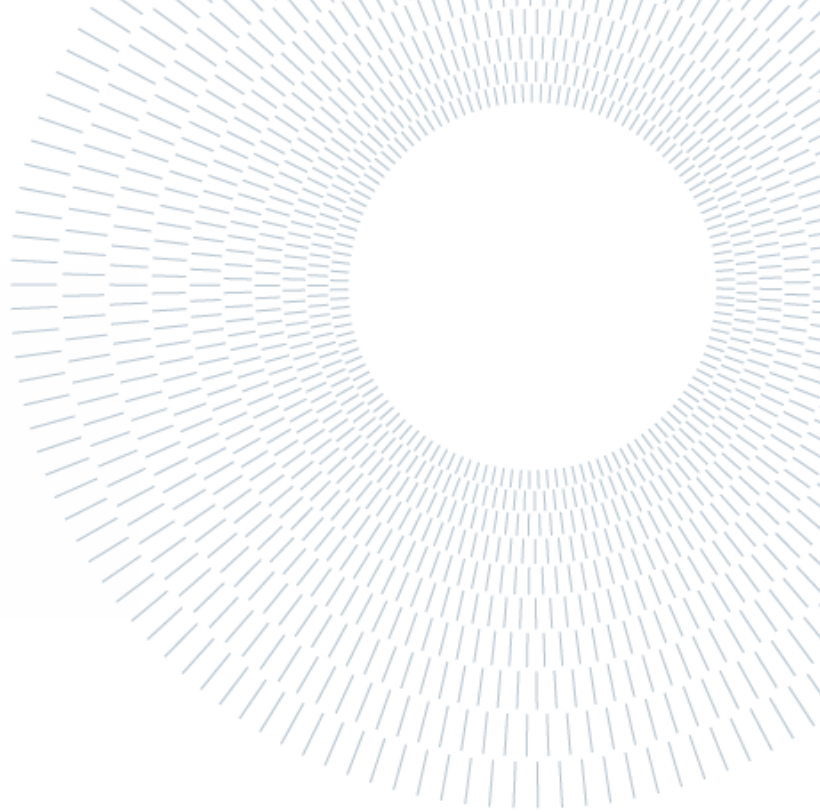




POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE,
AMBIENTALE E TERRITORIALE



Analisi fotogrammetrica con immagini satellitari dell'evoluzione del Ghiacciaio del Belvedere (2009-2023) e impatto della colata detritica dell'agosto 2023

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO -
ENVIRONMENTAL AND LAND PLANNING ENGINEERING

Autore: Luca Cerina

Matricola: 225330

Relatore: Prof. Ing. Livio Pinto

Correlatore: Ing. Francesco Ioli

Anno accademico: 2023-2024

Abstract

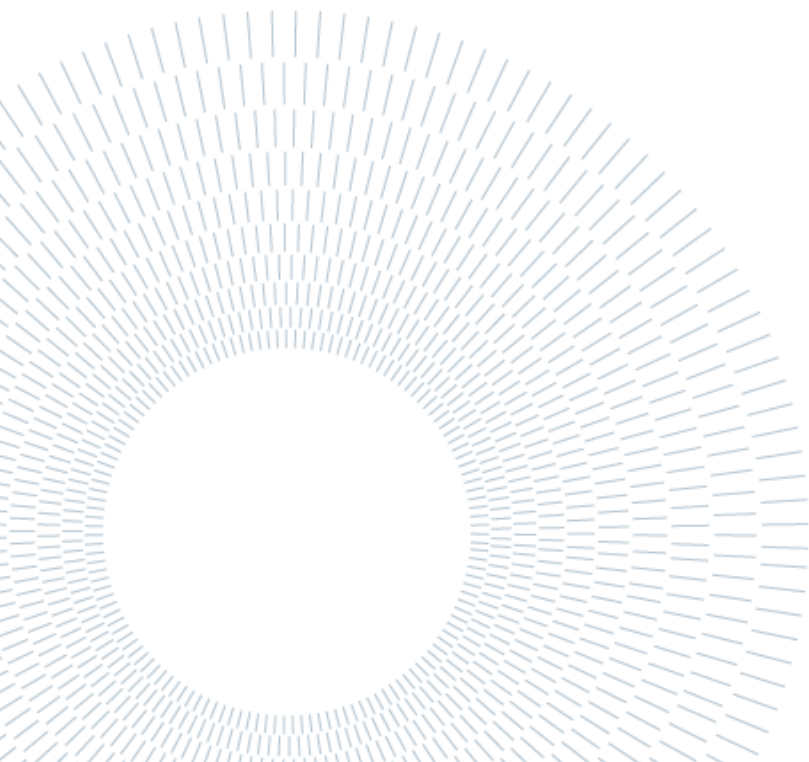
Lo studio presenta un'analisi fotogrammetrica dettagliata dell'evoluzione del Ghiacciaio del Belvedere nei periodi compresi tra il 2009 e il 2017 e tra il 2017 e il 2023, con particolare attenzione all'impatto della colata detritica generata da un evento alluvionale del 27 agosto 2023. Utilizzando immagini satellitari ad alta risoluzione Pléiades e Pléiades Neo, sono stati generati le nuvole di punti e i Modelli Digitali di Elevazione (DEM) che hanno permesso di quantificare le variazioni altimetriche e volumetriche del ghiacciaio e di analizzare in dettaglio le modifiche morfologiche indotte dalla colata detritica. I risultati evidenziano un significativo ritiro glaciale negli ultimi anni, con una perdita annua di $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ tra il 2009 e il 2017 aumentando a $2,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ tra il 2017 e il 2023. La colata detritica ha causato significative alterazioni morfologiche del ghiacciaio, con la formazione di due zone di accumulo sulla lingua occidentale e lo sviluppo di due solchi erosivi profondi circa 4-5 metri, dovuti al nuovo percorso del Torrente Castelfranco scavato direttamente sulla superficie glaciale. I risultati ottenuti confermano le tendenze osservate in altri studi sul Belvedere e sui ghiacciai alpini, evidenziando l'importanza e i vantaggi del monitoraggio satellitare per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici e degli eventi estremi sui ghiacciai.

Parole chiave: Ghiacciaio del Belvedere, Fotogrammetria, Immagini satellitari, Nuvola di punti, DEM, Colata detritica.

Abstract (English)

This study provides a detailed photogrammetric analysis of the Belvedere Glacier's evolution between 2009 and 2017, and between 2017 and 2023, with particular focus on the impact of the debris flow generated by a flood event on August 27, 2023. Using very high-resolution Pléiades and Pléiades Neo satellite imagery, point clouds and Digital Elevation Models (DEMs) were generated, allowing for the quantification of altimetric and volumetric changes in the glacier and the detailed analysis of morphological modifications induced by the debris flow. The results highlight a significant glacial retreat in recent years, with an annual loss of $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ between 2009 and 2017, increasing to $2,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ between 2017 and 2023. The debris flow caused significant morphological alterations to the glacier, with the formation of two accumulation zones on the western tongue and the development of two erosive gullies approximately 4-5 meters deep, due to the new path of the Castelfranco Torrent carved directly onto the glacial surface. The results obtained confirm the trends observed in other studies on the Belvedere and Alpine glaciers, highlighting the importance and advantages of satellite monitoring for assessing the impact of climate change and extreme events on glaciers.

Key-words: Belvedere Glacier, Photogrammetry, Satellite imagery, Point cloud, DEM, Debris flow.



Indice dei contenuti

Abstract	i
Abstract (English)	iii
Introduzione	1
1 I Ghiacciai	3
1.1. Cos'è un ghiacciaio?	3
1.2. Il ruolo dei ghiacciai e l'importanza del monitoraggio	3
1.3. Il Ghiacciaio del Belvedere	5
1.3.1. Inquadramento geografico	5
1.4. Storia dell'evoluzione del Ghiacciaio del Belvedere	6
1.5. Il versante Castelfranco e la sua vulnerabilità.....	10
2 Stato dell'arte	13
2.1. Tecniche di monitoraggio dei ghiacciai.....	13
2.1.1. Metodi tradizionali	13
2.1.2. Immagini aeree storiche.....	13
2.1.3. Droni.....	14
2.1.4. Satelliti ottici	16
2.1.5. Satelliti radar	17
2.1.6. Camere automatiche.....	18
2.1.7. TLS	18
2.2. Stereoscopia e fotogrammetria da satellite	19
2.3. Flusso di lavoro per la mappatura 3D con dati satellitari	21
2.3.1. Ottimizzazione del modello.....	21
2.3.2. Generazione del modello digitale di superficie (DSM).....	21
2.3.3. Generazione del modello digitale del terreno (DTM).....	23
2.3.4. Orto-rettificazione e mosaicatura	23
3 Generazione modello 3D del 2017	25
3.1. Costellazione Pléiades.....	25
3.2. Data processing.....	28
3.2.1. Pansharpening	28
3.2.2. Importazione delle immagini e dei Ground Control Points (GCP)	29
3.2.3. Orientamento e restituzione.....	31
3.2.4. Prodotti fotogrammetrici.....	34

4	Generazione modello 3D del 2023	36
4.1.	Costellazione Pléiades Neo	36
4.2.	Data processing.....	37
4.2.1.	Prodotti fotogrammetrici.....	41
5	Validazione dei DEM	43
5.1.	Modello del 2017.....	44
5.2.	Modello del 2023.....	45
6	Comparazione dei DEM	47
6.1.	Differenze altimetriche e volumetriche	48
6.2.	Sezioni	51
7	Analisi della colata detritica del 2023	56
7.1.	Introduzione	56
7.2.	Metodologia.....	57
7.3.	Analisi dei risultati	60
8	Discussioni	68
9	Conclusioni e sviluppi futuri	72
	Bibliografia	76
	Indice delle Figure	82
	Indice delle Tabelle	85

Introduzione

Il telerilevamento è una tecnica di acquisizione dell'informazione, qualitativa o quantitativa, di un oggetto, senza entrare in contatto diretto con quest'ultimo. Questa peculiarità lo rende una disciplina chiave in materia di monitoraggio ambientale, in particolare dei ghiacciai. I sensori di acquisizione, situati su piattaforme aeree, droni o satelliti, permettono di acquisire immagini attraverso la registrazione di energia elettromagnetica riflessa o emessa dall'oggetto. Esempi di applicazioni nel campo del telerilevamento sono, per esempio, la modellazione di città, la valutazione delle foreste e la stima della biomassa, la classificazione della copertura e dell'uso del suolo, il bilancio del carbonio, il monitoraggio dei terreni agricoli, l'osservazione dei ghiacciai e la mappatura in generale. Tra le diverse applicazioni del telerilevamento, un ruolo di particolare importanza riveste la fotogrammetria. Questa tecnica, a partire da un numero sufficiente di immagini acquisite tramite telerilevamento, è in grado di generare un modello tridimensionale dell'oggetto. Tale modello geometrico permette di effettuare misure quantitative precise, aprendo la strada a diverse analisi e applicazioni. Negli ultimi anni, l'innovazione tecnologica ha portato un significativo sviluppo della fotogrammetria, con un crescente impiego di piattaforme satellitari e, in particolare l'utilizzo di stereocoppie. Con questo termine si intendono due immagini della stessa area acquisite simultaneamente o quasi, da posizioni leggermente diverse. Questa tecnica riproduce la visione binoculare umana e consente la percezione della profondità.

Il presente elaborato, partendo dall'utilizzo di stereocoppie satellitari, si propone di monitorare l'evoluzione del Ghiacciaio del Belvedere, quantificandone le variazioni tra due periodi principali: 2009 - 2017 e 2017 - 2023. Tale ghiacciaio si sviluppa sul versante orientale del Monte Rosa, nel comune di Macugnaga (VCO) in Piemonte, Italia.

Inizialmente l'elaborato offrirà una panoramica generale sul ruolo dei ghiacciai all'interno dell'ecosistema montano, consentendo di capire l'importanza del loro monitoraggio. In seguito, al fine di fornire un quadro storico completo e interpretare al meglio i cambiamenti recenti, il Capitolo 2 sarà dedicato all'analisi della letteratura scientifica sul Ghiacciaio del Belvedere. Inoltre, fornirà un dettaglio sulle principali tecniche di telerilevamento e di fotogrammetria attualmente in uso. Il capitolo

successivo descriverà la generazione dei modelli tridimensionali del ghiacciaio per i due periodi oggetto di studio (2017 e 2023), con la produzione di diversi prodotti fotogrammetrici, quali nuvole di punti, modelli digitali di elevazione (DEM) e ortomosaici. Successivamente i modelli saranno validati ed infine comparati, in modo da ottenere risultati quantitativi, sia in termini di variazioni altimetriche sia volumetriche. In conclusione, si analizzeranno gli effetti provocati dalla colata detritica durante l'evento alluvionale del 27 agosto 2023, che ha interessato parte della lingua occidentale del ghiacciaio. Per lo svolgimento di queste analisi sono stati utilizzati i software Agisoft Metashape, Cloud Compare e QGIS.

1 I Ghiacciai

1.1. Cos'è un ghiacciaio?

I ghiacciai sono masse di ghiaccio originatesi per metamorfismo di accumuli nevosi che hanno resistito a più periodi di fusione (estati), che contengono inclusioni di gas (bolle d'aria), sostanze organiche (pollini) e detriti rocciosi (morene) e che dalla zona d'alimentazione dove l'accumulo è eccedente defluiscono sino alla zona di fusione (o di ablazione), dove fondono (*Kappenberger & Locarno-Monti, 2006*). Sono per definizione dei sistemi in movimento, in cui l'equilibrio tra gli afflussi nevosi e i deflussi idrici è vitale per l'esistenza stessa del ghiacciaio. Attraverso il bilancio glaciale è possibile capire lo stato di salute del ghiacciaio. Afflussi maggiori rispetto ai deflussi determinano un bilancio positivo, il volume aumenta e la lingua procede verso valle, fino ad incontrare temperature per le quali fonde. Quando invece i deflussi superano gli afflussi, il ghiacciaio perde massa, e la lingua si ritrae verso monte, risultando in un bilancio negativo (*Walser & Comitato Glaciologico Italiano, 1991*).

Bacino di accumulo e di ablazione sono separati dalla linea di equilibrio (ELA), punto sul ghiacciaio dove il bilancio annuale è nullo. L'estensione del bacino di accumulo è un parametro fondamentale per la glaciologia; grazie al suo confronto con il bacino di ablazione si può determinare se un ghiacciaio è in fase di crescita, stasi o ritiro. La letteratura fornisce un valore compreso tra 0,6 e 0,7 come rapporto tra l'area di ablazione e quella totale affinché il ghiacciaio possa mantenersi in equilibrio (*Casarotto, 2010*).

1.2. Il ruolo dei ghiacciai e l'importanza del monitoraggio

I ghiacciai svolgono un ruolo cruciale negli ecosistemi montani e non solo. Essi influenzano il flusso dei corsi d'acqua, alimentano laghi e fiumi, e costituiscono una risorsa vitale per molte comunità umane e naturali. Tuttavia, il cambiamento climatico

rappresenta una seria minaccia per la loro esistenza, con conseguenze dirette su molti ecosistemi basati sull'apporto idrico garantito dai ghiacciai.

Il fenomeno del ritiro dei ghiacciai, alimentato dall'aumento delle temperature globali causato dalle emissioni di gas serra, è diventato una vera e propria crisi globale. Secondo l'AR6 Synthesis Report: Climate Change dell'IPCC (2023) l'influenza umana è stata molto probabilmente il principale motore di questo ritiro a partire dagli anni '90.

Una delle conseguenze dirette del riscaldamento globale è l'aumento della temperatura delle acque. Ciò comporta un aumento della densità delle stesse, risultando in un innalzamento del livello medio dei mari. Questo fenomeno è ulteriormente aggravato dall'accelerazione dello scioglimento dei ghiacciai. Nel corso degli ultimi decenni, grazie ad acquisizioni satellitari, sono stati svolti molti studi in cui vengono mostrati alti valori di perdita di massa glaciale (*Hugonnet et al., 2021*). Analisi sul bilancio di massa dei ghiacciai (*Meier et al., 2007; Kaser et al., 2006*) hanno permesso di stimare il loro contributo all'innalzamento del livello del mare, in particolare dal 1993, il fenomeno ha contribuito per circa il 21% all'innalzamento globale del livello del mare (*WCRP, 2018*), evidenziando la loro importanza in questo contesto.

Tuttavia, l'impatto dello scioglimento dei ghiacciai va ben oltre l'innalzamento del livello del mare. Essi svolgono diverse funzioni cruciali per l'ambiente, che vengono alterate da questo fenomeno:

- **Risorsa idrica:** i ghiacciai garantiscono un flusso costante di acqua durante tutto l'anno e svolgono il fondamentale ruolo di riserva idrica, soprattutto nei periodi di siccità. Un esempio rilevante è rappresentato dal fiume Indo, e dal suo enorme bacino idrografico, di circa 1.165.000 km². In questa area l'acqua proveniente dai ghiacciai himalayani è essenziale per l'agricoltura e per il sostentamento di milioni di persone. Oltre il 60% di quest'acqua viene utilizzata per l'irrigazione nella stagione secca (*Biemans et al., 2019*).
- **Ciclo dell'acqua e sedimenti:** il ciclo dell'acqua in montagna, un tempo stabile, è ora profondamente alterato a causa delle mutate temperature, e dalla riduzione delle nevicate invernali, che impatta negativamente sull'intero ecosistema montano (*Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019*). L'accelerato scioglimento dei ghiacciai comporta un aumento dell'erosione (sia chimica che fisica) delle rocce e la variazione nel trasporto di sedimenti, influenzando l'apporto di nutrienti nei fiumi (*Santofimia et al., 2017*). Il sedimento è fondamentale per la

qualità e la disponibilità dell'acqua, ma può anche essere un contaminante, causando torbidità e danni agli habitat.

- Energia idroelettrica: la produzione di energia idroelettrica, spesso concentrata in aree montane grazie alla morfologia del territorio, dipende strettamente dal flusso idrico proveniente dai ghiacciai. L'incertezza nella quantità di acqua disponibile a causa dello scioglimento può portare a sovrapproduzione o a crisi nella fornitura di energia comportando disagi nella fornitura di elettricità. Un esempio rilevante è rappresentato dalla Columbia Britannica, dove l'energia idroelettrica dipende in gran parte dall'acqua di fusione dei ghiacciai ed è responsabile di quasi il 90% dell'elettricità della provincia (Clason et al., 2022).

Di fronte a queste problematiche, il monitoraggio dei ghiacciai assume un'importanza cruciale. Solo attraverso un'analisi continua e precisa delle loro variazioni è possibile comprendere appieno gli impatti del cambiamento climatico, prevederne gli sviluppi futuri e adottare misure di mitigazione e adattamento efficaci. Possibili strategie a breve termine secondo Verre (2023), sono rappresentate dalla creazione di numerose stupe di ghiaccio. Queste sono di fatto dei ghiacciai artificiali. La tecnica permette di immagazzinare l'acqua di fusione proveniente dai nevai nel periodo invernale sotto forma di ghiaccio a forma conica. Durante la stagione estiva le stupe si sciolgono in maniera naturale e provvedono all'approvvigionamento idrico per le comunità a valle. Tuttavia, la soluzione a medio-lungo termine risiede nella rivoluzione nel modo in cui viene prodotta l'energia: abbandonare le fonti inquinanti e accelerare la transizione verso un sistema basato su energie pulite e rinnovabili (solare, eolico, idroelettrico, geotermico), allo scopo di far abbassare nel tempo le temperature. Inoltre, per contrastare la ridotta affluenza di acqua proveniente dai ghiacciai è fondamentale promuovere un uso più efficiente delle risorse idriche a valle, ad esempio con colture che richiedono una limitata quantità d'acqua e tecniche irrigue che generano minimi sprechi d'acqua (Verre, 2023).

1.3. Il Ghiacciaio del Belvedere

1.3.1. Inquadramento geografico

Protagonista di questo studio è il Ghiacciaio del Belvedere, un ghiacciaio alpino che domina il versante orientale del Monterosa. Inserito nel paesaggio di Macugnaga (VCO), il ghiacciaio confluisce nella Valle Anzasca, una valle alpina percorsa dal fiume Anza, affluente del Toce. Il Belvedere viene alimentato dai soprastanti ghiacciai della

Nordend, del Monte Rosa e del Signal. La sua superficie, di circa 1,8 km² si estende da un'altitudine di 2250 m fino a raggiungere i 1800 m circa dove si divide formando due lingue glaciali. Il ghiacciaio è quasi interamente coperto da materiale detritico, caratteristica che gli attribuisce, per definizione, l'aggettivo di "nero" (Fig. 1). Questa particolarità permette allo stesso di ritirarsi più lentamente rispetto ad un normale ghiacciaio (Benn & Evans, 2010); è infatti uno dei pochi ghiacciai che si trova nella fascia dei 2000 metri.



Figura 1: Veduta d'insieme della lingua valliva bilobata del Ghiacciaio del Belvedere (1° settembre 2014, f. Andrea Tamburini)

1.4. Storia dell'evoluzione del Ghiacciaio del Belvedere

Al fine di comprendere lo stato attuale del ghiacciaio è necessario conoscere i cambiamenti subiti dallo stesso nel corso degli anni passati. A questo scopo, il seguente capitolo presenterà la storia dell'evoluzione del Ghiacciaio del Belvedere, grazie alle testimonianze passate e alle indagini in situ e fotogrammetriche che sono state effettuate nel corso del tempo.

Le prime testimonianze che si hanno sul ghiacciaio risalgono alla fine del XVIII secolo da De Saussure (1779-1796) e Amoretti (1824). Essi riferirono, in modo qualitativo,

delle enormi dimensioni del ghiacciaio. Un'ulteriore informazione qualitativa, ma di notevole importanza, sul ghiacciaio è fornita da glaciologo Umberto Monterin che nel 1923 riporta una nota di viaggio relativa a un'escursione del luglio 1820 sulla Punta Zumstein. In essa, Monterin specifica l'estensione verso est del ghiacciaio di Macugnaga, delineandone in modo approssimativo, ma sostanzialmente corretto, l'orientamento. Successive missioni scientifiche, promosse dal Comitato Glaciologico Italiano, furono condotte da alcuni glaciologi, tra i quali Porro e Somigliana nel 1917, per rilevare rigorosamente (aspetti glaciologici e topografici) il Belvedere. A quel tempo furono eseguiti anche rilievi fotogrammetrici terrestri. Monterin fin dal 1826 monitorò il ghiacciaio per un lungo periodo durante il quale evidenziò l'elevata dinamicità del ghiacciaio, ed in particolare nel 1922 il ghiacciaio raggiunse la sua massima estensione e comparve una terza lingua. (*Monterin, 1922*).

Durante l'Anno Geofisico Internazionale (luglio 1957 - dicembre 1958) furono promosse numerose indagini sul ghiacciaio. Per la prima volta fu effettuato un rilievo aerofotogrammetrico (*E.I.R.A., 1961*) e fu prodotta una mappa in scala 1:5000 mediante stereo restituzione.

Tra il 1957 e il 1991 il ghiacciaio ha visto un aumento del proprio volume pari a $22,6 \times 10^6 \text{ m}^3$, questo valore include lo spessore del detrito superficiale, la cui misurazione nell'estate del 2000 ha fornito un valore di 15 cm. L'aumento di spessore è attribuito a bilanci di massa positivi, derivanti dall'incremento delle nevicate annuali tra l'inizio degli anni '70 e la metà degli anni '80 e da una riduzione delle temperature estive tra il 1953 e il 1977, registrata da numerose stazioni meteorologiche in Piemonte e Valle d'Aosta (*Diolaiuti et al., 2003*).

Negli anni '70 la tendenza alla crescita intermittente del ghiacciaio indusse un forte rigonfiamento della superficie glaciale e, in alcuni punti, portò la lingua del ghiacciaio a superare morene storiche e a distruggere giovani formazioni boschive. In questi anni i problemi legati a inondazioni, valanghe e colate detritiche diventarono più marcati, fino a quando, nel 1979, la tracimazione del Lago delle Locce, un lago di sbarramento glaciale alla confluenza del Ghiacciaio delle Locce (tributario) con il Ghiacciaio del Belvedere, causò ingenti danni e rese necessari studi del sito e interventi di costruzione per la protezione dalle inondazioni (*Haerberli et al., 2002*).

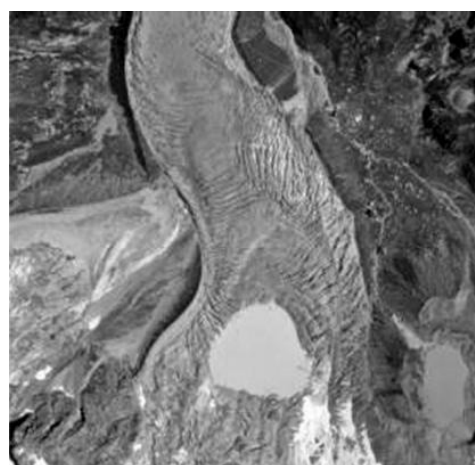
Dopo la metà degli anni '80, la riduzione delle precipitazioni e il contemporaneo aumento delle temperature hanno portato a bilanci di massa molto negativi per i ghiacciai puliti, con marcati arretramenti delle fronti, e a bilanci di massa stabili o meno

negativi per i ghiacciai detritici, con conseguenti lievi arretramenti delle fronti (Diolaiuti *et al.*, 2003).

Nel periodo successivo, tra il 1991 e il 2001, il ghiacciaio ha incrementato la sua dinamicità sia in frequenza temporale che in estensione, in particolare si è osservato un significativo accumulo di volume nella parte centrale del ghiacciaio (da +0,72 a +1,06 × 10⁶ m³/anno), parzialmente compensato da una diminuzione alle quote superiori (Da Gaetani *et al.* 2021). Verso la fine degli anni '90 la parete orientale del Monte Rosa è stata soggetta a rilevanti trasformazioni morfologiche per il ripetersi di crolli di roccia e ghiaccio: il conseguente e anomalo apporto di materiale ha determinato un aumento della velocità di flusso e uno straordinario incremento volumetrico della lingua valliva. Questa forte accelerazione ha generato una vasta depressione della superficie del ghiacciaio a quota di circa 2150 m s.l.m. Nell'estate del 2001 tale depressione diventò la culla di un lago epiglaciale, che nel giugno del 2002 arrivò a misurare più di 15 ettari con un volume di circa 3 milioni di m³ (Fig. 2) (Mortara & Mercalli, 2002; Tamburini *et al.*, 2003).



(a) Ottobre 2001 (CNR-IRPI, Torino).



(b) 25 Giugno 2002.

Figura 2: (a) Il lago effimero in una foto aerea scattata nell'ottobre 2001(CNR-IRPI, Torino). (b) La foto del lago effimero scattata da un elicottero il 25 giugno 2002

Questi eventi generarono attenzioni nella comunità scientifica a causa della possibilità di generare situazioni di rischio sia per le cose che per le persone a valle. Le istituzioni politiche italiane presero in considerazione tale potenziale situazione di rischio in alcune pubblicazioni ufficiali, un esempio è l'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 4 luglio 2002 (Mondino *et al.*, 2008).

La formazione del lago effimero è collegata ad un particolarissimo momento evolutivo per il Ghiacciaio del Belvedere, a partire dal 2000 e con un crescendo culminato presumibilmente nella tarda primavera 2002. Durante l'estate del 2000 nella parte inferiore della parete est del Monte Rosa, iniziò un'accelerazione del flusso che portò (Haeberli et al., 2002) a ipotizzare un fenomeno di surge come possibile causa di tale comportamento. Questo fenomeno generò a una forte crepacciatura e deformazione del ghiacciaio, nonché un sensibile aumento di volume apprezzabile soprattutto sul suo margine orografico destro. L'alta pressione dell'acqua e l'accelerazione del movimento continuarono fino all'inverno del 2001-2002, in cui il ghiaccio iniziò a superare la morena storica della Piccola Era Glaciale (PEG) vicino al Rifugio Zamboni del CAI. (Haeberli et al., 2002; Mortara & Mercalli, 2002). Il surge può essere considerato una sorta di "inondazione glaciale", cioè un movimento improvviso e veloce del ghiacciaio che non è legato né a un aumento delle precipitazioni nevose né a una riduzione della fusione del ghiaccio, bensì a trasformazioni nelle proprietà fisiche del ghiaccio probabilmente a seguito del riscaldamento atmosferico, con conseguenti variazioni nelle caratteristiche dello scorrimento del ghiaccio al contatto con il letto roccioso. (Tamburini et al., 2019)

A seguito di questo evento le analisi di volume del ghiacciaio rivelano una tendenza generale di perdita di massa nel corso del tempo. In particolare, tra il 2001 e il 2009 si è registrata una perdita particolarmente accentuata, concentrata nella porzione più alta ma distribuita fino alla fronte, con una media annua di $-5,97 \times 10^6 \text{ m}^3$. A fare le spese di questa perdita furono soprattutto le morene che, private della spinta esercitata dal ghiaccio, sono state soggette a fenomeni di erosione sul fianco interno e parziale collasso. Oltre a questo, anche eventi alluvionali hanno contribuito a destabilizzare l'area, soprattutto il versante solcato dal canale di Tuckett e la zona del Ghiacciaio di Castelfranco sopra la morena laterale sinistra, lingua ovest. Importante è stata l'alluvione registrata nel 2008. Anche la morena laterale destra nei pressi del Rifugio Zamboni subì una particolare trasformazione morfologica. Successivamente, tra il 2009 e il 2019, la diminuzione di volume è proseguita, seppur a un ritmo meno intenso, con un tasso di $-2,72 \times 10^6 \text{ m}^3$ all'anno (Da Gaetani et al., 2021).

Tuttavia, i rilievi fotogrammetrici più recenti, effettuati tra il 2015 e il 2023, evidenziano una nuova accelerazione nella perdita di ghiaccio, con una media di circa $3,21 \times 10^6 \text{ m}^3$ all'anno. L'analisi della serie temporale evidenzia infatti un aumento non lineare della riduzione di volume tra il 2020 e il 2023. L'estate eccezionalmente calda e secca del 2022 ha avuto un impatto significativo, causando una notevole perdita di volume pari a $4,90 \times 10^6 \text{ m}^3$ nel periodo 2022–2023 (Ioli et al., 2023). Inoltre, l'estate del 2023 è stata

protagonista di un grande evento alluvionale che verrà analizzato successivamente nel *Capitolo 7* del presente elaborato.

1.5. Il versante Castelfranco e la sua vulnerabilità

Il corso del torrente Castelfranco ha subito significative modifiche nel tempo a partire dal 1946. Anteriormente a tale data, il torrente confluiva nel torrente Anza molto più a valle rispetto ad oggi, scorrendo nel vallo compreso tra il versante sinistro e il fianco esterno della morena laterale sinistra del Belvedere. L'integrità di questa morena è testimoniata da varie documentazioni fotografiche antecedenti al 1946. Un'immagine risalente a quell'anno documenta l'inizio dell'erosione della morena a livello del conoide poligenico del T. Castelfranco. Da allora, una parte considerevole delle acque del torrente ha iniziato a confluire direttamente nel ghiacciaio, determinando la progressiva perdita dell'originaria via di deflusso lungo il vallo tra versante sinistro e la morena. Questo cambiamento ha favorito la colonizzazione arborea dell'area (*Mortara & Giuliano, 2008*).

La nuova configurazione idrografica ha avuto un ruolo determinante sull'evoluzione morfologica della morena, causandone un progressivo e parziale smantellamento. Questa situazione è peggiorata in seguito all'evento alluvionale del 7 settembre 2008, durante il quale tre dei quattro rami del torrente hanno convogliato parte del loro carico solido nel ghiacciaio (*Fig. 3*). Il quarto ramo ha invece ripreso temporaneamente l'originario percorso lungo il fianco esterno della morena.



Figura 3: Limite dell'area alluvionata, la linea tratteggiata ipotizza il percorso endo/subglaciale della colata detritica; le frecce indicano le bocche di ingresso e uscita (f. da elicottero di T. Sala, settembre 2008)

Il fenomeno ha avuto origine a quota di circa 3600 m in corrispondenza dei due ripidi canali Tyndall e Tuckett che solcano il versante sovrastato da Torre di Castelfranco (Fig. 4).



Figura 4: Accumuli di neve e ghiaccio all'interno dei canali Tyndall (TY) e Tuckett (TU) che evidenziano il passaggio della colata (f. CNR-IRPI, 10-09-2008)

Il canale Tuckett è stato il principale interessato, dove a partire dai 3000 m le tracce acquistano evidenza e continuità. La colata detritica, arricchita del materiale prelevato durante la discesa nella parte medio-alta del canale è arrivata sino alla morena laterale sinistra del ghiacciaio. A causa della discontinuità della morena, un lobo della colata ha colmato il dislivello presente tra l'alto fianco sinistro del ghiacciaio e la scarpata, senza espandersi oltre. Il deposito è poi stato trasportato dalle acque di fusione verso valle lungo un condotto endo/subglaciale per circa 800 m dove è stato espulso dalla bocca del ghiacciaio. Complessivamente il volume dei sedimenti depositati si è stimato essere nell'ordine delle migliaia di metri cubi (Mortara & Giuliano, 2008).

La portata dell'evento in termini di durata e volume detritico trasportato è stata notevole, soprattutto considerando la modesta quantità di pioggia caduta e la ridotta superficie del bacino interessato (2,8 km²). In particolare, grazie ai dati pluviometrici di due stazioni meteorologiche di ARPA Piemonte presso l'Alpe Pedriola (2065 m) e

Passo del Moro (2820 m), sono stati registrati rispettivamente 46,8 mm e 6,8 mm di pioggia in 27,5 ore. Le causanti principali sono da ricercarsi nell'elevata pendenza e abbondanza del materiale detritico del medio-alto bacino e nei settori apicali del Ghiacciaio di Castelfranco, anche le frane di crollo che interessano pareti sommitali contribuiscono notevolmente. Il fenomeno di colata ha interessato la zona per molte ore anche dopo la cessazione della pioggia. Questa durata insolita può trovare spiegazione nella struttura del bacino, dove i settori carichi dai depositi valanghivi hanno consentito occasionali accumuli di acqua di fusione e piovana, rilasciati per reiterati cedimenti di neve o ghiaccio (*Mortara & Giuliano, 2008*).

La stessa area è stata interessata da un secondo evento alluvionale il 27 agosto 2023, che ha presentato analogie con quello del 2008, ma con un'area alluvionata notevolmente più estesa. Questo evento sarà oggetto di un'analisi più approfondita nel corso di questo elaborato. Le acque di piena hanno progressivamente dilavato la copertura detritica del ghiacciaio fino alla bocca di ghiaccio, punto di origine del fiume Anza. La colata ha trasportato una grande quantità di detriti che, complice il notevole abbassamento della superficie del ghiacciaio, si è espansa formando un conoide alluvionale di neoformazione deposto direttamente sul ghiacciaio. Inoltre, più a valle la zona compresa tra il versante e la morena laterale sinistra è stata soggetta a ricorrenti valanghe provenienti dal bacino glaciale della Jazzi. L'accumulo di materiale detritico in questa zona ha completamente ostruito l'originario percorso del torrente Castelfranco.

2 Stato dell'arte

2.1. Tecniche di monitoraggio dei ghiacciai

2.1.1. Metodi tradizionali

I primi metodi di monitoraggio dei ghiacciai, definiti tradizionali o in situ, si basano su misurazioni dirette sul campo e sull'osservazione manuale. In particolare, per misurare la variazione di massa dei ghiacciai si utilizzava il metodo glaciologico diretto. In una serie di punti specifici veniva misurata la variazione del livello superficiale in due momenti diversi, e la differenza moltiplicata per la densità del ghiaccio o della neve forniva una stima del bilancio di massa in quel punto. I valori di densità per il ghiaccio erano considerati costanti a 900 kg/m^3 , mentre la densità della neve veniva misurata in trincee nivologiche. Durante l'inverno si misurava l'accumulo di neve, tramite carotaggi, mentre in estate si misurava l'ablazione (fusione e sublimazione), utilizzando paline ablatometriche, registrando la progressiva sporgenza delle stesse. L'inserimento della palina necessita l'uso preliminare di una trivella, il che causa un notevole consumo di tempo e pone limiti operativi legati all'attrezzatura stessa (Poli et al., 2020). Inoltre, il ritiro dei ghiacciai verso le quote più elevate e la loro frammentazione in corpi più piccoli rendono i rilevamenti tradizionali in situ sempre più complessi, meno efficienti e rischiosi. (Nucera, 2023).

Per questo motivo i metodi tradizionali sono stati progressivamente integrati con nuove tecnologie, come l'utilizzo di immagini aeree, il telerilevamento da satellite e l'utilizzo di droni, al fine di ottenere una visione più completa e dettagliata dell'evoluzione dei ghiacciai. In particolare, il metodo geodetico utilizza queste tecnologie per ricavare i modelli digitali del terreno (DTM) del ghiacciaio e calcolarne la variazione di massa.

2.1.2. Immagini aeree storiche

Le immagini aeree storiche rappresentano una risorsa molto preziosa per il monitoraggio dei ghiacciai. Attraverso questa fonte di informazioni, sebbene di qualità

discutibile, è possibile digitalizzarla e generare modelli per confrontarli con quelli più recenti, tracciando così l'andamento della superficie glaciale nel corso del tempo.

Le prime riprese aeree in Europa iniziarono all'inizio del XX secolo. Nelle prime missioni di fotogrammetria aerea, la stabilità e la velocità dell'otturatore rappresentavano sfide tecniche, ma verso la fine della Prima guerra mondiale, Sherman M. Fairchild sviluppò una fotocamera con l'otturatore posizionato all'interno del sistema di lenti. Questo design migliorò significativamente la qualità delle immagini e divenne lo standard per i sistemi di ripresa aerea per i successivi 50 anni (Poli et al., 2020). Il principale problema di queste immagini sta nel fatto che non erano concepite per fare monitoraggio dei ghiacciai, ma piuttosto per osservare aree popolate o target sensibili; pertanto, molto spesso erano eseguite durante giornate di sole e cielo sereno. Questo unito all'alta riflettanza delle zone coperte da ghiaccio e neve, e alla bassa risoluzione radiometrica dell'immagine produce aree sature o con basso contrasto. Tuttavia, le zone con un sufficiente livello di qualità rendono queste immagini utili in campo fotogrammetrico. (Poli et al., 2020)

2.1.3. Droni

I droni sono aeromobili senza pilota controllati a distanza, ed esistono diversi acronimi che li definiscono: UAV (Unmanned Aerial Vehicle), il termine si riferisce unicamente al velivolo; UAS (Unmanned Aircraft System) o SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto), in questo caso vengono considerati tutti i componenti necessari al funzionamento del drone, come stazione di controllo a terra, i sistemi di comunicazione e i sensori di bordo; APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto), termine ufficiale utilizzato in Italia dall'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile).

I droni, consentono di superare molti limiti dei metodi tradizionali, ma al tempo stesso ne pongono altri, legati alle loro specifiche tecniche. Tra queste, si citano la ridotta accessibilità a superfici caratterizzate da instabilità, dovuta a condizioni di pericolo, e la sensibilità alle variabili meteorologiche, quali vento, nebbia e temperatura (Avian et al., 2020).

Il monitoraggio con drone prevede una fase preliminare nella quale si pianifica il volo da eseguire, tramite un apposito software. In questa fase si definiscono diversi parametri interdipendenti, con l'obiettivo di ottimizzare il rapporto tra accuratezza del rilievo e risorse impiegate. Questi parametri includono: l'area di lavoro, la Ground Sampling Distance (GSD), l'altitudine di volo, la sovrapposizione longitudinale e trasversale delle immagini.

L'accuratezza che si riesce a raggiungere per il rilievo di un ghiacciaio con drone è tipicamente di circa 10-20 cm. Per garantire un posizionamento preciso dell'area di studio, vengono distribuiti uniformemente sul sito un numero adeguato di punti di controllo a terra, detti Ground Control Points (GCP). Le coordinate di ciascun GCP sono determinate con un ricevitore GNSS (Global Navigation Satellite System) di precisione, raggiungendo un'accuratezza di pochi centimetri.

Il GSD, che rappresenta la dimensione del pixel a terra, dovrebbe essere idealmente comparabile all'accuratezza desiderata, esso è definito dalla formula (1.1):

$$GSD = \frac{H}{f} \mu_x \quad (1.1)$$

Dove H definisce l'altezza di volo, f è la distanza focale (distanza tra il sensore e il centro di proiezione) e μ_x rappresenta la dimensione del pixel.

Una volta definito il GSD, è possibile calcolare l'altitudine di volo ottimale. Tuttavia, vincoli operativi o normativi possono limitare l'altitudine massima consentita, influenzando di conseguenza il GSD ottenibile. È quindi necessario trovare un compromesso tra accuratezza e fattibilità del volo.

La lunghezza del percorso di volo è un fattore critico, poiché influenza direttamente il tempo di volo e, di conseguenza, il consumo della batteria. Per garantire una ricostruzione tridimensionale accurata, ogni punto dell'area di interesse deve essere visibile in almeno due immagini consecutive. Questo requisito guida l'ottimizzazione della distanza tra le riprese e la definizione dei valori di sovrapposizione longitudinale e trasversale. Una maggiore sovrapposizione delle immagini garantisce una migliore copertura e, potenzialmente, una maggiore accuratezza del modello 3D. Tuttavia, un'eccessiva sovrapposizione comporta un aumento del numero totale di foto, con conseguente incremento dei tempi di elaborazione e dei costi. Pertanto, la scelta dei valori di sovrapposizione rappresenta un compromesso tra accuratezza ed efficienza. Generalmente, si utilizzano valori di sovrapposizione longitudinale e trasversale elevati, rispettivamente 70-80% e 60-70%, tenendo conto che un incremento eccessivo della sovrapposizione trasversale può aumentare il numero di strisciate del drone e, di conseguenza, la lunghezza complessiva del percorso di volo. Per questo motivo, il valore di sovrapposizione trasversale è tipicamente inferiore a quello longitudinale.

I GCP vengono posizionati sia su zone stabili circostanti il ghiacciaio, sia sulla sua superficie mobile. Data la natura dinamica di quest'ultima, è fondamentale che il rilievo con drone sia contestuale alla misurazione delle coordinate dei GCP. Questa

procedura viene ripetuta annualmente, creando una serie temporale di dati che permette di studiare l'evoluzione geometrica del ghiacciaio. L'analisi di questa serie di dati consente di determinare la velocità di spostamento di ciascun punto e, di conseguenza, dell'intero ghiacciaio.

Successivamente al volo, avviene l'elaborazione delle immagini acquisite dal drone che combinate con le informazioni derivanti dai GCP permettono di orientare le immagini e generarne il modello tridimensionale. In particolare, vengono utilizzate tecniche di fotogrammetria Structure-from-Motion (SfM). La fotogrammetria SfM impiega immagini acquisite da diverse angolazioni, che vengono automaticamente assemblate in nuvole di punti mediante algoritmi di image matching. Tale processo si basa sull'identificazione di punti di interesse, sfruttando in genere l'algoritmo Scale-Invariant Feature Transform (SIFT). In combinazione con tecniche Multi-View Stereo (MVS), la fotogrammetria SfM permette la ricostruzione simultanea di modelli 3D densi, nonché la determinazione della posizione e dell'orientamento delle camere (*Avian et al., 2020*).

2.1.4. Satelliti ottici

L'impiego dei dati satellitari multispettrali per il monitoraggio e la caratterizzazione dei fenomeni montani ha avuto inizio nei primi anni '90. Le principali missioni che hanno fornito una base per la mappatura dei ghiacciai sono rappresentate da Landsat 5, Landsat ETM+ e ASTER, sfruttando principalmente bande spettrali nel visibile e nel vicino infrarosso (*Avian et al., 2020*). Queste prime missioni offrivano immagini con una risoluzione non migliore di 15 m per pixel.

I satelliti più recenti, definiti VHR (Very High Resolution), raggiungono facilmente una risoluzione al suolo (GSD) inferiore al metro. Con satelliti di ultima generazione, si può arrivare anche fino a 30 cm di GSD. Grazie a questo miglioramento l'utilizzo dei satelliti per l'osservazione fotogrammetrica della Terra aumenta notevolmente.

L'acquisizione di immagini satellitari avviene tramite la registrazione della riflessione delle onde solari sulla superficie terrestre. Per ogni tipo di superficie è possibile realizzare un grafico della sua capacità di riflessione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Questo grafico prende il nome di firma spettrale. I satelliti acquisiscono dati in diverse bande spettrali e in pancromatico. Quest'ultima offre una risoluzione maggiore grazie alla maggiore ampiezza di banda, che consente di registrare una maggiore quantità di energia. Questo permette anche di ridurre le dimensioni del sensore di acquisizione. L'obiettivo è ridurre la dimensione del pixel

mantenendo un buon rapporto segnale-rumore, e quindi producendo un'immagine chiara, possibile grazie alla quantità maggiore di energia ricevuta.

Tipicamente i sensori utilizzati nei satelliti acquisiscono le immagini attraverso una tecnica chiamata push broom, ovvero a differenza delle fotocamere tradizionali che acquisiscono un'immagine in un singolo istante, essi acquisiscono una singola linea di pixel alla volta. Il sensore è quindi formato da una sola dimensione di pixel, e acquisisce dati in modo continuo, generando un flusso di righe che vengono poi assemblate per formare l'immagine (*Perko et al., 2019*).

Le immagini acquisite provengono da costellazioni satellitari commerciali. In particolare, questo elaborato si concentrerà su Pléiades e Pléiades Neo, di proprietà di Airbus, che ne commercializza dati e immagini. La maggior parte dei satelliti VHR distribuisce immagini in formato DIMAP V2, suddivise in due cartelle per ogni immagine: una per i dati multispettrali e una per quelli pancromatici, per un totale di quattro cartelle. Ciascuna cartella contiene il file immagine, i metadati e il file RPC (Rational Polynomial Coefficient) in formato XML.

L'utilizzo dei satelliti a scopi fotogrammetrici, presenta vantaggi e svantaggi. Riduce significativamente i tempi di rilievo per unità di superficie, garantendo una fornitura costante di immagini durante l'anno, permette un'ampia area di presa e una equivalente possibilità di acquisizione delle immagini in qualunque parte del mondo. Attualmente la disponibilità di stereocoppie satellitari è bassa e con alti costi, esse presentano una limitata risoluzione e sono meteorologicamente (nuvole) condizionate, inoltre sono affette negativamente dalle zone d'ombra, in quanto gli algoritmi hanno difficoltà a trovare punti omologhi in tali zone.

2.1.5. Satelliti radar

Gli strumenti SAR (Radar ad Apertura Sintetica) sono ampiamente utilizzati nel campo di monitoraggio dei ghiacciai soprattutto a causa della loro tecnica di acquisizione del segnale, la quale permette una precisa identificazione dei laghi glaciali. I satelliti radar, infatti, operano nel campo delle micro-onde (3-70cm) e registrano i segnali retro diffusi, cioè la radiazione che viene riflessa dalla superficie terrestre. Una superficie liscia genera una riflessione speculare, pertanto il segnale non torna al satellite, e quello che si vedrà nelle immagini sarà una zona scura. Al contrario una superficie con elevata rugosità genera una riflessione diffusa, che il satellite riesce a registrare. Più la rugosità è elevata più il valore registrato sarà alto. Questa caratteristica consente l'identificazione delle superfici d'acqua tramite l'applicazione

di una semplice soglia. Un metodo che trova ampio utilizzo per la definizione automatica di tale soglia è quello proposto da Otsu (1975). Tale approccio, tuttavia, presuppone la presenza di un istogramma bimodale con un minimo ben definito che separi nettamente le distribuzioni di acqua e terra. Per superare questa limitazione, sono stati proposti metodi alternativi, tra cui la classificazione manuale per la delimitazione di laghi glaciali, l'estrazione di poligoni buffer intorno ai laghi per forzare la bimodalità dell'istogramma e, più recentemente, la segmentazione level-set (Avian *et al.*, 2020).

2.1.6. Camere automatiche

L'utilizzo di fotocamere fisse per il monitoraggio dei processi geomorfologici non è da sottovalutare. Infatti, i significativi avanzamenti tecnologici in questo campo hanno determinato, nel corso dell'ultimo decennio, una progressiva e sempre più marcata adozione di sistemi time-lapse automatici. L'alta risoluzione spazio-temporale, i costi contenuti e la capacità di operare in autonomia anche in contesti remoti costituiscono vantaggi di rilievo. Questi sistemi trovano applicazioni rilevanti nel monitoraggio della posizione della fronte glaciale, della copertura nevosa e dei movimenti di massa, ma anche per catturare eventi di drenaggi di laghi sopraglaciali e di scioglimento nivale (Avian *et al.*, 2020).

2.1.7. TLS

Il Terrestrial Laser Scanning (TLS) è un sistema a tempo di volo che offre misurazioni con precisione centimetrica. Questa tecnologia sfrutta le peculiarità del laser (direzionalità del raggio) e del radar (determinazione della posizione), combinandone i vantaggi. La nuvola di punti risultante è georeferenziata mediante l'utilizzo di oggetti riflettenti, quali sfere o cilindri, di coordinate note. Questa georeferenziazione permette confronti accurati tra rilievi acquisiti in momenti diversi. Il TLS opera nel vicino infrarosso, impiegando lunghezze d'onda differenti: circa 1000 nm per applicazioni su neve e ghiaccio ottimizzando la portata, e circa 1500 nm per altre applicazioni. Il TLS trova largo impiego in contesti di alta montagna, in ambiti quali il monitoraggio di pareti rocciose, lo studio dei bilanci sedimentari, l'analisi dell'evoluzione di aree paraglaciali e delle relative instabilità dei versanti, la caratterizzazione dei ghiacciai detritici e gli studi nivologici (Avian *et al.*, 2020).

2.2. Stereoscopia e fotogrammetria da satellite

La fotogrammetria è un'applicazione del telerilevamento e ha come fine l'estrazione di informazioni tridimensionali a partire da immagini bidimensionali, consentendo la generazione di modelli 3D. Il processo fotogrammetrico si divide in tre fasi principali: acquisizione dell'immagine, orientamento e restituzione.

L'acquisizione rappresenta la cattura dell'oggetto 3D su un'immagine 2D mediante lo scatto di una fotocamera. Questa fase è assimilabile a una prospettiva centrale su un piano, un generico punto A sull'oggetto, di coordinate $A(x, y, z)$, è collegato al corrispondente punto A' sull'immagine, di coordinate $A'(\xi, \eta)$. La linea retta che collega questi due punti passa per il centro prospettico O . I tre punti sulla stessa linea consentono di definire l'equazione di collinearità, la quale permette di passare dalle coordinate oggetto a quelle dell'immagine e viceversa.

L'orientamento consiste nella ricostruzione matematica della posizione e dell'attitudine dell'immagine nel momento dell'acquisizione. Rappresenta di fatto una trasformazione dall'oggetto all'immagine: $(\xi, \eta) = f(x, y, z, \vartheta)$, dove ϑ rappresenta un vettore costituito da diversi parametri da stimare, tra cui la posizione della camera, l'attitudine della camera e la geometria della camera. Al fine di stimare tutti questi parametri sono necessari stessi punti in diversi sistemi di riferimento, detti punti omologhi.

La restituzione rappresenta una trasformazione dall'immagine all'oggetto, e consiste nel calcolare le coordinate dei punti oggetto nella realtà, equivale a trovare il modello tridimensionale dell'oggetto.

Per definire l'equazione di collinearità è necessario descrivere il modello della prospettiva centrale, in particolare il vettore ϑ . Questo vettore contiene i 3 parametri per l'orientamento interno della camera (calibrazione della camera), che consistono in distanza principale (c) e coordinate del punto principale $PP(\xi_0, \eta_0)$, e i 6 parametri per l'orientamento esterno, cioè le coordinate della proiezione centrale $O(X_0, Y_0, e Z_0)$ ed infine gli angoli di cardano ω (rollio), ϕ (beccheggio), κ (imbardata). Questi tre angoli descrivono la rotazione tra il sistema di riferimento 3D dell'immagine e quello dell'oggetto. Il punto principale rappresenta la proiezione perpendicolare della proiezione centrale sull'immagine, mentre la distanza principale è la distanza tra la proiezione centrale e l'immagine. A questo punto è possibile descrivere l'equazione di collinearità (1.2) attraverso un approccio grafico o analitico. I tre parametri di rotazione

non vengono considerati in quanto si assume che il sistema di riferimento dell'immagine sia parallelo a quello dell'oggetto.

$$\begin{cases} X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{\xi' - \xi_0'}{\zeta' - \zeta_0'} \\ Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{\eta' - \eta_0'}{\zeta' - \zeta_0'} \end{cases} \quad (1.2)$$

Dove ζ' rappresenta la coordinata Z del punto P' sull'immagine (ha valore nullo), e ζ_0' è la coordinata Z della proiezione centrale (O) nel sistema di riferimento dell'immagine pari ad un valore uguale a quello della distanza principale (c).

Il sistema ottenuto è composto da due equazione in tre incognite rappresentate dalle tre coordinate del punto nel sistema di riferimento dell'oggetto, inoltre X e Y dipendono entrambe da Z, pertanto, è necessario avere una seconda immagine, in questo modo si hanno quattro equazioni e tre incognite. L'intersezione tra le due equazioni di collinearità permette di trovare la Z del punto sull'oggetto.

L'equazione di collinearità può essere scritta anche sottoforma di un modello lineare sovraparametrizzato, detto DLT (Direct Linear Transformation) (1.3), in modo da rendere il problema lineare:

$$\begin{cases} \xi = \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4}{b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + 1} \\ \eta = \frac{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + c_4}{b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + 1} \end{cases} \quad (1.3)$$

La soluzione del problema, cioè le coordinate dell'oggetto o dell'immagine vengono trovate mediante l'utilizzo dei minimi quadrati.

I satelliti, anziché utilizzare l'equazione di collinearità, non valida a causa dei numerosi parametri atmosferici, impiegano un modello matematico simile alla DLT, ma con un numero maggiore di coefficienti e ordini superiori. Il modello più comune utilizzato per i satelliti è detto RPC (Rational Coefficient Polynomial), consiste in un insieme di coefficienti polinomiali razionali che definiscono il modello del sensore satellitare, e che sostituiscono il modello fisico del sensore. In particolare, il modello RPC utilizza quattro polinomi di terzo grado per mappare le coordinate geografiche (X, Y, Z) in coordinate immagine (ξ , η) organizzati secondo la struttura della DLT (1.3). Complessivamente il modello è definito da 78 parametri, 20 per i polinomi al numeratore e 19 per i polinomi a denominatore, poiché il primo coefficiente del denominatore è sempre 1 (*Edgybees, 2023*). Data l'elevata numerosità di questi coefficienti, si utilizzano valori approssimati degli stessi, nel file della RPC troviamo sia quelli riferiti al modello diretto (image-to-ground) sia quelli riferiti al modello

inverso (ground-to-image), utilizzati per trasformare le coordinate immagine in coordinate oggetto e viceversa.

Tipicamente nel campo della fotogrammetria si utilizzano le stereocoppie satellitari, dove la zona di interesse viene catturata quasi simultaneamente in due immagini differenti con angoli di vista leggermente diversi, permettendo la ricostruzione 3D dell'area. È possibile anche ottenere immagini tri-stereo, costituite da una stereocoppia e da un'immagine al nadir, la quale consente una migliore completezza del modello digitale di superficie (DSM) e riduce le occlusioni tipicamente generate da angoli di convergenza elevati sul terreno (Loghin et al., 2020).

2.3. Flusso di lavoro per la mappatura 3D con dati satellitari

Il presente capitolo esporrà le principali operazioni necessarie per la produzione di output fotogrammetrici specifici, partendo da una stereocoppia satellitare. Le fasi principali consistono nell'ottimizzazione del modello del sensore, la generazione del DSM e del DTM e l'orto rettificazione.

2.3.1. Ottimizzazione del modello

I modelli dei sensori satellitari, RPC, forniti dai fornitori di immagini satellitari sottoforma di file .XML, offrono una soluzione versatile per la geolocalizzazione delle immagini. Tuttavia, l'accuratezza iniziale di questi modelli è spesso limitata, a causa dell'approssimazione dei coefficienti, richiedendo una fase di calibrazione mediante GCP. Nonostante questa limitazione, i modelli RPC presentano il vantaggio di essere generici e adattabili a diversi sensori. Il processo di calibrazione, che consiste nella risoluzione di un sistema di equazioni non lineari, permette di affinare i parametri del modello e di ottenere una geolocalizzazione più precisa, consentendo di passare da una precisione metrica a una centimetrica (Perko et al., 2019).

2.3.2. Generazione del modello digitale di superficie (DSM)

La generazione del modello tridimensionale si articola in diverse fasi: rettifica epipolare, stereo matching, intersezione di punti spaziali, ricampionamento del Modello digitale di superficie (DSM), fusione dei DSM e post-elaborazione.

La rettifica epipolare è una tecnica utilizzata per semplificare la ricerca di punti corrispondenti in immagini stereoscopiche, in particolare restringendo la ricerca delle corrispondenze lungo linee epipolari. Nel caso dei sensori push-broom, la geometria epipolare è più complessa e richiede l'utilizzo di equazioni di collinearità modificate. Sebbene sia possibile eseguire la corrispondenza direttamente lungo le curve epipolari non lineari, questo approccio comporta una maggiore complessità computazionale. La rettifica epipolare, pur introducendo delle approssimazioni, semplifica notevolmente il processo di corrispondenza e migliora l'accuratezza della ricostruzione 3D (Perko et al., 2019).

La rettifica epipolare può essere omessa se l'algoritmo di stereo matching successivo esegue la ricerca direttamente lungo le curve epipolari non lineari. Tuttavia, tale approccio presenta degli svantaggi: richiede un algoritmo di corrispondenza sufficientemente generale da considerare i vincoli geometrici del modello del sensore e, per ogni posizione nello spazio di ricerca lungo la curva epipolare, necessita il ricampionamento della finestra di ricerca locale durante la fase di corrispondenza (Perko et al., 2019).

Lo stereo matching affronta il problema dell'abbinamento denso tra due immagini orientate. Il cuore di questo processo consiste nell'individuare, per ogni pixel di un'immagine, il pixel corrispondente nell'altra immagine. Inizialmente, si tratta di un problema di ricerca bidimensionale, poiché devono essere considerati sia gli spostamenti di riga che di colonna. Tuttavia, la rettifica epipolare riduce lo spazio di ricerca a una dimensione e migliorando significativamente l'efficienza e l'accuratezza degli algoritmi di corrispondenza (Perko et al., 2019).

Gli algoritmi di stereo matching possono essere suddivisi in algoritmi locali o globali. I primi, basati su finestre, valutano la similarità tra patch di pixel corrispondenti, mentre i secondi considerano l'immagine nel suo complesso, cercando di minimizzare una funzione di costo che tiene conto sia della similarità locale tra i pixel che di vincoli di regolarità sulla mappa di disparità (Scharstein & Szeliski, 2002). Un esempio noto è l'algoritmo SGM (Semi-Global Matching) (Perko et al., 2019).

Le fasi tipiche di un algoritmo di stereo matching sono:

1. Calcolo del costo di corrispondenza: valuta la similarità tra patch di pixel corrispondenti
2. Aggregazione del costo: combina i costi locali al fine di ottenere una misura di affidabilità della corrispondenza

3. Calcolo/ottimizzazione della disparità: determina la disparità per ogni pixel, calcolando la differenza di posizione tra i pixel corrispondenti nelle due immagini
4. Raffinamento delle disparità: mira a migliorare la qualità della mappa di disparità attraverso tecniche di post-elaborazione

(Scharstein & Szeliski, 2002)

A partire dai modelli dei sensori e dalle disparità, si procede alla ricostruzione della nuvola di punti 3D mediante intersezione spaziale diretta. Il processo consiste nel risolvere un sistema di equazioni non lineari mediante linearizzazione del modello del sensore e successiva compensazione ai minimi quadrati per la stima degli incrementi di coordinate (Perko et al., 2019).

Una rappresentazione più compatta derivante dalle nuvole di punti sono i modelli digitali della superficie (DSM). Quest'ultimi, ottenuti mediante interpolazione della nuvola di punti su una griglia regolare, facilitano l'analisi e la visualizzazione dei dati. Nel caso di dataset multi-stereo, è possibile ottenere DSM multipli, che possono essere fusi tramite tecniche di interpolazione locale o globale per ottenere un modello digitale più completo e accurato (Perko et al., 2019).

2.3.3. Generazione del modello digitale del terreno (DTM)

A differenza dei DSM, che includono tutte le caratteristiche della superficie terrestre, i Modelli Digitali del Terreno (DTM) rappresentano esclusivamente la superficie nuda del terreno, escludendo elementi come vegetazione e edifici.

Al fine di ottenere un DTM da un DSM, è necessario un processo di filtraggio che individui e rimuova gli oggetti fuori terra e sopraelevati, e interpoli o colmi le aree risultanti in modo intelligente. Oltre a metodi classici manuali, dispendiosi in termini di tempo e risorse, esistono numerosi algoritmi di filtraggio automatico basati su morfologia matematica, filtri statistici o tecniche di classificazione (Perko et al., 2019).

2.3.4. Orto-rettificazione e mosaicatura

La fase finale del processo consiste nell'orto-rettificazione delle immagini e nella loro mosaicatura. Esistono due principali approcci alla rettifica delle immagini: la rettifica diretta, che proietta i pixel dell'immagine di input sul prodotto cartografico mediante una trasformazione immagine-carta, e la rettifica indiretta, che proietta i punti della

carta sull'immagine di input mediante una trasformazione carta-immagine. Infine, viene generato l'ortomosaico, tramite mosaicatura, ovvero l'unione delle singole immagini orto-rettificate. Le problematiche principali riguardano la gestione delle sovrapposizioni e la creazione di un prodotto visivamente coerente (*Perko et al., 2019*).

3 Generazione modello 3D del 2017

Al fine di generare il modello tridimensionale del Ghiacciaio del Belvedere alla data della ripresa del 2017, è stata impiegata una metodologia che combina dati pregressi e nuove acquisizioni: le coordinate dei Ground Control Points (GCP), estratte da un precedente modello del 2009 derivato da riprese con aereo, sono state integrate con una stereocoppia della costellazione Pléiades, acquisita nell'agosto 2017 e georeferenziata mediante RPC.

3.1. Costellazione Pléiades

Il sistema satellitare europeo Pléiades è un sistema duale composto da due satelliti identici, denominati Pléiades-1A e Pléiades-1B. Lanciati rispettivamente nel dicembre 2011 e nel dicembre 2012, entrambi i satelliti forniscono dati immagine ad altissima risoluzione (VHR). I satelliti operano sulla stessa orbita con uno sfasamento di 180 gradi per garantire una capacità di rivisitazione giornaliera. Questa orbita è condivisa anche con i satelliti Spot-6 e Spot-7, sebbene con uno sfasamento di 90 gradi. I satelliti Pléiades sono caratterizzati da una notevole agilità, con angoli di puntamento regolabili in un intervallo di ± 47 gradi (in modalità standard ± 30 gradi), e una larghezza di fascia di 20 chilometri al suolo, corrispondenti a 40000 pixel nella direzione trasversale (*Airbus, 2021*).

Analogamente ad altre missioni VHR come Ikonos, Spot o WorldView, Pléiades consente l'acquisizione di dati stereo durante un singolo sorvolo, attraverso un'appropriata configurazione anteriore e posteriore del sensore. Un'innovazione significativa di Pléiades è rappresentata dalla capacità di acquisire fino a tre immagini della stessa area durante un singolo passaggio, con visualizzazione del sensore in avanti, al nadir e all'indietro lungo la traccia, oltre alla possibilità di una scansione trasversale. Queste terne di immagini sono denominate set di dati tri-stereo e offrono vantaggi significativi per applicazioni di telerilevamento avanzate.

I sensori a bordo dei satelliti Pléiades acquisiscono dati in una banda pancromatica (470–830 nm) con un GSD di 0,7 metri al nadir, e in quattro bande multispettrali: blu (430–550 nm), verde (500–620 nm), rosso (590–710 nm) e vicino infrarosso (740–940 nm), con un GSD di 2,8 metri. Le immagini acquisite vengono fornite come un insieme

di una banda pancromatica sovracampionata a 0,5 metri GSD e bande multispettrali a 2,0 metri GSD, in formato GeoTIFF o JPEG (*Airbus, 2021*).

Ogni banda delle immagini Pléiades ha una profondità di 12 bit per pixel. Generalmente, i dati vengono rappresentati con 8 bit per pixel (256 valori di grigio per banda), poiché i software di elaborazione supportano tipicamente 8 o 16 bit. Si preferisce utilizzare 8 bit per ottimizzare le prestazioni, evitando l'elaborazione di una quantità di dati superflua che non apporterebbe benefici significativi.

Il modello del sensore viene fornito come un modello di coefficienti polinomiali razionali (RPC). Autori come Perko (et al., 2018) riportano l'accuratezza di geolocalizzazione di questo modello dell'ordine di 8,5 metri CE90, tuttavia, la guida di Airbus (2021) fornisce un valore leggermente inferiore, di 6.5 metri CE90 (Errore Circolare). L'Errore Circolare al 90% definisce un'area di incertezza rappresentata da un cerchio intorno alla posizione misurata. Con un livello di confidenza del 90%, si afferma che la posizione reale dell'oggetto ha il 90% di probabilità di trovarsi all'interno di questo cerchio. Per mappature di alta precisione, è chiaro che l'accuratezza di geolocalizzazione deve essere ulteriormente affinata e ottimizzata attraverso l'utilizzo dei GCP (*Airbus, 2021*).

La stereocoppia satellitare utilizzata per derivare il modello 3D del ghiacciaio è stata acquisita il 15 agosto 2017 (*Fig. 5*) con un angolo di vista medio di circa 16,5 gradi, e un angolo incidente medio di circa 18,8 gradi.

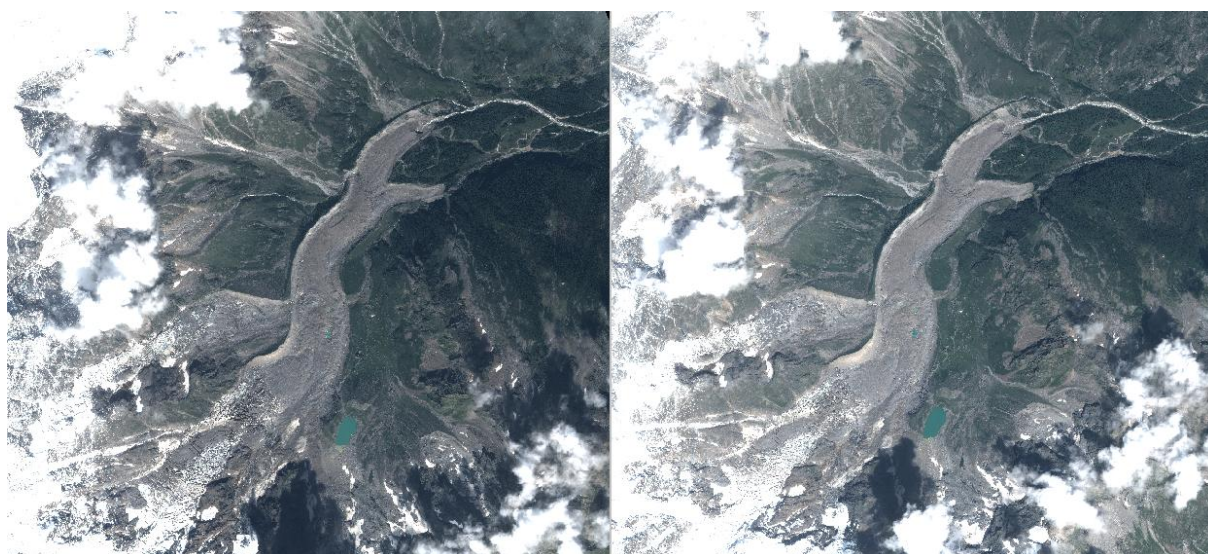


Figura 5: Stereocoppia acquisita dalla costellazione Pléiades il 15 Agosto 2017

L'angolo di vista (α), anche detto angolo di puntamento, descrive l'orientamento del satellite. È definito dagli angoli di rollio (ω) e beccheggio (ϕ) del pixel centrale rispetto al sistema di riferimento orbitale locale, misurati dalla posizione del satellite (Airbus, 2023).

L'angolo di incidenza (globale) (β), anche chiamato Angolo Zenitale di Osservazione (OZA), rappresenta l'angolo tra la normale locale all'ellissoide terrestre (approssimato come una sfera) e la linea di vista del satellite (Airbus, 2023). In altre parole, è l'angolo con cui il satellite "vede" la superficie terrestre, più è piccolo e più la vista del satellite è vicina a quella nadirale. I suddetti angoli sono illustrati in *Figura 6*.

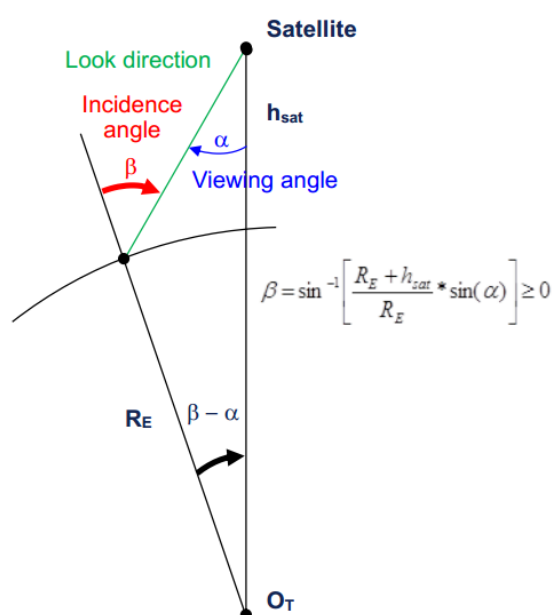


Figura 6: Angolo di vista e di incidenza di un satellite (Airbus, 2023, p.74)

L'angolo di incidenza può essere scomposto in due componenti ortogonali corrispondenti alla direzione longitudinale "along track" (beccheggio, ϕ) e alla direzione trasversale "across track" (rollio, ω) rispetto al percorso del satellite.

Grazie a questi angoli è possibile risalire all'angolo di intersezione, anche detto angolo di convergenza (δ), e ad un'approssimazione del rapporto base-altezza (B/H). L'angolo di convergenza esprime l'angolo compreso tra le due acquisizioni di una stereocoppia, e da esso dipende il rapporto B/H. Più l'angolo di intersezione è ampio più il rapporto sarà elevato (*Fig. 7*).

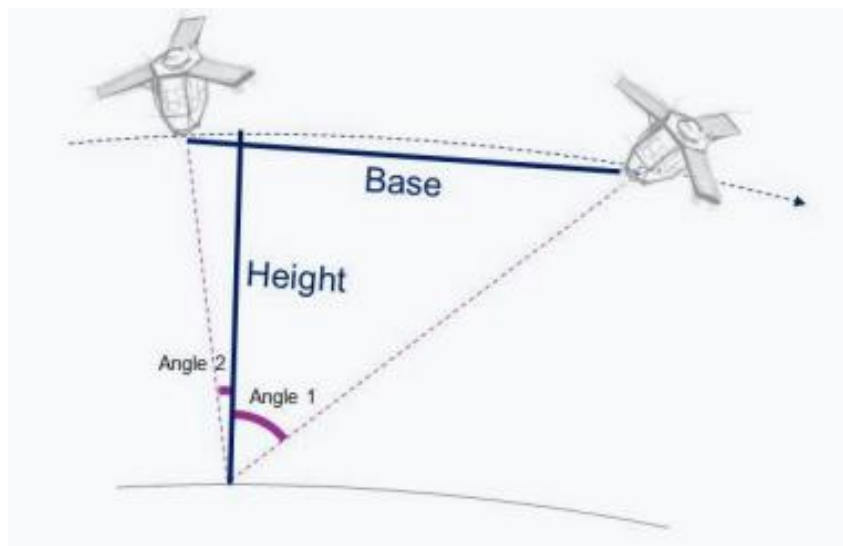


Figura 7: Rapporto base-altezza tra due acquisizioni stereo

Il calcolo dell'angolo di convergenza e del rapporto B/H segue le formule citate in Perko (2019). In *Tabella 1* vengono riassunti i parametri di acquisizione per la stereocoppia del 2017.

Tabella 1: Parametri di acquisizione della stereocoppia Pléiades 2017

Data	ID	Angolo di incidenza (β) [°]			Angolo di convergenza (δ) [°]	Rapporto B/H
		Along (ϕ)	Across (ω)	Overall		
15/08/2017	1	15.88	9.98	18.50	27.01	0.48
15/08/2017	2	-11.11	16.01	19.17		

3.2. Data processing

3.2.1. Pansharpening

Prima di utilizzare le immagini, è stato effettuato il pansharpening. Questa tecnica permette di combinare la migliore risoluzione dell'immagine pancromatica con l'informazione del colore derivante dall'immagine multispettrale. Si tratta di inserire dettagli spaziali estratti dall'immagine pancromatica, nell'immagine multispettrale a peggior risoluzione, in modo da ottenere immagini multispettrali ad alta risoluzione. A tal fine è stato utilizzato il programma QGIS, in particolare il tool (GDAL pansharpening) permette di eseguire automaticamente il pansharpening delle due

immagini in input, specificando l'algoritmo di ricampionamento. In questo progetto, il ricampionamento è stato eseguito impiegando l'interpolazione bilineare (con un kernel 2x2). Questo metodo considera i quattro pixel più prossimi al punto di interesse e ne interpola i valori su una superficie bilineare. Il nuovo valore del pixel ricampionato è quindi determinato dall'intersezione tra questa superficie interpolata e le coordinate del punto di ricampionamento.

3.2.2. Importazione delle immagini e dei Ground Control Points (GCP)

Per l'importazione delle immagini nel software che è stato scelto per le elaborazioni (Agisoft Metashape), è fondamentale associare a ciascuna immagine i corrispondenti dati RPC (Rational Polynomial Coefficients). A tal fine, è stato generato un file di testo contenente le informazioni RPC necessarie per la corretta interpretazione delle immagini da parte del software. Nello specifico, sono stati estratti i coefficienti del modello inverso (ground to image) del RPC, unitamente a informazioni relative alla validità del modello. A ciascuna immagine è associata una camera identificata dal modello RPC.

La scelta del modello inverso si basa sulla documentazione tecnica del satellite, che ne prescrive l'utilizzo per la derivazione delle coordinate immagine. Tuttavia, Metashape richiede un formato non standard per l'interpretazione dei parametri approssimati contenuti nel file RPC. Di conseguenza, si è reso necessario estrapolare e copiare all'interno di un file di testo appositamente predisposto esclusivamente i dati pertinenti, ovvero 78 parametri approssimati di orientamento esterno (suddivisi in 20 valori per il numeratore e 19 per il denominatore sia per la coordinata ξ che per la coordinata η), e i due coefficienti unitari a denominatore, per un totale di 80 valori.

Il sistema di riferimento utilizzato è rappresentato dal datum WGS84 proiettato in UTM 32 Nord, in coerenza con il sistema di riferimento dei punti di controllo a terra, presi dal modello di riferimento del 2009.

Le coordinate dei GCP sono state derivate da un modello del 2009 acquisito tramite rilievo aerofotogrammetrico da aereo con accuratezza stimata di 40 cm. Le coordinate planimetriche (Easting e Northing) sono state estratte dall'ortofoto prodotta da tale modello, mentre le quote sono state ricavate dal relativo DEM (Digital Elevation Model) proiettato in UTM 32 Nord (Datum WGS84). Sono stati selezionati complessivamente 37 GCP in aree stabili, limitrofe al ghiacciaio, presupponendo la loro invarianza nel tempo e garantendo, di conseguenza, la confrontabilità dei dati tra diverse acquisizioni temporali. Una parte di tali punti è stata designata come Check

Points (CP), destinati esclusivamente alla validazione del modello generato. In accordo con la letteratura, che suggerisce un rapporto CP/GCP compreso tra il 20% e il 30% con una distribuzione uniforme sul modello, sono stati selezionati 10 CP (Fig. 8).

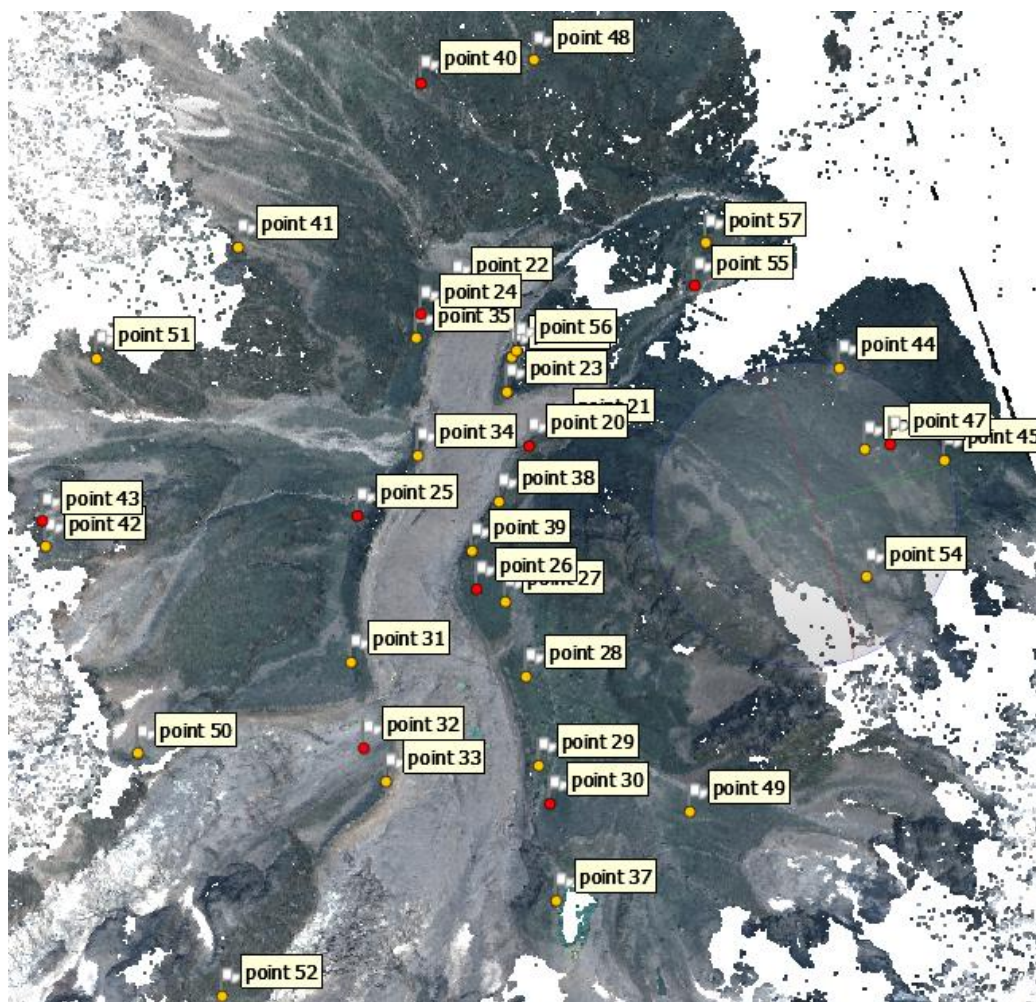


Figura 8: GCP (in arancio) e CP (in rosso) sulla nuvola di punti del modello del 2017

Dopo l'importazione del file contenente i GCP e le relative coordinate, è stata definita l'accuratezza di tali coordinate, considerando sia l'accuratezza stimata del modello del 2009, da cui derivano, sia l'accuratezza nella collimazione dei punti sulle immagini del 2017. Per la maggior parte dei punti, l'accuratezza è stata mantenuta a 40 cm, in linea con quella del modello di riferimento. Solo per alcuni punti, caratterizzati da una maggiore difficoltà di collimazione (punti su edifici o rocce di elevata altitudine), è stata impostata un'accuratezza di 50 cm.

3.2.3. Orientamento e restituzione

L'elaborazione del modello ha previsto diverse fasi, a partire da un orientamento iniziale basato sui coefficienti RPC (Rational Polynomial Coefficients) approssimati forniti con le immagini. Tale orientamento, pur non rappresentando la soluzione definitiva a causa dell'approssimazione intrinseca dei coefficienti, si è rivelato fondamentale per la successiva fase di collimazione dei GCP (Ground Control Points). Infatti, esso ha fornito una stima iniziale della posizione dei GCP all'interno delle immagini, agevolandone l'identificazione e la collimazione accurata.

Successivamente si è proceduto all'orientamento finale del modello attraverso un Bundle Block Adjustment (BBA). Questo algoritmo, ampiamente utilizzato in fotogrammetria, rappresenta una procedura per il simultaneo orientamento di più immagini, ottimizzando la stima dei parametri di orientamento interni (parametri della camera) ed esterni (posizione e orientamento della camera nello spazio) e delle coordinate tridimensionali dei punti omologhi nel sistema di riferimento dell'oggetto. Il BBA risolve il problema non lineare di orientamento attraverso la linearizzazione del sistema di equazioni ai minimi quadrati, iterando fino alla convergenza a una soluzione stabile. Questo processo costituisce una procedura integrata di orientamento e di restituzione, poiché determina simultaneamente la geometria delle immagini e le coordinate 3D dei punti, di fatto restituisce una nuvola di punti sparsa. Il processo è stato eseguito con un'accuratezza "high", permettendo di utilizzare le immagini alla dimensione originale (Agisoft LLC, 2023).

I Check Points (CP) sono stati esclusi dal calcolo del BBA, in modo da poterli utilizzare successivamente per valutare la bontà del modello, in quanto indipendenti da esso.

L'identificazione automatica dei punti di interesse comuni tra le immagini, alla base del processo di orientamento, è stata eseguita mediante tecniche di image matching implementate in Agisoft Metashape. Sebbene il software non specifichi l'algoritmo utilizzato è plausibile che sia un algoritmo basato sull'estrazione di feature invarianti a scala e rotazione, come SIFT (Lowe, 2004), e tecniche di filtraggio delle corrispondenze come RANSAC (Raguram et al., 2008), data la robustezza del processo di allineamento a variazioni geometriche e la sua capacità di gestire immagini di qualità variabile.

Il processo di image matching si articola generalmente in diverse fasi:

1. Estrazione di punti di interesse (feature detection): questa fase mira a identificare punti caratteristici all'interno di ogni immagine, che siano robusti a

variazioni di scala, rotazione, illuminazione e punto di vista. Questi punti vengono detti feature point o keypoints, rappresentano elementi distintive dell'immagine, come angoli, bordi o regioni con forte variazione di intensità. Algoritmi come SIFT e SURF creano dei descrittori per ogni punto chiave, ovvero delle rappresentazioni numeriche che ne catturano le caratteristiche salienti (*Shaharom et al., 2023*).

2. Corrispondenza delle feature (feature matching): in questa fase si procede alla ricerca di corrispondenze tra le feature delle diverse immagini. Questo viene fatto confrontando i descrittori: feature con descrittori simili vengono considerate potenziali corrispondenze. Esistono diverse metriche di similarità che possono essere utilizzate, come la distanza euclidea o la correlazione. Cercando lungo la corrispondente linea epolare si velocizza il processo.
3. Filtraggio delle corrispondenze: la precedente fase può generare anche corrispondenze errate, chiamate outlier. Per eliminare questi errori, vengono utilizzate tecniche di filtraggio geometrico. Un algoritmo molto utilizzato a questo scopo è RANSAC (RANDOM Sample Consensus) (*Raguram et.al., 2008*). È un metodo iterativo che stima un modello geometrico (ad esempio una trasformazione affine) tra le immagini, selezionando casualmente un sottoinsieme di corrispondenze. Le corrispondenze che rientrano nel modello stimato vengono considerate inlier, mentre quelle che non vi rientrano sono considerate outlier. Questo processo viene ripetuto più volte, e il modello con il maggior numero di inlier viene scelto come soluzione finale. RANSAC è particolarmente efficace nel gestire un'elevata percentuale di outlier (*Shaharom et al., 2023*).

Il BBA fornisce due fattori che aiutano a capire l'accuratezza e la solidità del modello. In primo luogo, è possibile analizzare la matrice di covarianza dei punti omologhi, la quale, nel caso in analisi, ha evidenziato una deviazione standard, con valori tipicamente nell'ordine di 0,45 m, coerenti con la risoluzione a terra delle immagini (GSD). Sebbene siano stati riscontrati valori fino a 8 metri questi si concentrano in aree caratterizzate da geometrie complesse o scarsa tessitura, dove l'algoritmo di image matching ha incontrato maggiori difficoltà nell'identificazione dei punti omologhi. Tali punti, tuttavia, rappresentano una percentuale non significativa del totale e non compromettono l'accuratezza complessiva del modello.

Un secondo indicatore di qualità del modello è rappresentato dall'analisi degli errori di posizionamento associati ai GCP e ai CP. Tali errori sono stati calcolati come la differenza tra le coordinate tridimensionali stimate dal modello per ciascun punto e le corrispondenti coordinate osservate considerate come riferimento. L'analisi ha evidenziato un errore quadratico medio, anche detto Root Mean Square Error (RMSE), di 0,22 m per i GCP e di 0,39 m per i CP. L'RMSE rappresenta la radice quadrata della media dei quadrati delle differenze. Un RMSE maggiore sui CP è un risultato tipico, in quanto questi punti non sono stati utilizzati nel processo di ottimizzazione del modello (BBA) e rappresentano quindi una validazione indipendente. La maggiore accuratezza sui GCP è invece una conseguenza diretta del loro impiego nel processo di bundle adjustment, che minimizza gli errori su questi punti.

Entrambi i valori di RMSE, 0,22 m e 0,39 m, mostrano una buona coerenza con la risoluzione a terra delle immagini (GSD), pari a 0,5 m e con l'accuratezza stimata delle coordinate osservate, pari a 0,4 – 0,5 m. Questa concordanza suggerisce che il modello è stato generato con un buon livello di accuratezza e che gli errori di posizionamento rientrano nelle aspettative, considerando le caratteristiche dei dati di input. Oltre all'RMSE, è stata analizzata la presenza di errori sistematici attraverso il calcolo dell'errore medio (bias) per ciascuna componente (X, Y, Z). I risultati ottenuti, visibili nella *Tabella 2* evidenziano la presenza di errori sistematici, seppur di entità contenuta, soprattutto per le componenti planimetriche (X e Y). Tuttavia, come evidenziato dall'RMSE, l'accuratezza complessiva rimane coerente con il GSD.

*Tabella 2: RMSE ed errore medio lungo le tre dimensioni (X, Y, Z) relativi ai GCP e ai CP, in metri.
Modello 2017*

	East error (X)	North error (Y)	Alt. error (Z)	RMSE
GCP	0,13	0,17	0,05	0,22
CP	0,25	0,23	0,19	0,39

3.2.4. Prodotti fotogrammetrici

La generazione della nuvola di punti densa è stata realizzata a partire dalla generazione di una mappa di profondità. Il software articola questa fase in diversi step. In primo luogo, a partire dalla stereocoppia è stata generata una mappa di profondità mediante tecniche di dense stereo matching. Questo processo sfrutta la geometria epipolare, definita dai parametri di orientamento esterno e interno delle due camere, per determinare la disparità tra le immagini e quindi la profondità di ciascun punto della scena. Successivamente la mappa di profondità ottenuta è stata trasformata in una nuvola di punti densa. Per ogni punto, il software calcola la normale alla superficie mediante plane fitting considerando un intorno di pixel nella mappa di profondità. Il colore di ciascuno è stato campionato dalle immagini originali. Infine, alla nuvola di punti è stata applicato un filtro del rumore per ottimizzarne la qualità geometrica. In particolare, il filtraggio delle mappe di profondità è stato eseguito con l'impostazione "Mild", che applica una rimozione del rumore conservativa, privilegiando la conservazione dei dettagli geometrici (Agisoft LLC, 2023).

A causa dell'utilizzo di una singola stereocoppia, il valore di confidenza associato ai punti della nuvola densa presenta una limitata variazione, riflettendo la presenza di al massimo due osservazioni per ciascun punto. La generazione della mappa di profondità è stata eseguita con impostazione di qualità "High", che ottimizza la precisione delle corrispondenze a una risoluzione dell'immagine pari a $\frac{1}{4}$ di quella originale, influenzando la risoluzione del DEM derivato (Agisoft LLC, 2023). La nuvola di punti risultante è composta da circa 40 milioni di punti, un valore coerente con la risoluzione e la sovrapposizione delle immagini utilizzate.

Successivamente alla generazione della nuvola di punti densa, è stato derivato un Modello Digitale di Elevazione (DEM). Il DEM rappresenta una superficie 2.5D discretizzata in una griglia regolare (raster), dove ogni cella (pixel) contiene un singolo valore di elevazione, rappresentativo dell'altezza interpolata all'interno dell'area coperta dalla cella. In particolare, è stata utilizzata l'interpolazione predefinita di Metashape ("Enabled"), che calcola il DEM per tutte le aree della scena visibili in almeno una delle immagini. Questo approccio massimizza la copertura del DEM, ma è importante considerare che le aree con minore densità di punti o visibili in una sola immagine possono presentare una minore accuratezza a causa del processo di interpolazione. Il DEM è stato generato rasterizzando la nuvola di punti densa, risultando in una risoluzione spaziale pari a 1,0 m. Questo valore, come anticipato, è superiore al valore della risoluzione teorica data dal GSD delle immagini originali (50

cm) a causa dell'impostazione "High" utilizzata nella generazione della mappa di profondità (*Agisoft LLC, 2023*).

L'ortomosaico è stato generato a partire dal DEM, con una risoluzione di 50 cm. Questo processo consiste nella proiezione ortogonale delle immagini originali sulla superficie del DEM e nella successiva fusione. Per la generazione dell'ortomosaico è stata utilizzata la proiezione geografica. Questa proiezione è adatta per la rappresentazione di aree estese e garantisce la corretta georeferenziazione dell'ortomosaico in un sistema di coordinate geografiche.

4 Generazione modello 3D del 2023

4.1. Costellazione Pléiades Neo

Il modello del 2023 utilizza una stereocoppia del sistema satellitare Pléiades Neo, acquisita nell'ottobre 2023. La costellazione satellitare Pléiades Neo inizialmente era composta da quattro satelliti ottici identici ad altissima risoluzione. Due satelliti sono stati lanciati con successo nel 2021, mentre il lancio di altri due, previsto per la fine del 2022 a bordo del razzo Vega di Arianespace, non è andato a buon fine. La missione ha una durata prevista di 10 anni, durante i quali i satelliti garantiranno la fornitura di immagini con una risoluzione di 30 centimetri. Pléiades Neo opera come una vera e propria costellazione sulla stessa orbita, con uno sfasamento di 90 gradi tra ciascun satellite. Questa configurazione orbitale, combinata con la capacità di acquisizione con incidenza obliqua fino a 52 gradi, una larghezza di fascia di 14 chilometri e l'eccezionale agilità dei satelliti, consente di rivisitare qualsiasi punto del globo due volte al giorno, rendendo il sistema ideale per il monitoraggio di siti sensibili, la prevenzione dei rischi e la copertura di vaste aree.

Pléiades Neo come la precedente costellazione, consente l'acquisizione di due immagini, una rivolta in avanti (anteriore) e una rivolta all'indietro (posteriore), creando una coppia stereoscopica con una differenza angolare regolabile. Se necessario, una terza immagine acquisita direttamente sotto il satellite (nadir) può essere acquisita simultaneamente per una visione tri-stereoscopica.

Combinando le bande pancromatiche e multispettrali, le immagini, con profondità di 8 bit per pixel, possono essere visualizzate in bianco e nero (risoluzione del prodotto 30 cm), a colori naturali, a falsi colori (risoluzione del prodotto 1,2 m) o come prodotto combinato pansharpened con la risoluzione di un'immagine pancromatica (*Airbus, 2023*).

L'accuratezza di geolocalizzazione di questo modello riportata nei metadati delle immagini è dell'ordine di 5 metri CE90; anche in questo caso, per una mappatura accurata, è necessaria l'ottimizzazione con GCP (*Perko et al., 2019*).

La stereocoppia satellitare (*Fig. 9*) utilizzata per derivare il modello 3D del ghiacciaio è stata acquisita il 17 ottobre 2023 con un angolo di vista mediamente di circa 41 gradi, e un angolo di incidenza medio di circa 47.5 gradi.



Figura 9: Stereocoppia acquisita dalla costellazione Pléiades Neo il 17 Ottobre 2023

Questi angoli (Fig. 6, Capitolo 3.1), significativamente diversi dall'assetto nadirale, determinano una prospettiva obliqua e possono influire negativamente sia sulla collimazione dei GCP sia sulla fase di ricerca dei punti omologhi, rendendola più complessa a causa delle distorsioni geometriche indotte.

I parametri di acquisizione della stereocoppia sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3: Parametri di acquisizione della stereocoppia Pléiades Neo 2023

Data	ID	Angolo di incidenza (β) [°]			Angolo di convergenza (δ) [°]	Rapporto B/H
		Along (ϕ)	Across (ω)	Overall		
17/10/2023	1	-6.50	-47.50	47.70	15.88	0.28
17/10/2023	2	-26.60	-43.80	47.20		

4.2. Data processing

Le fasi del flusso di lavoro sono state eseguite con modalità analoghe a quelle descritte per il modello del 2017. Pertanto, il presente capitolo si concentrerà unicamente sulle differenze e sulle criticità emerse durante l'elaborazione.

Analogamente al modello del 2017, le coordinate dei punti utilizzati sono state derivate dal modello del 2009, riducendo cautelativamente l'accuratezza associata a

un valore di 1 metro per ogni punto. Questa scelta metodologica deriva dall'incertezza intrinseca a cui è soggetta la fase di collimazione, a causa della prospettiva obliqua delle immagini.

Per l'orientamento del modello sono stati selezionati 11 GCP identificati dai numeri 4, 8, 9, 44, 49, 56, 58, 61, 63, 64 e 65. La diversa geometria di acquisizione delle immagini rispetto al modello del 2017, e al valore più elevato dell'angolo di incidenza del satellite, ha comportato una riduzione del numero di GCP disponibili e ha reso inutilizzabile la posizione di molti punti impiegati nel precedente modello. Di conseguenza è stato necessario identificare nuovi punti, distribuiti in modo da garantire una buona copertura dell'area. A causa della colata detritica in zona Castelfranco (morena sinistra del ghiacciaio, lingua ovest) e della geometria dell'immagine non è stato possibile prendere alcun GCP alla sinistra del ghiacciaio.

Di questi undici punti, quattro (58, 61, 63 e 65) sono stati designati come CP, per una validazione indipendente dall'accuratezza del modello. I restanti sette punti sono stati destinati all'orientamento e restituzione del modello tramite Bundle Block Adjustment (BBA). L'algoritmo è stato eseguito con impostazione di qualità "high", permettendo di utilizzare le immagini alla dimensione originale (Agisoft LLC, 2023) e di mitigare le problematiche intrinseche ai dati, che verranno discusse di seguito.

Come illustrato in *Figura 10* la nuvola di punti derivante presenta diverse zone prive di dati, principalmente localizzate in corrispondenza di zone d'ombra. Questa limitazione è riconducibile alle difficoltà intrinseche degli algoritmi di dense stereo matching nell'elaborare aree con scarsa illuminazione e contrasto. In particolare, le zone più critiche corrispondono alla morena sinistra, nella parte superiore del ghiacciaio, e alla lingua est, dove si osserva una notevole mancanza di punti.

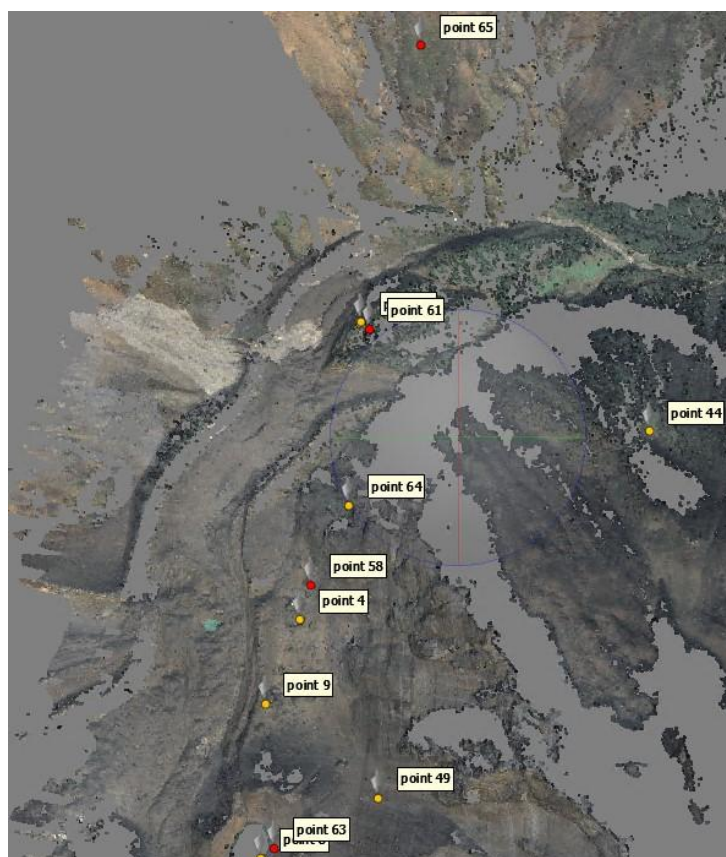


Figura 10: Nuvola di punti del 2023. GCP in arancio e CP in rosso

L'analisi delle mappe di profondità (Figg. 11 e 12) conferma il fallimento dell'algoritmo di *dense stereo matching* in queste aree. A causa di queste problematiche, si è deciso di escludere tali aree dal successivo confronto tra i modelli, al fine di evitare risultati non affidabili nell'analisi comparativa.

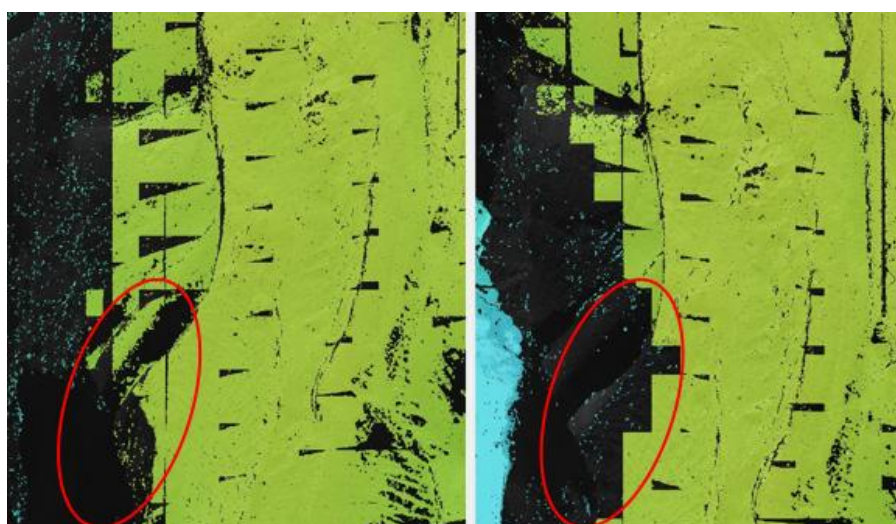


Figura 11: Mappa di profondità generata per la stereocoppia 2023 con focus sulla morena sinistra nella parte superiore del ghiacciaio (evidenziata in rosso). I punti neri indicano le zone in cui l'algoritmo non è stato in grado di trovare punti omologhi

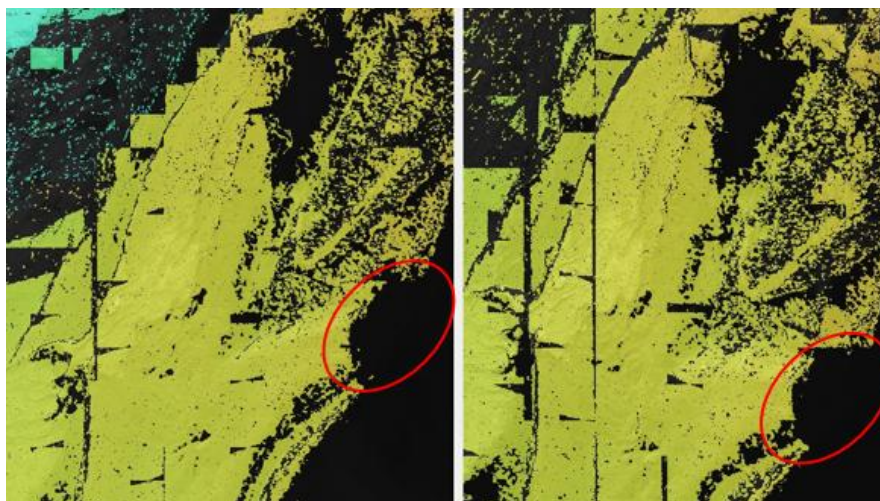


Figura 12: Mappa di profondità generata per la stereocoppia 2023 con focus sulle lingue del ghiacciaio. Evidenziata in rosso si nota la parziale mancata ricostruzione della lingua est. I punti neri indicano le zone in cui l'algoritmo non è stato in grado di trovare punti omologhi

L'analisi della matrice di covarianza dei punti omologhi ha evidenziato una deviazione standard (σ), con la maggior parte dei valori nell'ordine di 0,50 m, pari a circa il doppio del GSD (30 cm). Tale valore rientra comunque nel limite massimo di 2-3 volte il GSD, considerato accettabile in contesti fotogrammetrici. I valori di σ superiori rientrano in un range pari a 0,5 – 1,7 m e sono in quantità non significative, pertanto, non compromettono l'accuratezza complessiva del modello.

I risultati dell'analisi degli errori sui GCP e CP sono riportati in *Tabella 4*. I risultati evidenziano un Root Mean Square Error (RMSE) di 0,44 m per i GCP e di 0,54 m per i CP. Come previsto l'RMSE dei CP è maggiore rispetto a quello dei GCP comunque coerente con la risoluzione a terra delle immagini (GSD) e con l'accuratezza delle coordinate dei CP, validando l'accuratezza del modello.

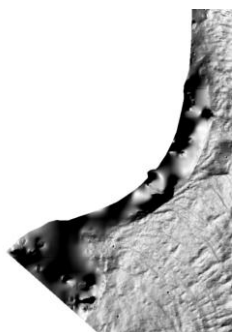
Tabella 4: RMSE ed errore medio lungo le tre dimensioni (X, Y, Z) relativi ai GCP e ai CP, in metri.
Modello 2023

	East error (X)	North error (Y)	Alt. error (Z)	RMSE
GCP	0,23	0,26	0,27	0,44
CP	0,39	0,16	0,34	0,54

4.2.1. Prodotti fotogrammetrici

La nuvola di punti è stata realizzata a partire dalla generazione di una mappa di profondità con impostazione di qualità "Ultra High", che fornisce la precisione delle corrispondenze alla risoluzione originale dell'immagine. La nuvola di punti risultante è composta da circa 600 milioni di punti, un valore coerente con l'area, e la risoluzione delle immagini utilizzate.

Successivamente è stato generato il DEM dalla mappa di profondità con una risoluzione spaziale pari a 50 cm. Le aree critiche citate nel capitolo 4.2., come da aspettative, si sono riflesse anche nel DEM mostrando nelle corrispettive aree una interpolazione molto grossolana (*Fig. 13*), che ha comportato la conseguente eliminazione delle stesse.



(a) Porzione della morena sinistra nella parte superiore del ghiacciaio



(b) Lingua est del ghiacciaio

Figura 13: Parti interpolate a causa del fallimento dell'algoritmo di ricerca dei punti omologhi

Nella seguente *Figura 14* è riportato il confronto tra il DEM iniziale e il DEM privato delle aree critiche.

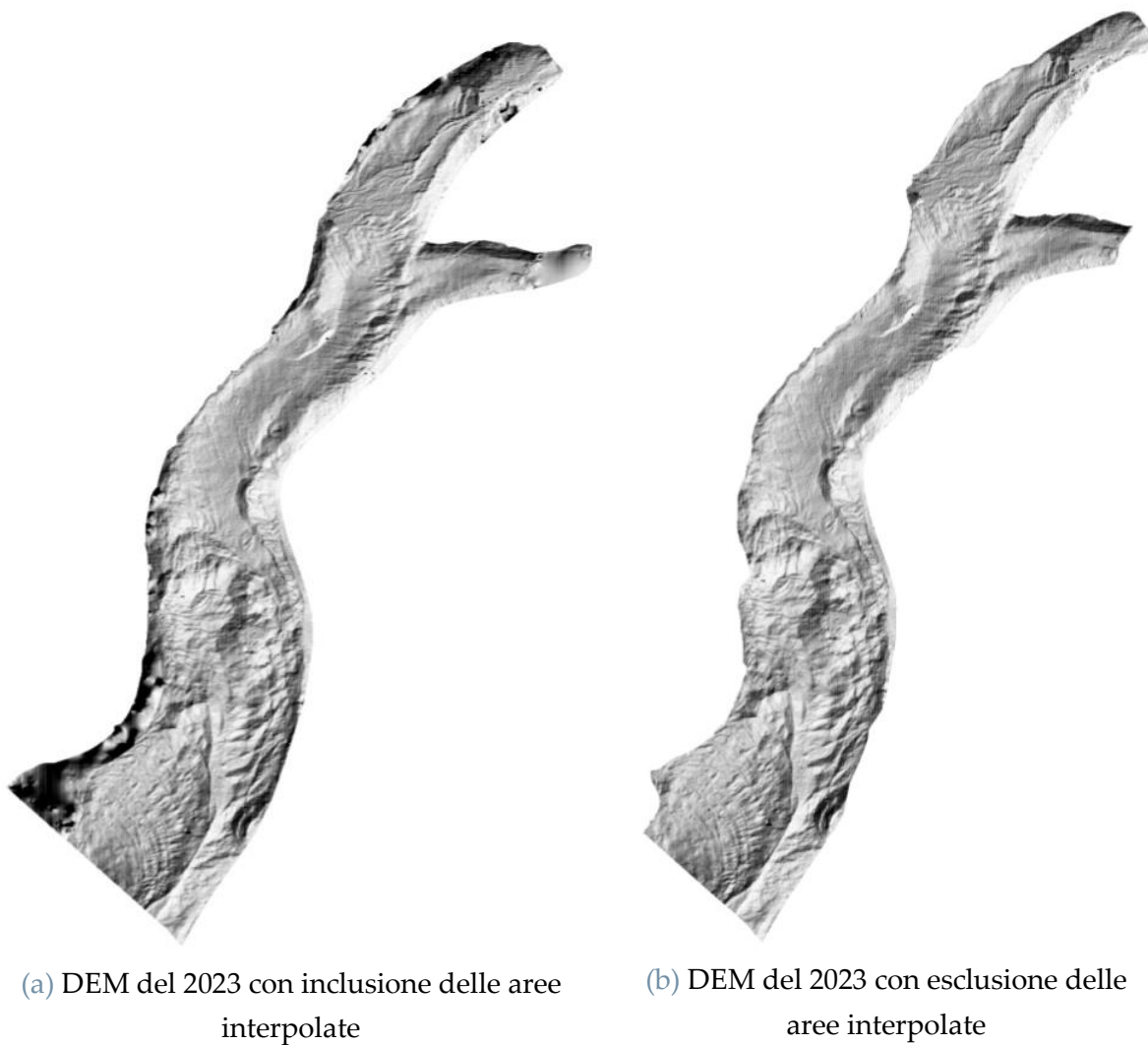


Figura 14: Confronto tra le due aree di interesse del ghiacciaio. Con inclusione delle aree interpolate (a), con esclusione delle aree interpolate (b)

L'ortomosaico infine è stato generato a partire dal DEM, anch'esso con una risoluzione di 50 cm.

5 Validazione dei DEM

Una volta generati i modelli digitali di elevazione, si è effettuata una validazione, secondo una procedura standard nel campo del telerilevamento, come descritto da Perko (*et al.* 2019). Il DEM generato viene confrontato in termini di differenze altimetriche con uno di riferimento. Tuttavia, la natura dinamica dei ghiacciai rende complesso il confronto diretto tra DEM di periodi diversi, a causa delle continue variazioni che la massa glaciale subisce. Pertanto, per la validazione si sono selezionate aree circostanti il ghiacciaio presumibilmente stabili, ovvero non influenzate da variazioni significative nel corso del tempo. Su queste aree sono state calcolate le differenze altimetriche (DEM_{Δ}) tra il DEM di interesse (DEM_i) e il DEM di riferimento (DEM_r) mediante la seguente formula:

$$DEM_{\Delta} = DEM_i - DEM_r \quad (1.4)$$

Il DEM di riferimento scelto è rappresentato dal DEM del 2009, acquisito tramite rilievo con aereo. Questa scelta è stata condizionata dalla disponibilità del modello e dalla comprovata stabilità delle zone di validazione considerate come riportano le successive analisi.

5.1. Modello del 2017

Al fine di valutare l'accuratezza del modello digitale di elevazione generato, sono state selezionate quattro aree di riferimento, illustrate in *Figura 15*.

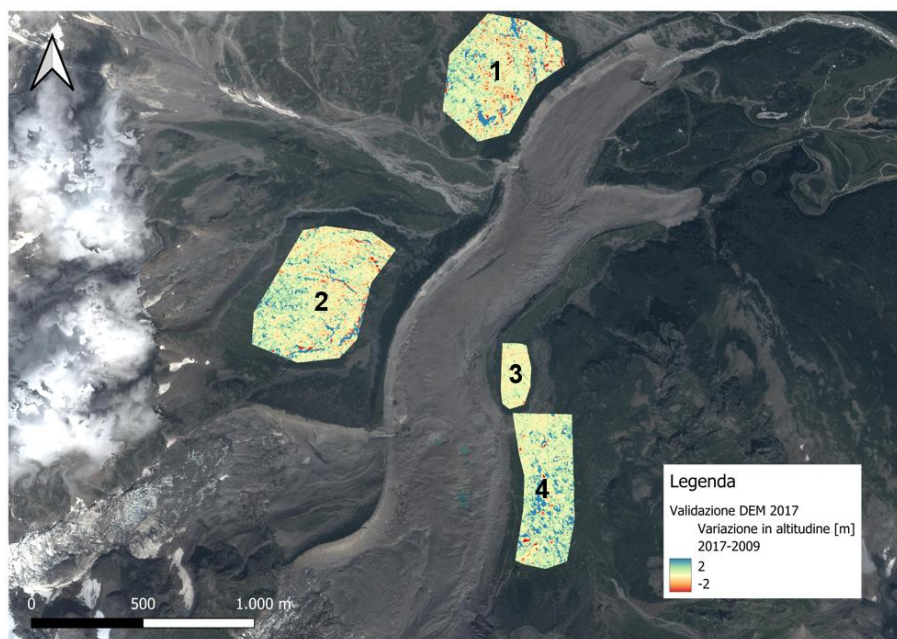


Figura 15: Distribuzione spaziale delle aree di validazione nel modello del 2017 (ortofoto 2017)

La scelta di queste aree è ricaduta su zone caratterizzate da una morfologia relativamente stabile e omogenea, con lo scopo di minimizzare l'influenza di eventuali variazioni naturali del terreno. Le aree 1 e 2 corrispondono a porzioni di versante, con copertura a tratti di vegetazione, l'area 3 a una zona pianeggiante e l'area 4 a una zona con presenza di massi e un piccolo corso d'acqua. Per ciascuna di queste aree, sono state calcolate le differenze altimetriche rispetto al DEM di riferimento, ottenendo i risultati riportati in *Tabella 5*.

Tabella 5: Statistiche delle aree di validazione considerate nel modello del 2017, in metri

Area	Media	Deviazione standard
1	0,41	1,53
2	0,37	1,46
3	0,11	0,41
4	0,67	1,10

La maggior parte delle differenze riscontrate non eccedono il limite di 2-3 volte il GSD (50 cm), tuttavia l'area 1 e 2 mostrano valori elevati di deviazione standard, seguite

dall'area 4. I valori elevati nelle aree 1 e 2 sono causati principalmente dalla morfologia delle aree, caratterizzata dalla pendenza del versante e dalla presenza di vegetazione, portando a differenze altimetriche maggiori anche in presenza di piccoli errori di ricostruzione. Nell'area 4 il più alto valore della media è attribuibile alla presenza del piccolo fiume e dei molti massi che hanno generato zone d'ombra e occlusioni, influenzando negativamente sul processo di dense stereo matching, portando ad una maggiore incertezza nella ricostruzione del DEM. Per concludere è possibile che parte delle differenze riscontrate tra i DEM non siano dovute a reali variazioni altimetriche, ma piuttosto a errori di ricostruzione causati dalla complessa morfologia del terreno. A sostegno di questo, nell'area 3, che presenta una superficie omogenea, si sono riscontrate differenze minime, confermando l'importanza della morfologia del terreno nella qualità dei risultati.

5.2. Modello del 2023

Al fine di validare il modello del 2023 si sono selezionate solamente le aree 3 e 4 in quanto le prime due si trovano in zone non ricostruite adeguatamente dall'algoritmo di dense stereo matching. La distribuzione spaziale nelle aree stabili è illustrata in *Figura 16*, e le statistiche di ogni area sono riportate in *Tabella 6*.

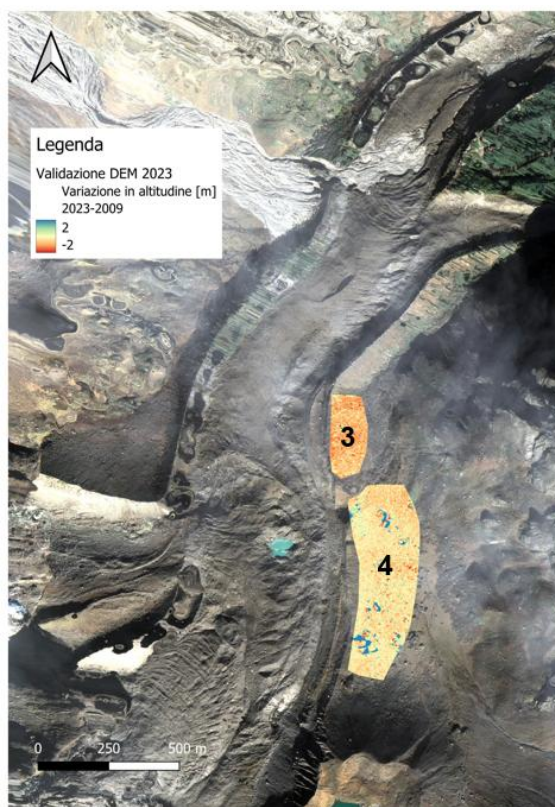


Figura 16: Distribuzione spaziale delle aree di validazione nel modello del 2023 (ortofoto 2023)

Tabella 6: Statistiche delle aree di validazione considerate nel modello del 2023, in metri

Area	Media	Deviazione standard
3	- 0,77	0,35
4	-0,14	1,04

I risultati mostrano che l'area 4 nonostante la morfologia più complessa, presenta una media delle differenze altimetriche relativamente bassa, ma con una deviazione standard elevata, suggerendo la presenza di errori localizzati. Questa situazione potrebbe essere spiegata dalla presenza dei numerosi massi e dalle loro zone d'ombra, e da un effetto di compensazione tra errori positivi e negativi. Al contrario, l'area 3, caratterizzata da una morfologia più omogenea, presenta una leggera sottostima sistematica delle altimetrie. Questo potrebbe essere attribuito alla limitata densità di punti, causata dalla geometria di acquisizione della stereocoppia, oltre che dalla maggiore incertezza nelle coordinate dei GCP.

6 Comparazione dei DEM

L'analisi dei cambiamenti morfologici del ghiacciaio, eseguita mediante il software QGIS, ha interessato il periodo compreso tra il 2009 e il 2023 con l'utilizzo di tre diversi modelli digitali di elevazione. Il DEM del 2009, caratterizzato da una risoluzione spaziale di 40 cm, è stato ottenuto tramite rilievo con aereo, mentre i DEM del 2017 e 2023, come spiegato nei Capitoli 3 e 4, sono stati derivati da stereocoppie satellitari con risoluzioni inferiori.

Al fine di garantire la comparabilità dei dati, tutti i DEM sono stati ricampionati a una risoluzione comune di 100 cm, corrispondente a quella del DEM del 2017. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di poter effettuare confronti diretti tra i modelli, evitando errori sistematici dovuti a differenze di risoluzione. Tuttavia, il processo di ricampionamento può comportare una perdita di dettaglio nelle zone caratterizzate da forti gradienti topografici, limitando la precisione delle analisi.

L'area di interesse è stata definita in corrispondenza del perimetro del ghiacciaio nel 2009 (Fig. 17).



Figura 17: Area di interesse selezionata sul perimetro del ghiacciaio nel 2009

Questa scelta strategica permette di tracciare l'evoluzione del ghiacciaio nel tempo, evidenziando eventuali arretramenti o avanzamenti della lingua glaciale rispetto allo scenario più antico disponibile in questa analisi.

6.1. Differenze altimetriche e volumetriche

L'analisi delle variazioni altimetriche è stata condotta mediante una sottrazione pixel per pixel tra i due DEM considerati, seguendo la formula 1.4. riportata nel Capitolo 5. In particolare, il DEM più recente è stato sottratto a quello più antico ottenendo una mappa delle variazioni altimetriche. I valori positivi indicano un aumento di quota, ovvero un accumulo di materiale, mentre i valori negativi indicano una diminuzione di quota, ovvero un'erosione. Questa rappresentazione intuitiva facilita l'interpretazione dei risultati.

Avendo a disposizione tre modelli per tre diversi anni, sono state generate due mappe di variazioni altimetriche. La prima, visibile in *Figura 18*, illustra la variazione in quota subita dal ghiacciaio tra il 2009 e il 2017.

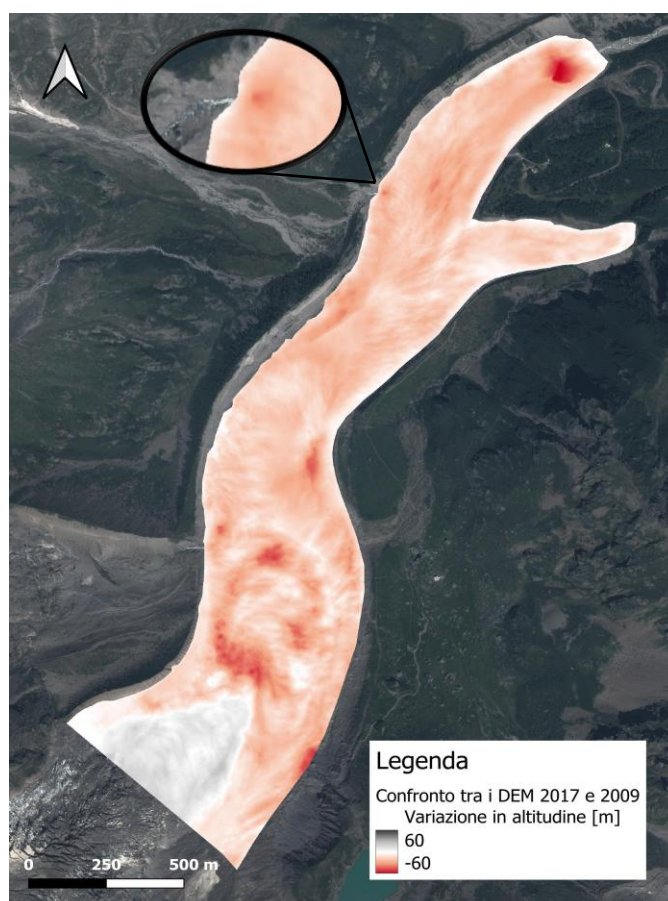


Figura 18: Variazioni altimetriche tra il 2009 e il 2017. In alto a sinistra il focus mostra un picco di erosione in corrispondenza del punto in cui il T. Castelfranco oltrepassa la morena

Nel periodo considerato, il ghiacciaio ha manifestato una dinamica complessa. Mentre la zona superiore ha registrato un accumulo di ghiaccio con un massimo di 27,5 metri, la parte immediatamente successiva e la lingua glaciale hanno subito un significativo decremento con un massimo in corrispondenza della lingua pari a 60 metri. A parte per la limitata zona superiore, la mappa evidenzia un pattern chiaro di perdita glaciale su tutta la superficie del ghiacciaio, con un bilancio complessivo di circa $19,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ persi in 8 anni, su $1,3 \times 10^6 \text{ m}^2$ di area analizzata. Dall'elaborazione dei risultati il ghiacciaio ha registrato una perdita media di $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Una zona di interesse è quella del fiume Castelfranco che a seguito della colata detritica del 2008 defluisce in parte attraverso un percorso endo/subglaciale, a partire dal punto in cui oltrepassa la morena laterale sinistra in corrispondenza dell'inizio della lingua ovest. In *Figura 18* è visibile un focus di questa zona, in cui si nota un picco di erosione, probabilmente dovuta all'attività di erosione del fiume nel periodo analizzato.

La seconda mappa, illustrata in *Figura 19*, mostra le variazioni altimetriche nel periodo compreso tra il 2017 e il 2023.

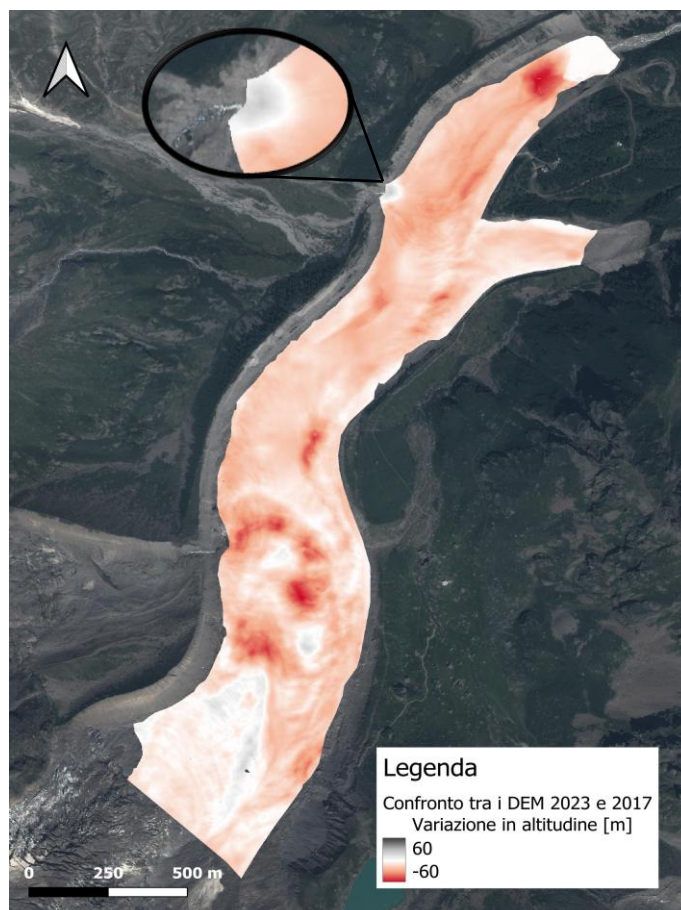


Figura 19: Variazioni altimetriche tra il 2017 e il 2023. In alto a sinistra il focus mostra una zona di accumulo oltre la morena formatasi probabilmente in seguito alla colata detritica dell'agosto 2023

L'analisi comparativa tra i diversi periodi ha evidenziato una continuità nelle tendenze generali dell'evoluzione del ghiacciaio, con un persistente ritiro della lingua glaciale e un'area di accumulo nella zona superiore. Tuttavia, l'area di accumulo appare molto più frastagliata e meno netta rispetto al periodo precedente. Parallelamente, il ritiro della lingua glaciale è proseguito, con un decremento massimo di 57 metri. Il bilancio complessivo di $16,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ persi su un'area analizzata di $1,15 \times 10^6 \text{ m}^2$, seppur inferiore rispetto al precedente periodo, dimostra l'accelerazione dello scioglimento del ghiacciaio. Il periodo analizzato in questa analisi è infatti inferiore al precedente di 2 anni, risultando in una perdita di massa glaciale media superiore e pari a $2,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

L'analisi della zona del fiume Castelfranco, visibile nel focus in *Figura 19*, ha un comportamento contrario rispetto alla *Figura 18*. Questo è ragionevole sapendo che la stereocoppia del 2023 utilizzata è successiva all'evento alluvionale registrato nel settembre del 2023. La mappa mostra chiaramente come il corso d'acqua in questo tratto sia stato parzialmente o completamente ostruito dai sedimenti. Tuttavia, la temporalità dei dati utilizzati non consente di isolare l'impatto esclusivo della colata detritica, rendendo necessaria un'analisi più dettagliata, che verrà affrontata nel capitolo successivo, al fine di quantificare il contributo di questo evento ai cambiamenti morfologici del ghiacciaio.

6.2. Sezioni

Al fine di approfondire i risultati dell'analisi precedente sono state identificate delle sezioni rappresentative sul ghiacciaio illustrate in *Figura 20*.

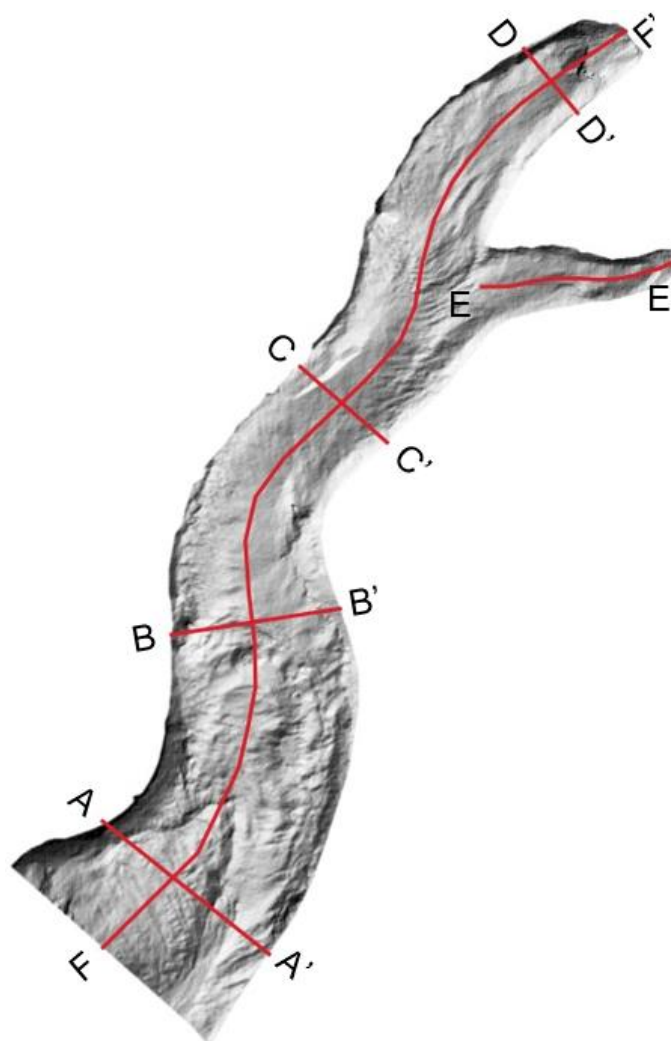


Figura 20: Identificazione delle sezioni sul ghiacciaio

Le sezioni sono state elaborate utilizzando un tool di QGIS e attraverso la funzionalità di sovrapposizione dei DEM è stato possibile visualizzare in modo chiaro l'evoluzione del profilo altimetrico del ghiacciaio nel tempo. Per chiarezza visiva i profili altimetrici sono stati rappresentati graficamente con colori distinti: nero per il 2009, blu per il 2017 e rosso per il 2023.

La sezione FF' (*Fig. 21*) mostra l'andamento del ghiacciaio longitudinalmente, con inizio in corrispondenza della zona superiore e termine nella zona terminale della lingua ovest.

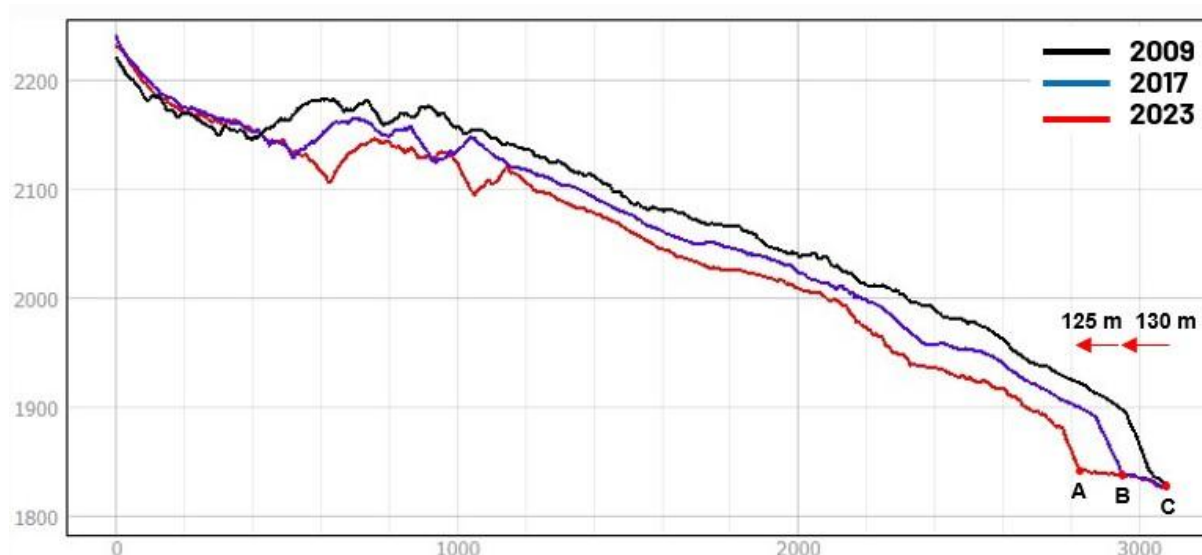


Figura 21: Sezione FF'

L'analisi della sezione longitudinale FF' evidenzia un risultato in linea con l'analisi precedente. La zona di accumulo, seppur presente è limitata e non compensa l'intensa ablazione che interessa la restante superficie del ghiacciaio. In particolare, è possibile identificare quattro zone caratterizzate da dinamiche differenti. Una apicale di accumulo, una zona immediatamente successiva contraddistinta da picchi di erosione nell'ordine di 30-50 metri, probabilmente dovuti alla presenza di un lago epiglaciale, una zona centrale marcata da un'uniforme perdita di massa glaciale risultando in un abbassamento di circa 20 metri in ciascuno dei due periodi considerati. Infine, con un comportamento simile ma più intenso rispetto la zona precedente, la lingua ovest, caratterizzata da un abbassamento di circa 25 metri in ciascuno dei due periodi, risultando in una perdita media annua di 3,1 m tra il 2009 e il 2017, e di 4,1 m tra il 2017 e il 2023. La sezione FF', permette inoltre di stimare il ritiro della lingua ovest nel corso del tempo. Nel primo periodo si stima un arretramento di 130 metri, con un ritiro medio di 16,3 m/anno, mentre nel secondo si stima un arretramento di altri 125 metri, con un ritiro medio di 20,8 m/anno.

La sezione EE' (Fig. 22) mostra l'andamento longitudinale della lingua est, in cui si osserva un comportamento correlabile alla lingua ovest, con un abbassamento medio di circa 1,8 m/anno tra il 2009 e il 2017, e di 2,5 m/anno tra il 2017 e il 2023.

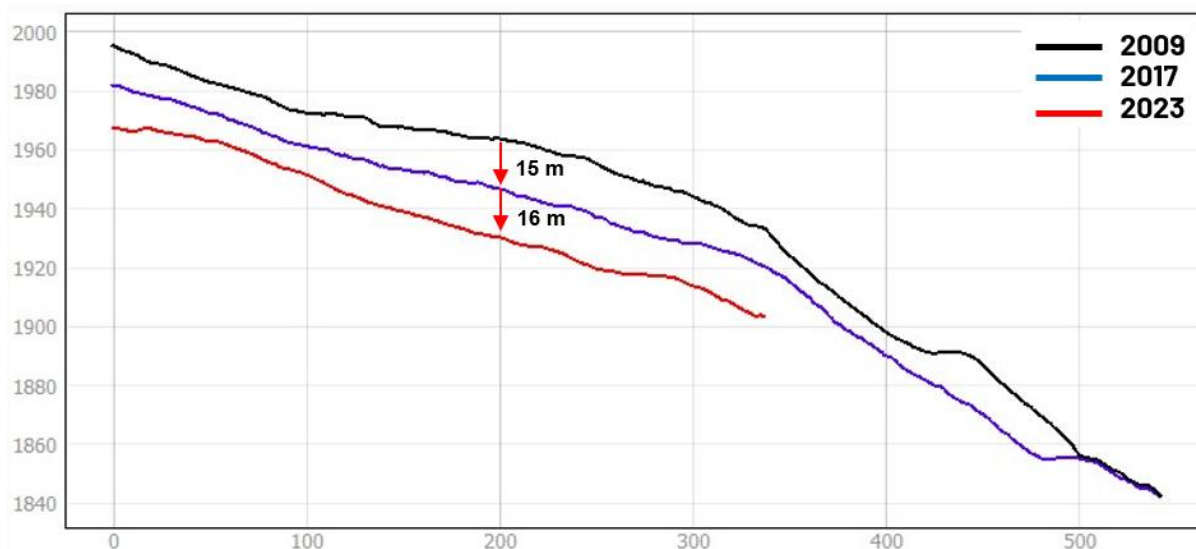


Figura 22: Sezione EE'

La sezione DD' (Fig. 23) mostra il profilo trasversale della lingua ovest in corrispondenza della parte terminale al 2023 (punto A nella sezione FF', Fig. 21). Ciò permette di osservare l'abbassamento di 57 m verificatosi tra il 2017 e il 2023, delineando una perdita di 9,5 m/anno in questo periodo. Analogamente l'abbassamento maggiore registrato tra il 2009 e il 2017 è stato di 60 m, evidenziando una perdita di 7,5 m/anno. È fondamentale notare che gli abbassamenti sopracitati sono presi lungo la verticale Z, e non perpendicolarmente alla superficie del ghiacciaio. Ciò implica valori maggiori in corrispondenza di pendenze maggiori, in particolar modo nella zona terminale della lingua affetta da un notevole gradiente.

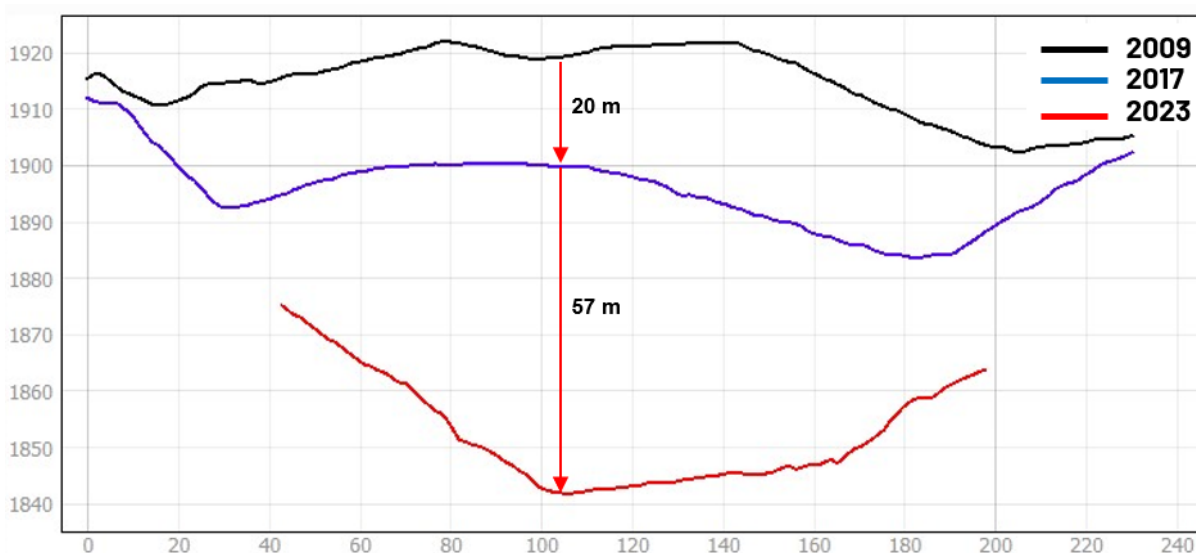


Figura 23: Sezione DD'

Le sezioni trasversali CC' (Fig. 24) e BB' (Fig. 25) mostrano in dettaglio le zone centrali del ghiacciaio, offrendo una visione approfondita delle variazioni di spessore e morfologia nel tempo. La sezione CC' illustra la zona più a valle (Fig. 24) che presenta una morfologia più uniforme. L'abbassamento riscontrato in questa zona è simile tra i due periodi analizzati, suggerendo una risposta uniforme del ghiacciaio alle variazioni climatiche o di bilancio di massa.

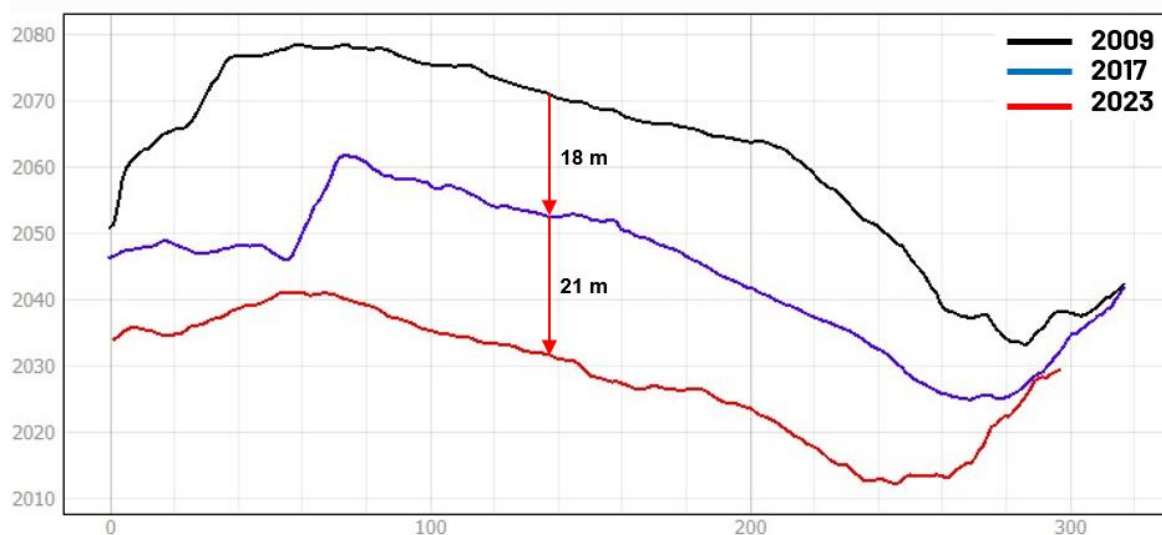


Figura 24: Sezione CC'

La sezione BB' (Fig. 25), situata nella parte centrale-superiore del ghiacciaio delinea un abbassamento uniforme di circa 13 m tra il 2009 e il 2017 lungo tutta la sezione. Tra il 2017 e il 2023 si registra un'accelerazione significativa dell'abbassamento. Inoltre, la parte destra della sezione presenta una piccola zona di accumulo.

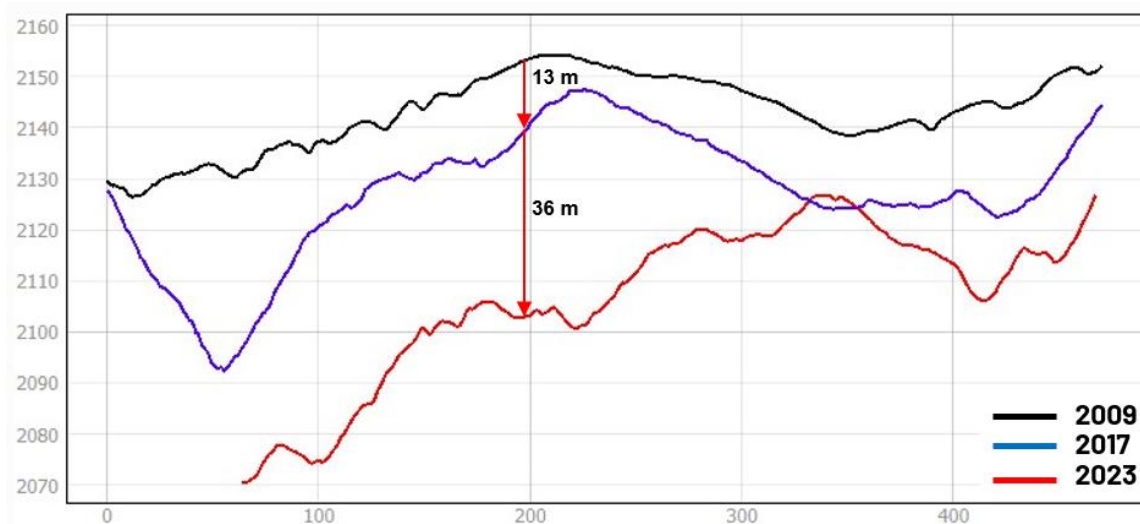


Figura 25: Sezione BB'

La sezione AA' (Fig. 26), situata nella zona superiore del ghiacciaio, mostra un'evoluzione interessante nel corso del tempo. L'analisi comparativa tra il 2009, il 2017 e il 2023 rivela un andamento inizialmente positivo, seguito da un cambiamento significativo.

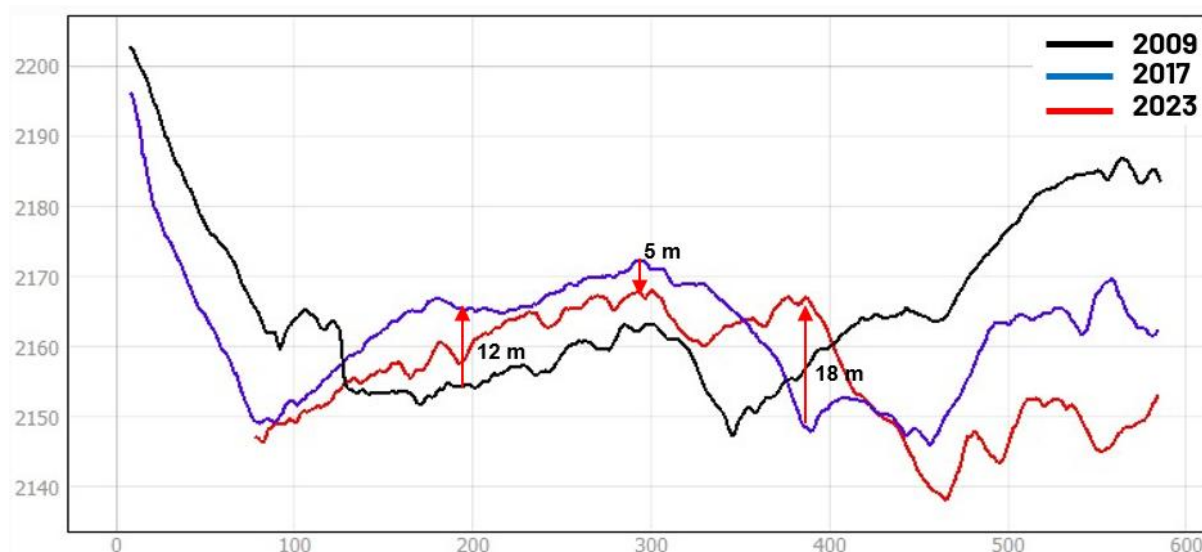


Figura 26: Sezione AA'

Nel periodo compreso tra il 2009 e il 2017, si registra un accumulo di circa 12 metri lungo la sezione AA'. Questo indica un bilancio di massa positivo in questa zona del ghiacciaio, dove l'apporto di neve supera la perdita di massa dovuta alla fusione e ad altri processi. Tuttavia, il profilo del 2023 mostra un cambiamento significativo, con un abbassamento generalizzato della superficie del ghiacciaio, tra i 2 e i 9 metri, anche nella zona di accumulo. Questo suggerisce un'inversione di tendenza preoccupante.

Nonostante l'abbassamento generale, si osserva una ristretta ma importante zona di accumulo nella parte destra della sezione AA'. Questa zona potrebbe rappresentare un'area più resistente alla fusione o con maggiori apporti di neve nell'ultimo periodo.

Tuttavia, come riportato dall'analisi volumetrica, in entrambi i periodi analizzati l'estensione limitata della zona di accumulo non è sufficiente a compensare la perdita di massa complessiva del ghiacciaio.

7 Analisi della colata detritica del 2023

7.1. Introduzione

Le colate detritiche rappresentano eventi geomorfologici di notevole importanza nei contesti alpini, modellando il paesaggio e influenzando l'evoluzione dei ghiacciai. La presente analisi si concentra sulla colata detritica che il 27 agosto del 2023, ha interessato il versante del Torrente Castelfranco e la lingua occidentale del Ghiacciaio del Belvedere (Fig. 27), con l'obiettivo di comprenderne gli effetti sia sull'area direttamente coinvolta sia sulle zone circostanti. Nello studio sono state utilizzate immagini satellitari integrate con un rilievo da drone per eseguire un'analisi multi-temporale tramite il software Cloud Compare. Il capitolo si articola nella descrizione delle diverse aree di interesse e delle relative metodologie, concludendo in una discussione dei risultati ottenuti.



Figura 27: Colata detritica del 27/08/23 il cui accumulo (grigio chiaro) ha sopravanzato la superficie del Ghiacciaio del Belvedere (Regione Piemonte).

7.2. Metodologia

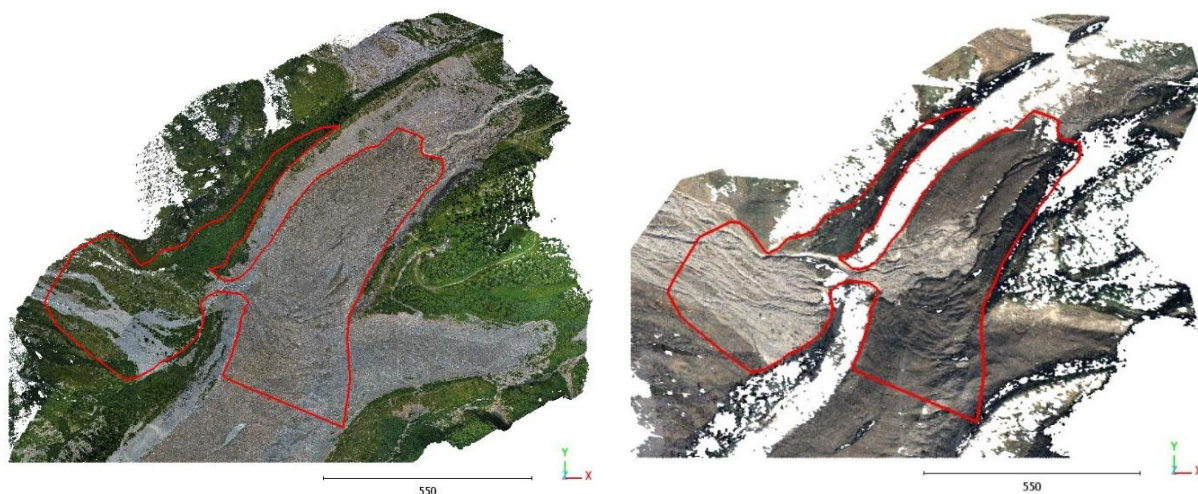
L'analisi si basa sulla comparazione delle nuvole di punti derivanti da diverse fonti: le due stereocoppie satellitari, già citate nei precedenti capitoli, acquisite rispettivamente nel 2017 e nel 2023 (17 ottobre, post-colata), e un rilievo da drone eseguito il 25 luglio 2023 (pre-colata). Attraverso l'utilizzo del software Cloud Compare, in particolare dei tool "Cloud/Cloud distance" e "Compute 2.5d Volume" è stato possibile indentificare le variazioni morfologiche avvenute nel periodo considerato, sia in termini di variazioni di quota sia in termini di variazioni volumetriche. A completamento dell'analisi, si sono generate delle sezioni di interesse sul ghiacciaio e si sono analizzate per i tre diversi DEM (2017, 2023 pre-colata, 2023 post-colata), tramite il software QGIS.

L'area di interesse selezionata per l'analisi comprende sia la porzione di superficie all'interno del ghiacciaio interessata dalla colata detritica, sia la zona colpita sul versante adiacente. Tuttavia, la delimitazione precisa di tale area ha presentato alcune difficoltà, principalmente riconducibili a due fattori legati alle nuvole di punti del 2023.

In primo luogo, la nuvola di punti ottenuta tramite rilievo da drone, pur offrendo una copertura dettagliata dell'area di interesse, presenta un'estensione limitata rispetto alle immagini satellitari. Di conseguenza, la porzione sommitale della colata, non completamente acquisita dal rilievo aereo, è stata necessariamente esclusa dall'analisi volumetrica iniziale (*Fig. 28a*).

In secondo luogo, la nuvola di punti del 2023 ottenuta da satellite presenta una parziale lacuna di dati, che ha impedito l'analisi della morena laterale sinistra della lingua occidentale del ghiacciaio (*Fig. 28b*).

L'area di interesse complessiva, tenendo conto di queste limitazioni, è riportata in dettaglio nella *Figura 28*, ed è stata analizzata confrontando la nuvola di punti 2017 con la nuvola di punti da drone 2023 (pre-colata), e successivamente quest'ultima con la nuvola di punti 2023 da satellite (post-colata). Ciò ha permesso di approfondire i cambiamenti subiti sia nel periodo precedente l'evento sia in quello immediatamente successivo.



(a) Nuvola di punti 2023 realizzata con drone (pre-colata)

(b) Nuvola di punti 2023 generata da stereocoppia satellitare (post-colata)

Figura 28: Delimitata in rosso l'area di interesse per lo studio della colata detritica

Nonostante queste limitazioni, l'analisi della porzione sommitale della colata è stata comunque condotta, seppur attraverso un approccio differente, basato sul confronto tra la nuvola di punti del 2017 e del 2023 (post-colata). Tale analisi, pur non consentendo l'isolamento degli effetti causati dalla colata, a causa del lungo periodo di tempo considerato, ha comunque permesso di ottenere informazioni preziose sull'evoluzione morfologica dell'area.

L'area di studio è stata successivamente suddivisa in due zone differenti, al fine di catturare le diverse dinamiche e interpretare correttamente i risultati.

L'Area 1 (Fig. 29), direttamente interessata dalla colata sulla lingua del ghiacciaio è stata analizzata confrontando la nuvola di punti da drone del 2023 (pre-colata) con quella da satellite del 2023 (post-colata). Ciò ha consentito di quantificare con precisione le variazioni morfologiche indotte dalla colata.

L'Area 2 (Fig. 29), colpita dalla colata sul versante è stata a sua volta suddivisa in due sotto aree:

1. Area 2a (inferiore): anche in questo caso, il confronto tra la nuvola di punti da drone del 2023 e quella da satellite del 2023 ha permesso di isolare gli effetti della colata.
2. Area 2b (superiore): a causa della limitata estensione del rilievo da drone, è stato necessario utilizzare la nuvola di punti del 2017 (pre-colata) in combinazione con quella del 2023 (post-colata). Questa limitazione non ha consentito di

distinguere con certezza gli effetti della colata da altre variazioni morfologiche avvenute nel periodo 2017-2023.

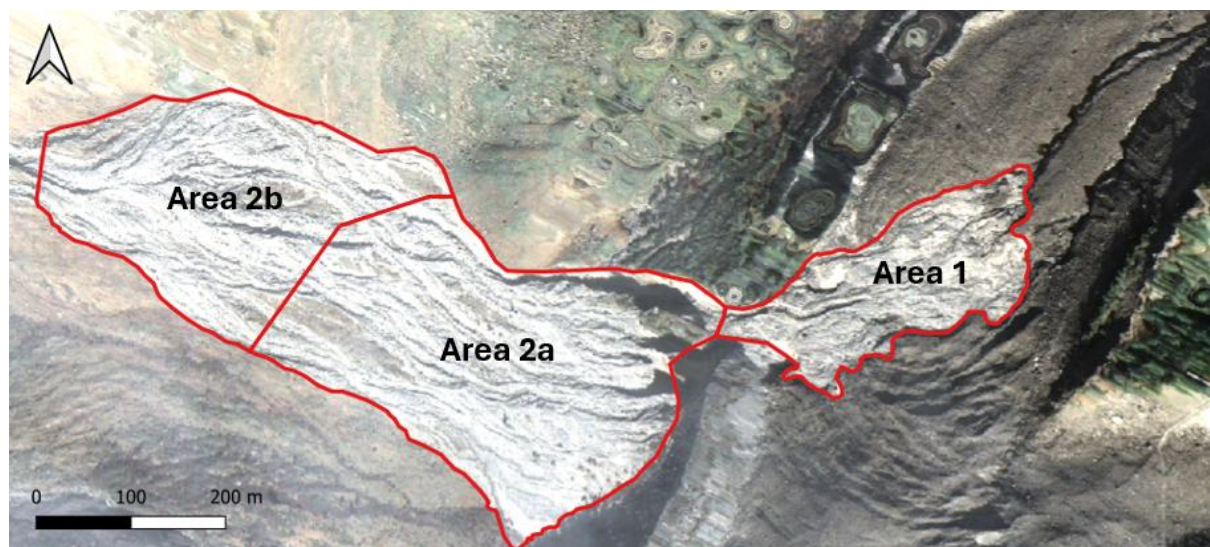


Figura 29: Suddivisione dell'area di studio della colata detritica

Per ciascuna zona, sono state descritte in dettaglio le variazioni morfologiche osservate, supportando l'analisi con sezioni significative e dati quantitativi.

7.3. Analisi dei risultati

L'analisi dell'area di interesse complessiva, nel periodo compreso tra il 2017 e il 2023 (pre-colata) *Figura 30*, ha mostrato variazioni di quota principalmente negative, distribuite uniformemente lungo l'intera superficie della lingua, con picchi negativi nella zona centrale e in corrispondenza della parte terminale. Il versante, sembra invece aver subito fenomeni di accumulo, tuttavia, a causa della scala di colore non vengono esaltati in modo opportuno; pertanto, l'analisi sarà approfondita successivamente durante lo studio della zona 2a.

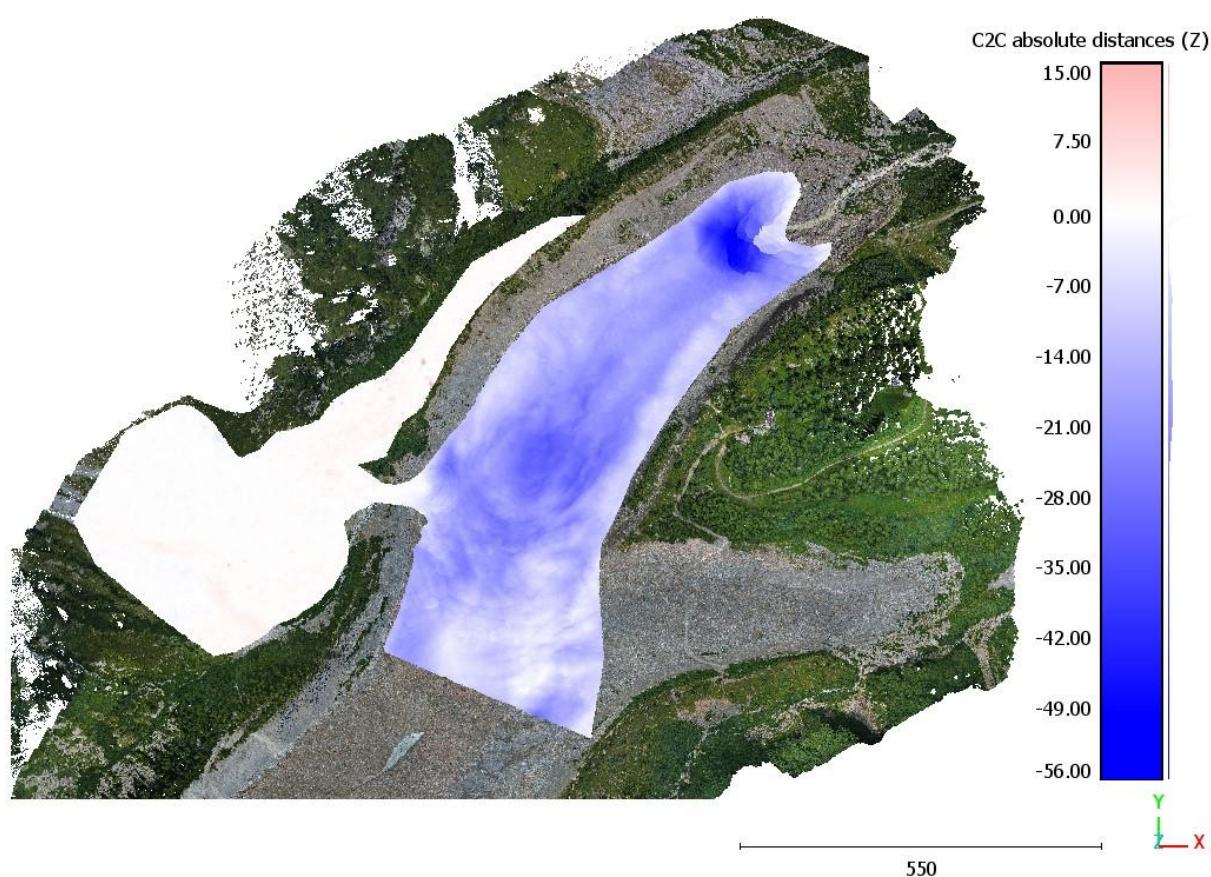


Figura 30: Variazioni altimetriche nell'area di interesse tra il 2017 e il 25 luglio 2023

Analizzando il periodo successivo, la mappa delle variazioni di quota del territorio tra la situazione pre e post evento (*Fig. 31*) ha evidenziato chiaramente il percorso della colata detritica con la formazione di due principali zone di accumulo lungo la lingua glaciale, contemporaneamente il versante sembra aver subito una notevole erosione lungo la zona inferiore.

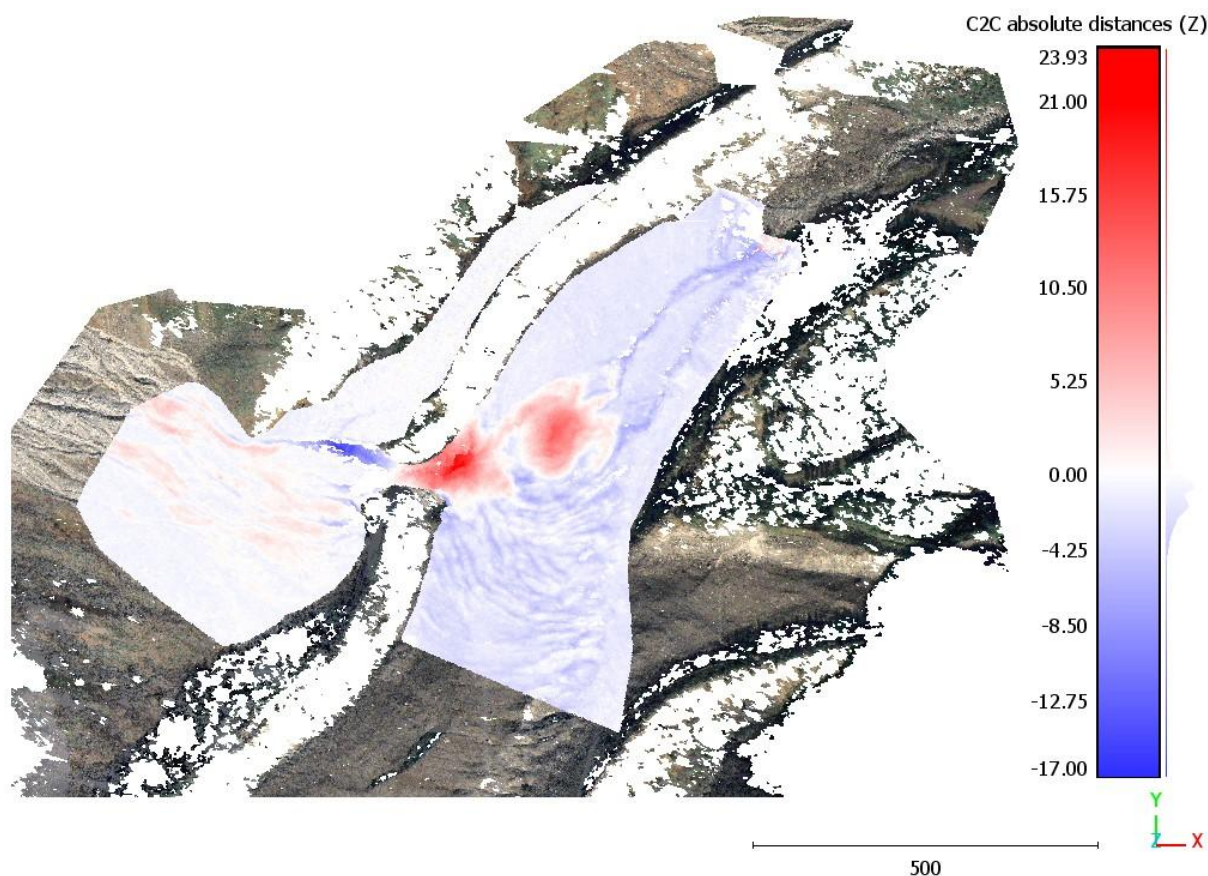
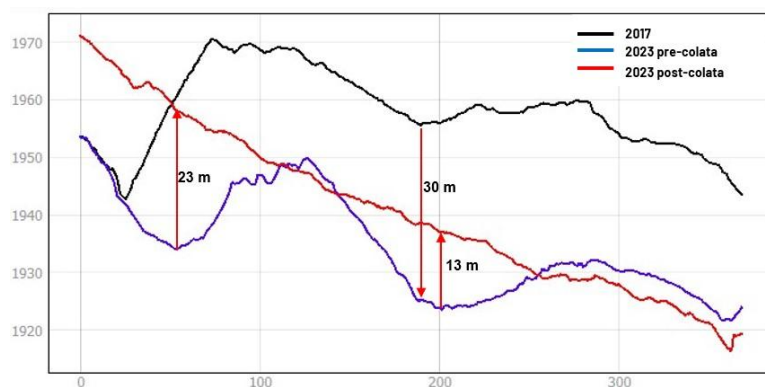


Figura 31: Variazioni altimetriche nell'area di interesse tra il 25 luglio 2023 e il 17 ottobre 2023

La combinazione della mappa in Figura 31 con la sezione FF' in Figura 32a permette un'analisi più dettagliata. Si osserva che la prima zona, la più consistente in termini di volume, si localizza in corrispondenza del punto in cui il fiume Castelfranco supera la morena, incanalandosi tra quest'ultima e la parete glaciale. La seconda zona di accumulo si trova in una posizione più centrale rispetto alla lingua glaciale (Fig. 32a).



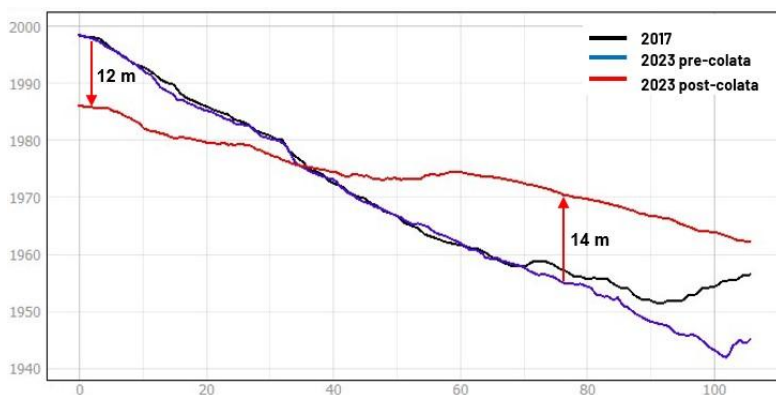
(a) Comparazione dei profili dei DEM identificati dalla sezione FF'



(b) Identificazione della sezione FF' sul ghiacciaio

Figura 32: Sezione FF', le due zone di accumulo

In corrispondenza del letto del fiume a monte della morena si osserva un'area di ablazione significativa (Fig. 31). Osservando la sezione EE' in Figura 33 è plausibile che la colata abbia mobilizzato questa porzione di terreno, trasportandola fino alla prima zona di accumulo e ricoprendo l'area compresa tra la morena e il ghiacciaio, precedentemente erosa dall'azione fluviale.



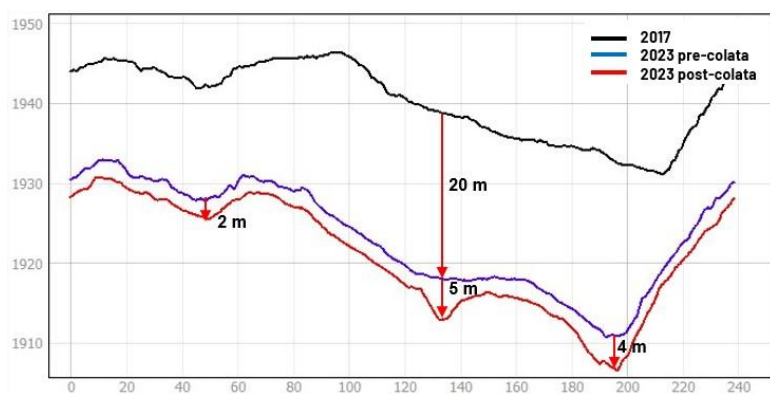
(a) Comparazione delle sezioni EE' riferite a tempi diversi



(b) Identificazione della sezione EE' sul ghiacciaio

Figura 33: Sezione EE', mobilitazione del versante

In precedenza, il fiume scorreva oltre la morena, proseguendo il suo corso sotto il ghiacciaio, tra la morena e la parete glaciale. A seguito della colata, il fiume ha iniziato a scorrere direttamente sulla superficie del ghiacciaio, molto probabilmente, a causa dell'ostruzione del precedente percorso. Il cambiamento ha generato due solchi ben visibili che partono dal termine della zona di accumulo centrale e si estendono fino al termine della lingua ovest, riversandosi nel fiume Anza (Fig. 31). La sezione GG' (Fig. 34) fornisce un'altra vista di questi solchi, profondi circa 4-5 metri.



(a) Comparazione dei profili dei DEM identificati dalla sezione GG'



(b) Identificazione della sezione GG' sul ghiacciaio

Figura 34: Sezione GG', i solchi generati dal fiume Castelfranco

La sezione GG' (Fig. 34) fornisce un'ulteriore informazione sul rapido scioglimento subito dalla lingua ovest, si osserva infatti l'abbassamento uniforme della superficie tra il 25 luglio 2023 (linea blu) e il 17 ottobre 2023 (linea rossa). In appena 84 giorni la lingua ha perso circa 2 metri di spessore.

Le variazioni riscontrate a seguito della colata nell'Area 1 (Fig. 35) determinano un volume di accumulo pari a circa 180 mila metri cubi, ed un volume perso di circa 33 mila metri cubi.

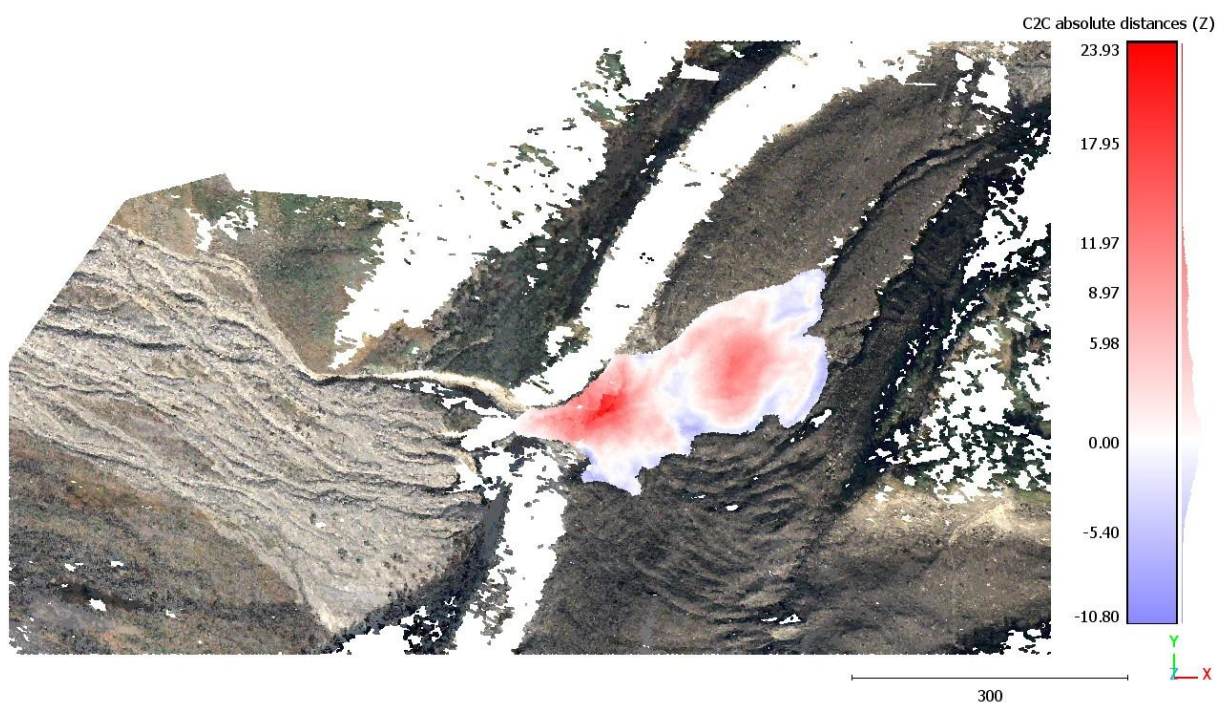


Figura 35: Variazioni di quota tra il 25 luglio e il 17 ottobre 2023 sull'area della lingua glaciale interessata dalla colata detritica.

Relativamente all'Area 2a il bilancio dà esito opposto (Fig. 36) con un volume ablato corrispondente a circa 69 mila metri cubi, a confronto dei 29 mila metri cubi in accumulo.

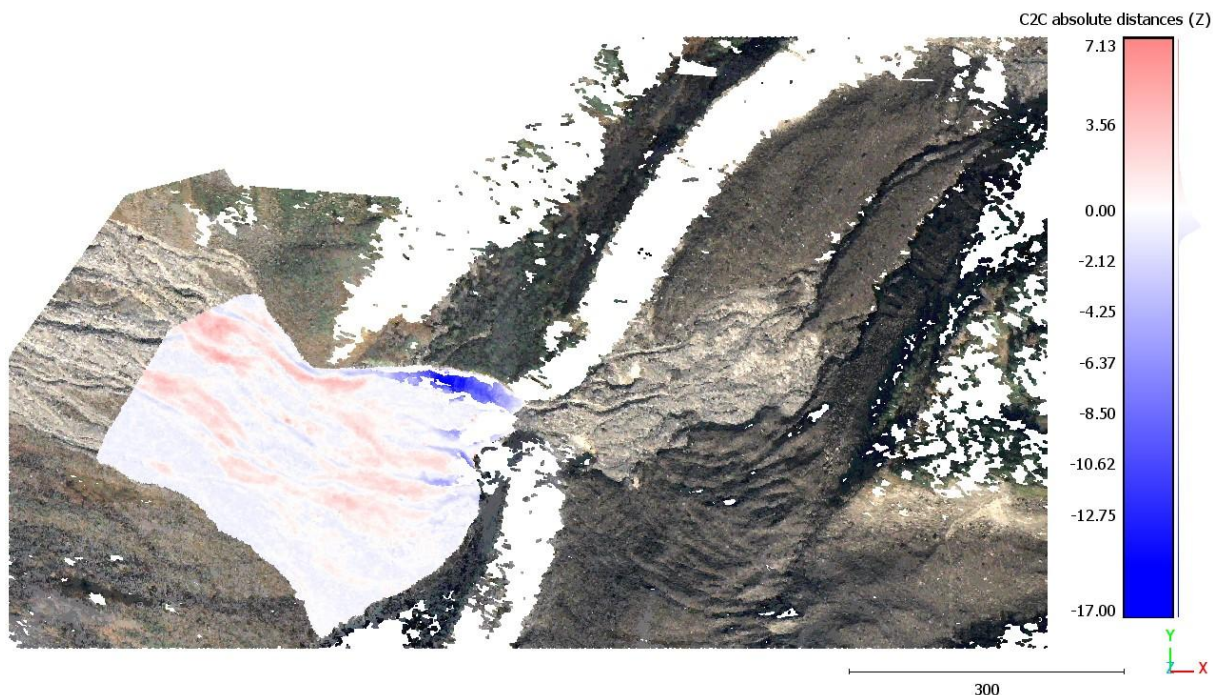
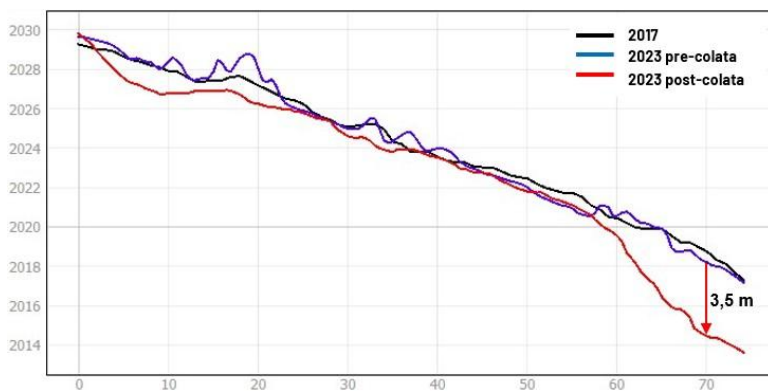


Figura 36: Variazioni di quota tra il 25 luglio e il 17 ottobre 2023 sull'area inferiore del versante interessata dalla colata detritica.

La zona più significativa di massa mobilitata interessa il corso del fiume Castelfranco. Questo sembra essere ragionevole, data l'importante capacità erosiva dei torrenti, soprattutto quando alimentati da colate detritiche. Tuttavia, anche l'area lungo la parte terminale del versante presenta una perdita notevole visibile in sezione DD' (Fig. 37).



(a) Comparazione dei profili dei DEM identificati dalla sezione DD'



(b) Identificazione della sezione DD' sul ghiacciaio

Figura 37: Sezione DD'

L'analisi della stessa Area 2a nel periodo precedente la colata, tra il 2017 e il 2023, ha mostrato principalmente variazioni positive (Fig. 38) fornendo un'informazione molto interessante.

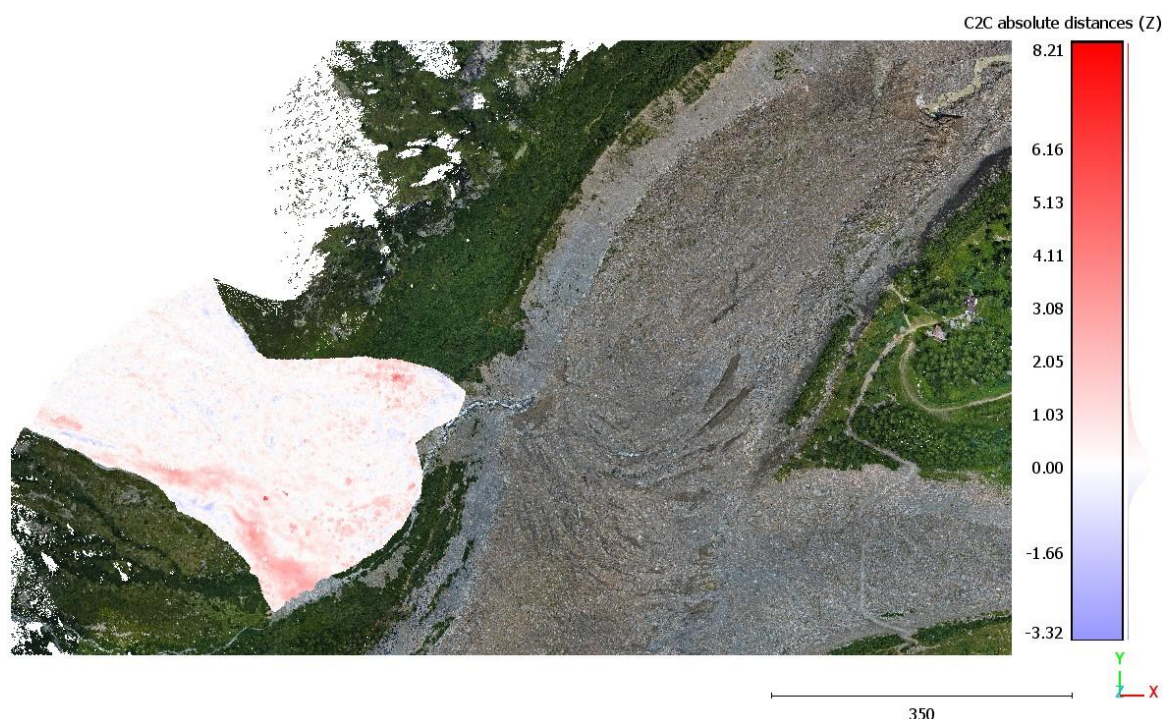


Figura 38: Differenze altimetriche tra il 2017 e il 2023 pre-colata nella zona inferiore del versante.

Durante questo periodo il versante ha subito un accumulo di circa 28.000 m³ di materiale, probabilmente a seguito di crolli o depositi di sedimenti dovuti a eventi meteorologici verificatisi in questo periodo. Tale materiale potrebbe essere stato poi mobilizzato dalla colata del 2023, generando la significativa perdita di volume osservata tra il 2023 pre-colata e il 2023 post-colata (Fig. 36).

Infine, l'analisi del versante è stata completata con l'integrazione dell'Area 2b (superiore). Come discusso nel sottocapitolo precedente (7.2) questo ha comportato l'aumento del periodo di tempo considerato introducendo una maggiore incertezza riguardo agli effetti causati dalla colata. Le variazioni sull'intera area del versante (Fig.39) interessata dalla colata tra il 2017 e il 2023 post-colata, ha evidenziato una dinamica morfologica apparentemente di equilibrio con circa 80.000 m³ in accumulo e 76.000 m³ persi. I valori suggeriscono che i processi di accumulo e di erosione hanno agito in modo sinergico ed equilibrato, tuttavia, questi risultati non sono attribuibili

alla sola colata detritica del 2023 ma piuttosto a una combinazione di eventi che si sono verificati nel periodo di tempo considerato.

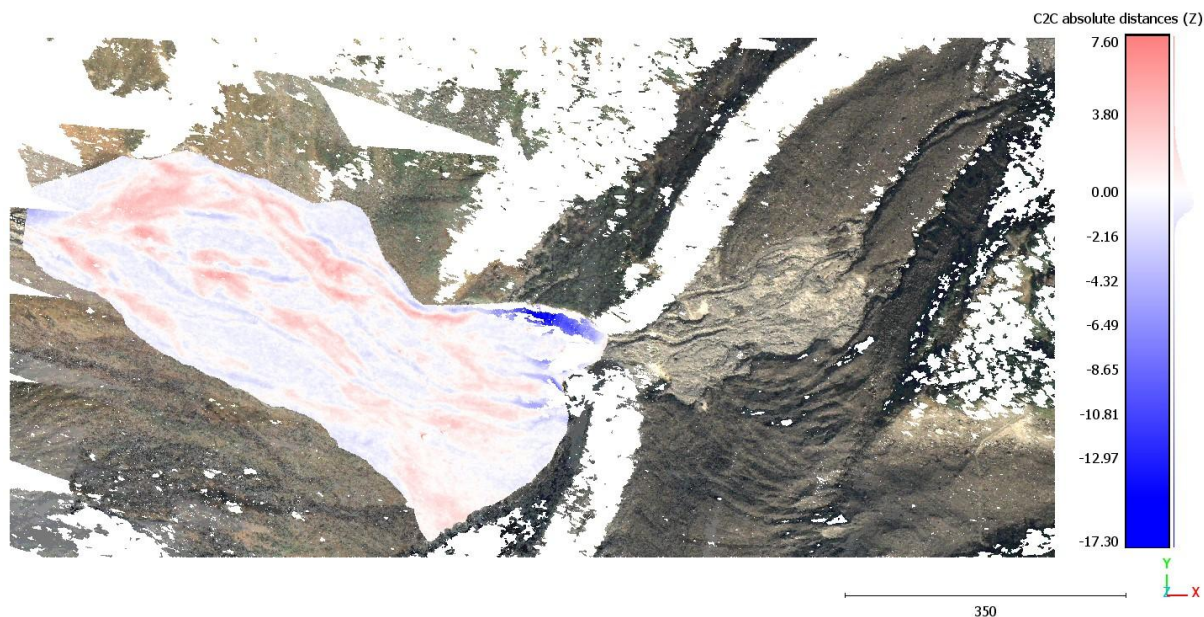


Figura 39: Analisi dei cambiamenti, tra il 2017 e il 2023 post-colata, sull'intera area del versante colpita dall'evento.

Nell'Area 2a prossima al ghiacciaio si osserva una significativa ablazione, attribuibile principalmente all'evento alluvionale del 2023, in quanto la stessa zona analizzata tra il 2017 e il 2023 pre-colata (Fig.38), non ha mostrato significativi fenomeni di ablazione. Più complicata è l'analisi dell'Area 2b superiore del versante in cui l'assenza di dati intermedi tra il 2017 e il 2023 (post-colata) rende difficile quantificare con precisione il contributo della colata detritica alla variazione volumetrica totale. Nonostante ciò, l'analisi mostra come questa zona sia la più interessata da fenomeni di accumulo, suggerendo la probabile esistenza di zone favorevoli all'accumulo di materiale detritico. È stato ipotizzato che la parte alta del versante potrebbe svolgere una funzione di serbatoio di materiale, pronto ad essere mobilitato e alimentare così i processi erosivi nella parte inferiore in occasione di eventi scatenanti come la colata detritica del 2023.

In conclusione, l'analisi ha fornito informazioni preziose sia da un punto di vista quantitativo, sia da un punto di vista qualitativo, aiutando a formulare ipotesi sulle dinamiche che hanno interessato la colata. Riguardo alla parte superiore del versante sarebbero necessarie ulteriori indagini basate su dati satellitari di poco antecedenti alla

colata detritica del 2023 per approfondire la comprensione dei cambiamenti che questo evento ha determinato a questa zona.

L'evento del 27 agosto 2023, a seguito dell'analisi volumetrica effettuata, conferma la superiore entità rispetto a quella dell'evento alluvionale del precedente 7 settembre 2008, dove G. Mortara e M. Giuliano (2008) stimano "solamente" alcune migliaia di metri cubi di volume di sedimenti depositati.

8 Discussioni

I risultati ottenuti forniscono un quadro dettagliato sull'abbassamento della superficie del ghiacciaio dal 2009 al 2017 e dal 2017 al 2023, delineando una tendenza generale di forte perdita di massa, con un'accelerazione nel periodo più recente. Tale andamento, coerente con le dinamiche osservate in altri studi, evidenzia una risposta significativa del ghiacciaio alle variazioni climatiche in atto. Tra il 2015 e il 2020 si è stimata una perdita di volume tra i $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ e i $3,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ di ghiaccio all'anno (Ioli et al., 2022), un valore che si allinea a quelli trovati nel presente studio pari a $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ tra il 2009 e il 2017 e di $2,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ tra il 2017 e il 2023.

Altri autori, come De Gaetani (2021) stimano una perdita di circa $27 \times 10^6 \text{ m}^3$ tra il 2009 e il 2019. Il valore conduce a una stima media di $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ in questo periodo, leggermente più alta rispetto a quella riscontrata nel presente studio di $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ tra il 2009 e il 2017. Tuttavia, bisogna considerare il minor periodo di tempo analizzato e possibili differenze causate dal diverso tipo di strumentazione. In particolare, le immagini satellitari attualmente garantiscono una risoluzione peggiore rispetto ai rilievi da drone utilizzati da De Gaetani (2021), questo potrebbe aver generato approssimazioni dovute al minor dettaglio.

Nonostante questo, i risultati ottenuti forniscono informazioni preziose sulle principali dinamiche evolutive che si allineano a quelle riportate nelle analisi di De Gaetani (2021). Lo studio presenta la mappa delle variazioni di quota subite dal ghiacciaio tra il 2009 e il 2019, mostrando una "distribuita similitudine" con quella presentata in questo elaborato. La comparazione tra le due è illustrata in *Figura 40*.

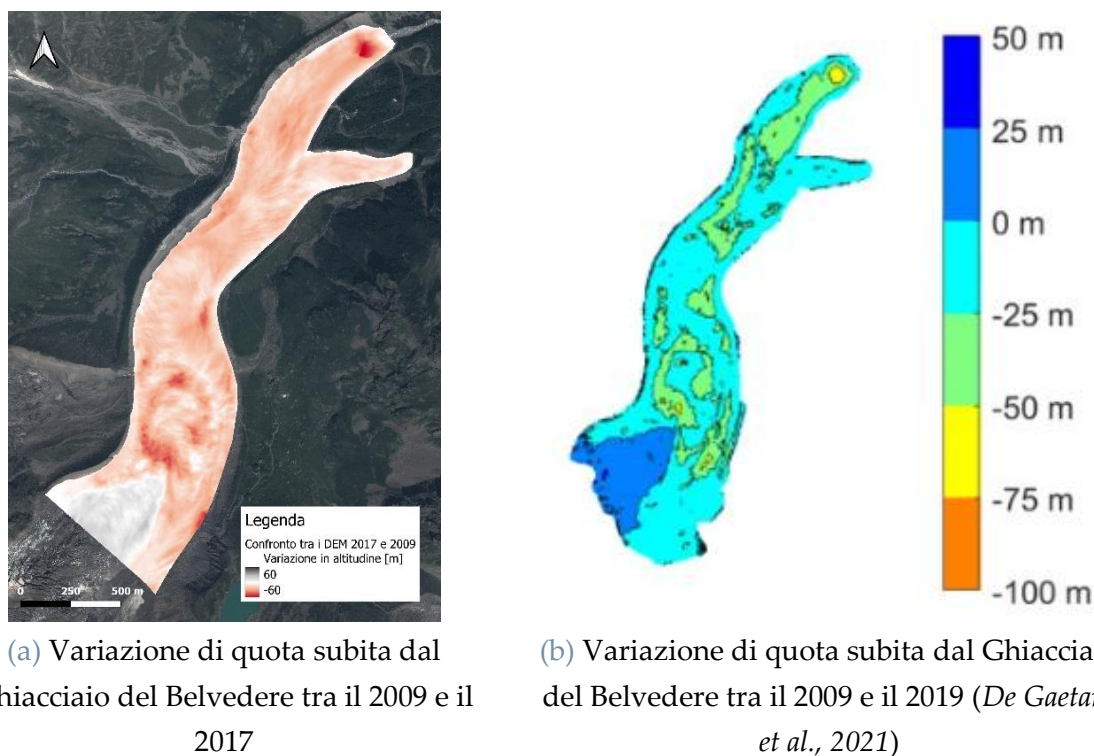


Figura 40: Comparazione tra la mappa di variazioni di quota ottenuta nel seguente studio (a) e quella di De Gaetani (2021) (b)

In entrambe le immagini si osservano variazioni positive (accumulo) nella parte superiore del ghiacciaio, con valori nel range 0-25 metri, e variazioni negative (perdita di massa) nel resto della superficie, con picchi nella zona seguente a quella di accumulo, e lungo la lingua ovest. Tale concordanza suggerisce che, nonostante le differenze metodologiche e di risoluzione, entrambi gli studi sono in grado di catturare le principali dinamiche evolutive del ghiacciaio.

L'accelerazione nello scioglimento del ghiacciaio riscontrata tra il 2017 e il 2023 rispetto al precedente periodo osservato, 2009 – 2017, si allinea ai risultati ottenuti da Ioli (2023) in cui viene identificata una significativa accelerazione nella perdita di massa a partire dal 2016.

Le analisi presenti nello studio sono state soggette ad alcune limitazioni, derivanti da caratteristiche intrinseche della tecnologia utilizzata (satelliti ottici, droni); dai limiti a cui sono soggetti gli algoritmi di ricerca dei punti omologhi (zone d'ombra, zone sature); dalle condizioni meteorologiche che giocano un ruolo importante per quanto riguarda il telerilevamento satellitare ottico. Le immagini satellitari possono essere oscurate da nuvole, nebbia o fumo. In particolare, la stereocoppia 2023 (Fig. 9) presenta in una delle due immagini una fascia più chiara, probabilmente dovuta alla presenza di una nuvola, o di nebbia.

Oltre a questo, la stereocoppia del 2023, presenta una geometria di presa non ottimale, con un angolo di incidenza elevato pari a 47 gradi. L'angolo di incidenza, ovvero l'angolo tra la verticale al terreno e la direzione di osservazione del satellite, è un parametro fondamentale che influenza la qualità dei dati e l'accuratezza dei risultati. Angoli elevati possono causare distorsioni geometriche, zone d'ombra e di conseguenza difficoltà nella ricerca di punti omologhi, rendendo l'elaborazione più complessa. La geometria di presa, pertanto è fondamentale nelle immagini satellitari, in quanto non solo influenza la difficoltà di collimazione dei GCP, ma anche il risultato degli algoritmi di ricerca dei punti omologhi.

Inoltre, a seguito di studi effettuati su diversi set di stereocoppie Pléiades, riportati da Perko (2019), si è osservato che angoli di convergenza nell'intervallo tra 20° e 30°, che corrispondono a un rapporto B/H tra 0,35 e 0,55, producono i migliori risultati. In particolare, per superfici relativamente lisce come quelle interessate da ghiacciai, Berthier (2014) suggerisce un rapporto B/H tra i 0,35 e 0,45 per una copertura adeguata.

La seguente *Tabella 7* riassume i parametri di acquisizione delle due stereocoppie analizzate in questo studio.

Tabella 7: Tabella riassuntiva dei parametri di acquisizione delle stereocoppie del 2017 e del 2023

Data	ID	Angolo di incidenza (β) [°]			Angolo di convergenza (δ) [°]	Rapporto B/H
		Along (ϕ)	Across (ω)	Overall		
15/08/2017	1	15.88	9.98	18.50	27.01	0.48
15/08/2017	2	-11.11	16.01	19.17		
17/10/2023	1	-6.50	-47.50	47.70	15.88	0.28
17/10/2023	2	-26.60	-43.80	47.20		

Si osserva come la geometria di presa che si allinea di più ai valori ottimali sia quella della stereocoppia del 2017 e coerentemente il modello derivante da tale stereocoppia presenta errori più contenuti rispetto a quello del 2023 (*Tabella 8*), con una ricostruzione della superficie più uniforme e priva di vuoti.

Tabella 8: RMSE sui GCP e CP ottenuti nei modelli 2017 e 2023, in metri

Modello	RMSE - GCP	RMSE - CP
2017	0,22	0,39
2023	0,44	0,54

Un'ulteriore limitazione, si è presentata durante l'analisi della colata detritica del 27 agosto 2023, per quanto riguarda la sola parte del versante. Il DEM antecedente alla colata disponibile, realizzato con drone, presenta un limite altimetrico. Eventi come questo, tuttavia, interessano spesso ampie porzioni di versante a quote elevate. Tale limite viene superato dalle acquisizioni satellitari, sebbene in questo caso la stereocoppia antecedente più prossima all'evento risalga al 2017, non consentendo l'isolamento dei cambiamenti dovuti esclusivamente alla colata detritica.

9 Conclusioni e sviluppi futuri

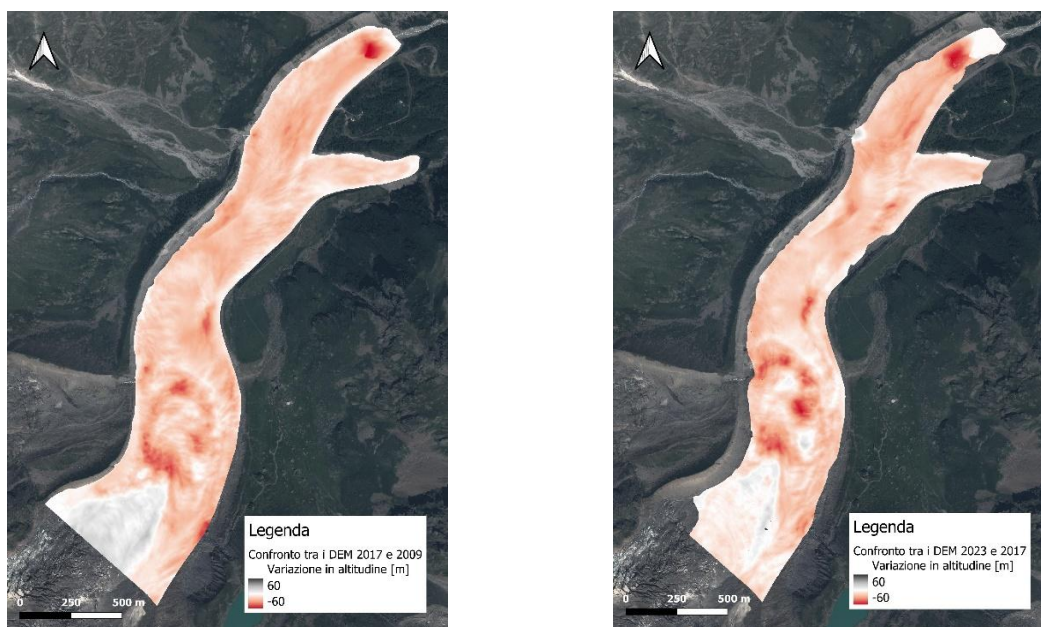
L'elaborato ha presentato una metodologia per la ricostruzione tridimensionale del Ghiacciaio del Belvedere utilizzando immagini satellitari ad alta risoluzione Pléiades e Pléiades Neo integrate con dati storici acquisiti da aereo nel 2009. L'impiego di una stereocoppia Pléiades del 15/08/2017 e una Pléiades Neo del 17/10/2023, insieme al modello preesistente del 2009, ha permesso di analizzare l'evoluzione del ghiacciaio in un arco temporale di 14 anni, offrendo una visione approfondita dei cambiamenti morfologici subiti.

Per ricostruire il modello tridimensionale del ghiacciaio si sono seguite diverse fasi. Inizialmente è stata migliorata la qualità delle immagini tramite una tecnica chiamata pansharpening. Successivamente è stato generato il file RPC, ottimizzato per l'elaborazione delle immagini nel software Agisoft Metashape. Per georeferenziare il modello sono stati utilizzati Ground Control Points (GCP) con coordinate note ricavate dal modello del 2009. Una calibrazione iniziale del modello ha consentito di ottenere una posizione approssimata dei punti, agevolandone la collimazione.

In seguito, è stato utilizzato un Bundle Block Adjustment (BBA), per orientare correttamente tutte le immagini e generare una nuvola di punti tridimensionale. Al fine di validare il modello, sono stati selezionati dei Check Point (CP) che sono stati esclusi dal BBA per garantire l'indipendenza.

I risultati ottenuti hanno mostrato una buona precisione dei modelli, con un Root Mean Square Error (RMSE) di 0,22 sui GCP e 0,39 sui CP per il 2017, e di 0,44 sui GCP e 0,54 sui CP per il 2023. Infine, il software ha permesso di ricavare prodotti fotogrammetrici quali la nuvola di punti densa, il Modello Digitale di Elevazione (DEM) e l'ortomosaico.

I prodotti ottenuti, specialmente i DEM sono stati utilizzati per monitorare l'evoluzione del ghiacciaio attraverso il software QGIS. Mediante una sottrazione raster tra i DEM presi a coppie, sono state analizzate le variazioni di quota subite nei due periodi, 2009-2017 e 2017-2023. Gli esiti riportati in *Figura 41* mostrano una chiara tendenza negativa, con una progressiva perdita di massa glaciale.



(a) Variazioni di quota tra il 2009 e il 2017

(b) Variazioni di quota tra il 2017 e il 2023

Figura 41: Variazioni altimetriche nei due periodi considerati

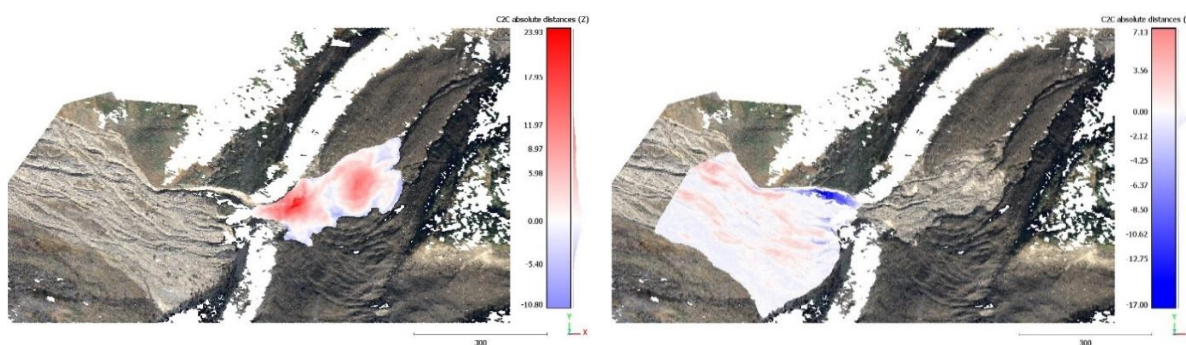
Sono state osservate due zone particolarmente critiche, l'area immediatamente a valle della zona di accumulo e la lingua ovest. La prima mostra variazioni irregolari e repentine, conseguenza della sua vulnerabilità e della presenza di un lago epiglaciale. La lingua ovest, in particolare la sua parte terminale, ha subito un significativo ritiro, quantificato in 130 metri tra il 2009 e il 2017 e in ulteriori 125 metri tra il 2017 e il 2023.

Complessivamente il ghiacciaio ha registrato una perdita di circa $19,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ dal 2009 al 2017, su un'area analizzata di $1,3 \times 10^6 \text{ m}^2$, con una perdita media annua di $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ tra il 2009 e il 2017. Nel periodo successivo, tra il 2017 e il 2023, si è osservata un'accelerazione di questa tendenza, con una perdita di $16,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ su un'area analizzata di $1,15 \times 10^6 \text{ m}^2$, corrispondente a una perdita media annua di $2,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Tuttavia, è importante considerare la maggiore incertezza relativa a quest'ultimo dato, dovuta alla non ottimale geometria di presa della stereocoppia 2023, che ha reso impossibile la ricostruzione di alcune aree caratterizzate dalla totale mancanza di punti omologhi, limitando di conseguenza l'estensione dell'area analizzata.

Un ulteriore oggetto dello studio è stato l'evento alluvionale del 27 agosto 2023, che ha interessato il versante del Torrente Castelfranco. Tale evento ha rappresentato un'occasione unica per studiare la dinamica di una colata detritica e il suo impatto sull'ambiente circostante.

Grazie all'analisi integrata di dati acquisiti con diverse tecniche (stereocoppia Pléiades Neo 2023, rilievo da drone 2023), è stato possibile quantificare le variazioni morfologiche indotte dall'evento.

I risultati ottenuti evidenziano un quadro complesso. Le intense precipitazioni, combinate con i depositi di sedimenti accumulati lungo il versante, hanno innescato una colata detritica che, alimentata dalle acque del T. Castelfranco, ha oltrepassato la morena, e si è riversata sulla lingua occidentale, formando due distinte zone di accumulo, con un volume stimato di 180.000 m³ (Fig. 42a). Contestualmente, la parte inferiore del versante ha subito una perdita netta di materiale, quantificata in 69.000 m³ con un picco di erosione in corrispondenza del T. Castelfranco a monte della morena (Fig. 42b).



(a) Zona di accumulo del materiale detritico sulla lingua ovest.

(b) Zona parziale del versante colpita dalla colata detritica

Figura 42: Variazioni di quota tra il 25 luglio e il 17 ottobre 2023 (rosso: variazioni positive, blu: variazioni negative)

La stessa zona inferiore del versante nel periodo precedente la colata (2017-2023) ha registrato un forte accumulo di materiale pari a 28.000 m³. Si è concluso che probabilmente il materiale depositato negli anni precedenti sia stato mobilizzato in occasione dell'evento scatenante, risultando nella significativa erosione riscontrata a seguito della colata.

Un ulteriore effetto significativo della colata è stata la deviazione del corso del torrente. L'ostruzione della sua precedente via tra la morena e la parete glaciale ha indotto il torrente a scorrere direttamente sulla lingua glaciale, generando un parziale dilavamento dei detriti presenti e la formazione di due solchi ben visibili con una profondità stimata tra i 4 e i 5 metri.

A completamento dell'analisi del versante è stata introdotta anche la zona superiore che non era catturata nel rilievo da drone. Questo ha comportato un aumento del periodo di tempo analizzato (2017 – 2023 post-colata). Il confronto ha comunque mostrato informazioni utili, evidenziando un possibile stato di equilibrio dinamico del versante, con processi di accumulo (circa 80.000 m³) e di erosione (76.000 m³) che si sono parzialmente compensati nel corso del tempo.

La parte superiore del versante, probabilmente caratterizzata da morfologie favorevoli all'accumulo di materiale detritico, ha mostrato una maggiore concentrazione di depositi. Al contrario la zona più a valle è stata interessata da maggiori fenomeni erosivi. Si è avanzata quindi l'ipotesi che la parte alta del versante svolga una funzione di serbatoio di materiale, che in occasioni di eventi meteorologici importanti, venga mobilitato e alimenti l'erosione a valle.

In conclusione, lo studio ha presentato una metodologia efficace per la ricostruzione tridimensionale e l'analisi delle variazioni morfologiche dell'area glaciale, sfruttando dati satellitari ad alta risoluzione e tecniche di fotogrammetria digitale. Tuttavia, l'analisi ha evidenziato alcuni limiti delle stereocoppie satellitari, in particolare le problematiche derivanti da una geometria di presa non ottimale. In questo caso un'efficace alternativa alle stereocoppie è rappresentata dalle acquisizioni tri-stereo, le quali grazie ad una combinazione dei DEM derivanti dalle tre immagini garantiscono una riduzione della percentuale di vuoti e un incremento nell'accuratezza del DEM finale, come dimostrato da Berthier (2014).

La capacità dei satelliti di fornire una copertura spaziale ampia e ripetuta nel tempo si è rivelata fondamentale per monitorare l'evoluzione della colata detritica del 27 agosto 2023, compensando così le limitazioni dei dati ottenuti da drone. Questa analisi dimostra l'importanza dei dati satellitari per lo studio di fenomeni naturali in aree remote e difficilmente accessibili, come le zone glaciali.

Le informazioni raccolte possono supportare future attività di monitoraggio dei ghiacciai e lo sviluppo di strategie efficaci per mitigare gli impatti del cambiamento climatico nelle regioni montane.

Bibliografia

- Agisoft LLC (2023). Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition, v2.0
- Airbus (2021). Pléiades Imagery User guide, Defence and Space Intelligence.
- Airbus (2023). Pléiades Neo User guide, v4, Defence and Space Intelligence.
- Amoretti, C. (1824). Viaggio da Milano ai tre laghi Maggiore, di Lugano, e di Como, e ne' monti che li circondano (Vol. 28). Per Giovanni Silvestri.
- Avian, M., Bauer, C., Schlögl, M., Widhalm, B., Gutjahr, K. H., Paster, M., ... & Sulzer, W. (2020). The status of earth observation techniques in monitoring high mountain environments at the example of pasterze glacier, Austria: Data, methods, accuracies, processes, and scales. *Remote Sensing*, 12(8), 1251, <https://doi.org/10.3390/rs12081251>
- Berthier, E., Vincent, C., Magnússon, E., Gunnlaugsson, Á. Þ., Pitte, P., Le Meur, E., ... & Wagnon, P. (2014). Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *The Cryosphere*, 8(6), 2275-2291, <https://doi.org/10.5194/tc-8-2275-2014>
- Biemans, H., Siderius, C., Lutz, A. F., Nepal, S., Ahmad, B., Hassan, T., ... & Immerzeel, W. W. (2019). Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. *Nature Sustainability*, 2(7), 594-601, <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0305-3>
- Casarotto, C. (2010). Ghiacciai in Trentino: ricerca e stato di salute. *Atti dell'Accademia roveretana degli Agiati. B, Classe di scienze matematiche, fisiche e naturali*, 10, 63-78.
- Cauvy-Fraunié, S., & Dangles, O. (2019). A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution*, 3(12), 1675-1685, <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1042-8>
- Clason, C., Rangecroft, S., Owens, P. N., Łokas, E., Baccolo, G., Selmes, N., ... Blake, W. (2022). Contribution of glaciers to water, energy and food security in mountain regions: current perspectives and future priorities. *Annals of Glaciology*, 63(87-89), 73-78, <https://doi.org/10.1017/aog.2023.14>

- De Gaetani, C. I., Ioli, F., & Pinto, L. (2021). Aerial and UAV images for photogrammetric analysis of belvedere glacier evolution in the period 1977–2019. *Remote Sensing*, 13(18), 3787, <https://doi.org/10.3390/rs13183787>
- De Saussure H. B. (1779-1796). *Voyages dans les Alpes*, Vol. 4, Neuchatel, pp. 348
- Diolaiuti, G., D'Agata, C., & Smiraglia, C. (2003). Belvedere Glacier, Monte Rosa, Italian Alps: Tongue Thickness and Volume Variations in the Second Half of the 20th Century. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(2), 255–263. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2003\)035\[0255:BGMRJA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2003)035[0255:BGMRJA]2.0.CO;2)
- Douglas I. Benn and D.J.A. Evans. 2010. *Glaciers and Glaciation*, second ed. Routledge, NY, pp. 1-21, ISBN 13: 978-0-340-90579-1 (pbk).
- Edgybees (2023). RPC (Rational Polynomial Camera model), The Nitty Gritty, <https://edgybees.com/rpc-rational-polynomial-camera-model-the-nitty-gritty/> (Accesso eseguito il 02 gennaio 2025).
- Ente Italiano Rilievi Aerofotogrammetrici (E.I.R.A.) (1961). Il rilievo topografico. *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*, 10, II serie, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, pp. 58- 64.
- Haeberli, W., Chiarle, M., Mortara, G., & Mazza, A. (2002). Assessing glacier hazards at Ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga, Italian Alps. In *EGS General Assembly Conference Abstracts* (p. 3570).
- Haeberli, W., Kääb, A., Paul, F., Chiarle, M., Mortara, G., Mazza, A., ... & Richardson, S. (2002). A surge-type movement at Ghiacciaio del Belvedere and a developing slope instability in the east face of Monte Rosa, Macugnaga, Italian Alps. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 56(2), 104-111, <https://doi.org/10.1080/002919502760056422>
- Ioli, F., Bianchi, A., Cina, A., De Michele, C., Maschio, P., Passoni, D., & Pinto, L. (2022). Mid-Term Monitoring of Glacier's Variations with UAVs: The Example of the Belvedere Glacier. *Remote Sensing*, 14(1), 28. <https://doi.org/10.3390/rs14010028>
- Ioli, F. (2023). Multi-scale and multi-temporal photogrammetry for alpine glacier monitoring.

- IPCC (2023). Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kappenberger, G., & Locarno-Monti, M. (2006). *Che cos' è un ghiacciaio.*
- Loghin, A. M., Otepka-Schremmer, J., & Pfeifer, N. (2020). Potential of Pléiades and WorldView-3 tri-stereo DSMs to represent heights of small isolated objects. *Sensors*, 20(9), 2695, <https://doi.org/10.3390/s20092695>
- Lowe, D.G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60, 91-110, <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Mazza, A. (1998). Evolution and dynamics of Ghiacciaio Nord delle Locce (Valle Anzasca, Western Alps) from 1854 to the present. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 21(2), 233-243.
- Mondino, E. B., & Chiabrandoa, R. (2008). Multi-temporal block adjustment for aerial image time series: The Belvedere glacier case study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Beijing*, 37(B2).
- Monterin U. (1922). Il ghiacciaio di Macugnaga dal 1780 al 1922. *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*, 5, Società Italiana per il Progresso delle Scienze, Roma, pp.12-40.
- Mortara, G., & Mercalli, L. (2002). Il lago epiglaciale 'Effimero'sul ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga, Monte Rosa. *Nimbus*, 23(24), 10-17.
- Mortara, G., Giuliano, M. (2008). La colata detritica del 7 settembre 2008 nel bacino glaciale della Torre di Castelfranco, pp. 135-139.
- Nucera, G. (2023). Deep space: Monitorare I ghiacciai alpine dallo spazio, <https://www.globalscience.it/40896/monitorare-i-ghiacciai-alpini-dallo-spazio/> (Accesso eseguito il 28 dicembre 2024).

- Otsu, N. (1975). A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296), 23-27.
- Perko, R., Raggam, H., Schardt, M., & Roth, P. M. (2018). Very high resolution mapping with the Pleiades satellite constellation. *Am. J. Remote Sens*, 6(2), 89-99, <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20180602.14>
- Perko, R., Raggam, H., & Roth, P. M. (2019). Mapping with pléiades—end-to-end workflow. *Remote Sensing*, 11(17), 2052, <https://doi.org/10.3390/rs11172052>
- Poli, D., Casarotto, C., Strudl, M., Bollmann, E., Moe, K., & Legat, K. (2020). Use of historical aerial images for 3D modelling of glaciers in the Province of Trento. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 1151-1158, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1151-2020>
- Raguram, R., Frahm, JM., Pollefeys, M. (2008). A comparative Analysis of RANSAC Techniques Leading to Adaptive Real-Time Random Sample Consensus. In: Forsyth, D., Torr, P., Zisserman, A. (eds) *Computer Vision – ECCV 2008*. ECCV 2008. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 5305. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88688-4_37
- Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., González-Toril, E., & Aguilera, Á. (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Perú): hydrochemical and mineralogical characterization and associated environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 25243-25259, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>.
- Scharstein, D., & Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International journal of computer vision*, 47, 7-42, <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>.
- Shaharom, M. F. M., & Tahar, K. N. (2023). Multispectral Image Matching Using SIFT and SURF Algorithm: A Review. *International Journal of Geoinformatics*, 19(1), <https://doi.org/10.52939/ijg.v19i1.2495>
- Tamburini A., Mortara G., Belotti M., Federici P. (2003). The emergency caused by the “Short-lived Lake” of the Belvedere Glacier in the summer 2002 (Macugnaga,

Monte Rosa, Italy). Studies, survey techniques and main results. *Terra Glacialis* n.6 pp. 37-54

Tamburini, A., Chiarle, M., Mortara, G. (2019). Il collasso delle morene del ghiacciaio del belvedere (Monte Rosa, Ossola), https://www.nimbus.it/ghiacciai/2019/190816_BelvedereCollassoMorene.htm (Accesso eseguito il 23 Dicembre 2024).

Verre, F. (2023). Lo scioglimento dei ghiacciai: cause, effetti e possibili soluzioni, AB AQUA - Centro Studi Idrostrategici.

Walser Kulturzentrum, G. & Comitato Glaciologico Italiano, T. (1991). La montagna di ghiaccio. Storia dei ghiacciai italiani del Monte Rosa. Vincenzo Bona srl, Torino.

Indice delle Figure

<i>Figura 1: Veduta d'insieme della lingua valliva bilobata del Ghiacciaio del Belvedere (1° settembre 2014, f. Andrea Tamburini).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2: (a) Il lago effimero in una foto aerea scattata nell'ottobre 2001(CNR-IRPI, Torino). (b) La foto del lago effimero scattata da un elicottero il 25 giugno 2002</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3: Limite dell'area alluvionata, la linea tratteggiata ipotizza il percorso endo/subglaciale della colata detritica; le frecce indicano le bocche di ingresso e uscita (f. da elicottero di T. Sala, settembre 2008)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4: Accumuli di neve e ghiaccio all'interno dei canaloni Tyndall (TY) e Tuckett (TU) che evidenziano il passaggio della colata (f. CNR-IRPI, 10-09-2008)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5: Stereocoppia acquisita dalla costellazione Pléiades il 15 Agosto 2017.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6: Angolo di vista e di incidenza di un satellite (Airbus, 2023, p.74)</i>	<i>27</i>
<i>Figura 7: Rapporto base-altezza tra due acquisizioni stereo</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8: GCP (in arancio) e CP (in rosso) sulla nuvola di punti del modello del 2017.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9: Stereocoppia acquisita dalla costellazione Pléiades Neo il 17 Ottobre 2023</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10: Nuvola di punti del 2023. GCP in arancio e CP in rosso</i>	<i>39</i>
<i>Figura 11: Mappa di profondità generata per la stereocoppia 2023 con focus sulla morena sinistra nella parte superiore del ghiacciaio (evidenziata in rosso). I punti neri indicano le zone in cui l'algoritmo non è stato in grado di trovare punti omologhi.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 12: Mappa di profondità generata per la stereocoppia 2023 con focus sulle lingue del ghiacciaio. Evidenziata in rosso si nota la parziale mancata ricostruzione della lingua est. I punti neri indicano le zone in cui l'algoritmo non è stato in grado di trovare punti omologhi</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13: Parti interpolate a causa del fallimento dell'algoritmo di ricerca dei punti omologhi</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14: Confronto tra le due aree di interesse del ghiacciaio. Con inclusione delle aree interpolate (a), con esclusione delle aree interpolate (b).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15: Distribuzione spaziale delle aree di validazione nel modello del 2017 (ortofoto 2017)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 16: Distribuzione spaziale delle aree di validazione nel modello del 2023 (ortofoto 2023)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17: Area di interesse selezionata sul perimetro del ghiacciaio nel 2009.....</i>	<i>47</i>

<i>Figura 18: Variazioni altimetriche tra il 2009 e il 2017. In alto a sinistra il focus mostra un picco di erosione in corrispondenza del punto in cui il T. Castelfranco oltrepassa la morena.</i>	48
<i>Figura 19: Variazioni altimetriche tra il 2017 e il 2023. In alto a sinistra il focus mostra una zona di accumulo oltre la morena formatasi probabilmente in seguito alla colata detritica dell'agosto 2023</i>	49
<i>Figura 20: Identificazione delle sezioni sul ghiacciaio</i>	51
<i>Figura 21: Sezione FF'</i>	52
<i>Figura 22: Sezione EE'</i>	53
<i>Figura 23: Sezione DD'</i>	53
<i>Figura 24: Sezione CC'</i>	54
<i>Figura 25: Sezione BB'</i>	54
<i>Figura 26: Sezione AA'</i>	55
<i>Figura 27: Colata detritica del 27/08/23 il cui accumulo (grigio chiaro) ha sopravanzato la superficie del Ghiacciaio del Belvedere (Regione Piemonte).</i>	56
<i>Figura 28: Delimitata in rosso l'area di interesse per lo studio della colata detritica</i>	58
<i>Figura 29: Suddivisione dell'area di studio della colata detritica</i>	59
<i>Figura 30: Variazioni altimetriche nell'area di interesse tra il 2017 e il 25 luglio 2023</i>	60
<i>Figura 31: Variazioni altimetriche nell'area di interesse tra il 25 luglio 2023 e il 17 ottobre 2023</i>	61
<i>Figura 32: Sezione FF', le due zone di accumulo</i>	61
<i>Figura 33: Sezione EE', mobilitazione del versante</i>	62
<i>Figura 34: Sezione GG', i solchi generati dal fiume Castelfranco</i>	62
<i>Figura 35: Variazioni di quota tra il 25 luglio e il 17 ottobre 2023 sull'area della lingua glaciale interessata dalla colata detritica.</i>	63
<i>Figura 36: Variazioni di quota tra il 25 luglio e il 17 ottobre 2023 sull'area inferiore del versante interessata dalla colata detritica.</i>	64
<i>Figura 37: Sezione DD'</i>	64
<i>Figura 38: Differenze altimetriche tra il 2017 e il 2023 pre-colata nella zona inferiore del versante.</i>	65
<i>Figura 39: Analisi dei cambiamenti, tra il 2017 e il 2023 post-colata, sull'intera area del versante colpita dall'evento.</i>	66
<i>Figura 40: Comparazione tra la mappa di variazioni di quota ottenuta nel seguente studio (a) e quella di De Gaetani (2021) (b).</i>	69

<i>Figura 41: Variazioni altimetriche nei due periodi considerati.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 42: Variazioni di quota tra il 25 luglio e il 17 ottobre 2023 (rosso: variazioni positive, blu: variazioni negative).....</i>	<i>74</i>

Indice delle Tabelle

<i>Tabella 1: Parametri di acquisizione della stereocoppia Pléiades 2017</i>	<i>28</i>
<i>Tabella 2: RMSE ed errore medio lungo le tre dimensioni (X, Y, Z) relativi ai GCP e ai CP, in metri. Modello 2017</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 3: Parametri di acquisizione della stereocoppia Pléiades Neo 2023.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabella 4: RMSE ed errore medio lungo le tre dimensioni (X, Y, Z) relativi ai GCP e ai CP, in metri. Modello 2023</i>	<i>40</i>
<i>Tabella 5: Statistiche delle aeree di validazione considerate nel modello del 2017, in metri....</i>	<i>44</i>
<i>Tabella 6: Statistiche delle aree di validazione considerate nel modello del 2023, in metri</i>	<i>46</i>
<i>Tabella 7: Tabella riassuntiva dei parametri di acquisizione delle stereocoppie del 2017 e del 2023</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 8: RMSE sui GCP e CP ottenuti nei modelli 2017 e 2023, in metri.....</i>	<i>70</i>

Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia e i miei amici per avermi accompagnato durante questo percorso, offrendomi supporto e spensieratezza.

Ringrazio il Professor Livio Pinto per avermi seguito durante il percorso di tesi e per avermi dato la possibilità di partecipare alla Summer School di Geomatica 2024. Oltre ad un'esperienza altamente formativa, è stata un'occasione per poter toccare con mano l'oggetto della mia tesi, il Ghiacciaio del Belvedere.

Ringrazio i compagni e i tutor della Summer School, in particolar modo l'Ing. Federica Gaspari, l'Arch. Rebecca Fascia, l'Ing. Federico Barbieri e l'Ing. Francesco Ioli che sono riusciti a creare un ambiente stimolante e istruttivo.

Inoltre, ringrazio l'Ing. Francesco Ioli per la disponibilità e la competenza che mi ha offerto durante questi mesi.

Infine, ringrazio anche il Professor Mirko Reguzzoni e l'Ing. Lorenzo Rossi per avermi introdotto e appassionato alla fotogrammetria.

