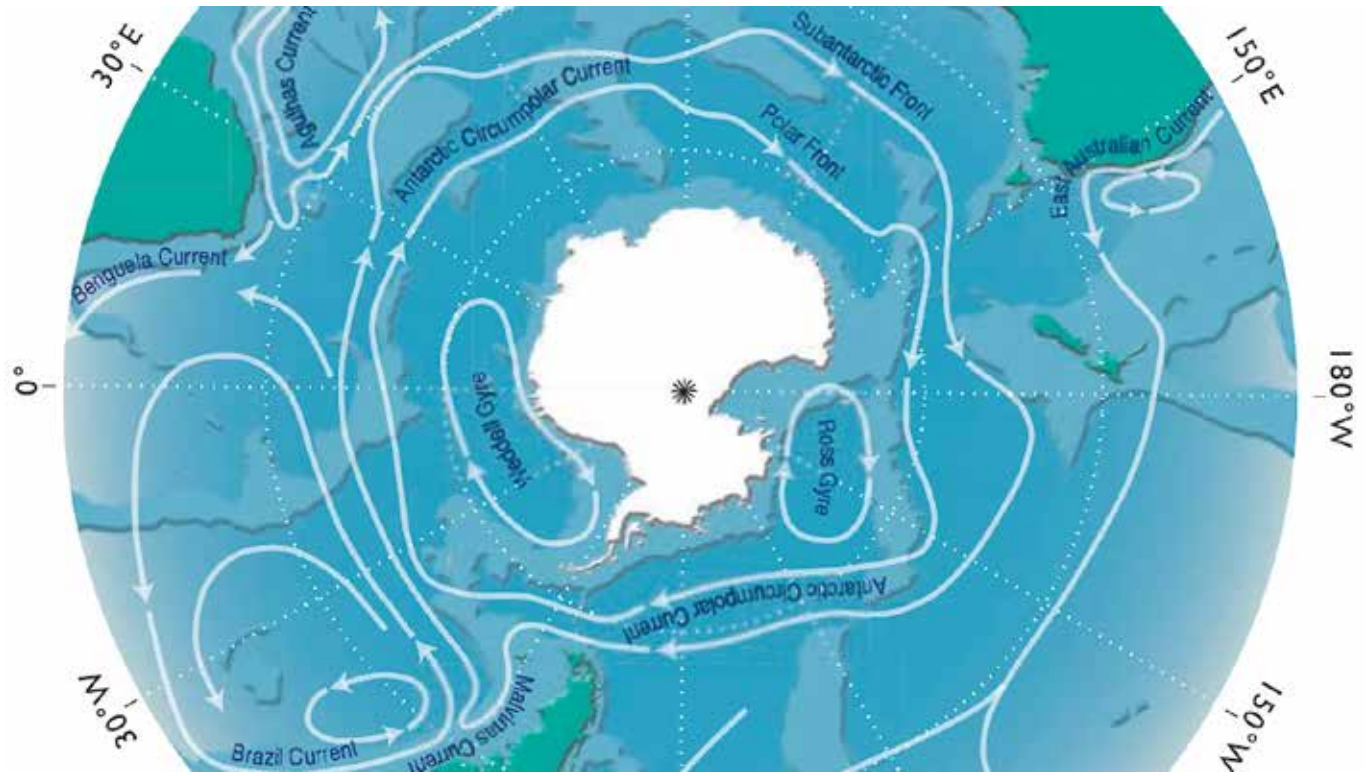


Figura 2 - La portata globale dell'Oceano Meridionale - ph Academic Press_de Vos Design



Figura 3 - In gruppo per la caccia - ph royalty-free

La stessa storia, scritta in luoghi diversi

Se si guardano insieme queste connessioni, l'Antartide smette di essere un caso a sé e diventa il capitolo più grande di una storia che si sta scrivendo ovunque.

I ghiacciai del mondo si ritirano seguendo la stessa fisica: un bilancio di massa che va in negativo quando l'accumulo non compensa più l'ablazione. Cambiano le scale che prendiamo in considerazione – un bacino di drenaggio antartico e il ghiacciaio dell'Adamello non sono la stessa cosa – ma gli strumenti con cui li osserviamo sono largamente comuni: bilanci di massa, telerilevamento satellitare, carotaggi. Non è un caso che le Nazioni Unite abbiano dedicato il 2025 alla conservazione dei ghiacciai e istituito una giornata mondiale ricorrente: la comunità scientifica ha smesso di trattare la criosfera come un insieme di casi locali.

E dietro ai ghiacciai ci sono i fiumi e i laghi. Le montagne sono le torri d'acqua del pianeta: il Gange, l'Indo, il Mekong, il Rodano, il Po dipendono in misura variabile dal contributo nivo-glaciale.

Quando un ghiacciaio si ritira, cambia la stagionalità delle portate, cambia la temperatura dell'acqua, cambiano gli ecosistemi fluviali a valle e le agricolture che ne dipendono. Uno studio recente sui bacini antartici mostra che la calotta non si comporta come un unico elemento di ribaltamento ma come un insieme di diciotto bacini interagenti, ciascuno con la propria soglia critica: ai livelli di riscaldamento attuali, circa il 40% del ghiaccio dell'Antartide occidentale potrebbe essere già avviato a una perdita di lungo periodo. È esattamente il modo in cui abbiamo imparato a pensare i bacini alpini: non un blocco unico, ma un mosaico di sistemi con soglie proprie.

La conclusione che bisogna trarre è che non esiste una questione antartica separata da una questione alpina, andina, himalayana o amazzonica. Esiste un unico sistema di acque e di ghiacci che stiamo trattando come se fosse fatto di parti indipendenti l'una dall'altra.

Che cos'è l'Antartide, secondo la legge

Ogni ordinamento giuridico divide il mondo in due categorie. Da una parte i soggetti: chi ha diritti propri, può subire un torto e può presentarsi davanti a un giudice per dirlo. Dall'altra gli oggetti: ciò su cui i diritti si esercitano. Le persone fisiche sono soggetti. Lo sono anche entità che non hanno corpo né coscienza (una società per azioni, un comune, uno Stato, una multinazionale) perché a un certo punto abbiamo deciso che era utile che lo fossero.

L'Antartide sta interamente dalla seconda parte. È uno spazio, un'area geografica, un insieme di risorse viventi e minerali, un ambito di giurisdizione, ma non è mai un soggetto.

Questo non toglie nulla al valore di ciò che è stato costruito attorno a essa. Il Trattato Antartico del 1959 resta uno dei risultati diplomatici più notevoli del Novecento: in piena Guerra Fredda ha sospeso le rivendicazioni territoriali con l'articolo IV, ha vietato le attività militari e ha destinato un intero continente alla ricerca. Il Protocollo di Madrid del 1991 lo definisce riserva naturale dedicata alla pace e alla scienza e proibisce le attività minerarie. La convenzione sulla pesca antartica del 1980 è stata il primo accordo di questo tipo a dichiarare un approccio ecosistemico.

Ma si osservi la struttura di queste norme. Sono accordi fra Stati che riguardano uno spazio. La protezione è una qualifica che gli Stati attribuiscono all'Antartide, non una condizione che appartiene all'Antartide. Ciò che gli Stati concedono, gli Stati possono ridiscutere: il Protocollo prevede che, trascorsi cinquant'anni dalla sua entrata in vigore, una qualsiasi Parte consultiva possa chiedere una conferenza di revisione, e quella soglia cade nel 2048.

C'è poi un limite che deriva direttamente da tutto quello che abbiamo visto nella prima parte di questo articolo. Il sistema antartico può disciplinare ciò che accade a Sud del 60° parallelo ma non può disciplinare le emissioni che alterano la circolazione abissale, né lo sbilanciamento energetico che sta consumando i bacini glaciali. Un continente i cui processi fisici sono planetari è protetto da un diritto rigorosamente territoriale.

E infine: nelle stanze dove si decide, non possiamo sentire la voce dell'Antartide. Siedono gli Stati, ciascuno con i propri interessi scientifici, logistici, economici, strategici. La domanda "che cosa è meglio per l'Antartide?" non è il punto di partenza di quelle riunioni, nel migliore dei casi è un vincolo tra gli altri.

I diritti della natura

A questo tipo di problema, altrove, si è già cominciato a rispondere.

La proposta teorica è vecchia di mezzo secolo: nel 1972 il giurista statunitense Christopher Stone si chiese, in un saggio rimasto celebre [7], se gli alberi potessero avere dei diritti. La storia del diritto è una progressiva estensione della soggettività: schiavi, donne, minori, popoli colonizzati, società commerciali sono stati in momenti diversi oggetti prima di diventare soggetti, e ogni estensione è sembrata assurda finché non è diventata ovvia.

Negli ultimi vent'anni quella proposta è diventata reale. La Costituzione dell'Ecuador del 2008 riconosce alla natura il diritto all'esistenza e alla

rigenerazione dei propri cicli vitali. La Nuova Zelanda ha attribuito personalità giuridica all'area forestale di Te Urewera nel 2014 e al fiume Whanganui nel 2017, in entrambi i casi istituendo organismi di tutela che agiscono per conto dell'entità. La Corte Costituzionale colombiana ha fatto lo stesso per il fiume Atrato. In Europa la laguna spagnola del Mar Menor ha ottenuto personalità giuridica nel 2022, per iniziativa popolare, dopo anni di morie di pesci dovute all'eutrofizzazione.

E nel gennaio 2025 il Parlamento neozelandese ha riconosciuto all'unanimità personalità giuridica a Taranaki Maunga, un vulcano di 2518 metri tra le vette più frequentate del Paese, insieme alle cime circostanti: una montagna che si scala, si scia e si ama, alla quale un ordinamento moderno ha riconosciuto di essere qualcuno anziché qualcosa. Vale la pena chiarire che cosa questi provvedimenti fanno e cosa non fanno. Non attribuiscono a un fiume la capacità di votare o di firmare contratti. Fanno tre cose precise, riconoscono che:

- quell'entità ha interessi propri, distinti da quelli di chi la usa;
- individuano chi è autorizzato a rappresentarli;
- attribuiscono la legittimazione ad agire in giudizio quando quegli interessi vengono lesi.

È lo stesso meccanismo con cui il diritto tratta da secoli un minore o una persona incapace: non si presume che possano parlare, si stabilisce chi parla per loro.

Foreste, fiumi, lagune, montagne, ma nessuno ha ancora provato con l'Antartide.



Figura 4 - I licheni conquistano il terreno libero dai ghiacci - ph Wikimedia Commons

Che cosa significherebbe, per l'Antartide

Applicare questo paradigma all'Antartide non è facile, perché l'Antartide non somiglia a nessuno dei casi precedenti: non ha una popolazione nativa che possa rivendicarne la tutela, non appartiene formalmente a nessuno Stato e a differenza di un fiume o di una laguna, produce effetti su scala planetaria.

Una bozza di Dichiarazione per i diritti dell'Antartide, elaborata da un gruppo di lavoro internazionale di giuristi ambientali, scienziati polari, rappresentanti di popolazioni indigene e studiosi, e presentata il 1° dicembre 2023, prova ad affrontare esattamente queste tre specificità.

Sul primo punto, definisce l'entità non come un territorio ma come una comunità di esseri interdipendenti - il continente, il ghiaccio, il mare, il fondale, l'atmosfera, le specie autoctone e le relazioni che le legano - delimitata dalla Convergenza Antartica, cioè da un confine oceanografico anziché politico. È una definizione che segue la fisica descritta nella prima parte di questo articolo, non le carte geografiche.

Sul secondo, afferma che l'Antartide è un'entità autonoma dotata di personalità giuridica internazionale propria, e le riconosce alcuni diritti fondamentali: esistere e rigenerarsi; essere rispettata per ciò che è; la libertà di essere selvaggia, libera da inquinamento e da interferenze; e il diritto di essere rappresentata nei processi decisionali umani che la riguardano, dai negoziati climatici alle sedi giudiziarie.

Il terzo punto è il più interessante, e discende direttamente dalla scienza. La Dichiarazione impone agli Stati il dovere di regolare anche le attività che si svolgono fuori dall'Antartide quando hanno impatti significativi sul continente. È la risposta alla discrepanza di cui si diceva: se le cause del cambiamento sono planetarie, gli obblighi non possono fermarsi al 60° parallelo. Un diritto costruito attorno alla soggettività dell'Antartide segue le connessioni fisiche invece di ignorarle.

Il testo non è al momento vincolante e non pretende di sostituire il Sistema del Trattato Antartico, che continua a funzionare e che nessuno propone di smantellare. Si colloca su un piano diverso: quello dei principi che precedono le norme.

Che il piano non sia irrilevante lo dice l'ottavo Congresso mondiale della conservazione dell'IUCN, riunito ad Abu Dhabi nell'ottobre 2025 [8]. Il 14 ottobre l'Assemblea dei Membri ha adottato la risoluzione sul riconoscimento dei diritti dell'Antartide, che invita commissioni e membri dell'Unione a valutare il concetto dei diritti fondamentali del continente e dei corrispondenti doveri umani. Non è arrivata da sola: nella stessa sessione sono passate altre quattro risoluzioni sui diritti della natura, una delle quali sui fiumi, e una sul riconoscimento dell'ecocidio come crimine. Il segnale non riguarda soltanto l'Antartide: la comunità conservazionista internazionale sta spostando il proprio quadro di riferimento dalla gestione della natura come risorsa al riconoscimento degli ecosistemi come entità titolari di diritti.



Figura 5 - Disgelo - ph royalty-free

Immaginare: un mondo in cui l'Antartide ha diritti

Vorrei ora chiedere al lettore un esercizio di immaginazione, dichiarandolo per quello che è: uno scenario, non una previsione. Ma uno scenario costruito su pezzi che esistono già.

Immaginiamo che la Dichiarazione dell'Antartide venga adottata da un numero crescente di Stati.

Non una dichiarazione di principio adottata dalla società civile, ma uno strumento vincolante: un trattato che riconosce all'Antartide personalità giuridica internazionale, ratificato da un numero sufficiente di Stati ed entrato in vigore, con un organo di rappresentanza - chiamiamolo Consiglio Antartico - e un meccanismo per contestarne le violazioni.

Cosa cambierebbe, concretamente?

- **Nelle sedi antartiche**

Oggi alla commissione che regola la pesca nell'Oceano Australe siedono gli Stati e si decide per consenso. Nel 2024 la misura che per quindici anni aveva imposto di distribuire il prelievo di *krill* su un'area ampia non è stata rinnovata; quest'anno, per la seconda volta nella storia, il limite di 620.000 tonnellate è stato raggiunto e la pesca chiusa d'ufficio il 1° agosto; l'area marina protetta per la Penisola Antartica, proposta da Cile e Argentina e sostenuta da oltre centocinquanta studi, resta bloccata come ogni anno dal 2018. In quella stanza nessuno ha il mandato dell'ecosistema in quanto tale.

Nel mondo che stiamo immaginando, il Consiglio Antartico siede a quel tavolo come parte e partecipa in nome dell'entità di cui si discute, l'Antartide.

Se il consenso salta perché una delegazione si oppone a una misura che gli organi tecnici ritengono necessaria alla rigenerazione dello stock, quel rifiuto non resta un fatto interno alla riunione: diventa una condotta contestabile, perché esiste un titolare di diritti che può sostenere di essere stato leso e un foro davanti al quale sostenerlo.

- **Nei negoziati climatici**

Alle Conferenze delle Parti sul clima si negozia su base nazionale: ogni delegazione porta un interesse, e il risultato è la somma algebrica di quegli interessi. Immaginiamo una sedia in più, non uno Stato, non un'organizzazione non governativa, ma la rappresentanza di un continente che di quelle emissioni subisce gli effetti senza averne prodotta nessuna.

- **Nei tribunali**

Qui lo scenario è meno immaginario di quanto sembri. Il 23 luglio 2025 la Corte Internazionale di Giustizia ha emesso un parere consultivo unanime sugli obblighi degli Stati in materia di cambiamento climatico, affermando che gli Stati hanno l'obbligo di prevenire danni significativi all'ambiente e al sistema climatico e che l'azione — ma anche l'inazione — può far sorgere responsabilità internazionale. È un parere non vincolante, ma è già alla base di strategie contenziose in tutto il mondo.

Un soggetto giuridico antartico dotato di legittimazione ad agire potrebbe innestarsi esattamente lì: non chiedendo risarcimenti per sé, ma facendo valere in giudizio la violazione dei propri diritti da parte di attività che si svolgono a diecimila chilometri di distanza. È il punto che la Dichiarazione affronta esplicitamente, imponendo agli Stati il dovere di regolare anche le attività esterne all'Antartide che hanno impatti significativi sul continente — la risposta diretta al limite più grave dell'attuale sistema, che può regolare ciò che accade sotto il 60° parallelo Sud ma non ciò che lo sta trasformando.

- **Fuori dall'Antartide**

E qui torniamo alle connessioni da cui siamo partiti. Se un intero continente può essere soggetto di diritto, cade l'ultima obiezione di scala contro i casi più piccoli. Un bacino glaciale, uno spartiacque alpino, un lago di alta quota, un fiume che nasce da un ghiacciaio in ritiro: tutti questi oggi devono essere difesi dimostrando il danno a qualcuno. In un quadro ecocentrico l'onere si rovescia, e chi vuole intervenire deve dimostrare la compatibilità con l'esistenza e la rigenerazione del sistema. L'obiettivo dichiarato di *Antarctic Rights* non è soltanto proteggere l'Antartide: è costruire un prototipo di governance ecocentrica alla scala più grande possibile, perché possa poi essere applicato alle scale più piccole. Un'Antartide a cui vengono riconosciuti i suoi diritti è, tra le altre cose, un precedente per le Alpi.

Questo è ciò che intendo per diplomazia planetaria: un sistema in cui, accanto agli Stati che rappresentano popoli, siedano rappresentanze degli ecosistemi viventi che quei popoli tengono in vita.



Figura 6 - In attesa - ph Wikimedia Commons



Figura 7 - Adunata - ph royalty-free



Figura 8 - Paesaggio antartico - ph royalty-free



Figura 9 - Paesaggio antartico - ph royalty-free



Figura 10 - Segni della fusione dei ghiacci - ph Wikimedia Commons

Chi parla per l'Antartide?

Uno scenario così ambizioso solleva obiezioni serie.

Chi parla, concretamente, per l'Antartide?

Nei casi neozelandesi la risposta era relativamente chiara, perché esistevano comunità con un legame ancestrale documentato con il fiume o con la montagna. In Antartide non esiste alcuna popolazione nativa. È il motivo per cui abbiamo scelto una consultazione aperta invece di un testo chiuso redatto da pochi, e per cui la presenza di rappresentanti indigeni nel gruppo di lavoro non è simbolica: portano l'esperienza di chi la rappresentanza giuridica della natura l'ha già ottenuta e praticata. Ma il rischio che la rappresentanza diventi l'auto-investitura di un gruppo di organizzazioni va riconosciuto e progettato via, non minimizzato.

Non si rischia di destabilizzare un sistema che regge da sessant'anni?

Il Trattato Antartico del 1959 funziona anche grazie all'ambiguità del suo articolo IV, che congela le rivendicazioni territoriali senza risolverle, e chiedere agli Stati di rinunciarvi formalmente potrebbe indurne qualcuno ad affermarle. Lo dico con chiarezza: *Antarctic Rights* non nasce per sostituire il Sistema del Trattato Antartico, che è stato un esempio pionieristico di cooperazione pacifica in decenni in cui la cooperazione era merce rarissima. Nasce per completarlo e rafforzarlo. E osservo che l'equilibrio si sta già incrinando da solo: otto anni consecutivi di veto su un'area marina protetta indicano una chiara paralisi.

Una dichiarazione non vincolante non ferma una nave da pesca.

Nella sua forma attuale il testo non obbliga nessuno. Se il problema è la regola del consenso, un documento privo di forza giuridica non la scioglie.

Ma il punto è che la forma attuale è la prima tappa di un percorso, non il punto di arrivo. L'obiettivo dichiarato è un riconoscimento vincolante della soggettività giuridica dell'Antartide, e la sequenza scelta – enunciare i principi, costruire consenso, poi tradurli in norme – è quella che il diritto internazionale ha già seguito in altre occasioni.

Il precedente è quello dei diritti umani, e vale la pena guardarlo per intero, comprese le sue tempistiche. La Dichiarazione universale del 1948 non era vincolante e non impedì alcuna violazione. Servirono diciotto anni perché i due Patti internazionali del 1966 ne traducessero i principi in obblighi, e altri dieci perché entrassero in vigore. Ventotto anni fra l'enunciazione e l'esigibilità. Nel frattempo, però, quella Dichiarazione aveva già fatto qualcosa che nessun trattato avrebbe potuto fare per primo: aveva cambiato il vocabolario con cui le violazioni venivano nominate, e reso pensabile che uno Stato dovesse rispondere del trattamento riservato ai propri cittadini.

Chi obietta che una dichiarazione non è vincolante ha ragione sui fatti e sbaglia sulla funzione. Una dichiarazione non serve a obbligare: serve a rendere dicibile un obbligo che ancora non esiste.

Conclusioni

Sono partita da una parola, **remoto**, e vorrei chiudere restituendola corretta.

L'Antartide non è remota. Ci arriva addosso attraverso i nutrienti che fertilizzano i nostri mari, attraverso la gravità che ridistribuisce il livello dell'acqua sulle nostre coste, attraverso la fisica che governa i nostri ghiacciai e l'archivio che ci permette di leggerli. È il serbatoio del ciclo dell'acqua da cui dipendono fiumi e laghi in ogni parte del pianeta. Ed è l'unico continente senza popolazione stabile, senza governo, senza cittadini, il che significa anche che è l'unico di cui si decide senza che nessuno, in quella stanza, sia lì per rappresentarlo.

Riconoscerle dei diritti serve a portare in quella stanza una voce che non difende un interesse nazionale. E serve a costruire, alla scala più grande che possiamo immaginare, un precedente che poi torna utile alle scale più piccole: un bacino glaciale, uno spartiacque, una montagna.

Chi frequenta le Alpi lo sa già, anche se non lo ha mai messo in termini giuridici. Il CAI l'ha scritto molti anni fa nel Bidecalogo: la montagna non è solo un terreno su cui si va, è un ambiente che vale a prescindere da cosa ce ne facciamo. È la stessa premessa da cui partono i diritti della natura. Per sentirla non occorre una teoria giuridica. Per renderla esigibile sì.

Spero che entro pochi anni parlare di diritti dell'Antartide sembri normale come parlare di diritti umani o di diritti delle generazioni future. E che un giorno si possa dire che l'Antartide non è stata il nostro più grande fallimento collettivo, ma il posto da cui abbiamo cominciato a cambiare il modo di stare al mondo, riconoscendoci finalmente parte di un sistema vivo.

Per approfondire e partecipare

Il testo della Dichiarazione dell'Antartide è aperto a commenti e contributi su *antarcticrights.org*, dove è possibile aderire all'Alleanza come individui o come organizzazioni. Nel corso del 2026 il testo verrà completato attraverso consultazioni aperte, con l'obiettivo di una firma globale a Città del Capo il 1° dicembre 2026.

Note

1. *Antarctic Rights è un'alleanza internazionale che lavora al riconoscimento dell'Antartide come entità autonoma, con il diritto ad avere voce nelle decisioni che la riguardano. Il lavoro è portato avanti da un gruppo di lavoro di circa venticinque specialisti — giuristi ambientali, attivisti, scienziati polari, esperti del Sistema del Trattato Antartico, rappresentanti di popolazioni indigene e studiosi di diversi continenti — insieme alle organizzazioni aderenti della società civile. Il gruppo ha elaborato la Dichiarazione dell'Antartide, presentata il 1° dicembre 2023 e attualmente aperta alla consultazione pubblica fino al 30 Settembre 2026, e nell'ottobre 2025 ha ottenuto l'adozione della Risoluzione IUCN WCC-2025-Res-054 sul riconoscimento dei diritti dell'Antartide. https://antarcticrights.org/*
2. *J. L. Sarmiento, N. Gruber, M. A. Brzezinski, J. P. Dunne, High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity, Nature 427, 56-60 (2004)*
3. *Frölicher et al. (2015), Dominance of the Southern Ocean in Anthropogenic Carbon and Heat Uptake in CMIP5 Models, Journal of Climate 28(2)*
4. *G. C. Johnson (2008), Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes, Journal of Geophysical Research: Oceans 113, C05027, https://doi.org/10.1029/2007JC004477*
5. *Wyatt et al., (2026), The Observed Circumpolar Decline of Antarctic Bottom Water Volume, Geophysical Research Letter - https://doi.org/10.1029/2025GL121359*
6. *J. X. Mitrovica, M. E. Tamisiea, J. L. Davis, G. A. Milne (2001), Polar ice mass variations and the geometry of global sea level change, Nature 409, 1026-1029.*
7. *Christopher D. Stone, Should Trees Have Standing? — Toward Legal Rights for Natural Objects, in "Southern California Law Review", vol. 45, n. 2, 1972, pp. 450-501.*
8. *IUCN (2025), Recognition of the rights of Antarctica, Risoluzione WCC-2025-Res-054, ottavo Congresso mondiale della conservazione, Abu Dhabi, 14 ottobre 2025 (presentata come Mozione 055).*

Bibliografia

- ANTARCTIC AND SOUTHERN OCEAN COALITION (2025). *Krill Fishery Management Approach and the D1MPA*. Documento presentato a CCAMLR-44, Hobart
- ANTARCTIC RIGHTS WORKING GROUP (2023). *Antarctica Declaration (bozza in consultazione)*. Disponibile su https://antarcticrights.org/
- BAARD P., MANCILLA A. (2024) - *Outlining three arguments for Rights of Antarctica* - The Polar Journal, 14(2), 389-408, https://doi.org/10.1080/2154896X.2024.2414646
- CORTE INTERNAZIONALE DI GIUSTIZIA (2025) - *Obligations of States in respect of Climate Change* - Parere consultivo del 23 luglio 2025, General List n. 187
- CULLINAN C. (2011) - Wild Law: *A Manifesto for Earth Justice* - 2ª ed., Green Books (1ª ed. Siber Ink, Città del Capo, 2002; prefazione di Thomas Berry)
- GLOBAL ALLIANCE FOR THE RIGHTS OF NATURE (GARN) - https://garn.org
- HEMMINGS A. D. (2024). *Realising Rights of Nature across and beneath the Southern Ocean*. The Polar Journal, 14(2), 409-426 - https//doi.org/10.1080/2154896X.2024.2415826
- IUCN (2025) - *Recognition of the rights of Antarctica* - Risoluzione WCC-2025-Res-054, ottavo Congresso mondiale della conservazione, Abu Dhabi, 14 ottobre 2025
- IUCN (2025) - *Living in harmony with rivers through the rights of nature and ecocentric law* - Risoluzione WCC-2025-Res-066, ottavo Congresso mondiale della conservazione, Abu Dhabi
- LI Q., ENGLAND M. H., HOGG A. M., RINTOUL S. R., MORRISON A. K. (2023) - *Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater* - Nature, 615, 841-847
- MITROVICA J.X., GOMEZ N., CLARK P.U. (2009) - *The sea-level fingerprint of West Antarctic collapse* - Science, 323, 753
- SARMIENTO J. L., GRUBER N., BRZEZINSKI M. A., DUNNE J. P. (2004) - *High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity* - Nature, 427, 56-60
- SIEGERT M., et al., (2025) - *Emerging evidence of abrupt changes in the Antarctic environment* - Nature, https://doi.org/10.1038/s41586-025-09349-5
- SIERRA CLUB v. MORTON, 405 U.S. 727 (1972), *opinione dissenziente del giudice Douglas,* pp. 741-742 e 750 nota 8
- STONE C.D. (1972) - *Should Trees Have Standing? Toward Legal Rights for Natural Objects*. Southern California Law Review, 45(2), 450-501
- WINKELMANN R., GARBE J., DONGES J.F., ALBRECHT T. (2026) - *Mapping tipping risks from Antarctic ice basins under global warming* - Nature Climate Change, https://doi.org/10.1038/s41558-025-02554-0
- WYATT J. K., et al., (2026) - *The Observed Circumpolar Decline of Antarctic Bottom Water Volume* - Geophysical Research Letters - https://doi.org/10.1029/2025GL121359



Figura 7 - In attesa degli accordi - ph Jean de Pomereu

Who speaks for Antarctica?

Planetary connections, rights of nature and a new idea of diplomacy

by Roberta Bosu

Abstract

We call Antarctica "*the most remote continent*", but the word misleads. The Southern Ocean absorbs a disproportionate share of anthropogenic heat and carbon; the intermediate waters forming around Antarctica carry the nutrients that fuel much of the world ocean's biological productivity; Antarctic Bottom Water (AABW) oxygenates up to 40% of the global ocean volume; and through gravitational effects, melting of the Antarctic ice sheet raises sea level more in distant regions than nearby, disproportionately affecting Northern Hemisphere coasts, including the Mediterranean. Antarctica is thus bound to the glaciers, mountains, lakes and rivers of the entire planet by a network of measurable physical connections. A parallel legal network is emerging: from the Whanganui River to the Mar Menor lagoon, to Taranaki Maunga recognised as a legal person in January 2025, the rights of nature movement is building precedents. The Antarctic Rights initiative proposes applying this paradigm at the scale of an entire continent. This article sets out the scientific basis of these connections, the campaign's trajectory, and a scenario: how planetary diplomacy would change if Antarctica had a voice of its own.

Preface

I work in strategic environmental communication and in translating scientific knowledge into campaigns, narratives and tools for public participation. I work at the intersection of research, environmental policy and civil society: my task is to make complex questions comprehensible without diminishing their scope, and to help turn evidence into awareness, debate and action.

For some years now I have coordinated Antarctic Rights [1], a global campaign born in 2021 out of a question that at the time sounded almost provocative: what if we recognised the rights of nature for Antarctica?

The data and analyses that follow are based on the glaciological and oceanographic literature and on the work of the scientific communities that study the Antarctic continent. My contribution is not to set myself above that expertise, but to bring it into dialogue with law, communication, governance and the collective imagination. Because knowing is not enough: we also have to decide what that knowledge asks of us.

The wrong word

I would like to begin with a word I quarrel with every day: remote. Antarctica is described as the furthest place on Earth, and that image does more damage than we realise, because it lets us think that what happens down there stays down there. It does not. Antarctica is one of the central organs of the living system we call a planet, and it has to do with the glacier you watched retreat during this scorching summer, with the river that runs through your city, with the lake where you went walking on Sunday. The connection is physical, and it can be measured.

The connections: what the science says

- Antarctica fertilises the world's oceans. It is perhaps the least known connection, and the most surprising. Around Antarctica, the Circumpolar Current brings deep water extremely rich in nutrients up to the surface. Part of this water is not consumed on the spot: it is pushed northwards and sinks just north of the Subantarctic Front, forming Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water. These are water masses that travel for decades below the surface: around ten years to reach the waters east of Madagascar, some forty to resurface at the equator. When they do rise again, they return nitrogen and phosphorus to the sunlit zones of oceans very far away. A study published in Nature in 2004 [2] estimated that the Subantarctic Mode Water conduit may sustain up to three quarters of the biological production of the oceans north of 30° south. It is an estimate derived from models, not a direct measurement, and it does not hold everywhere: the North Pacific has its own independent return path, driven by vertical mixing. But otherwise the picture holds. To put it another way: a substantial share of the phytoplankton of the Atlantic, the equatorial Pacific and the Indian Ocean - and therefore of the fish that depend on it, and of the coastal economies that live from them - breathes thanks to a process that begins around Antarctica.

- Antarctica absorbs the heat and the carbon we produce elsewhere. The Southern Ocean covers roughly a quarter of the world's ocean surface, yet between 1970 and 2017 it took up between 35 and 43% of all the heat accumulated by the oceans in the first two thousand metres - and in the most recent years its share has risen above 45%. It also captures around 40% of the CO_2 of human origin that ends up in the oceans [3].

Part of that heat and that carbon does not stay there: the currents carry it northwards and redistribute it across the rest of the planet. It is a service no one asked for and no one pays for, and it is changing the chemistry of those waters and their very physical structure.

- Antarctica oxygenates the deep ocean. Along the continental shelves, cold, dense, oxygen-laden water forms, sinks to the sea floor and from there spreads beneath every ocean: this is Antarctic

Bottom Water (AABW), and it occupies up to 40% of the global ocean volume [4]. It is the lower cell of the overturning circulation, the deep branch of the system that mixes heat, carbon, oxygen and nutrients around the planet.
Twenty years of observations tell us that this water mass is warming, freshening and losing oxygen, and that it is contracting: around 3% of its volume lost between 2002 and 2023, with a rate of loss four times higher after 2015. A high-resolution model projects, under a high-emissions scenario, a 42% slowdown of abyssal overturning by 2050 [5].
A deep ocean that is losing oxygen is a problem for deep-sea ecosystems at every latitude, and at that depth nothing repairs itself quickly.

- Antarctic melting raises sea level above all far away from Antarctica. This is the connection I use most often when I speak in Europe, because it overturns intuition.
An ice sheet is so massive that it gravitationally attracts the ocean around it: close to a large ice sheet, sea level is higher than the average precisely because of that attraction. When the ice sheet loses mass, the attraction weakens, the sea nearby falls and the water redistributes towards the opposite latitudes, where the level rises above the global average. In the far field, the rise can exceed by 20-25% the value you would expect if the meltwater were spread out uniformly.
For anyone living in Europe, the result is this: Greenland is too close. As it melts, it raises sea level in the Netherlands by less than the global average, because its gravitational pull on the water of the North Sea falls away. Antarctica does the opposite: it is far enough away to push the water exactly here, and the same holds for Venice, for the Po delta, for the Italian coastal plains. The ice that really counts, for a Dutch or a Venetian resident, is the ice on the other side of the planet [6].

- Antarctica is the archive through which we read all the other ice. In January 2025, at Little Dome C, the European project Beyond EPICA – Oldest Ice completed a 2,800 metre borehole, down to the bedrock. It yielded the longest continuous record of Earth's climate ever obtained: around 1.2 million years. Scientific coordination was provided by the CNR Institute of Polar Sciences; logistics were handled by ENEA and the icebreaker Laura Bassi, within the framework of the Italian National Antarctic Research Programme.
That core is the yardstick by which everything else is measured. The air bubbles trapped in the ice preserve the composition of the atmosphere of the time, and make it possible to say how much carbon dioxide there was, how warm it was, at what rhythm glacial and interglacial periods alternated. Without that timescale, the retreat of an Alpine glacier remains an isolated data point: we know that the ice is melting, but we have no term of comparison to say whether it has happened before, and how fast. It is Antarctica that supplies this information.

The same story, written in different places

Looked at together, these connections stop making Antarctica a case apart and turn it into the largest chapter of a story that is being written everywhere.
The world's glaciers are retreating according to the same physics: a mass balance that turns negative when accumulation no longer offsets ablation. The scales we consider differ - an Antarctic drainage basin and the Adamello glacier are not the same thing - but the instruments with which we observe them are largely shared: mass balances, satellite remote sensing, ice cores. It is no accident that the United Nations dedicated 2025 to the preservation of glaciers and established a recurring world day: the scientific community has stopped treating the cryosphere as a collection of local cases.
And behind the glaciers there are the rivers and the lakes. Mountains are the planet's water towers: the Ganges, the Indus, the Mekong, the Rhône and the Po depend to varying degrees on the contribution of snow and ice. When a glacier retreats, the seasonality of the flows changes, the temperature of the water changes, the river ecosystems downstream change, and so do the forms of agriculture that depend on them. A recent study of the Antarctic basins shows that the ice sheet does not behave as a single tipping element but as a set of eighteen interacting basins, each with its own critical threshold: at current warming levels, around 40% of West Antarctic ice may already be committed to long-term loss. This is exactly the way we have learned to think about Alpine basins: not a single block, but a mosaic of systems with thresholds of their own.
The conclusion to be drawn is that **there is no Antarctic question separate from an Alpine, Andean, Himalayan or Amazonian one.** There is a single system of water and ice which we are treating as though it were made of parts independent of one another.

What Antarctica is, according to the law

Every legal order divides the world into two categories. On one side, subjects: those who hold rights of their own, who can be wronged and can appear before a judge to say so. On the other, objects: that upon which rights are exercised. Natural persons are subjects. So are entities with neither body nor consciousness (a joint-stock company, a municipality, a State, a multinational), because at a certain point we decided it was useful for them to be.
Antarctica lies entirely on the second side. It is a space, a geographical area, a set of living and mineral resources, a sphere of jurisdiction, but it is never a subject.
This takes nothing away from the value of what has been built around it. The Antarctic Treaty of 1959 remains one of the most remarkable diplo-

matic achievements of the twentieth century: at the height of the Cold War it suspended territorial claims through Article IV, prohibited military activity and dedicated an entire continent to research. The Madrid Protocol of 1991 defines it as a natural reserve devoted to peace and science and prohibits mining. The 1980 convention on Antarctic fisheries was the first agreement of its kind to declare an ecosystem approach.

But consider the structure of these rules. They are agreements between States concerning a space. Protection is a quality that States attribute to Antarctica, not a condition that belongs to Antarctica. What States grant, States can reopen: the Protocol provides that, fifty years after its entry into force, any Consultative Party may call for a review conference, and that threshold falls in 2048.

There is also a limit that follows directly from everything we saw in the first part of this article. The Antarctic system can regulate what happens south of the 60th parallel but it cannot regulate the emissions that are altering abyssal circulation, nor the energy imbalance that is consuming the glacial basins. A continent whose physical processes are planetary is protected by a strictly territorial body of law.

And finally: in the rooms where decisions are taken, we cannot hear Antarctica's voice. The States sit there, each with its own scientific, logistical, economic and strategic interests. The question "*what is best for Antarctica?*" is not the starting point of those meetings; at best it is one constraint among others.

The rights of nature

Elsewhere, this kind of problem has already begun to receive an answer.

The theoretical proposal is half a century old: in 1972 the American legal scholar Christopher Stone asked, in an essay that has remained famous [7], whether trees could have a standing. The history of law is a progressive extension of subjecthood: slaves, women, minors, colonised peoples and commercial companies were all, at different moments, objects before becoming subjects, and every extension seemed absurd until it became obvious.

Over the past twenty years that proposal has become real. Ecuador's Constitution of 2008 recognises nature's right to exist and to regenerate its own vital cycles. New Zealand granted legal personality to the Te Urewera forest area in 2014 and to the Whanganui River in 2017, in both cases establishing guardianship bodies that act on behalf of the entity. The Colombian Constitutional Court did the same for the Atrato River. In Europe, the Spanish lagoon of the Mar Menor obtained legal personality in 2022, through a popular initiative, after years of fish die-offs caused by eutrophication. And in January 2025 the New Zealand Parliament unanimously recognised legal personality for Taranaki Maunga, a 2,518-metre volcano among the country's most frequented peaks, together with the surrounding summits: a mountain that people climb, ski and love, and which a modern legal order has recognised as being someone rather than something.

It is worth clarifying what these measures do and do not do. They do not give a river the capacity to vote or to sign contracts. They do three precise things: they recognise that the entity has interests of its own, distinct from those of whoever uses it; they identify who is authorised to represent those interests; and they confer standing to go to court when those interests are harmed. It is the same mechanism through which the law has for centuries treated a minor or a person lacking legal capacity: they are not presumed able to speak, so it is established who speaks for them.

Forests, rivers, lagoons, mountains, but no one has yet tried with Antarctica.

What it would mean for Antarctica

Applying this paradigm to Antarctica is not easy, because Antarctica resembles none of the previous cases: it has no native population that could claim guardianship over it, it formally belongs to no State and, unlike a river or a lagoon, it produces effects on a planetary scale.

A draft Declaration for the rights of Antarctica, developed by an international working group of environmental lawyers, polar scientists, representatives of Indigenous peoples and scholars, and presented on 1 December 2023, attempts to address precisely these three specificities.

On the first point, it defines the entity not as a territory but as a community of interdependent beings - the continent, the ice, the sea, the sea floor, the atmosphere, the native species and the relationships that bind them - delimited by the Antarctic Convergence, that is, by an oceanographic rather than a political boundary. It is a definition that follows the physics described in the first part of this article, not the maps.

On the second, it affirms that Antarctica is an autonomous entity endowed with international legal personality of its own, and recognises for it a number of fundamental rights: to exist and to regenerate; to be respected for what it is; the freedom to be wild, free from pollution and from interference; and the right to be represented in the human decision-making processes that concern it, from climate negotiations to courts of law.

The third point is the most interesting, and it follows directly from the science. The Declaration places on States the duty to regulate activities that take place **outside** Antarctica as well, when these have significant impacts on the continent. It is the answer to the mismatch described above: if the causes of change are planetary, obligations cannot stop at the 60th parallel. A body of law built around Antarctica's subjecthood follows the physical connections instead of ignoring them.

The text is not binding at present and does not claim to replace the Antarctic Treaty System, which continues to function and which no one is proposing to dismantle. It sits on a different plane: that of the principles which precede rules.
That this plane is not irrelevant is shown by the eighth IUCN World Conservation Congress, held in Abu Dhabi in October 2025 [8]. On 14 October the Members' Assembly adopted the resolution on the recognition of the rights of Antarctica, which invites the Union's commissions and members to consider the concept of the continent's fundamental rights and the corresponding human duties. It did not arrive alone: in the same session four further resolutions on the rights of nature were passed, one of them on rivers, and one on the recognition of ecocide as a crime. The signal does not concern Antarctica alone: the international conservation community is shifting its frame of reference from the management of nature as a resource to the recognition of ecosystems as entities holding rights.

Imagining: a world in which Antarctica has rights

I would now like to ask the reader for an exercise in imagination, declaring it for what it is: a scenario, not a forecast. But a scenario built out of pieces that already exist.
Imagine that the Antarctica Declaration is adopted by a growing number of States.
Not a statement of principle adopted by civil society, but a binding instrument: a treaty recognising Antarctica's international legal personality, ratified by a sufficient number of States and in force, with a body to represent it - call it the Antarctic Council - and a mechanism for challenging violations of its rights.

What would change, concretely?

- In the Antarctic forums

Today the commission that regulates fishing in the Southern Ocean is made up of States and decides by consensus. In 2024 the measure that for fifteen years had required the krill catch to be spread across a wide area was not renewed; this year, for the second time in history, the limit of 620,000 tonnes was reached and the fishery closed automatically on 1 August; the marine protected area for the Antarctic Peninsula, proposed by Chile and Argentina and supported by more than one hundred and fifty studies, remains blocked, as it has been every year since 2018. In that room, no one holds a mandate from the ecosystem as such.
In the world we are imagining, the Antarctic Council sits at that table as a party and takes part in the name of the entity under discussion, Antarctica. If consensus collapses because one delegation opposes a measure that the technical bodies consider necessary for the regeneration of the stock, that refusal does not remain an internal fact of the meeting: it becomes conduct that can be challenged, because there exists a holder of rights who can claim to have been harmed, and a forum before which to make that claim.

- In the climate negotiations

At the climate Conferences of the Parties, negotiation proceeds on a national basis: each delegation brings an interest, and the outcome is the algebraic sum of those interests. Imagine one more chair - not a State, not a non-governmental organisation, but the representation of Antarctica, that suffers the effects of those emissions without having produced any of them.

- In the courts

Here the scenario is less imaginary than it seems. On 23 July 2025 the International Court of Justice issued a unanimous advisory opinion on the obligations of States in respect of climate change, affirming that States have an obligation to prevent significant harm to the environment and to the climate system, and that action - but also inaction - may give rise to international responsibility. It is a non-binding opinion, but it already underpins litigation strategies around the world. An Antarctic legal subject endowed with standing could graft itself precisely there: not by seeking compensation for itself, but by asserting in court the violation of its own rights by activities taking place ten thousand kilometres away. This is the point the Declaration addresses explicitly, placing on States the duty to regulate activities outside Antarctica that have significant impacts on the continent — the direct answer to the gravest limitation of the current system, which can regulate what happens below 60° south but not what is transforming it.

- Outside Antarctica

And here we return to the connections we started from. If an entire continent can be a subject of law, the last objection of scale against smaller cases falls away. A glacial basin, an Alpine watershed, a high-altitude lake, a river born from a retreating glacier: today all of these must be defended by demonstrating harm to someone. In an ecocentric framework the burden is reversed, and whoever wants to intervene must demonstrate compatibility with the existence and regeneration of the system. Antarctic Rights' declared objective is not only to protect Antarctica: it is to build a prototype of ecocentric governance at the largest possible scale, so that it can then be applied at smaller ones. An Antarctica whose rights are recognised is, among other things, a precedent for the Alps.
This is what I mean by **planetary diplomacy**: a system in which, alongside the States that represent peoples, there sit representatives of the living ecosystems that keep those peoples alive.

Who speaks for Antarctica?

A scenario this ambitious raises serious objections.
- Who, concretely, speaks for Antarctica? In the New Zealand cases the answer was relatively cle-

ar, because there were communities with a documented ancestral bond to the river or the mountain. In Antarctica there is no native population. That is why we chose an open consultation rather than a closed text drafted by a few, and why the presence of Indigenous representatives in the working group is not symbolic: they bring the experience of those who have already obtained and practised legal representation of nature. But the risk that representation turns into the self-appointment of a group of organisations has to be acknowledged and designed out, not played down.

- Isn't there a risk of destabilising a system that has held for sixty years? The Antarctic Treaty of 1959 also works thanks to the ambiguity of its Article IV, which freezes territorial claims without resolving them, and asking States to renounce them formally might induce some of them to assert them instead. Let me say it clearly: Antarctic Rights was not created to replace the Antarctic Treaty System, which was a pioneering example of peaceful cooperation in decades when cooperation was an exceedingly rare commodity, it was created to complete and strengthen it. And I would observe that the balance is already cracking on its own: eight consecutive years of veto over a marine protected area point to clear paralysis.

- A non-binding declaration does not stop a fishing vessel. In its current form the text obliges no one. If the problem is the consensus rule, a document without legal force does not dissolve it.
But the point is that the current form is the first stage of a path, not the destination. The declared objective is binding recognition of Antarctica's legal subjecthood, and the sequence chosen - to set out the principles, build consensus, then translate them into rules - is the one international law has already followed on other occasions.
The precedent is that of human rights, and it is worth looking at it in full, including its timescales. The Universal Declaration of 1948 was not binding and prevented no violation. It took eighteen years for the two International Covenants of 1966 to translate its principles into obligations, and another ten for them to enter into force. Twenty-eight years between enunciation and enforceability. In the meantime, however, that Declaration had already done something no treaty could have done first: it had changed the vocabulary in which violations were named, and had made it thinkable that a State should answer for the treatment of its own citizens.
Those who object that a declaration is not binding are right about the facts and wrong about the function. A declaration does not serve to oblige: it serves to make sayable an obligation that does not yet exist.

Conclusions

I began with a word, remote, and I would like to close by giving it back corrected.
Antarctica is not remote. It reaches us through the nutrients that fertilise our seas, through the gravity that redistributes water level along our coasts, through the physics that governs our glaciers and the archive that allows us to read them. It is the reservoir of the water cycle on which rivers and lakes in every part of the planet depend. And it is the only continent with no permanent population, no government, no citizens, which also means that it is the only one about which decisions are taken without anyone, in that room, being there to represent it.
Recognising Antarctica's rights serves to bring into that room a voice that is not defending a national interest. And it serves to build, at the largest scale we can imagine, a precedent that then proves useful at the smaller ones: a glacial basin, a watershed, a mountain.
Anyone who spends time in the Alps knows this already, even if they have never put it in legal terms. The CAI *(Italian Alpine Club)* wrote it many years ago in its Bidecalogo: *the mountain is not merely ground to walk on, it is an environment that has worth regardless of what we make of it*. It is the same premise from which the rights of nature start. To feel it, no legal theory is needed. To make it enforceable, one is.
I hope that within a few years talking about the rights of Antarctica will seem as normal as talking about human rights or the rights of future generations. And that one day it will be possible to say that Antarctica was not our greatest collective failure, but the place from which we began to change the way we inhabit the world, finally recognising ourselves as part of a living system.

Further reading and how to take part

The text of the Antarctica Declaration is open to comments and contributions at antarcticrights.org, where individuals and organisations can join the Alliance. During 2026 the text will be completed through open consultations, with the aim of a global signing in Cape Town on 1 December 2026.

Notes

1. *Antarctic Rights is an international alliance working for the recognition of Antarctica as an autonomous entity with the right to a voice in the decisions that affect it. Its work is carried out by a working group of some twenty-five specialists - environmental lawyers, activists, polar scientists, Antarctic Treaty practitioners, Indigenous representatives and scholars from several continents - together with member organisations of civil society. The group drafted the Antarctica Declaration, presented on 1 December 2023 and currently open to public consultation until September 30th 2026, and in October 2025 secured the adoption of IUCN Resolution WCC-2025-Res-054 on the recognition of the rights of Antarctica.* https://antarcticrights.org/
2. J. L. Sarmiento, N. Gruber, M. A. Brzezinski, J. P. Dunne, High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity, Nature 427, 56-60 (2004).

3. Frölicher et al. (2015), Dominance of the Southern Ocean in Anthropogenic Carbon and Heat Uptake in CMIP5 Models, Journal of Climate 28(2).
4. G. C. Johnson (2008), Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes, Journal of Geophysical Research: Oceans 113, C05027, doi 10.1029/2007JC004477.
5. Wyatt et al. (2026), The Observed Circumpolar Decline of Antarctic Bottom Water Volume, Geophysical Research Letters, doi 10.1029/2025GL121359.
6. J. X. Mitrovica, M. E. Tamisiea, J. L. Davis, G. A. Milne (2001), Polar ice mass variations and the geometry of global sea level change, Nature 409, 1026-1029.
7. Christopher D. Stone, Should Trees Have Standing? — Toward Legal Rights for Natural Objects, in "Southern California Law Review", vol. 45, no. 2, 1972, pp. 450-501.
8. IUCN (2025), Recognition of the rights of Antarctica, Resolution WCC-2025-Res-054, eighth World Conservation Congress, Abu Dhabi, 14 October 2025 (submitted as Motion 055).

Bibliography

- ANTARCTIC AND SOUTHERN OCEAN COALITION (2025). *Krill Fishery Management Approach and the D1MPA*. Documento presentato a CCAMLR-44, Hobart
- ANTARCTIC RIGHTS WORKING GROUP (2023). *Antarctica Declaration (bozza in consultazione)*. Disponibile su *https://antarcticrights.org/*
- BAARD P., MANCILLA A. (2024) - *Outlining three arguments for Rights of Antarctica* - The Polar Journal, 14(2), 389-408, https://doi.org/10.1080/2154896X.2024.2414646
- CORTE INTERNAZIONALE DI GIUSTIZIA (2025) - *Obligations of States in respect of Climate Change* - Parere consultivo del 23 luglio 2025, General List n. 187
- CULLINAN C. (2011) - Wild Law: *A Manifesto for Earth Justice* - 2ª ed., Green Books (1ª ed. Siber Ink, Città del Capo, 2002; prefazione di Thomas Berry)
- GLOBAL ALLIANCE FOR THE RIGHTS OF NATURE (GARN) - https://garn.org
- HEMMINGS A. D. (2024). *Realising Rights of Nature across and beneath the Southern Ocean*. The Polar Journal, 14(2), 409-426 - https//doi.org/10.1080/2154896X.2024.2415826
- IUCN (2025) - *Recognition of the rights of Antarctica* - Risoluzione WCC-2025-Res-054, ottavo Congresso mondiale della conservazione, Abu Dhabi, 14 ottobre 2025
- IUCN (2025) - *Living in harmony with rivers through the rights of nature and ecocentric law* - Risoluzione WCC-2025-Res-066, ottavo Congresso mondiale della conservazione, Abu Dhabi
- LI Q., ENGLAND M. H., HOGG A. M., RINTOUL S. R., MORRISON A. K. (2023) - *Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater* - Nature, 615, 841-847
- MITROVICA J.X., GOMEZ N., CLARK P.U. (2009) - *The sea-level fingerprint of West Antarctic collapse* - Science, 323, 753
- SARMIENTO J. L., GRUBER N., BRZEZINSKI M. A., DUNNE J. P. (2004) - *High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity* - Nature, 427, 56-60
- SIEGERT M., et al., (2025) - *Emerging evidence of abrupt changes in the Antarctic environment* - Nature, https://doi.org/10.1038/s41586-025-09349-5
- SIERRA CLUB v. MORTON, 405 U.S. 727 (1972), *opinione dissenziente del giudice Douglas,* pp. 741-742 e 750 nota 8
- STONE C.D. (1972) - *Should Trees Have Standing? Toward Legal Rights for Natural Objects*. Southern California Law Review, 45(2), 450-501
- WINKELMANN R., GARBE J., DONGES J.F., ALBRECHT T. (2026) - *Mapping tipping risks from Antarctic ice basins under global warming* - Nature Climate Change, https://doi.org/10.1038/s41558-025-02554-0
- WYATT J. K., et al., (2026) - *The Observed Circumpolar Decline of Antarctic Bottom Water Volume* - Geophysical Research Letters - https://doi.org/10.1029/2025GL121359

INDICE PER ARGOMENTI

In questo indice si trovano tutti gli articoli pubblicati sui Bollettini CSC suddivisi per argomenti e con le indicazioni del Bollettino di riferimento e delle pagine.

ARCHEOLOGIA

CAMBIAMENTI CLIMATICI

FAUNA

GEOLOGIA, PALEONTOLOGIA, GEOMORFOLOGIA
GLACIOLOGIA, VULCANOLOGIA

PAESAGGIO

VEGETAZIONE

INTERESSE GENERALE

ARCHEOLOGIA

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• HENRY DE SANTIS - *L'antropizzazione del comprensorio toiranese tra preistoria e protostoria. Censimento e attualizzazione dello status quo delle grotte aventi tracce di frequentazione poste nel territorio di Toirano (SV)*	ottobre 2020	7-41
• GIUSEPPE BORZIELLO - *I siti mesolitici ai laghi del Colbricon nella catena dei Lagorai (Trentino orientale)*	ottobre 2020	43-67
• DIEGO ANGELUCCI, FRANCESCO CARRER - *Alpes - Un progetto di ricerca archeologica sulla pastorizia delle Terre Alte della Val di Sole*	aprile 2021	51-65
• ALFREDO NICASTRI - *La chiesa fortezza del Monte Bastiglia. Un insediamento medievale per il controllo e la difesa del territorio di Salerno*	aprile 2021	81-103
• DARIO SIGARI, ANGELO E. FOSSATI - *I cervidi nelle rocce - Primi risultati del progetto di ricerca sulle raffigurazioni dei cervidi nell'arte rupestre della Valcamonica*	ottobre 2021	25-41
• ANNA LOSI, MONICA MIARI - *Monte Sassoso - Un insediamento fortificato a controllo della valle del fiume Secchia*	ottobre 2021	75-83
• ANNA LOSI, MONICA MIARI - *Monte Sassoso - La seconda campagna di ricerca*	aprile 2022	81-91
• GIANCARLO SANI - *Le incisioni rupestri del Monte Prato Fiorito - Val di Lima - Toscana*	aprile 2022	103-121
• GIANCARLO SANI - *Le rocce dei Pennati - Sulle tracce delle rocce sacre dei Liguri Apuani sulle Alpi Apuane*	aprile 2023	93-105
• ENRICO CROCE, DIEGO E. ANGELUCCI, JACOPO ARMELLINI, FEDERICO CONFORTINI, FRANCESCO DORDONI, CHIARA ROSSI, DIEGO VENEZIANO, LAURA VEZZONI, STEFANIA CASINI - *Archeologia di montagna alle sorgenti del Brembo*	aprile 2023	11-29
• RACHELE DISCOSTI, STEFANO BERTOLA, CECILIA MILANTONI, MICHELANGELO MONTI, LORENZO URBINI, ROMINA PIRRAGLIA, MARCO PERESANI - *Il sito mesolitico di Comignolo sull'Appennino romagnolo - Ricerche, studi e prospettive di valorizzazione*	ottobre 2023	67-75
• ANNA LOSI, MONICA MIARI - *Primi sondaggi di verifica archeologica a Cà Bertacchi - Regnano (RE)*	ottobre 2023	77-87
• GIANCARLO SANI, GIULIANO CERVI - *Le rocce di Lulseto - Situate nell'Appennino reggiano, sono ciò che probabilmente rimane di un antico luogo di culto legato alla venerazione delle rocce*	aprile 2024	109-121
• ANNA LOSI, MONICA MIARI - *Nuove ricerche nella chiesa medievale di Cà Bertacchi di Regnano - Appennino reggiano*	ottobre 2024	53-67
• DAVIDE DELPINO, MARCO PERESANI, FABIO BONA - *Le "grotte a orso" alpine - Archivi paleoecologici e luoghi di frequentazione sporadica nel Paleolitico*	aprile 2026	61-69

CAMBIAMENTI CLIMATICI

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• CLAUDIO SMIRAGLIA, DAVIDE FUGAZZA, GUGLIELMINA DIOLAIUTI - *Continua inarrestabile il regresso dei ghiacciai italiani e alpini. Le evidenze dei recenti catasti*	aprile 2021	7-21
• GIOVANNA BARBIERI - *Monitoraggio botanico di alcune specie target, possibili indicatrici di cambiamento climatico, al Monte Cimone. Report del primo anno del progetto*	aprile 2021	23-29
• GIOVANNA BARBIERI - *Monitoraggio climatico e atmosferico presso C.A.M.M. (Centro Aeronautica Militare di Montagna) di Monte Cimone. Sintesi della relazione tenuta dal Ten. Col. Antonio Vocino il 27 giugno 2020 al Giardino Botanico Esperia*	aprile 2021	31-37
• PAOLO BONASONI, LUCA FREZZINI, SILVIO DAVOLIO,GUIDO NIGRELLI, PAOLO VINCENZO FILETTO, GIAN PIETRO VERZA - *Rifugi montani sentinelle del clima e dell'ambiente - Un progetto CAI-CNR che si estende dalle Alpi al Mediterraneo*	aprile 2022	9-17
• GUIDO NIGRELLI, MARTA CHIARLE - *Temperature in aumento nell'ambiente periglaciale alpino - Evoluzione nel periodo 1990-2020*	aprile 2022	45-51
• MARIO GOBBI, ROBERTO AMBROSINI, CHRISTIAN CASAROTTO, GUGLIELMINA DIOLAIUTI, GENTILE FRANCESCO FICETOLA, VALERIA LENCIONI, ROBERTO SEPPI, CLAUDIO SMIRAGLIA, DUCCIO TAMPUCCI, BARBARA VALLE, MARCO CACCIANIGA - *Ghiacciai in estinzione e crisi della biodiversità*	aprile 2022	53-65
• GIOVANNA BARBIERI - *Monitoraggio botanico di alcune specie target, possibili indicatrici di cambiamento climatico, al Monte Cimone. Report del secondo anno del progetto*	ottobre 2022	59-75
• GIOVANNA BARBIERI, EDOARDO PINOTTI - *Monitoraggio botanico di alcune specie target, possibili indicatrici di cambiamento climatico, nell'area Groppo Rosso - Valle Tribolata - Ciapa Liscia - Appennino settentrionale (piacentino-genovese). Report del primo anno del progetto*	ottobre 2022	77-83
• GIOVANNA BARBIERI - *Monitoraggio botanico di alcune specie target, possibili indicatrici di cambiamento climatico, al Monte Cimone. Report del terzo anno del progetto con focus sul Geranium argenteum*	aprile 2023	45-61
• CLAUDIO SMIRAGLIA, GIANNI MORTARA - *Cambiamenti climatici e cambiamenti degli itinerari in alta montagna. Un'introduzione al tema*	ottobre 2023	11-27
• GUIDO NIGRELLI, MARTA CHIARLE - *Il periodo climatologico normale 1991-2020 sulle Alpi - Un focus sull'ambiente di alta quota*	aprile 2024	11-21
• GIOVANNA BARBIERI, ELISA MARINO - *Cambiamenti climatici e piante officinali - Il caso della coltivazione della salvia comune (Salvia officinalis) e della lavanda vera (Lavandula angustifolia) al Giardino Botanico Esperia - Rifugio Sentinella del clima e dell'ambiente*	aprile 2024	59-65
• GIOVANNA BARBIERI, EDOARDO PINOTTI - *Monitoraggi botanici in Appennino settentrionale - Nell'ambito del progetto Rifugio Sentinella del clima e dell'ambiente con riferimento alle aree dell'Osservatorio CNR "O.Vittori" e del Rifugio Esperia*	aprile 2024	49-57
• GIOVANNI MARGHERITINI, GIOVANNA BARBIERI, MARCELLO BORRONE, GUIDO NIGRELLI, LUIGI MAZARI, LUCIANO MASSETTI, PAOLO BONASONI, ANGELA MARINONI - *Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente - Report dei primi cinque anni di attività*	aprile 2025	11-29

• GIULIANO BONANOMI, ADRIANO STINCA, ALFREDO NICASTRI, DIEGO ERRICO, BEATRICE BIGU, IVAN CIANO, FRANCESCA BELLUCCI - *Rilievi botanici, faunistici e inquinamento luminoso - Primi studi presso il Rifugio Cervati - Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente*	aprile 2025	39-57
• GIULIANO BONANOMI, MARA GHERARDELLI, SABRINA SPIGNO, MOHAMED IDBELLA - *Cambiamenti climatici e sport invernali: quale futuro in Appennino?*	aprile 2025	69-79
• CLAUDIO SMIRAGLIA, ANTONELLA SENESE, MICHELE DI BIASE, ROBERTO AMBROSINI, ROBERTO SERGIO AZZONI, DANIELE BOCCHIOLA, GIUSEPPE COLA, MASSIMO FAVARON, DAVIDE FUGAZZA, DANIELA MARZANO, STEFANO MOROSINI, LUCA PEDROTTI, GIOVANNI PRANDI, RICCARDO SCOTTI, ANDREA TOFFALETTI, MICHELE ZUCALI, MANUELA PELFINI, GUGLELMINA ADELE DIOLAIUTI - *Sentieri effimeri: gli itinerari glaciologici fra scienza e divulgazione* - DOI: 10.82056/cai.2025.10_01	ottobre 2025	25-43
• VANESSA BIANCHI - *Variazioni della vegetazione di pascolo nelle Alpi Marittime in un contesto di cambiamento climatico - Un monitoraggio ventennale (2003-2024)*	ottobre 2025	45-55
• VANESSA BIANCHI - *Changes in pasture vegetation in the Maritime Alps in a scenario of climate change - A 20-year monitoring (2003-2024)* - DOI: 10.82056/cai.2025.10.02	ottobre 2025	57-67
• GIOVANNI MARGHERITINI, GIOVANNA BARBIERI, CLAUDIO BIONDI, MARCELLO BORRONE, GUIDO NIGRELLI, ERICA MATTA, LUIGI MAZARI, LUCIANO MASSETTI, FRANCESCO MENEGUZZO, PAOLO BONASONI, ANGELA MARINONI - *Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente - Report dei primi sei anni di attività* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_09	aprile 2026	11-35
• GIOVANNA BARBIERI - *Monte Cimone - Sei anni di monitoraggi botanici nell'ambito del progetto Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente* https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_01	aprile 2026	37-49
• CLASUDIO SMIRAGLIA, DAVIDE FUGAZZA, MICHELE DI BIASE, PIETRO SELLA, GUGLIELMINA DIOLAIUTI - *L'evoluzione del Ghiacciaio Baltoro al K2 fra "Karakoram Anomaly" e "Surge" - Il contributo della fotografia diacronica e del telerilevamento* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_01	ottobre 2026	11-35
• MASSIMO SANTONI, FRANCESCA VALLONGO, CRISTIAN FERRARI - *I ghiacciai visti dallo spazio - Sviluppi e prospettive dell'approccio integrato della Commissione Geologica della SAT tra telerilevamento e rilievi sul campo* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_02	ottobre 2026	37-47
• ANDREA SECURO, RENATO COLUCCI - *Il declino dei ghiacciai nelle Dolomiti dagli anni '80 a oggi* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_03	ottobre 2026	49-57
• ANDREA FERRARI, GIOVANNI CILIA, MATTEO CONTI, CARLO POLIDORI, GIANALBERTO LOSAPIO - *Quando i ghiacciai si ritirano - Conseguenze per la biodiversità degli impollinatori, le reti trofiche e i patogeni delle api* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_04	ottobre 2026	59-71

FAUNA

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• LUCA PELLICIOLI - *Stambecchi (Capra ibex) sulle Alpi Orobie - Esperienza di Citizen Science nel triennio 2017-2019*	aprile 2021	39-49
• MATTIA BRAMBILLA, DAVIDE SRIDEL, PAOLO PEDRINI - *Quale futuro per il fringuello alpino Montifrigilla nivalis sulle Alpi italiane?*	ottobre 2021	17-23
• ALBERTO TARRONI, FABRIZIO FABBRI, GIOVANNA BARBIERI - *Biodiversità in ambienti in quota - Analisi della comunità macrozoobentonica del laghetto del Giardino Esperia (Passo del Lupo - Sestola - MO)*	ottobre 2022	111-137
• ANTONIO GELATI - *Avvelenamento da piombo in fenicotteri rosa (Phoenicopterus roseus) rinvenuti nel Parco Regionale Veneto del Delta del Po*	aprile 2023	31-37
• ANTONIO GELATI, MAURIZIO FERRARESI - *Radioattività e conservazione dell'Ambiente*	ottobre 2023	61-65
• ANTONIO GELATI - *Come gli uccelli si proteggono dal freddo - Strategie, adattamenti posturali e anatomici per superare l'inverno*	aprile 2024	77-83
• BENEDETTA ORSINI - *Il Camoscio più bello del mondo - Uomo e natura uniti da una storia di conservazione grazie alla quale, ancora oggi, è possibile ammirare camosci appenninici arrampicarsi sulle rocce e sui pendii innevati - Rupicapra pyrenaica ornata*	aprile 2024	85-97
• FABIO VETTOTRI, ALESSANDRO DE GUELMI - *L'anno dell'orso in Trentino*	ottobre 2024	11-19
• IVAN BORRONI - *La diversità ecologica nelle acque interne. Principali aspetti fisici e biologici*	ottobre 2024	31-43
• LUCA PELLICIOLI - *Conosciamo lo "scalatore" delle Alpi. Il camoscio alpino*	ottobre 2024	45-51
• ROBERTO BERTOLANI, FEDERICA FRIGIERI, ROBERTO GUIDETTI - *I tardigradi della lettiera di faggio - Primi studi presso il Rifugio Esperia - Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente*	aprile 2025	59-67
• GIUSEPPE DI FAZIO - *Il fiume Tronto: un corridoio ecologico (in)visibile - Studio di un tratto fluviale per la scoperta ecologica tramite fototrappole* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_04	aprile 2026	87-103
• ENRICO RIPA, LOREDANA DI GIACOMO - *I chirotteri dei Sibillini - Due endemismi da tutelare*	aprile 2026	105-115

GEOLOGIA

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• MARIA TERESA CASTALDI - *Insediamento estrattivo di lapis specularis nel Parco della Vena del Gesso romagnola in epoca romana*	ottobre 2020	69-113
• GIULIANO CERVI - *Rapporto tra costruito storico e assetto geomorfologico lungo il sentiero appenninico dei Ducati*	ottobre 2020	115-123
• LORENZA CAVINATO - *Val Imperina nel Parco Nazionale delle Dolomiti Bellunesi*	ottobre 2020	125-142
• ROSALDA PUNTURO, ROSANNA MANISCALCO, GIOVANNI CASSARINO - *La pietra pece di Ragusa, una roccia semplice che ha fatto molta strada*	ottobre 2021	55-73
• DOMENICO ARINGOLI, PIERLUIGI FERRACUTI, PIETRO PAOLO PIERANTONI, DOMENICO PISTONESI, ANGELO ROMAGNOLI - *Sorgenti e fonti d'alta quota del Parco Nazionale dei Monti Sibillini*	ottobre 2021	117-135
• MARCO BASTOGI - *Glacialismo nelle Alpi Apuane e nell'Appennino settentrionale - Le testimonianze*	ottobre 2022	85-101
• SONIA ZANELLA, ANDREA BAUCON, ENRICO COLLO, MICHELE PIAZZA - *La forma è sostanza - Scelte didattiche per l'aggiornamento degli ONC del CSR LPV*	ottobre 2022	103-109
• VALENTINA ALICE BRACCHI - *Pinna nobilis del torrente Stirone - Un archivio paleoclimatico e paleoambientale ancora inesplorato*	ottpbre 2023	29-37
• FRANCESCO MARTELLI - *Le acque carsiche - Caratteristiche, utilizzo e rischi di inquinamento*	ottobre 2023	39-59
• MARCO BASTOGI - *Le palestre di roccia in Toscana - Una opportunità per svelare la geodiversità di una regione contraddistinta da un ricco patrimonio geologico*	ottobre 2023	99-139
• TIZIANO ABBÀ, ERIK UNTERPERTINGER - *Aspetti geologici del Col Quaternà in Comelico - Un percorso geologico nel Permiano superiore*	aprile 2024	67-75
• CIRO CERRONE - *Il surface uplift Quaternario dell'Appennino meridionale: stato dell'arte e risultati preliminari*	aprile 2024	77-85
• FRANCESCO MANTELLI - *Le acque in montagna e nelle aree remote - Linee generali per l'utilizzo a scopo potabile* - DOI: 10.82056/cai.2025.10_0	ottobre 2025	57-85
• LAURA GRASSI, SOFIA FARINA - *Citizen Science, monitoraggio delle acque di fusione e dimensione emotiva del cambiamento climatico sul ghiacciaio del Prè de Bar (Val Ferret, Valle d'Aosta)* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_03	aprile 2026	71-77
• MARCO BASTOGI - *Massi erratici - Elementi del paesaggio glaciale precursori dello studio dei ghiacciai*	aprile 2026	79-85

PAESAGGIO

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• GIULIANO CERVI - *Il paesaggio italiano - Il ruolo del Club Alpino Italiano nell'affermarsi in Italia del concetto di paesaggio, dai primordi dello Stato unitario all'articolo 9 della Costituzione*	aprile 2021	67-71
• ENZO GUZZONI - *Sentinelle di crinale - I termini di confine, serie 1828, fra Ducato di Parma e Granducato di Toscana*	ottobre 2021	43-53
• CARLO NATALI - *Territori di carta - Indicazioni di metodo per l'interpretazione dei luoghi*	ottobre 2021	93-115
• CARLO NATALI - *Centri storici e montagna toscana*	ottobre 2022	31-57
• ROBERTA PINI - *Fuoco, foreste e uomini: le trasformazioni del paesaggio cominciano nella Preistoria*	ottobre 2021	85-91
• ROBERTO DINI, CRISTIAN DALLERE, MATTEO TEMPESTINI - *Rigenerazione e riuso del patrimonio costruito alpino - Esperienze didattiche in Valdigne*	aprile 2022	67-79
• PIERO DONATI - *Il censimento delle maestà in Lunigiana*	aprile 2022	93-101
• LUCIANO MASETTI, FRANCESCO MENEGUZZO - *Il cielo naturale notturno*	aprile 2022	123-129
• MARIA CONTE - *V come Vajont, V come Vallesella - Risonanze di paesaggi lungo la Piave, tra hybris idraulica e resistenze*	ottobre 2022	19-29
• ENZO GUZZONI - *Sentinelle di crinale, alla ricerca di antiche testimonianze - I termini di confine, serie 1823 - Tra Ducato di Parma e lo Stato Sardo*	ottobre 2023	89-97
• ENZO GUZZONI, VALERIA ORLANDINI - *Viaggio lungo il confine fra il Ducato di Parma e lo Stato Sardo. Ricerche di antiche testimonianze (seconda parte)*	ottobre 2024	69-79
• MARIA TERESA CASTALDI, MARINA LO CONTE, MASSIMO ERCOLANI, LORIS GARELLI - *Censimento e georeferenziazione delle trincee lungo la Linea Gotica nella Vena del Gesso romagnolo*	aprile 2025	81-91
• MILENA MERLO PICH, GIULIANO CERVI, FURIO FINOCCHIARO, MARCO PERESANI, RACHELE DISCOSTII, MATTEO DE LORENZI, VINCENZO ABBATE, GABRIELE BORGHETTI, IVAN BORRONI, GIUSEPPE BORZIELLO, GIOIA BOSSI, MARCO CABBAI, MARIA TERESA CASTALDI, SONIA GLERA, MARCO MENICHETTI, ALFREDO NICASTRI, CARLO NATALI, SANDRO TRIPEDI, VALENTINA OLIVERI, SONIA ZANELLA, FRANCESCO RIGA, PAOLO MONTANARO, ALESSIO PICCIOLI, PIERO CARLESI - *Il progetto di Citizen Science del Comitato Scientifico Centrale su aspetti naturalistici, culturali e antropologici di alcune tappe del Sentiero Italia CAI - Primi risultati del progetto pilota e proposte per il futuro*	ottobre 2025	11-23
• ENZO GUZZONI, VALERIA ORLANDINI - *Viaggio lungo il confine tra il Ducato di Parma e lo Stato Sardo - Ricerca di antiche testimonianze (parte terza)*	ottobre 2025	87-97
• BENEDETTA ORSINI - *L'Appennino dell'osso e l'Italia della polpa - Riabilitare le aree interne per riscoprire l'identità paesaggistica dell'Appennino, un patrimonio da proteggere e vivere come casa e comunità* - *https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_06*	aprile 2026	141-149
• FRANCESCO VIGNERI - *Lo spopolamento delle aree montane interne dell'Appennino - Inesorabile declino o nuove possibilità?* - *https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_07*	aprile 2026	151-157
• TIZIANA BIANCHI - *Terre Alte dell'Appennino centrale: economia e tradizioni tra luci e ombre - Quale sopravvivenza? La voce dei piccoli paesi del basso Lazio* *https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_08*	aprile 2026	159-169

VEGETAZIONE

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• FEDERICA ZABINI, FRANCESCO MENEGUZZO - *Terapia Forestale: efficace per la salute umana ma a certe condizioni. Ricerca congiunta CNR, CAI, CERFIT per il riconoscimento della Terapia Forestale quale medicina complementare*	aprile 2021	73-79
• ANDREA PIOTTI, CAMILLA AVANZI - *Alla scoperta delle abetine dell'Appennino Tosco-Emiliano*	aprile 2022	21-31
• GIULIANO BONANOMI - *Il limite superiore del bosco in Appennino*	aprile 2022	33-43
• ANNA CORLI, RITA BARALDI, LUISA NERI - *I composti organici volatili biogenici e i loro effetti sulla salute umana durante i percorsi di Terapia Forestale*	aprile 2023	39-43
• FULVIO DUCCI - *Gli antichi rifugi glaciali degli alberi forestali nell'Appennino settentrionale*	aprile 2023	63-91
• GIULIANO BONANOMI, EMILIA ALLEVATO, GIANDOMENICO AMOROSO, FRANCESCA BELLUCCI, ALFREDO NICASTI, MOHAMED IDBELLA - *Ricostruzione della storia della vegetazione di alta quota del Monte Cervati, del Gran Sasso e di Campo Imperatore mediante analisi pedoantracologica e del DNA antico - Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente*	aprile 2024	23-35
• DEBORA BAROLIN, GUIDO TEPPA - *La vegetazione del bacino glaciale della Bessanese - Contributo alla conoscenza della colonizzazione vegetale di un'area glaciale nelle Alpi Graie - Rifugio Gastaldi - Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente*	aprile 2024	37-47
• GIOVANNA BARBIERI - *Linum capitatum* subsp. *serralatum - Specie di interesse conservazionistico - Monitoraggi presso i Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente*	ottobre 2024	21-29
• ERICA MATTA, GUIDO NIGRELLI - *Rilievi fenologici presso il Rifugio Gastaldi - Estate 2024 - Rifugi Sentinella del clima e dell'ambiente*	aprile 2025	31-37
• CIRO GARDI, ANDREA BATTISTI - *Nuove minacce per le foreste europee e italiane - Parassiti prioritari e non solo* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_02	aprile 2026	51-59
• FRANCESCA MARCUCCI - *La vegetazione d'alta quota del massiccio della Maiella - Biodiversità, endemismi, adattamenti altitudinali* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.04_05	aprile 2026	117-139

INTERESSE GENERALE

Autori e titolo	Bollettino	pagine
• GIULIANO CERVI - *I 90 anni del Comitato Scientifico Centrale - Un lungo cammino tra passato e futuro all'insegna dell'etica delle montagne e delle nuove sfide nelle Terre Alte*	ottobre 2021	9-10
• MAURO VAROTTO **-** *Dall'Excelsior al Paulo Infra - Trent'Anni del Gruppo Terre Alte*	ottobre 2021	11-13
• GIOVANNI MARGHERITINI - *La questione "Terapia Forestale" all'interno del CAI*	ottobre 2022	9-15
• MARCO BASTOGI - *Un inno per il Club Alpino Italiano - Avvenimenti otto-centeschi connessi all'opportunità, per gli alpinisti riuniti a convegno, di potersi distinguere con un proprio tema canoro*	aprile 2025	93-103
• MARCO BASTOGI - *Gli albori del Club Alpino Italiano e della Società Geologica nell'Italia post unitaria dell'Ottocento*	aprile 2025	105-113
• ANNA BALDO - *Sulle tracce del nuovo Artico - Ricerca italiana alla base "Dirigibile Italia", Ny Ålesund, Svalbard* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_05	ottobre 2026	73-85
• ROBERTA BOSU - *Chi parla per l'Antartide? - Connessioni planetarie, diritti della natura e una nuova idea di diplomazia -(testo in italiano e in inglese a seguire - text in Italian and English to follow)* - https://doi.org/10.82056/cai.2026.10_06	ottobre 2026	87-97



ISBN 978-88-7982-180-3