CLUB ALPINO ITALIANO

IL BOLLETTINO

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE

PERIODICO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

OTTOBRE 2026

CLUB ALPINO ITALIANO

IL BOLLETTINO

COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE

PERIODICO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

OTTOBRE 2026

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

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*

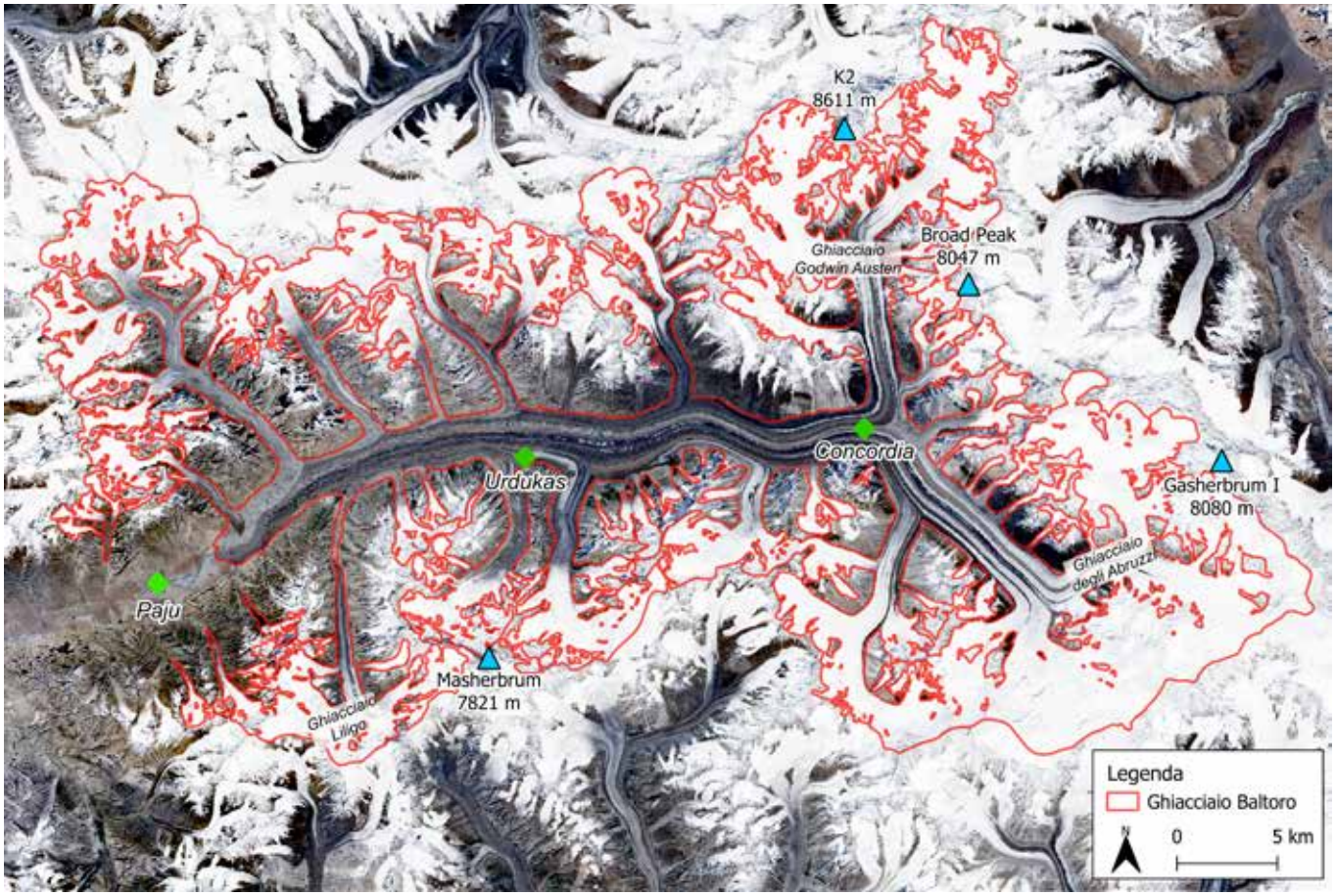


Figura 1 - Il Ghiacciaio Baltoro. Immagine satellitare del 30 agosto 2023, Sentinel 2 - elaborazione di M. Di Biase

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

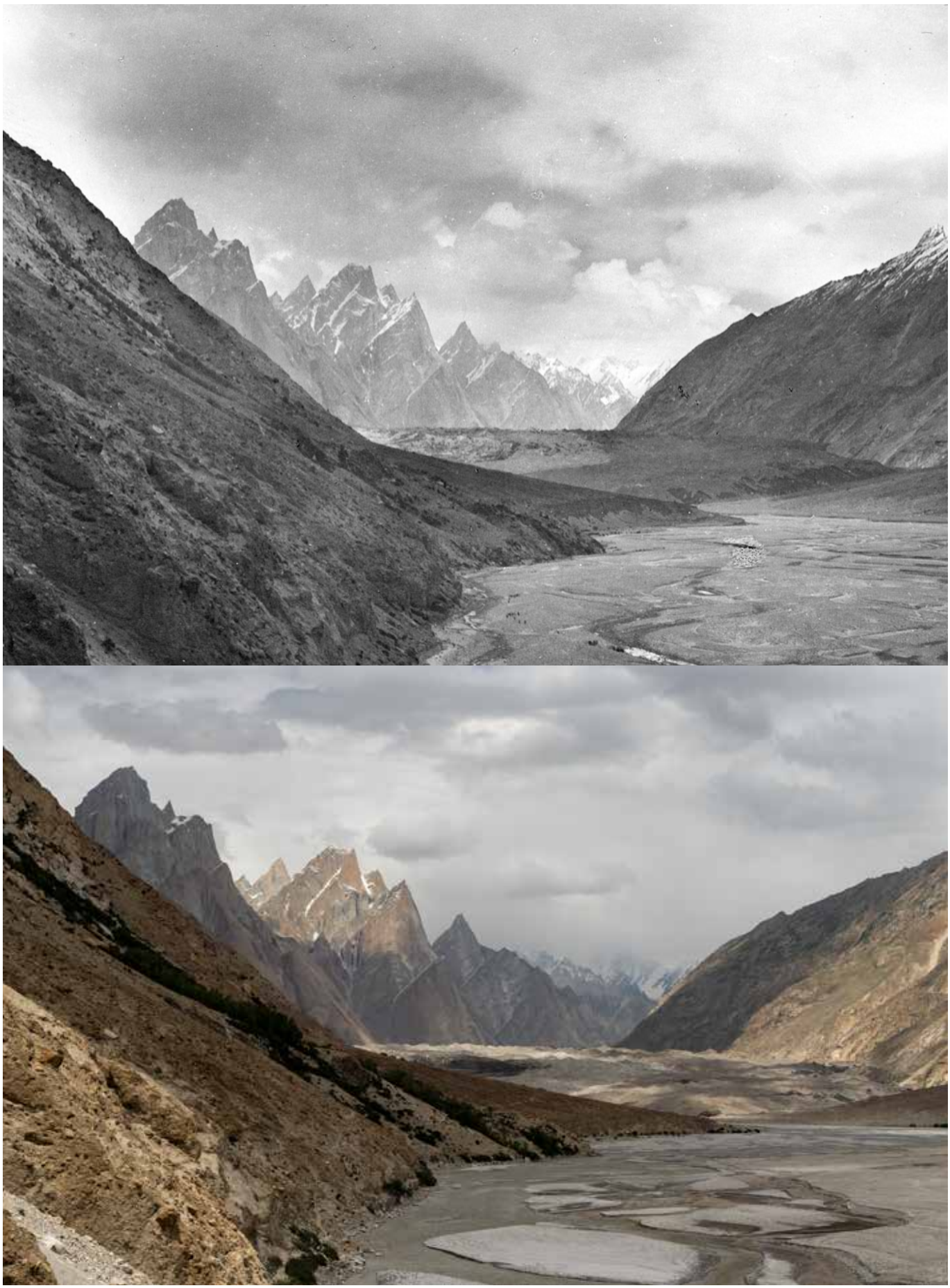


Figura 3 - La fronte del Ghiacciaio Baltoro ripresa poco a valle di Paju nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella) e nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) (coordinate N35.660203° E76.103286°). Si osservi la stabilità del limite frontale, accompagnata da una sensibile riduzione dello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

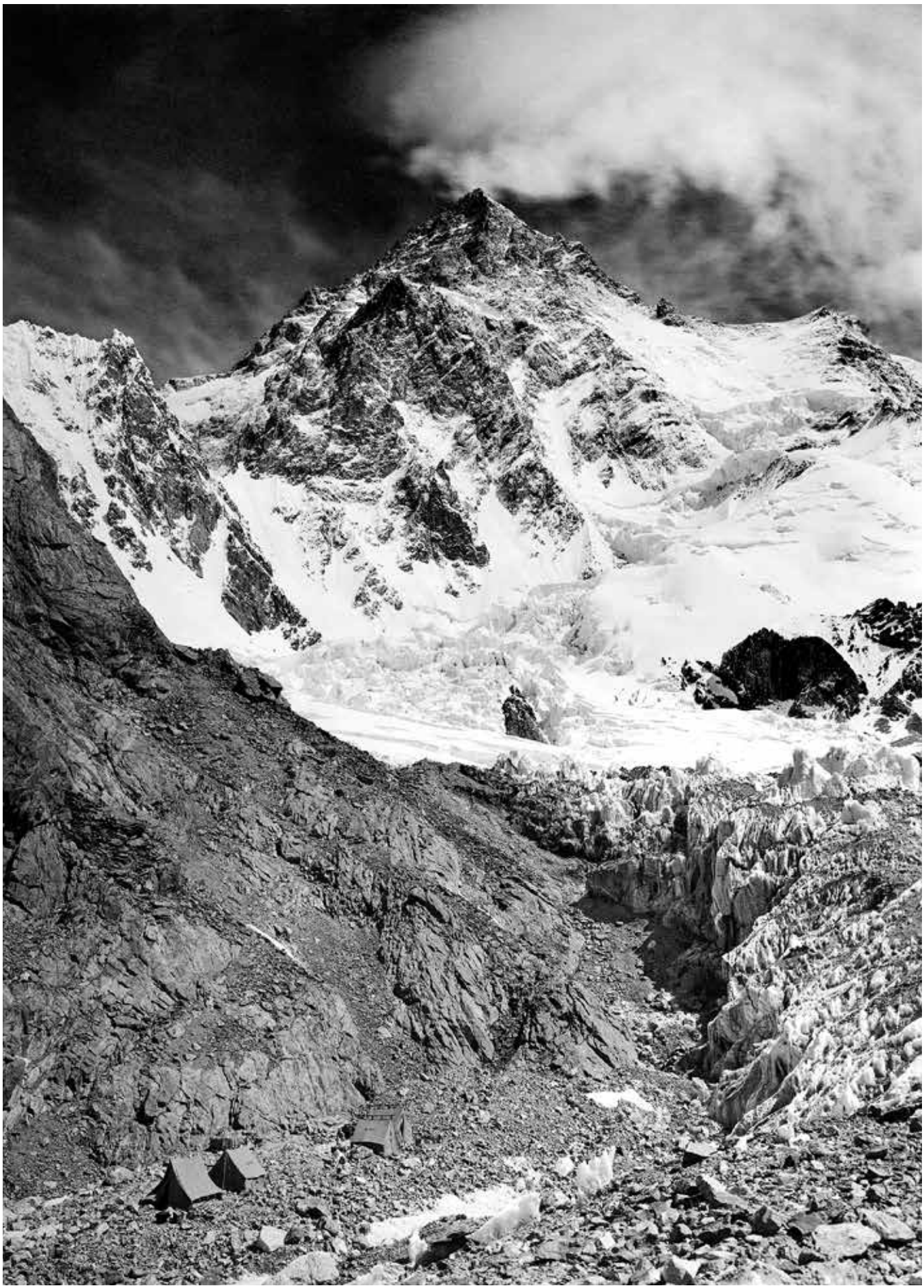


Figura 6 - La parete Sud del K2 nei pressi del campo base di Vittorio Sella nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella)

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

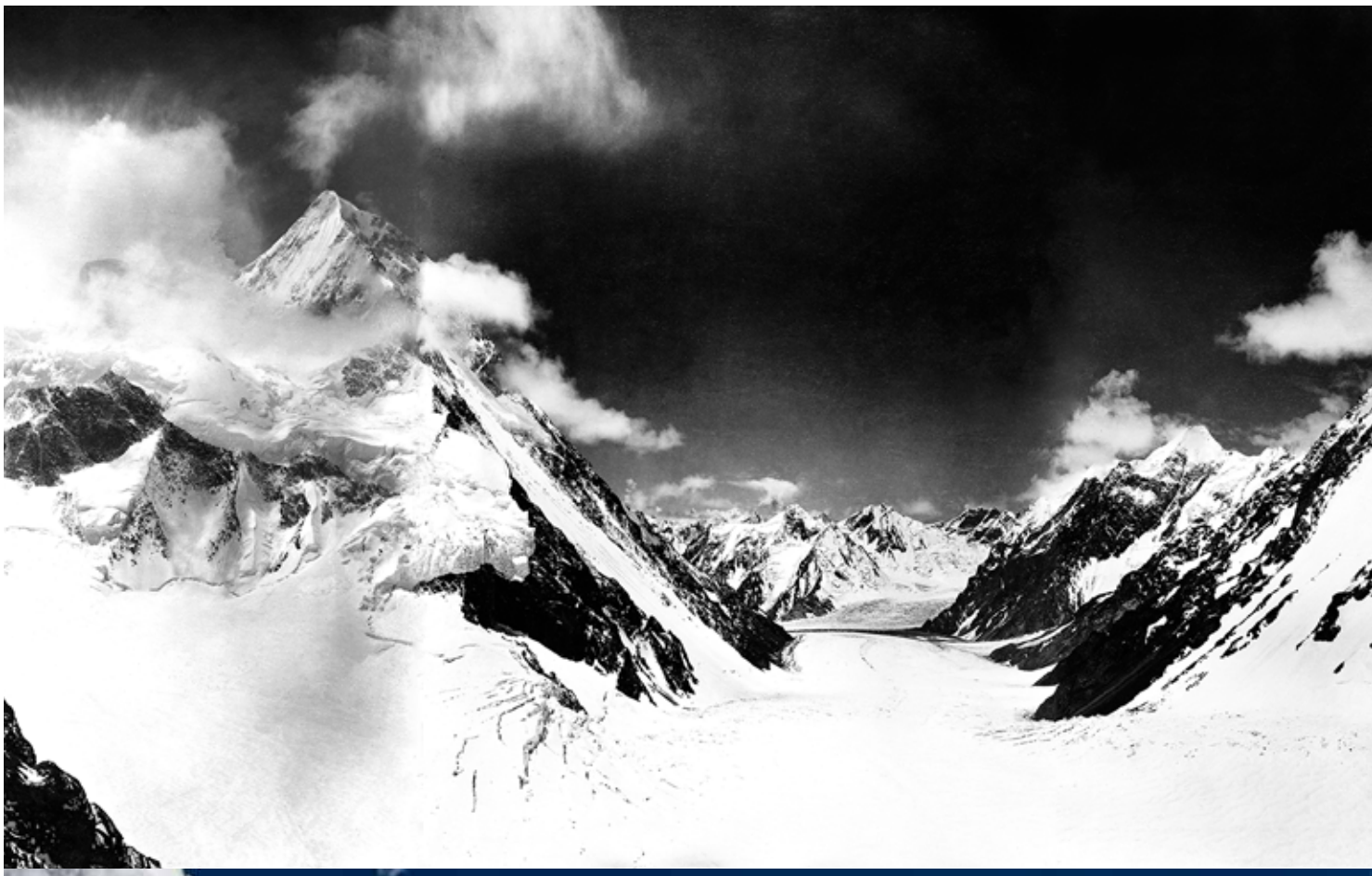
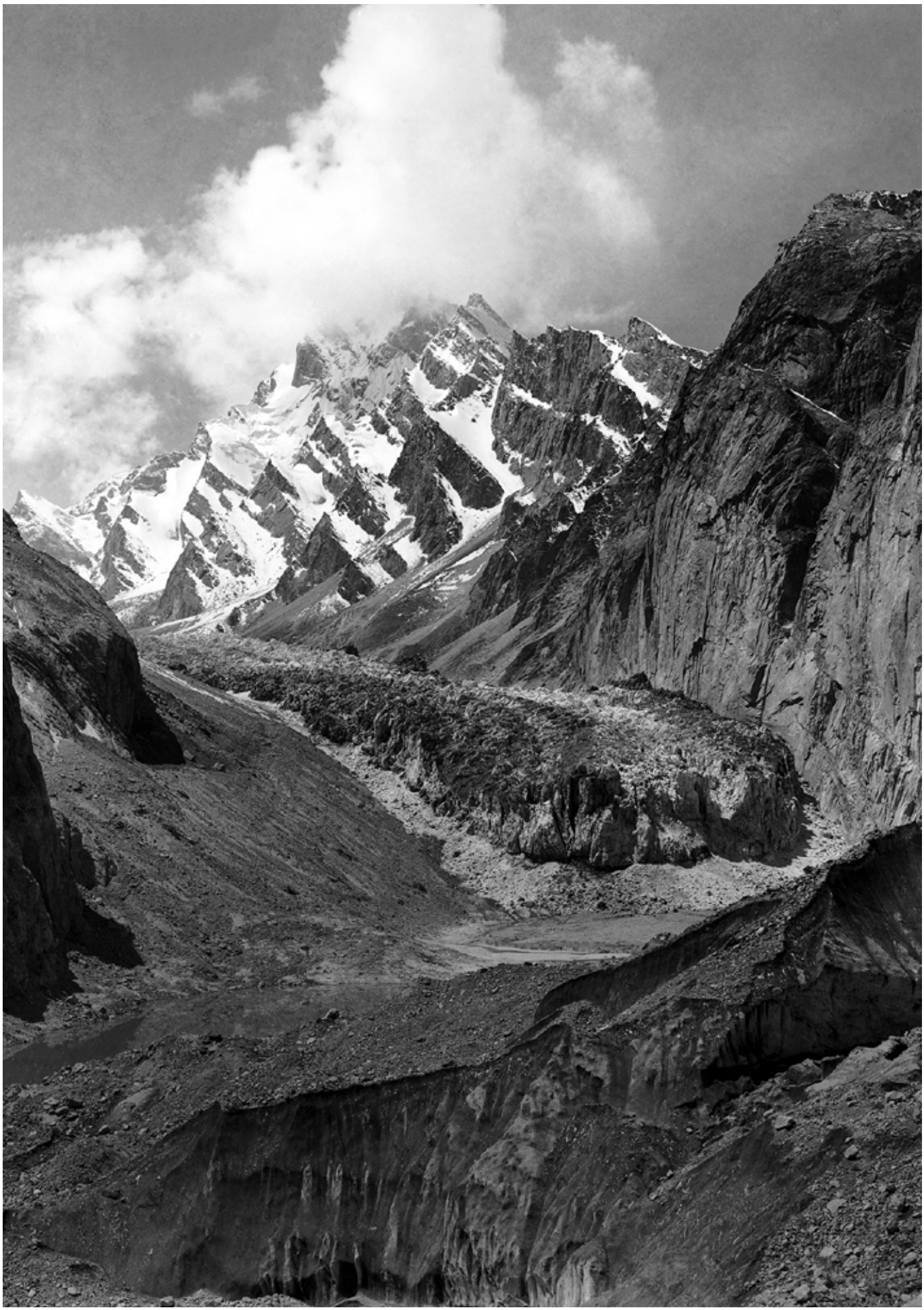


Figura 7 - Le cime del Broad Peak a sinistra (pag. 22) e del K2 a destra (pag. 23), riprese dal bacino superiore del Ghiacciaio Godwin Austen nel 1909 (ph V. Sella 1909 - © Fondazione Sella) e nel 2024 (ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) - (coordinate N35.868563° E76.564345°). Sulla parete Est del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



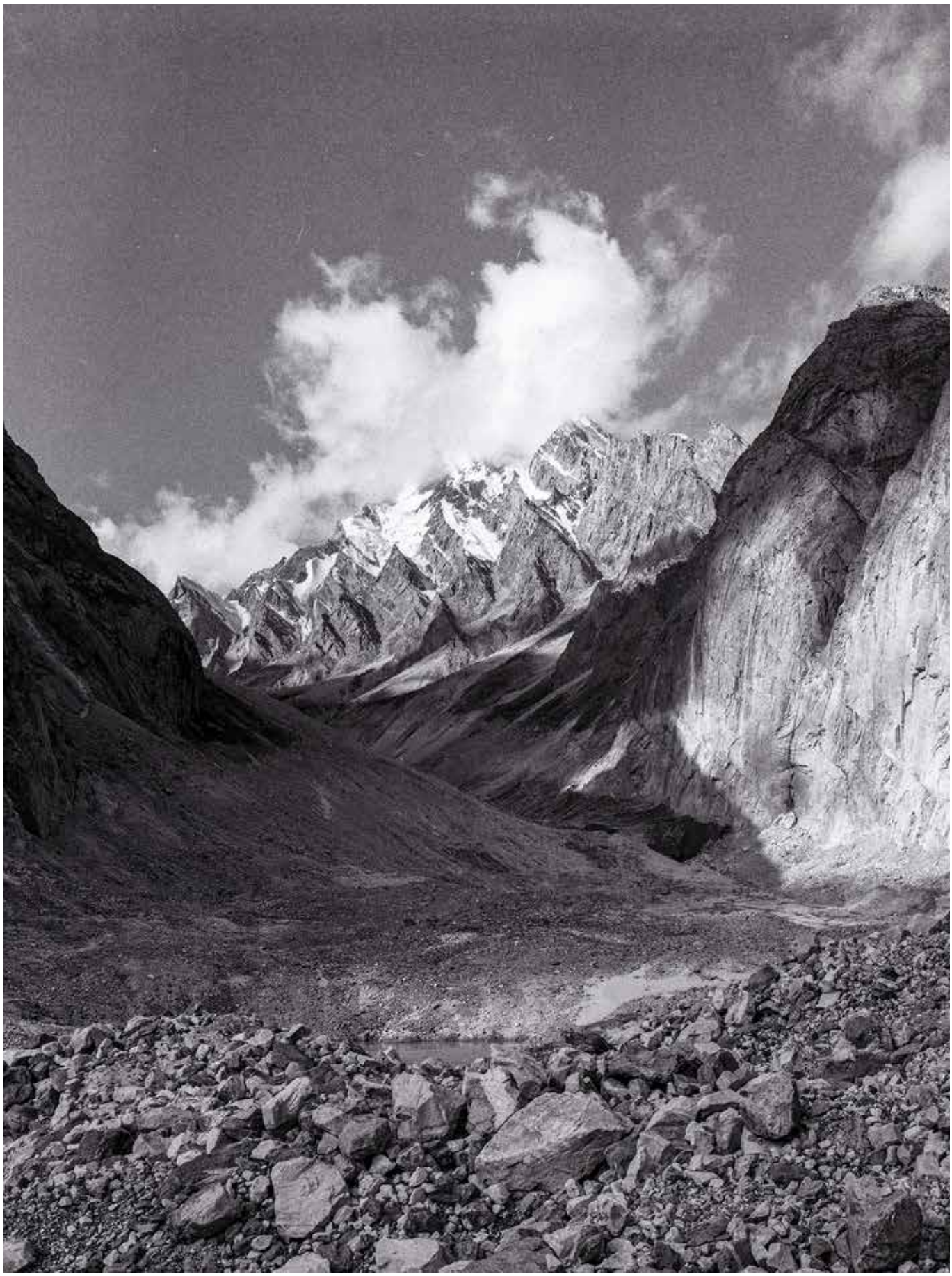


Figure 8 e 8/1 - Il Ghiacciaio Liligo visto dal Baltoro nel 1909 (a sinistra, pag. 24 - ph Vittorio Sella - © Fondazione Sella) e nel 2024 (a destra, pag. 25- ph P. Sella 2024 - © Fondazione Sella) - (coordinate N35.716846° E76.230857°). Nella foto storica la lingua si presenta rigonfia e crepacciata, 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

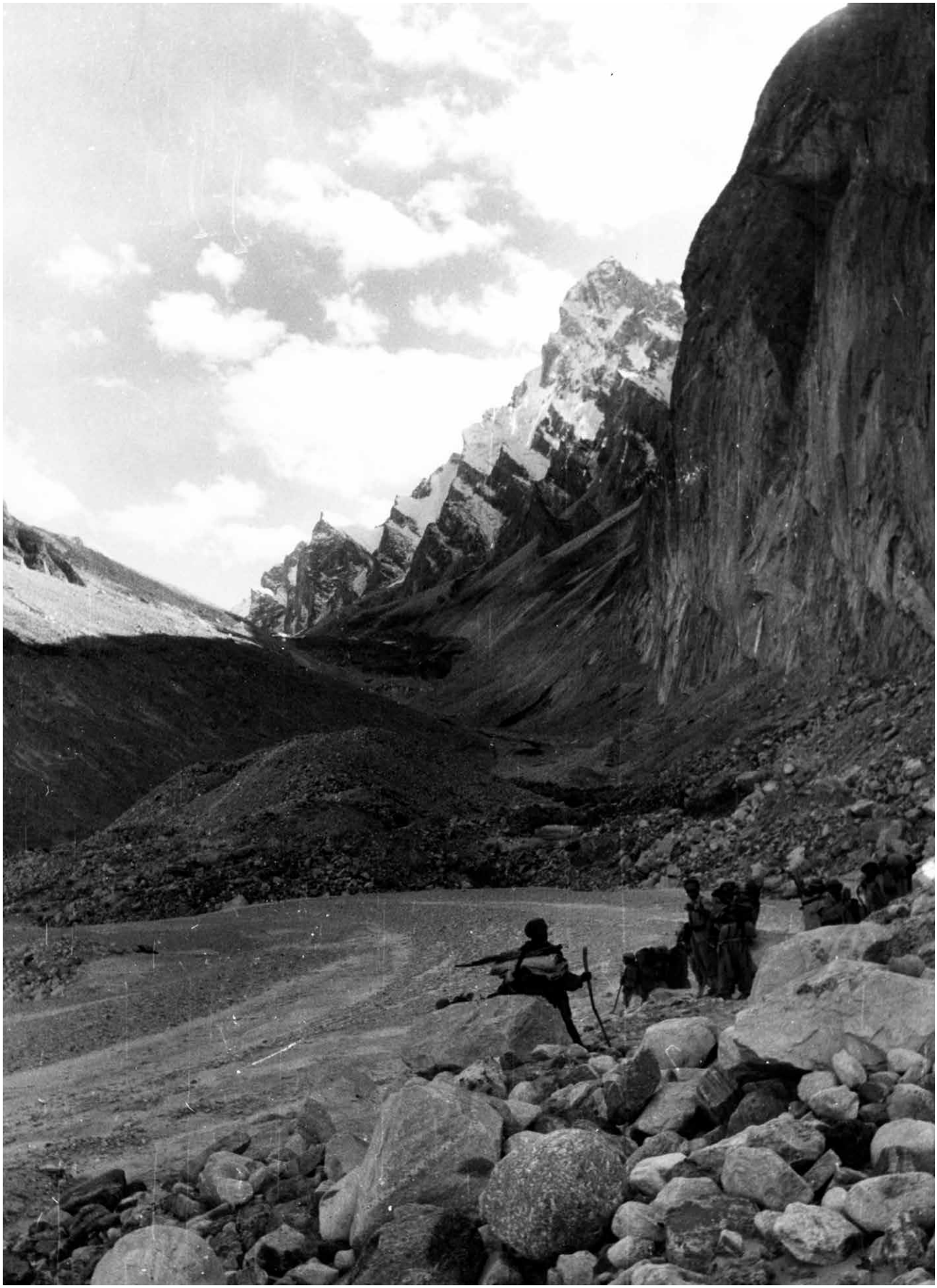


Figura 9 - Il Ghiacciaio Liligo nel 1953 visto dal Baltoro. La lingua, difficilmente individuabile, si è ridotta di lunghezza e di spessore, creando una situazione simile a quella che il ghiacciaio assumerà nel 2024 - (ph A. Desio 1953 – Archivio Fondazione Glaciologica Italiana)

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

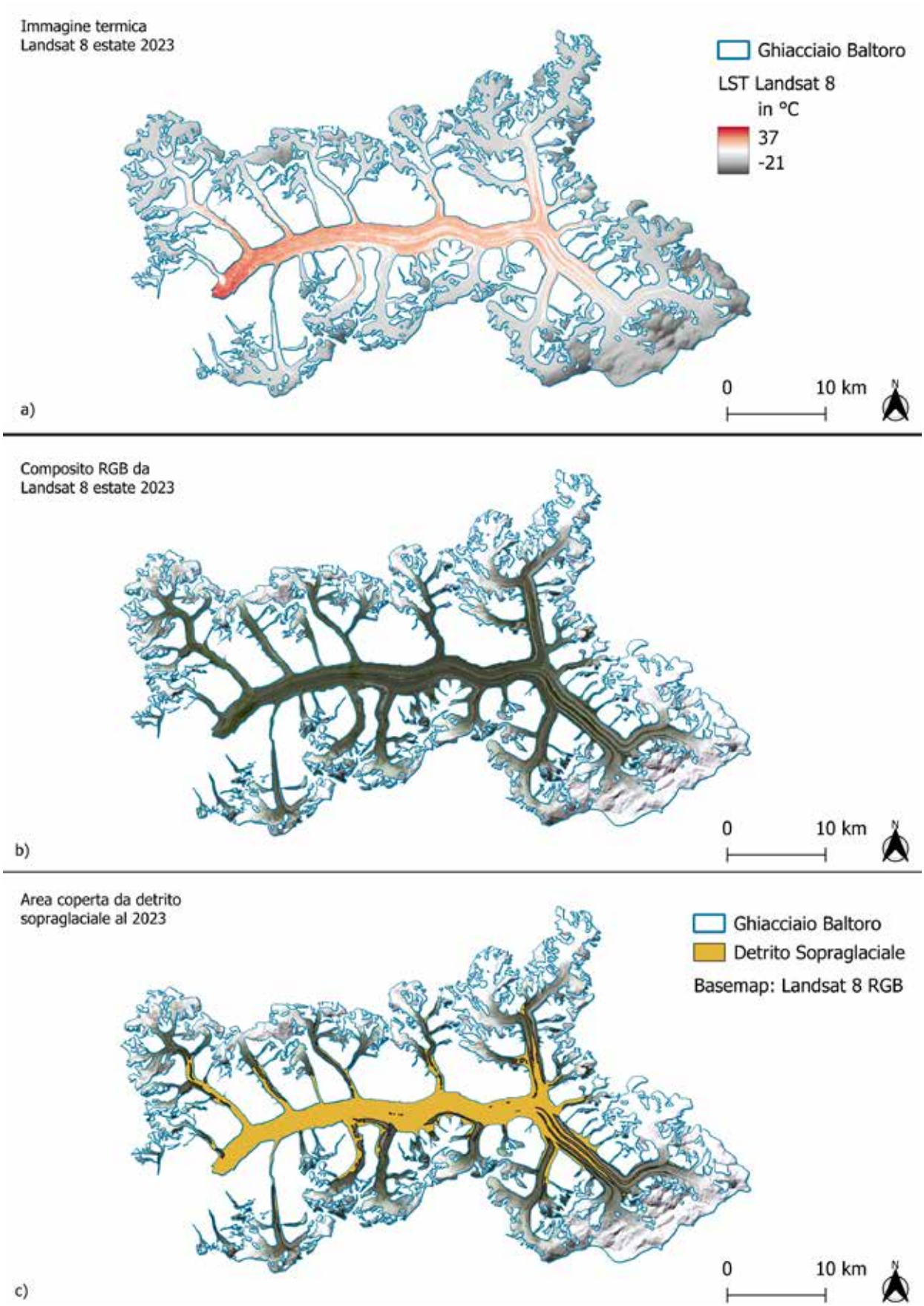


Figura 13 - La copertura detritica sopraglaciale del Baltoro: a) carta della temperatura superficiale ottenuta come composito medio delle immagini Landsat 8 disponibili durante l'estate 2023; b) immagine RGB ottenuta dalle stesse immagini Landsat 8; considerando che un'immagine multispettrale contiene 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, l 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) - *Interdecadal 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/