

Modellazione 3D dei ghiacciai in Trentino da immagini aeree del 1954 per analisi temporali

Daniela Poli ^(a), Christian Casarotto ^(b), Markus Strudl ^(a), Erik Bollmann ^(a),
Kjersti Moe ^(a), Klaus Legat ^(a)

^(a) Vermessung AVT-ZT-GmbH, Imst, Austria d.poli@terra-messflug.at,

^(b) MUSE, Trento, christian.casarotto@muse.it

Introduzione

Le immagini aeree storiche rappresentano la più antica fonte di informazione uniforme e completa sui ghiacciai (Bolch et al., 2010). Come dimostrano diversi studi in tutto il mondo, le immagini aeree storiche hanno un grande valore per il monitoraggio di un ghiacciaio, e spesso forniscono il dato di riferimento per la valutazione dei cambiamenti di area, lunghezza e massa. Il problema principale per l'estrazione di informazioni metriche 2D/3D risiede nella qualità delle immagini stesse. In effetti, i primi voli militari fotogrammetrici non erano ottimizzati per il rilevamento dei ghiacciai, ma per luoghi popolati o infrastrutture strategiche, e le camere analogiche non avevano il potenziale per catturare un forte riflesso della luce sul ghiaccio né la bassa tessitura della neve tipica delle aree ghiacciate. Il gruppo di glaciologia del Museo delle Scienze di Trento (MUSE) si occupa, tra le varie attività, del monitoraggio dei ghiacciai in Trentino, attualmente 146, per una superficie complessiva di circa 32 kmq (2015). Il gruppo aveva a disposizione circa 300 fotogrammi acquisiti tra agosto e ottobre del 1954 dall'Aeronautica Americana su tutta la Provincia di Trento, e ha incaricato la ditta AVT / Terra Messflug di elaborare le immagini per estrarre non solo l'ortofoto di tutta la Provincia, ma anche un modello digitale della superficie (DSM) dei ghiacciai presenti. In questo contesto l'articolo discute il potenziale delle immagini aeree per l'estrazione di informazioni 3D sui ghiacciai e si concentra sulla valutazione della loro qualità, con particolare attenzione a come la loro copertura, accuratezza radiometrica e geometrica, stato di conservazione e ricoprimento, possano influenzare il flusso di lavoro.

Analisi immagini

I primi voli di immagini aeree in tutta Europa iniziarono intorno all'inizio del XX secolo. Nelle prime missioni fotogrammetriche aeree la stabilità e la velocità dell'otturatore erano un problema, ma verso la fine della Prima guerra mondiale Sherman M. Fairchild sviluppò una macchina fotografica con l'otturatore situato all'interno dell'obiettivo. Questo design migliorò significativamente la qualità delle immagini e diventò lo standard per i sistemi di camere aeree dei successivi 50 anni. Le circa 300 immagini aeree utilizzate in questo lavoro sulla Provincia di Trento furono acquisite durante diverse

missioni aeree tra agosto e ottobre 1954 con tre telecamere analogiche Fairchild KF7660 con dimensioni 23 cm x 23 cm e lunghezze focali 153,16 mm, 153,89 mm e 153,34 mm rispettivamente (Figura 1a). Sui fotogrammi è stato possibile recuperare la data e l'ora del volo, il tipo di obiettivo e l'altitudine approssimativa (Figura 1b).

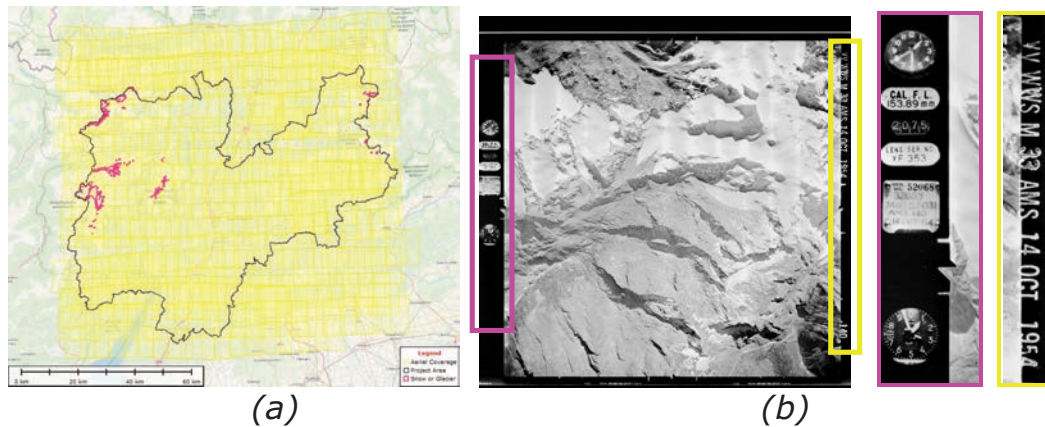


Figura 1. (a). Copertura della Provincia di Trento con i voli del 1954 e in viola i perimetri dei ghiacciai rilevati nel 2015. (b) Esempio di fotogramma su ghiacciaio e zoom sul bordo con informazioni riguardo la camera e il volo.

Le scansioni dei fotogrammi sono state fornite dall'Istituto Geografico Militare di Firenze (Italia) e prodotte a 2400 dpi, presumibilmente dalla stampa cartacea. Dalla quota di volo e le quote nella Provincia di Trento (150 - 3500 m), si stima che il GSD medio delle immagini digitali sia di circa 0,58 m e la scala media del volo di circa 1: 55000. L'analisi della qualità dell'immagine è stata condotta tenendo conto dei seguenti aspetti:

- copertura. La Provincia, e in particolare i ghiacciai, sono completamente coperti dalle immagini aeree. I voli sono stati eseguiti in direzione est-ovest, con una sovrapposizione di circa il 60% tra le immagini e del 30% tra le strisciate. La copertura è adatta per la produzione di ortofoto in zone pianeggianti, collinari e montane;
- visibilità. Data la natura militare del volo, alcune aree strategiche distribuite in tutta la Provincia, come fabbriche, caserme militari e così via, sono state mascherate nei fotogrammi originali, con una matita nera o simile (Figura 2a). Le aree dei ghiacciai non sono interessate ad alcuna cancellazione;
- ∞ conservazione. La qualità di conservazione dei fotogrammi prima della scansione è piuttosto scarsa. Graffi, tagli e segni di colla sono presenti nella maggior parte delle immagini (Figura 2a);
- scansione. Per preservare al massimo la qualità dei voli analogici, i film dovrebbero essere scansionati con scanner fotogrammetrici, con una risoluzione di scansione nota in μm . Per le immagini utilizzate in questo lavoro, la risoluzione di scansione è espressa in dpi, il che presuppone che la scansione sia stata eseguita con scanner non fotogrammetrici, con conseguente perdita della qualità. Inoltre sono presenti errori meccanici, evidenti sotto forma di linee mancanti di pixel o disallineamenti (Figura 2c).

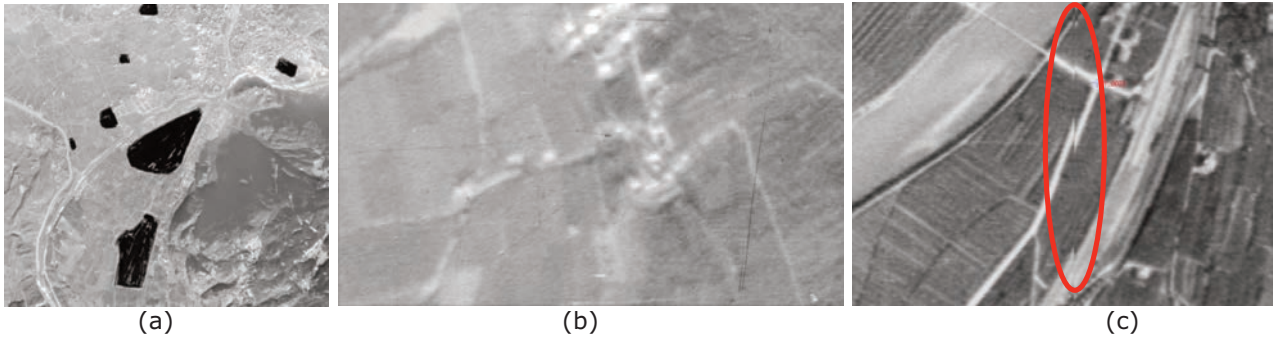


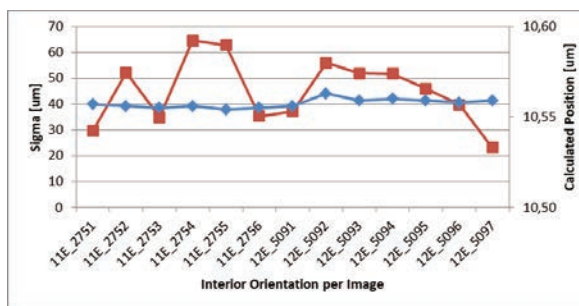
Figura 2. Esempi di (a) elementi mascherati (b) graffi e (c) problemi di scansione nelle immagini aeree del 1954.

Nell'area coperta dai ghiacciai, che ha la massima priorità nel progetto, alcuni ulteriori difetti nelle immagini influenzano significativamente l'estrazione dei prodotti 3D e richiedono alcuni commenti:

- saturazione. I voli sono stati eseguiti in condizioni meteorologiche ottimali per acquisizioni su obiettivi militari e aree popolate, quindi con cielo sereno e alta inclinazione del sole. Su un'area coperta da ghiaccio o neve fresca, queste condizioni causano un forte riflesso della luce nei fotogrammi, con conseguenti effetti di saturazione nelle immagini scansionate (Figura 1b). L'effetto a volte è limitato ad alcuni pixel, ma in alcune aree, come il ghiacciaio dell'Adamello, esso riguarda gran parte dei ghiacciai;
- contrasto e ombre scure. Le montagne della provincia di Trento, in particolare nell'area delle Dolomiti, sono caratterizzate da pareti scoscese, quasi verticali, e gole profonde, che causano ombre. A causa della bassa qualità dei film disponibili all'epoca e della gamma dinamica limitata delle immagini, le ombre appaiono spesso come aree nere omogenee. Di conseguenza, l'identificazione (e la misurazione) di qualsiasi dettaglio è pressoché impossibile.

Orientamento delle immagini e ortorettifica

A causa della mancanza dei certificati di calibrazione, l'orientamento interno è stato stimato manualmente, misurando le marche fiduciali in ogni immagine aerea. Alcune incertezze non quantificabili in modo accurato sono dovute al fatto che le misure delle marche fiduciali sono state eseguite sulle immagini scansionate con uno scanner non fotogrammetrico e non è noto il grado di restringimento della pellicola. Nonostante queste incertezze, l'analisi delle posizioni calcolate delle marche fiduciali e delle corrispondenti deviazioni standard mostra un andamento accettabile. Per le due strisciate consecutive sui ghiacciai mostrate in Figura 3, la posizione stimata delle marche fiduciali oscilla intorno a $10,55 \mu\text{m}$, mentre il valore teorico è di $10,58 \mu\text{m}$. La deviazione standard (linea rossa) oscilla tra $20 \mu\text{m}$ e $70 \mu\text{m}$ (tra $3 \mu\text{m}$ e $130 \mu\text{m}$ se si considerano tutte le immagini). Nel caso ideale di orientamento interno sui fotogrammi originali con certificato di calibrazione noto, la deviazione standard è inferiore a $10 \mu\text{m}$. L'andamento della deviazione standard indica che l'errore non è sistematico nelle immagini. Tutti gli errori dall'orientamento interno sono stati trasferiti nella triangolazione aerea.



	X	Y	Z
Traslazioni	5,76m	6,91m	6,11m
Rotazioni	0,053°	0,041°	0,013°
Punti a terra	2,35m	2,58m	6,94m
GCPs	1,55m	1,23m	1,58m
RMSE			
GCPs	1,49m	1,18m	1,41m

Figura 3. Andamento della posizione stimata (blu) e deviazione standard del 1954 (rosso) dei punti fiduciali per le strisciate 11 e 12.

La triangolazione aerea del blocco di volo è stata condotta nel software Match-AT Inpho. A causa delle posizioni imprecise dei centri di presa e delle differenze tra le strisciate, in parte a causa dei diversi giorni di volo, non è stato possibile orientare il blocco nel suo insieme, ma ogni strisciata è stata orientata separatamente e collegata manualmente a quelle adiacenti. Successivamente sono stati misurati diversi punti di appoggio, disponibili da precedenti progetti realizzati nel 2015 nella stessa area di progetto, dalle mappe dell'IGM e da un geodatabase pubblico della Provincia, in cui i punti fiduciali sono mappati e accompagnati da metadati dettagliati. Le principali difficoltà erano dovute alla bassa accuratezza delle mappe storiche IGM, con evidenti errori relativi tra mappe adiacenti, e alla bassa qualità delle immagini aeree dal 1954, che rendeva incerta l'identificazione dei punti. I risultati della triangolazione aerea, riassunti nella Tabella 1, riflettono le significative incertezze previste dall'orientamento interno e dalla qualità dei fotogrammi.

L'ortofoto è stata generata con una griglia di 1 m su tutta la Provincia di Trento, utilizzando il DTM disponibile da un volo Lidar eseguito nella Provincia nel 2006. La digitalizzazione dei perimetri dei ghiacciai ha permesso una prima stima delle variazioni delle superfici dal 1850 al 2015 (Figura 4).

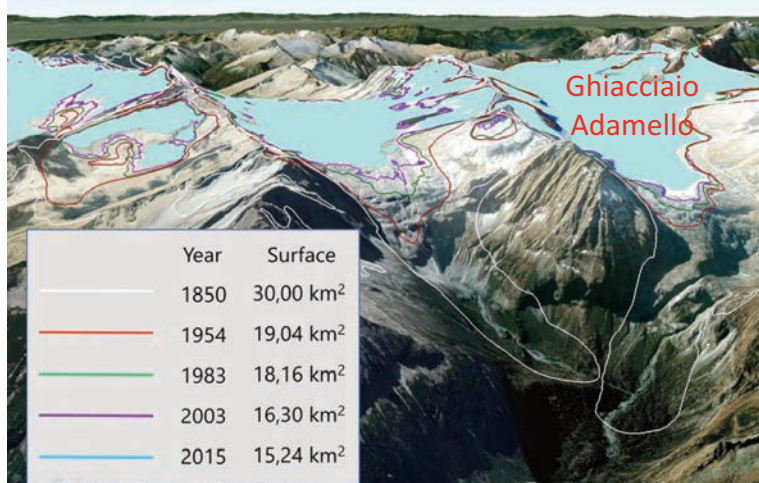


Figura 4. Analisi temporale della variazione dei perimetri dei ghiacciai e confronto tra gli anni 1850, 1954, 1983, 2003 e 2015 sul ghiacciaio dell'Adamello.

Modellazione 3D

Per la modellazione 3D dei ghiacciai e la generazione del modello digitale del terreno (DTM), possono essere utilizzate diverse tecniche. Il metodo tradizionale si basa sulla misura stereoscopica manuale da parte di un operatore di punti di massa e *breaklines*, seguendo la morfologia del terreno. Le misure 3D vengono quindi interpolate e regolarizzate in una griglia raster. Maggiore è la densità delle misure, migliore è l'accuratezza del DTM. Il metodo è costoso in termini di tempo e risorse e necessita un hardware speciale per la restituzione e un operatore esperto, soprattutto nel caso di superfici difficili come i ghiacciai. Esso fornisce i risultati più accurati, se i punti omologhi sono ben riconoscibili in entrambe le immagini stereo. Il *dense image matching*, basato sulla modellazione in automatico di superfici grazie all'autocorrelazione tra le immagini, ha fornito ottimi risultati sui ghiacciai del Trentino a partire da un volo fotogrammetrico nel 2015 e in altri progetti sui ghiacciai realizzati da AVT (Legat et al., 2016); esso ha il grande vantaggio di avere un elevato grado di automazione e generare nuvole di punti molto dense e DTM con griglia fino alla risoluzione geometrica delle immagini, ma richiede un'elevata sovrapposizione tra le immagini stesse e può mostrare limiti nel caso di superfici omogenee.

Per valutare le singole metodologie, è stato eseguito un test sul ghiacciaio del Careser. Il ghiacciaio si trova nel gruppo Ortles-Cevedale ed è stato classificato come uno dei ghiacciai di riferimento italiani dal World Glacier Monitoring Service per la più lunga serie di dati disponibili sul bilancio di massa (dal 1967 ad oggi). Come operazione preliminare, è stato digitalizzato il perimetro del ghiacciaio utilizzando come base l'ortofoto del 1954 prodotta. In generale la digitalizzazione dei contorni dei ghiacciai in 2D nelle ortofoto produce risultati attendibili solo nel caso in cui il ghiaccio sia confinato direttamente sul substrato roccioso solido, ma mostra limiti in caso di scarsa qualità dell'immagine dell'ortofoto (ad es. errori nelle immagini, basso contrasto), di presenza di detriti o neve fresca lungo i contorni del ghiacciaio o in zone molto ombreggiate (ad esempio vicino a ripide pareti rivolte a nord). Nel caso del Careser la lingua del ghiacciaio era stata erroneamente interpretata come un lago nella digitalizzazione 2D. Pertanto il perimetro 2D è stato controllato da un operatore in stereo e corretto con nuove misure 3D (Figura 5(a)). Per la modellazione della superficie, è stato inizialmente testato il *dense image matching* sulle immagini del 1954, ma i risultati sono stati insoddisfacenti: l'identificazione automatica di punti omologhi era quasi impossibile nelle zone in ombra, e altrove a causa della presenza di rumore, graffi, saturazione e i difetti riportati sopra. Questi risultati sono stati confermati da test eseguiti su altri ghiacciai dove le immagini del 1954 presentavano una qualità generalmente migliore. Si è quindi concluso che la bassa qualità e la limitata sovrapposizione delle immagini non consentono la modellazione automatica della superficie sui ghiacciai trentini a partire dai voli del 1954 disponibili. Per valutare la possibilità di estrarre il DTM manualmente, sono stati confrontati i DTM ottenuti da due sessioni distinte di restituzione stereo. In Figura 5(b) sono rappresentati i punti di massa restituiti nella prima (Stereo1, blu) e seconda (Stereo2, rosso) sessione. Come mostrato in Figura 7(a) in generale i due DTM presentano differenze poco significative (i valori in bianco, giallo e azzurro sono

inferiori a 5 m), con una media di 3,65 m, con deviazione standard di 7,10 m. Nella parte Est sono visibili notevoli differenze, dovute alla difficile identificazione dei punti omologhi perché non ben visibili in una o entrambe le immagini. Questa parte del ghiacciaio è infatti caratterizzata da una superficie molto omogenea, con colori chiari, piccole variazioni superficiali e una copertura nevosa pronunciata, tale da rendere incerto anche il rilievo manuale dei punti omologhi. Il metodo stereoscopico ha fornito risultati migliori nelle aree a quote più basse del ghiacciaio, dove il terreno è eterogeneo e possono essere identificati e restituiti in stereo un maggior numero di elementi. In questi casi il metodo stereoscopico può essere considerato un metodo affidabile per l'estrazione di informazioni 3D puntuali, ed è particolarmente utile in aree con bassa tessitura in cui il *dense image matching* non può essere impiegato. Come ulteriore verifica, è stato considerato il DTM ottenuto dalla digitalizzazione di una mappa topografica storica a scala 1:25.000 della serie *tavolette*, generata da un volo aereo effettuato nel 1959 (Figura 5b). Questo DTM non è affidabile in prossimità dell'area indicata dal cerchio di colore magenta nella Figura 5b, poiché le curve di livello non riportavano l'informazione della quota. Il confronto tra il DTM dalla tavoletta e il DTM ottenuto dalle misure stereo (Figura 6a) conferma i risultati discussi in precedenza. Il test sul ghiacciaio del Careser ha mostrato che non può essere scelta un'unica metodologia di modellazione 3D per tutti i ghiacciai dell'area del progetto. Tenendo conto dei limiti di ciascuna tecnica dovuta alla qualità dei dati e alla disponibilità delle mappe, i 128 ghiacciai sono stati analizzati singolarmente e per ognuno è stata selezionata la miglior tecnica per modellarli in 3D. Dove la qualità delle immagini non consentiva misure stereo sufficientemente dense, il DTM è stato estratto dalla digitalizzazione delle linee di contorno nelle tavolette ottenute dai voli aerei del 1954 e del 1959, al fine di fornire comunque le informazioni 3D su questi ghiacciai e rispondere alla richiesta degli esperti di glaciologia di avere una copertura 3D completa.

Analisi temporale

I DTM del ghiacciaio del Careser estratti dalle immagini del 1954 e dalle tavolette sono stati confrontati con il DSM ottenuto dal volo aereo eseguito nel 2015, calcolando le differenze di altezza (il più recente meno il più antico) e analizzando la distribuzione dei valori in funzione della qualità dei dati di origine e della geomorfologia locale (Figura 6b). In generale si osserva una differenza sistematica negativa intorno ai 40-50 m con picchi negativi superiori a 100m, in aree dove la modellazione 3D era ritenuta affidabile. In generale l'andamento del cambiamento e i valori delle differenze di quota sono in linea con le previsioni stimate dal gruppo di glaciologia del MUSE. Infatti il bilancio di massa determinato con il metodo glaciologico dal 1967 al 2015 ha restituito una perdita cumulata di 58 m di ghiaccio distribuiti sull'intero ghiacciaio. Questo valore è coerente con le variazioni di 46 m ottenute dalla differenza tra il DTM del 2015 e i valori del 1954 discussi in questo lavoro. L'analisi temporale ha incluso anche l'analisi dei profili delle differenze di quota lungo transetti di interesse, disegnati dalla cima (A) alla base (B) dei ghiacciai.

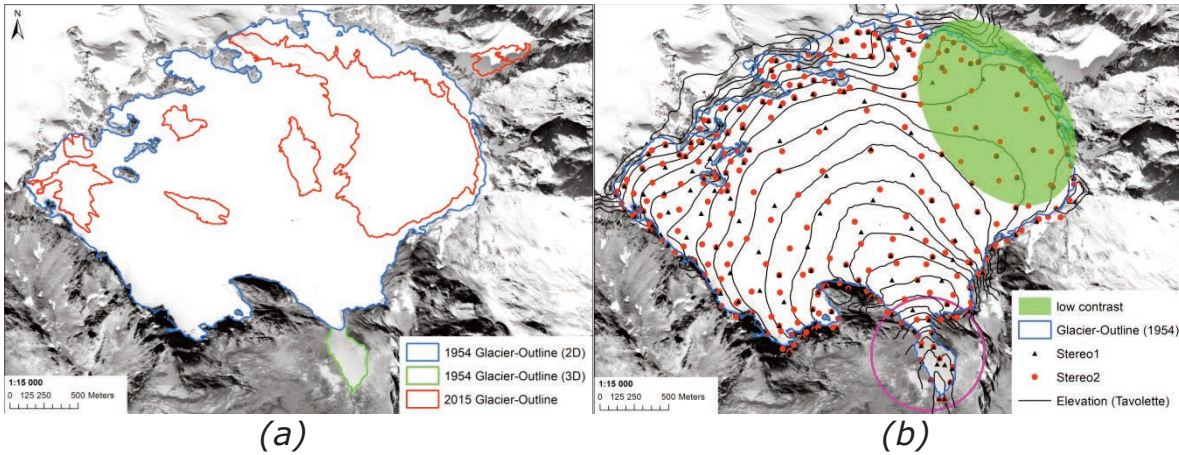


Figura 5. Estrazione di informazioni 3D dal ghiacciaio del Careser. (a) Perimetro del ghiacciaio nel 1954 misurato in 2D (blu), con correzioni in 3D (verde) e nel 2015 (rosso). (b) Punti di massa resituiti in due diverse sessioni di lavoro (rosso e blu), e curve di livello digitalizzate da mappe tavoletta (marrone).

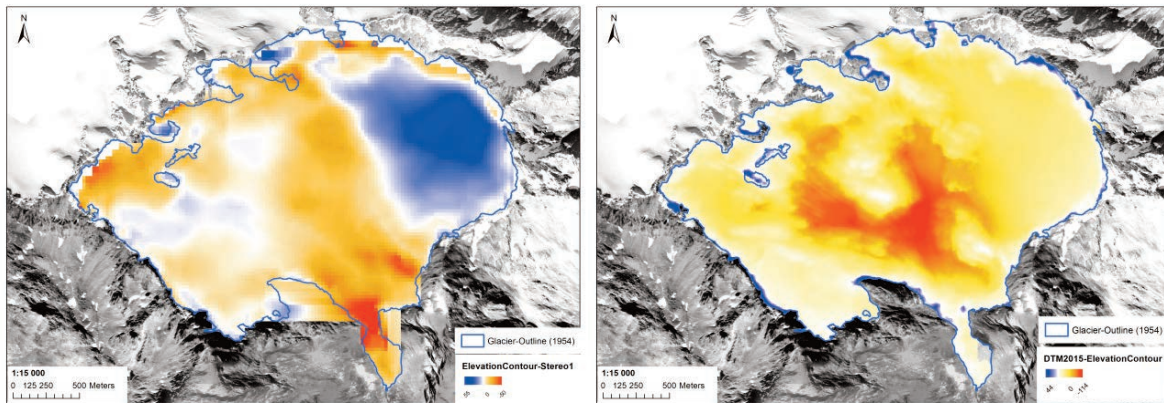


Figura 6. Analisi 3D sul ghiacciaio del Careser. (a) Differenza tra il DTM ottenuto dalla tavoletta e il DTM Stereo1 del 1954. (b) Differenza di quota tra il DTM del 2015 e il DTM ottenuto dalla tavoletta.

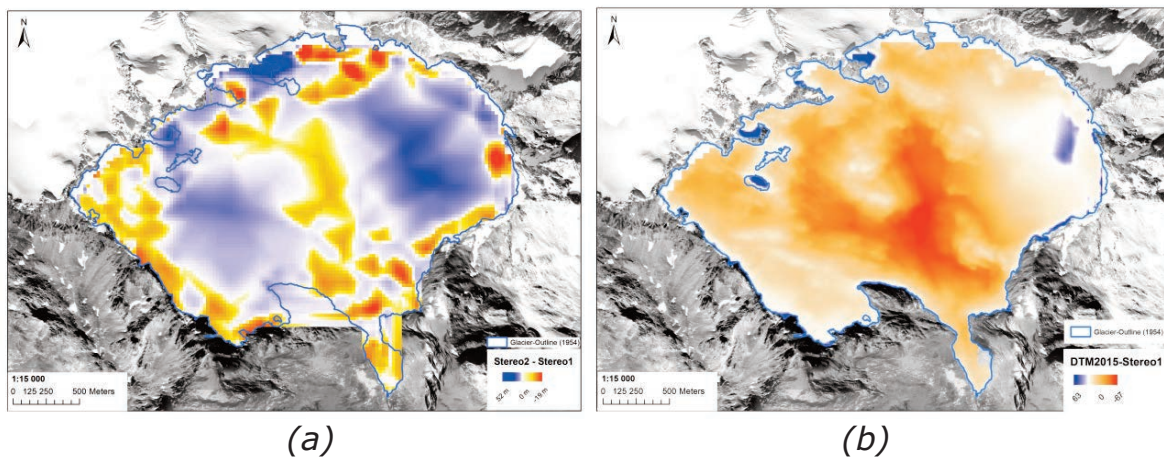


Figura 7. Analisi 3D sul ghiacciaio del Careser. (a) Differenza tra i DTM Stereo2 e Stereo1 del 1954. (b) Differenza di quota tra il DTM del 2015 e il DTM Stereo1 del 1954.

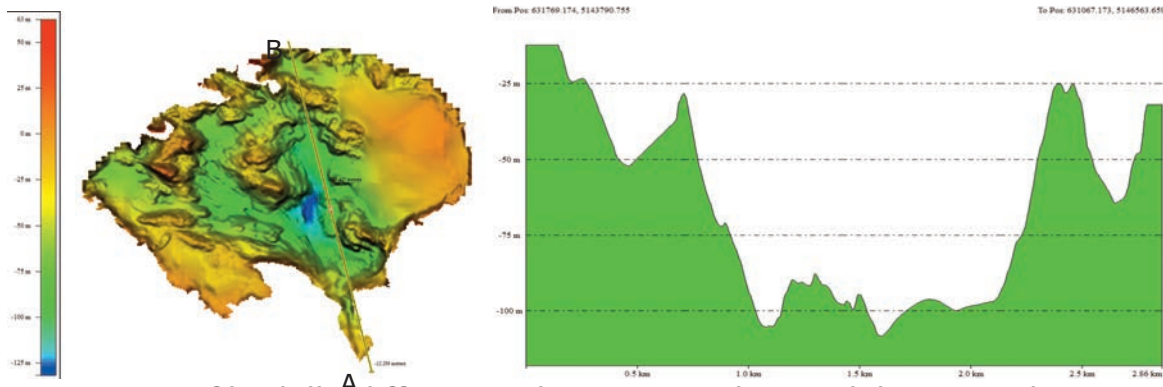


Figura 8. Profilo delle differenze di quote tra il DTM del 1954 e il DTM nel 2015 lungo il segmento indicato in giallo.

Conclusioni

Lo scopo del lavoro era di indagare la possibilità di estrarre informazioni 3D e modelli digitali della superficie sui ghiacciai della Provincia di Trento a partire dalle immagini aeree storiche acquisite nel 1954 dall'Aeronautica americana. L'analisi ha evidenziato come la bassa qualità dei fotogrammi, in particolare la presenza di graffi, zone saturate e altre zone omogenee, abbia influenzato il flusso di lavoro fotogrammetrico in termini di precisione raggiunta nelle fasi di orientamento interno ed esterno delle immagini, pur permettendo di generare un ortofoto di 1 m su tutta la Provincia di Trento, compresi i ghiacciai. I problemi relativi alla qualità dell'immagine e al basso ricoprimento hanno avuto effetti più critici nella modellazione 3D della superficie dei ghiacciai. In effetti, l'uso di *dense image matching* non ha dato risultati affidabili, sebbene la stessa metodologia avesse prodotto risultati molto accurati sugli stessi ghiacciai con immagini acquisite da camere aeree moderne e su altri ghiacciai con voli aerei dello stesso periodo storico. La presenza di aree sature o con bassa tessitura, ha compromesso anche la possibilità di modellare i ghiacciai manualmente con il metodo stereoscopico in alcune regioni. I risultati ottenuti sul ghiacciaio del Careser sono stati discussi criticamente, concludendo che in aree con una qualità dell'immagine accettabile è possibile ricavare l'informazione 3D in modo affidabile e utilizzare i dati per indagini geodetiche, come le variazioni della quota del ghiacciaio nel tempo, e per il confronto con i bilanci determinati con il metodo glaciologico.

Riferimenti bibliografici

Bolch, T., Pieczonka, T., Benn, D.I. (2010). Longest time series of glacier mass changes in the Himalaya based on stereo imagery. *The Cryosphere Discuss.*, 4, 2593–2613.

Legat, K., Moe, K., Poli, D., Bollmann, E. (2016). Exploring the potential of aerial photogrammetry for 3D modelling of high-alpine environments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2016*, XL-3/W4, 97-106.