

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Marzo 2025

Monitoraggio di ambienti alpini con fotogrammetria aerea

Relatori:

Prof. Alberto Cina

Ing. Myrta Maria Macelloni

Candidato:

Alberto Costa

Indice:

Indice delle figure: III

Indice delle tabelle: VII

Abstract 1

1. Introduzione del caso studio 3

1.1. I ghiacciai 3

1.2. La Valpelline..... 4

2. Introduzione alla fotogrammetria aerea 11

2.1. Teoria della fotogrammetria 11

3. Caratteristiche dei voli..... 18

3.1. Ground Control Point 24

4. Descrizione dei software fotogrammetrici..... 31

4.1. Agisoft Metashape 32

4.2. Stonex Cube 3d 39

5. Analisi del volo 2022..... 46

5.1. Elaborazione del blocco fotogrammetrico..... 47

5.1.1. Elaborazione con il software Cube 3d dei voli 2022 47

5.1.2. Elaborazione con il software Agisoft Metashape dei voli 2022 53

5.1.3. Prodotti cartografici 2022 58

5.2. Confronto dei risultati 64

5.2.1. Analisi e confronto coordinate centri di presa e parametri della camera .. 65

5.2.2. Analisi e confronto DSM..... 70

5.2.3. Considerazioni finali 86

6. Analisi del volo 2024..... 87

6.1. Elaborazione del blocco fotogrammetrico 2024..... 88

6.1.1.	Orientamento del modello	88
6.1.2.	Co-registrazione dei fotogrammi 2022	90
6.2.	Prodotti cartografici 2024	94
6.3.	Analisi sui check point del volo 2024	99
6.3.1.	Definizione delle configurazioni dei GCP e check point.....	99
6.3.2.	Considerazioni finali	106
7.	Recupero set fotogrammetrico 2020 e miglioramento 2022	108
7.1.	Gestione del modello fotogrammetrico anno 2020	109
7.2.	Tecnica di co-registrazione nel modello 2022.....	117
8.	Analisi del ghiacciaio Grandes Murailles e della morfologia della valle	119
8.1.	Validazione dei DSM	119
8.2.	Determinazione dell'ablazione del ghiacciaio Grandes Murailles 2022-2024.....	123
8.3.	Analisi del distacco nella morena del ghiacciaio Tza de Tzan	129
9.	Conclusioni	135
10.	Allegati	138
10.1.	Allegato 1 – Monografie GCP.....	138
10.2.	Allegato 2 - Monografie GCP rilevati nella campagna 2024.....	172
10.3.	Allegato 3 – Monografie rifugio S.A.S.S.O.....	178
10.4.	Allegato 4 - Coordinate centri di presa e differenze elaborazione volo 2022.....	180
10.5.	Allegato 5 - Script Matlab confronto DSM.....	202
10.6.	Allegato 6 - Posizione ed assetti centri di presa set fotogrammetrico marker di appoggio	206
11.	Bibliografia e sitografia:	210

Indice delle figure:

Figura 1: Schema di un ghiacciaio [8].....	4
Figura 2: Inquadramento geografico Valpelline - Google Earth.....	5
Figura 3: Ingrandimento Valpelline - Google Earth.....	5
Figura 4: Diga di Place Moulin [5].....	6
Figura 5: Ghiacciaio Grandes Murailles 260 [9].....	7
Figura 6: Sistema di riferimento del fotogramma digitale [10].....	12
Figura 7: Posizione del centro di proiezione [10].....	12
Figura 8: Schema piano di volo.....	16
Figura 9: Schema posizione camera aereo [13].....	19
Figura 10: Phaseone iXM-RS150F.....	20
Figura 11: Piani di volo 2020.....	21
Figura 12: Piani di volo 2022.....	22
Figura 13: Piano di volo 2024.....	23
Figura 14: Esempio rondella identificativa GCP Diati_48.....	26
Figura 15: Posizione GCP – Google Earth.....	26
Figura 16: Esempio monografia GCP Golf.....	27
Figura 17: Visibilità marker 1*1 m all'interno dei fotogrammi.....	28
Figura 18: Ubicazione marker campagna 2024 – Google Earth.....	28
Figura 19: Esempio marker Diati_66.....	29
Figura 20: Parametri allineamento foto Metashape.....	33
Figura 21: Importazione reference.....	35
Figura 22: Impostazioni nuvola densa.....	36
Figura 23: Impostazione DEM.....	37
Figura 24: Impostazioni ortofoto.....	38
Figura 25: Impostazioni aggiustamento di blocco.....	41

Figura 26: Schermata di collimazione dei marker Cube 3d	43
Figura 27: Impostazioni nuvola densa	43
Figura 28: Impostazioni DSM	44
Figura 29: Impostazioni ortofoto	44
Figura 30: Modello Cube 3d voli 18/09 e 03/10.....	48
Figura 31: Grafico scarti minimi quadrati Cube 3d	49
Figura 32: Modello tridimensionale volo 18/09/2022 CUBE 3D.....	50
Figura 33: Impostazione importazioni dati di telemetria	51
Figura 34: Nuvola densa CUBE 3D	52
Figura 35: Impostazioni di allineamento dei fotogrammi - Metashape.....	54
Figura 36: Modello ottenuto dall'orientamento relativo dei fotogrammi – Metashape	54
Figura 37: Grafico scarti minimi quadrati Metashape	56
Figura 38: GCP e relative ellissi d'errore stimate	56
Figura 39: Nuvola densa in media qualità - Metashape	57
Figura 40: Impostazioni DEM e ortofoto Metashape	58
Figura 41: DSM Cube 3d – campionamento 50cm	60
Figura 42: DSM Metashape – campionamento 50cm	61
Figura 43: Ortofoto Cube 3d - – campionamento 50cm	62
Figura 44: Ortofoto Metashape – campionamento 50cm	63
Figura 45: Differenze coordinata EST (Metashape - Cube 3d).....	65
Figura 46:Differenze coordinata NORD (Metashape - Cube 3d).....	66
Figura 47: Differenze quota ortometrica (Metashape - Cube 3d)	66
Figura 48: Analisi puntuale differenze quota ortometrica.....	68
Figura 49: Sistemi di riferimento dei due software (in rosso Cube 3d, in verde Metashape).....	69
Figura 50: Posizione sezioni.....	72
Figura 51: Sezione in zona di ghiaccio	72
Figura 52:Sezione in zona di ombra	73

Figura 53: Sezione in corrispondenza del marker Rifugio Aosta	73
Figura 54: Sezione in corrispondenza del marker Florio	74
Figura 55: Raster differenza DSM Cube – Metashape. Sono visibili le “strisciate” di errore generate dal calcolatore raster di QGIS.	75
Figura 56: Differenze tra DSM CUBE 3D – Metashape	76
Figura 57: Andamento statistico intero campione	77
Figura 58: Andamento statistico campione senza le code del 5%.....	77
Figura 59: Errore con soglia 10m.....	78
Figura 60: Errore con soglia 5m	79
Figura 61: Errore con soglia 1m	80
Figura 62: Errore con soglia 0,50m.....	80
Figura 63: Errore con soglia 0.25m.....	81
Figura 64: Errore con soglia 0.10m.....	82
Figura 65: Errore ΔH di proiezione	83
Figura 66: Carte delle differenze ΔH	84
Figura 67: Carta delle pendenze	84
Figura 68: Correlazione pendenze – differenze ΔH	85
Figura 69: Piano di volo 2024	87
Figura 70: Modello tridimensionale 2024	88
Figura 71: Impostazioni di riallineamento Metashape	90
Figura 72: GCP e relative ellissi d'errore stimate	92
Figura 73: Modello definitivo orientato 2024	93
Figura 74: DSM volo 2024	95
Figura 75: Ortofoto volo 2024	96
Figura 76: Bivacco S.A.S.S.O.....	97
Figura 77: Configurazione iniziale ed ellissi d'errore	101
Figura 78: Schema configurazione 1	101
Figura 79: Schema configurazione 2	103
Figura 80: Valori di scarto configurazione 2	104

Figura 81: Schema configurazione 3	105
Figura 82: Importazione parametri camera	111
Figura 83: DSM 2020	115
Figura 84: Ortofoto 2020	116
Figura 85: Individuazione sezioni su aree stabili.....	120
Figura 86: Sezione 1	120
Figura 87: Sezione 2	121
Figura 88: Sezione 3	121
Figura 89: Sezione 4	121
Figura 90: Variazione spessore ghiacciaio 2024-2022.....	124
Figura 91: Ghiacciaio Grandes Murailles - identificazione delle sezioni	125
Figura 92: Sezione 1 - Zona crepacci – Zona di fusione	125
Figura 93: Sezione 2 – zona di accumulo	126
Figura 94: Sezione 3 – zona di fusione.....	126
Figura 95: Sezione 4 zona di accumulo	126
Figura 96: Calcolo bilancio di massa	127
Figura 97: Individuazione della porzione di valle interessata dell'evento alluvionale	129
Figura 98: Ingrandimento zona interessata dall'evento alluvionale	130
Figura 99: Identificazione delle sezioni	131
Figura 100: Sezione 1	131
Figura 101: Sezione 2	131
Figura 102: Sezione 3	132
Figura 103: Sezione 4 - longitudinale	132
Figura 104: sezione 5 - Zona di deposito lungo la valle	132
Figura 105: Sezione 6 – Zona di erosione lungo la valle.....	132
Figura 106: Sezione 7 – Zona di deposito lungo la valle.....	133
Figura 107: Calcolo del volume della frana	134

Indice delle tabelle:

Tabella 1: Dati riepilogativi ghiacciaio Grandes Murailles [9].....	7
Tabella 2: Caratteristiche camera iXM-RS150F	20
Tabella 3: Riepilogo caratteristiche voli	24
Tabella 4: Precisioni ricevitore Trimble SP80	29
Tabella 5: coordinate GCP campagna 2024.....	30
Tabella 6: Scarti ai minimi quadrati marker orientamento assoluto CUBE 3D ..	49
Tabella 7: Estratto coordinate e parametri di assetto Cube 3d	50
Tabella 8: Scarti minimi quadrati GCP modello elaborato con Metashape	55
Tabella 9: Parametri statistici serie completa	67
Tabella 10: Parametri statistici senza i dieci parametri iniziali	67
Tabella 11: Coordinate del punto principale	68
Tabella 12: Posizione punto principale.....	69
Tabella 13: Differenze posizione punto principale	69
Tabella 14: Distanza focale.....	69
Tabella 15: Coefficienti di distorsione radiale	70
Tabella 16: Valori analisi differenze DSM.....	83
Tabella 17: Scarti ai minimi quadrati GCP modello 2024.....	89
Tabella 18: Scarti ai minimi quadrati GCP dopo co-registrazione.....	91
Tabella 19: Coordinate bivacco SASSO misurate e stimate.....	98
Tabella 20: Configurazione generale marker – scarti GCP volo 2024	100
Tabella 21: Valori degli scarti configurazione 1	102
Tabella 22: Valori di scarto configurazione 3	106
Tabella 23: Numero fotogrammi per marker.....	109
Tabella 24: Estratto tabelle parametri calcolati centri di presa.....	110
Tabella 25: Statistica di errore posizione camere.....	112

Tabella 26: Scarti GCP modello 2020	113
Tabella 27: Parametri statistici scarti GCP modello 2020	113
Tabella 28: Parametri statistici prima della co-registrazione GCP 2020	113
Tabella 29: statistica di errore posizione camere 2022.....	117
Tabella 30: Errori marker prima della co-registrazione delle immagini	118
Tabella 31: Statistica errore GCP 2024 dopo co-registrazione	118

Abstract

Negli ultimi decenni, l'evoluzione dei cambiamenti climatici ha reso necessario il monitoraggio degli indicatori ambientali più sensibili, al fine di determinarne l'evoluzione nel tempo e comprenderne gli effetti sul territorio. In Italia, così come in tutta Europa, i ghiacciai alpini hanno subito un forte ritiro, stimato negli ultimi 150 anni in una perdita di circa il 50% delle aree glaciali. Inoltre, l'aumento della temperatura media sul territorio delle alpi, stimato in $+1.5^{\circ}\text{C}$ per il periodo climatologico 2001-2030, rispetto al periodo 1961-1990, ha velocizzato tale fenomeno di fusione, rendendo necessario anche il monitoraggio degli effetti sul territorio dei differenti apporti in termini di acque di fusione e di accumulo. Per questi motivi i ghiacciai sono un indicatore fondamentale delle variazioni dovute ai cambiamenti climatici, e perciò sono costantemente monitorati attraverso dei modelli digitali, valutandone la variazione sia degli spessori, sia della superficie tra diversi periodi temporali.

In questo elaborato verrà impiegata la tecnica geomatica della fotogrammetria da aereo per la determinazione dei modelli digitali del territorio della Valpelline, utili a monitorare nel tempo la variazione dei corpi glaciali; nonché lo stesso modello sarà utilizzato per analizzare la variazione morfologica della valle a seguito di un evento alluvionale eccezionale manifestatosi all'inizio dell'estate 2024.

Il sito di indagine è l'alta Valpelline (AO) dove sono analizzati tre diversi set fotogrammetrici realizzati in anni diversi: 2020, 2022, 2024; sperimentando per ciascuno di essi tecniche differenti di elaborazione e gestione. Il volo 2020 sarà riprocessato sperimentando una tecnica di recupero e incremento dei punti a terra necessari per l'orientamento del modello, al fine di migliorare l'appoggio del volo già elaborato. In questo modo sarà convalidata la tecnica della co-registrazione di immagini provenienti da set fotografici diversi. Il volo 2022 sarà gestito con due diversi software, Agisoft Metashape e Cube 3d, al

fine di valutare, prendendo come modello di riferimento quello elaborato con il software Metashape, il risultato ottenuto con Cube 3d, definendo le criticità nell'utilizzo di questo nuovo software rispetto al consolidato uso di Metashape. Il volo 2024 sarà inizialmente processato utilizzando il software Metashape per ottenere il modello aggiornato del territorio al 2024. Successivamente, data la particolare morfologia della valle, che si presenta stretta e lunga con versanti molto acclivi e quindi con difficoltà nell'accedervi per posizionare i marker a terra per l'orientamento del modello, saranno analizzati i differenti apporti in termini di precisione dei Ground Control Point, definendo quali siano di maggiore importanza per il buon funzionamento del modello.

Infine, ottenuti i dati definitivi riguardanti i modelli elaborati della Valpelline, si è condotta l'analisi dell'ablazione del corpo del ghiaccio della Grandes Murailles e la valutazione del cambiamento della morfologia della valle a seguito dell'evento alluvionale avvenuto all'inizio dell'estate 2024

1. Introduzione del caso studio

In questo primo capitolo, dopo una descrizione introduttiva generale dei corpi glaciali, viene introdotta ed inquadrata l'area oggetto della tesi, la Valpelline, descrivendone i suoi aspetti ed elementi più importanti, passando poi alla descrizione di corpi glaciali che insistono su questo territorio, definendone l'importanza del loro monitoraggio.

1.1. I ghiacciai

Si definisce generalmente ghiacciaio un “accumulo naturale di ghiaccio, originato dal successivo sovrapporsi di strati nevosi che, esercitando pressione sugli strati sottostanti, ne determinano il continuo e lento movimento” [1]. Un aspetto importante è che il continuo movimento dei ghiacciai, dovuto ad uno scivolamento verso valle, provoca erosione e contestuale modellamento delle vallate alpine.

La formazione di un ghiacciaio avviene per stratificazione di neve che si accumula al di sopra del limite delle nevi perenni¹, soggetti a fenomeni di compattazione dovuti al peso proprio che gli strati più superficiali esercitano su quelli più profondi. A trasformazione completa il ghiaccio presente su di un versante raggiunge densità dell'ordine del 85-90% [7] di quella dell'acqua.

I ghiacciai alpini hanno generalmente estensione limitata, dovuta al fatto che il loro sviluppo avviene all'interno di avvallamenti e depressioni della superficie montuosa. L'estensione è generalmente di due tipi, o limitata

¹ Limite delle nevi perenni: quota al di sopra della quale la neve depositata durante la stagione invernale non fonde nel corso della stagione estiva, consentendo quindi un accumulo di neve perenne.

all'interno del bacino di formazione, oppure allungata a formare una lingua glaciale² verso valle. In via generale all'interno di un ghiacciaio possono essere riconosciute tre diverse zone [7]:

- Zona di accumulo o bacino collettore: zona nella quale si accumulano le nevi perenni;
- Zona di ablazione: zona nella quale la differenza tra massa fusa e massa generata è negativa;
- Fronte: limite dei ghiacci.

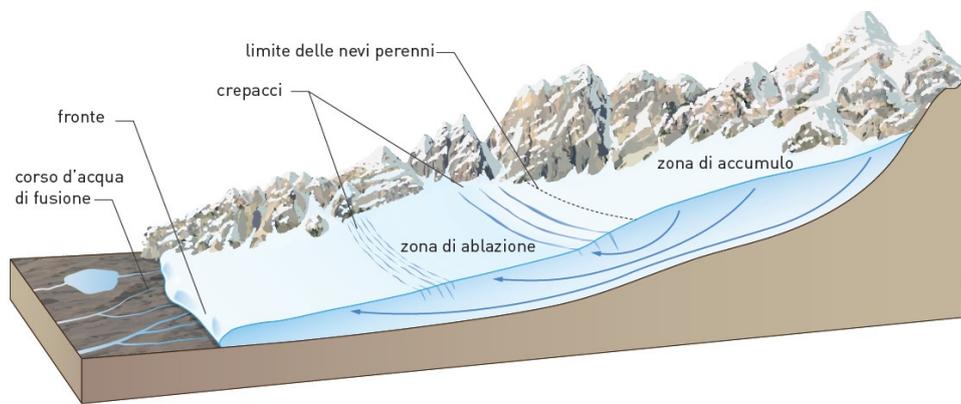


Figura 1: Schema di un ghiacciaio [8]

1.2. La Valpelline

Situata nel nord Italia, la Valpelline si sviluppa sulla sinistra orografica della regione Valle D'Aosta, con direzione principale Nord-Est – Sud-Ovest, circondata dai gruppi montuosi dello Château des Dames, dei Jumeaux, della Dent d'Hérens e del Collon [2]. Si sviluppa a partire dalla conca di Aosta fino ad arrivare alla località di Bionaz, vicino al confine svizzero, con un'estensione di circa 60 km [3].

² Lingua glaciale: massa di ghiaccio allungata in movimento verso valle



Figura 2: Inquadramento geografico Valpelline - Google Earth

La valle è attraversata dal torrente Valpelline che in prossimità della località Place Moulin, per la presenza di uno sbarramento artificiale, forma il lago denominato Lago di Place-Moulin.



Figura 3: Ingrandimento Valpelline - Google Earth

La diga sorge all'interno del comune di Bionaz, ad una quota di circa 2000 metri di altitudine ed è una delle più importanti opere per dimensione a livello europeo per l'approvvigionamento idrico e per la produzione di energia elettrica. È stata costruita tra il 1961 e il 1965 con una struttura ad arco-gravità che raggiunge un'altezza di 155 metri a una lunghezza del coronamento di 678 metri. Il lago artificiale, formatosi a monte dello

sbarramento, ha una capienza di 105 milioni di metri cubi e un'estensione verso monte di circa quattro chilometri. È alimentato dalle acque di fusione raccolte dal torrente Valpelline provenienti dal ghiacciaio Des Grandes Murailles [4] [7].



Figura 4: Diga di Place Moulin [5]

I ghiacciai della Valpelline

La Valle D'Aosta è la regione italiana con la più vasta superficie glaciale, con un totale di 132,90 km² (pari al 36,10% della superficie totale italiana), suddivisi tra 192 ghiacciai raggruppati in sei gruppi montuosi: Grande Sassièrè – Rutor, Gran Paradiso, Monte Bianco, Grand Combin, Cervino e Monte Rosa [9]. Nel dettaglio sulla Valpelline insistono numerosi corpi glaciali, le cui estensioni si sono notevolmente ridotte negli ultimi decenni a causa dei cambiamenti climatici, che ne hanno accelerato il processo di fusione. Ciò ha provocato negli ultimi 150 anni un arretramento del fronte glaciale di 7 km, provocando la divisione dell'antico corpo glaciale in ammassi di minor estensione ad una quota mediamente più elevata. All'interno del territorio analizzato in questa tesi ricade il ghiacciaio Des Grandes Murailles, identificato all'interno del nuovo catasto dei ghiacciai italiani con il numero progressivo 260 ed il codice WGI (World Glacier Inventory) IT4L01522027. Il ghiacciaio Grandes Murailles fa parte del raggruppamento montuoso del Cervino, che comprende 24 ghiacciai per una superficie totale di 15,88 km². Dai dati a disposizione all'interno del nuovo catasto dei ghiacciai italiani il ghiacciaio Grandes Murailles ha una superficie

di 6,26 km², mentre tutto il gruppo del cervino ha perso nell'ultimo mezzo secolo una superficie glaciale pari al 40%, con una riduzione del numero di ghiacciai, che è passata da 33 a 24 unità [8].

Ghiacciaio Grandes Murailles	
Numero catasto C.G.I.	260
Tipo	Montano
Forma	Pendio
Alimentazione	Diretta, Valanghe
Esposizione	Sud
Quota max	4179
Quota min	3950
Attività	Regresso

Tabella 1: Dati riepilogativi ghiacciaio Grandes Murailles [9]

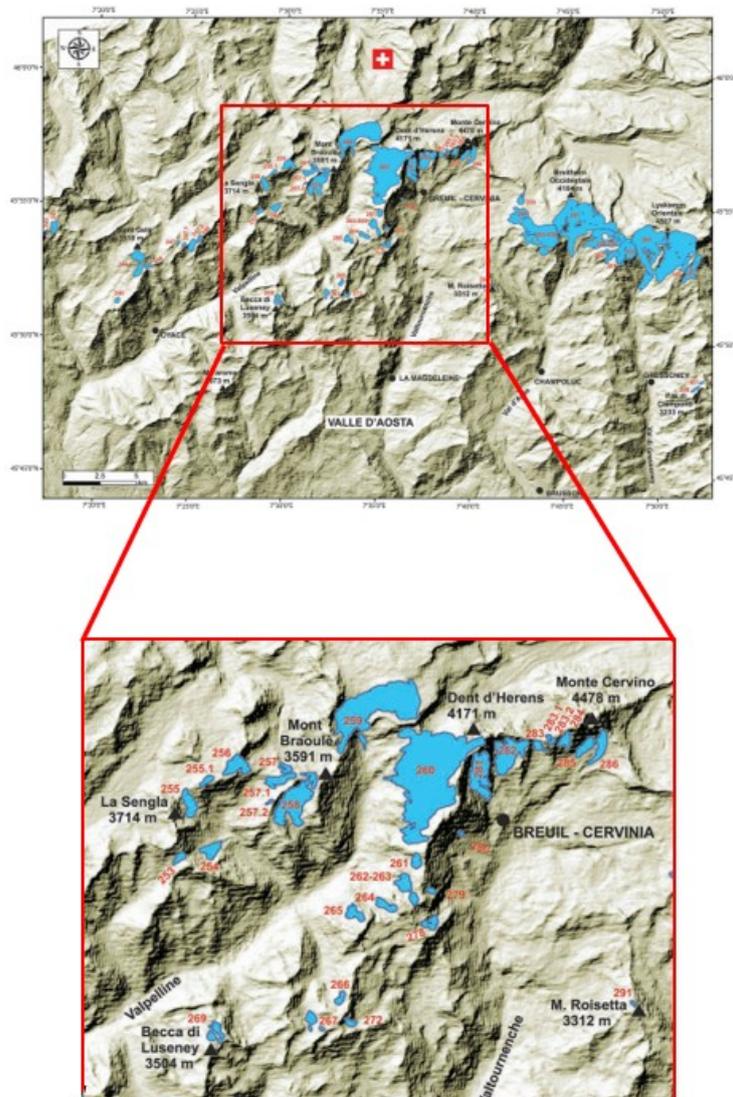


Figura 5: Ghiacciaio Grandes Murailles 260 [9]

Monitoraggio dei corpi glaciali

Data la forte evoluzione dei cambiamenti climatici che evolvono nel tempo ad un ritmo sempre più accelerato, il controllo degli indicatori ambientali che li descrivono e ne permettono il monitoraggio nel tempo è oggi giorno sempre di maggior interesse per tutta la comunità scientifica e civile. I ghiacciai sono uno degli indicatori maggiormente monitorati, considerando anche il rischio della loro estinzione a causa dell'innalzamento della temperatura media, stimato per il territorio delle Alpi in $+1.5^{\circ}\text{C}$ per il periodo climatologico 2001-2030, rispetto al periodo 1961-1990 [11]. La riduzione della massa dei ghiacciai genera oltre alla perdita diretta della massa di ghiaccio, anche effetti sul territorio circostante. All'interno del rapporto "*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*" realizzato dall'IPCC³ le aree alpine europee vengono definite tra quelle a maggior rischio a causa degli effetti climatici. Per queste aree vengono definiti molteplici aspetti che sono direttamente o indirettamente coinvolti ed influenzati dalla variazione dei ghiacciai, della copertura nevosa e del permafrost:

- Disponibilità idrica a valle: la riduzione dell'accumulo di nevi e ghiaccio riduce la disponibilità di risorse idriche durante il periodo estivo, con implicazioni sia a livello agricolo, sia per l'approvvigionamento di acqua potabile. Inoltre, occorre considerare che tali risorse idriche sono utilizzate anche per la produzione di energia elettrica; quindi, una loro riduzione riduce l'approvvigionamento energetico disponibile.
- Destabilizzazione dei versanti: la fusione dei ghiacci e del permafrost annulla l'effetto di coesione all'interno delle morene⁴ presenti sotto i ghiacciai. Ciò può generare frane e smottamenti del terreno con ripercussioni sul fondovalle.

³ IPCC: "Intergovernmental Panel on Climate Change" è l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione della scienza relativa ai cambiamenti climatici.

⁴ Morena: "accumulo di materiali rocciosi e terrosi trasportato o depositato da un ghiacciaio" [23]

- Incidenza sul paesaggio e sul turismo: la riduzione delle superfici ricoperte da neve impatta direttamente sull'offerta turistica, in particolar modo sulle stazioni sciistiche a quote meno elevate, con ripercussioni dirette sull'economia del luogo [9].

Per questi motivi il monitoraggio delle variazioni dei ghiacciai, soprattutto in una regione come la Valle D'Aosta, in cui si concentra il 36% dei ghiacciai italiani, è di fondamentale importanza. L'ARPA⁵ Valle D'Aosta svolge da diversi anni attività di monitoraggio dei corpi glaciali; così come la "*Cabina di regia dei ghiacciai valdostani*", un organismo che riunisce vari enti e istituzioni con lo scopo di monitorare l'evoluzione della criosfera in Valle d'Aosta. Le attività di monitoraggio prevedono [10] [11]:

- Bilanci di massa: consiste nella determinazione della massa dei ghiacciai definendone le variazioni annuali. Il bilancio può essere positivo, quando la massa aumenta, oppure negativo se vi è una contrazione della massa totale.
- Rilevazione dell'estensione superficiale: consiste nella determinazione della superficie totale (in km²) della superficie dei corpi glaciali.
- Misura dello spessore del ghiaccio: utilizzando il georadar è possibile definire la profondità del ghiaccio in modo tale da poter calcolare il volume di acqua contenuto all'interno.
- Arretramento del fronte: viene determinato l'arretramento del fronte dei ghiacci prendendo come riferimento un punto fisso. Questo parametro, insieme al bilancio di massa, sono i due maggiori indicatori degli effetti climatici sui ghiacciai [10] [12].

Periodicamente i dati raccolti vengono pubblicati all'interno di report annuali che raccolgono i dati registrati per i diversi ghiacciai. Dato l'elevato numero di ghiacciai presenti in Valle D'Aosta, solo per alcuni è possibile un

⁵ ARPA: "Agenzia Regionale Protezione Ambiente Valle d'Aosta" svolge attività conoscitive e di prevenzione e tutela in campo ambientale.

monitoraggio accurato, con la definizione dei parametri succitati. Altri corpi glaciali vengono monitorati attraverso l'analisi visiva di fotografie scattate in anni successivi. Dal Report *"Campagna glaciologica annuale dei ghiacciai italiani (2023)"* è possibile ottenere una descrizione inerente al ghiacciaio Des Grandes Murailles, oggetto di analisi di questa tesi: *"Il confronto con le foto scattate negli anni precedenti mostra inequivocabilmente una contrazione del ghiacciaio ed un aumento del detrito sulla sua superficie."* [13]. Per tale ghiacciaio non sono disponibili dati inerenti il bilancio di massa, ma solo una descrizione visiva. Al termine di tale tesi, sarà possibile grazie ai dati analizzati, definire la variazione tra l'anno 2022 e il 2024 anche per il ghiacciaio Des Grandes Murailles.

2. Introduzione alla fotogrammetria aerea

In questo capitolo viene presentata la tecnica e la teoria della fotogrammetria da aereo come metodo per la ricostruzione di un modello tridimensionale utilizzato per ottenere prodotti cartografici quali DSM e ortofoto a partire da singoli fotogrammi. Il modello DSM "*Digital Surface Model*" è un modello digitale del territorio in cui ad ogni coordinata piana EST e NORD è associato anche un valore di quota, mentre l'ortofoto è la rappresentazione cartografica sottoforma di immagine digitale georeferenziata. Essa è ottenuta come proiezione dell'area oggetto di rilievo sul piano cartografico di riferimento [10].

2.1. Teoria della fotogrammetria

Il fotogramma è una prospettiva centrale dell'oggetto che è rappresentato, il cui punto focale di acquisizione della camera corrisponde con il centro di proiezione. Utilizzando due prospettive centrali che raffigurano lo stesso oggetto è possibile risalire, grazie ad una visione stereoscopica⁶, alla terza dimensione, e cioè attribuire una posizione spaziale tridimensionale all'oggetto inquadrato [11].

La ricostruzione di un modello attraverso il processo fotogrammetrico si basa su due tipologie di orientamento:

⁶ Visione stereoscopica: visione che permette di ricreare l'effetto tridimensionale a partire da immagini bidimensionali [19]

- L'orientamento interno
- L'orientamento esterno

L'orientamento interno definisce, nello spazio immagine, la posizione del centro di proiezione rispetto al sistema di riferimento del fotogramma. Nel caso di fotogrammi digitali il sistema di riferimento ha origine nel pixel in alto a sinistra del fotogramma:

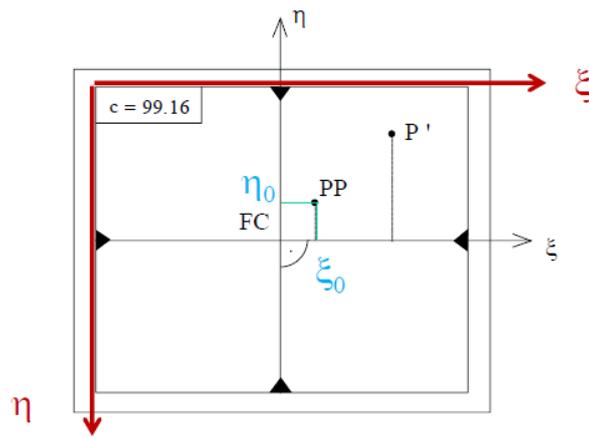


Figura 6: Sistema di riferimento del fotogramma digitale [10]

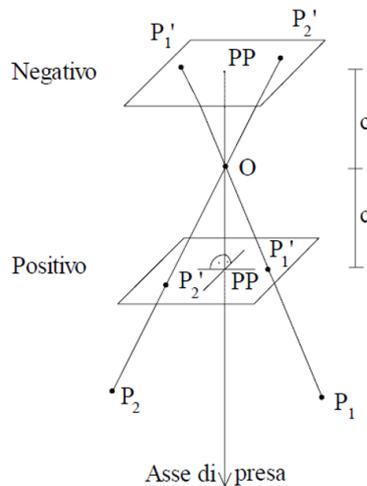


Figura 7: Posizione del centro di proiezione [10]

I parametri che descrivono l'orientamento interno sono:

- ξ_0, η_0 , che definiscono le coordinate del punto principale;
- c , distanza principale, tra il punto principale PP e il centro di proiezione O [10].
- ξ, η coordinate immagine di un generico punto

Essi sono una caratteristica della camera utilizzata e perciò costanti per tutti i fotogrammi realizzati con la stessa camera [12]. Durante la fase di orientamento interno è necessario tenere in considerazione anche la presenza di errori dovuti alle distorsioni generate dall'obiettivo. Tali distorsioni provocano lo spostamento di un generico punto all'interno dell'immagine, che assume quindi coordinate immagine diverse da quelle reali. Nella determinazione della posizione delle coordinate immagine (ξ , η) occorre quindi correggerne il valore misurato con un fattore $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ di errore. Esistono tre diverse tipologie di distorsioni che generano errori di natura diversa [18]:

- distorsione radiale:

Il raggio incidente che entra all'interno dell'obiettivo con un angolo τ esce con un angolo τ' diverso. Tale distorsione dipende dalla distanza r del punto con il punto principale ed è quella di maggior rilevanza tra le tre tipologie possibili di distorsione. Può essere calcolata con la seguente formulazione, dove k_n sono i coefficienti di distorsione radiale:

$$\Delta_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots$$

$$\Delta\xi_r = \xi \frac{\Delta_r}{r} \quad ; \quad \Delta\eta_r = \eta \frac{\Delta_r}{r}$$

- distorsione tangenziale:

È dovuta al disallineamento e decentramento dei componenti ottici all'interno della camera. Può essere determinato con la seguente formulazione, con P_1 e P_2 coefficienti di distorsione tangenziale:

$$\Delta\xi_{tan} = P_1(r' + 2\xi^2) + 2P_2\xi\eta$$

$$\Delta\eta_{tan} = P_2(r' + 2\eta^2) + 2P_1\xi\eta$$

- distorsioni di taglio e affinità:

Sono dovute alla deviazione del sistema di riferimento immagine con riferimento all'ortogonalità degli assi. Sono determinate con le seguenti formulazioni, con B_1 e B_2 coefficienti di distorsione affine e di taglio:

$$\Delta\xi_{aff} = B_1\xi + B_2\eta$$

$$\Delta\eta_{aff} = 0$$

I valori di correzione totale sono determinati dalla somma dei tre apporti. Si ottiene quindi:

$$\Delta\xi = \Delta\xi_r + \Delta\xi_{tan} + \Delta\xi_{aff}$$

$$\Delta\eta = \Delta\eta_r + \Delta\eta_{tan} + \Delta\eta_{aff}$$

I parametri di calibrazione della camera, quindi i valori di orientamento interno e di distorsione, possono essere determinati in due modi: forniti attraverso un certificato di calibrazione oppure determinati in modo automatico direttamente dal software utilizzato per l'elaborazione del blocco fotogrammetrico.

L'orientamento esterno è definito dai parametri necessari per la ricostruzione della posizione spaziale della camera al momento dello scatto della fotografia, rispetto ad un sistema di riferimento oggetto definito a priori. I parametri che definiscono l'orientamento sono sei: tre traslazioni e tre rotazioni [11] [10].

L'orientamento esterno viene a sua volta suddiviso in due passaggi:

- orientamento relativo
- orientamento assoluto

L'orientamento relativo permette, tramite l'individuazione di punti omologhi, anche definiti Tie Point, su due o più fotogrammi, la ricostruzione del modello ottenendo quindi che i raggi omologhi si intersechino. Sono sufficienti cinque punti su cui annullare la parallasse per un modello di due fotogrammi.

Successivamente a questa prima fase si procede con l'orientamento assoluto del modello tramite cui si individuano i sette parametri di rototraslazione (tre traslazioni, tre rotazioni e un fattore di scala) necessari per ottenere la sovrapposizione del modello attenuato al terreno. Per eseguire tale operazione è possibile adottare il metodo della triangolazione aerea tramite cui, conoscendo la posizione di almeno 3 GCP⁷ a terra ben distribuiti sull'area di rilievo, è possibile risolvere ai minimi quadrati il problema e orientare il modello.

Le equazioni di collinearità legano le coordinate immagine alle coordinate oggetto utilizzando i parametri di orientamento interno ed esterno [10]:

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

In cui:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sen\kappa & \sen\varphi \\ \cos\omega\sen\kappa + \sen\omega\sen\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sen\omega\sen\varphi\sen\kappa & -\sen\omega\cos\varphi \\ \sen\omega\sen\kappa - \cos\omega\sen\varphi\cos\kappa & \sen\omega\cos\kappa + \cos\omega\sen\varphi\sen\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}$$

- ω, φ, κ , angoli di assetto
- X, Y, Z , coordinate punto oggetto
- X_0, Y_0, Z_0 , coordinate centri di presa
- η, ξ , coordinate immagine

È possibile ricavare le formule inverse che permettono di ottenere le coordinate oggetto in funzione dei parametri di orientamenti interno, esterno e delle coordinate immagine [10]:

⁷ GPC: Ground Control Point sono punti di coordinate note ben identificabili sul terreno

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

L'ottenimento dei fotogrammi utili per la ricostruzione fotogrammetrica avviene attraverso un volo, il cui piano deve essere precedentemente progettato. In genere esso è costituito da più strisciate parallele, ciascuna delle quali viene realizzata con una sovrapposizione con quella adiacente del 60%. I fotogrammi scattati lungo ciascuna striscia invece devono avere una sovrapposizione minima del 60% al fine di garantire la copertura e la ricostruzione totale dell'area di rilievo [12].

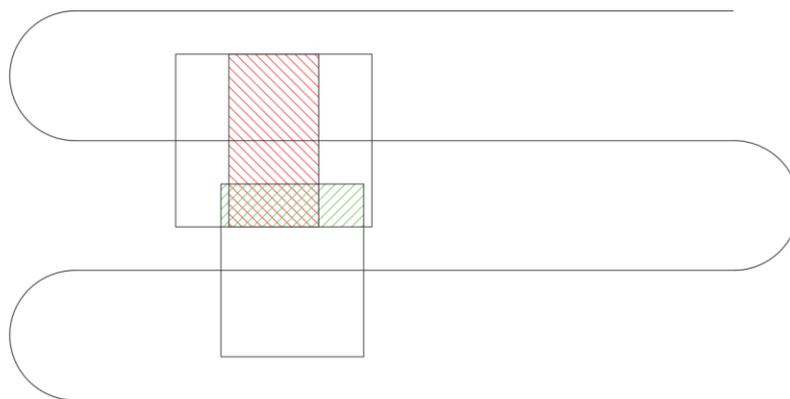


Figura 8: schema piano di volo

La fotogrammetria diretta e la triangolazione aerea

Dopo aver effettuato l'orientamento relativo dei fotogrammi ed averne ottenuto un blocco, è necessario orientare in modo assoluto il modello rispetto al sistema di riferimento adottato. L'orientamento può essere fatto in due modi diversi: nella fotogrammetria diretta i parametri di orientamento, cioè la posizione e l'assetto della camera al momento dello scatto, vengono misurati direttamente attraverso un sistema GNSS e IMU installati all'interno

del velivolo che effettua il volo. In questo modo tutti i parametri necessari sono noti ed è possibile procedere direttamente all'orientamento del modello. Sono quindi note, per ciascun fotogramma, le coordinate dei centri di presa (X_0, Y_0, Z_0) e i parametri di assetto (ω, φ, κ) necessari per determinare la matrice di rotazione. Usando le equazioni di collinearità è possibile risalire direttamente alle coordinate oggetto, dopo aver determinato le coordinate immagine sul fotogramma.

In alternativa è possibile adottare il metodo di orientamento definito triangolazione aerea, attraverso cui, conoscendo le coordinate di punti a terra definiti GCP (X, Y, Z), facilmente individuabili all'interno dei fotogrammi, è possibile calcolare con una soluzione ai minimi quadrati i parametri di orientamento per ogni fotogramma. In via teorica, per la soluzione del problema sarebbero sufficienti tre punti a terra per ogni blocco, ma al fine di ottenere un risultato migliore è auspicabile la conoscenza di più punti omogeneamente distribuiti nel modello, con particolare attenzione ai GCP di bordo.

Nel caso di fotogrammetria diretta, seppur non è richiesta la conoscenza di punti a terra di coordinate note, al fine di avere un sistema di controllo del risultato ottenuto è bene conoscere alcuni punti a terra di verifica [10].

Nel caso in esame di questa tesi, non avendo a disposizione i valori di posizione dei centri di presa al momento dello scatto, il metodo utilizzato è quello della triangolazione aerea.

3. *Caratteristiche dei voli*

Nella prima parte di questo capitolo sono descritte le caratteristiche dei dati a disposizione utilizzati nell'elaborazione della tesi inerenti ai tre diversi voli svolti negli anni 2020, 2022 e 2024, descrivendone sia le caratteristiche delle apparecchiature utilizzate, sia quelle riguardanti i fotogrammi ottenuti, mentre nella seconda parte saranno introdotti i dati inerenti i Ground Control Point disponibili sul territorio in esame.

I voli fotogrammetrici in esame sono stati realizzati dalla società DigiSky, che ha sede a Torino e che opera nel campo del monitoraggio aereo fornendo servizi per diverse tipologie di clienti, utilizzando un aereo ultraleggero tipo Tecnam P92 JS. L'aereo utilizzato è equipaggiato, come visibile nello schema seguente, con una camera Phaseone iXM-RS150F posizionata al di sotto dell'ala destra, ed una seconda camera i cui dati non sono utilizzati nella trattazione di questa tesi. Oltre alle camere sono presenti due apparati IMU a bassa precisione e un'antenna GNSS che permettono la misura dei dati di posizione e assetto del velivolo. Tali dati, utili nel caso si volesse sviluppare l'elaborazione sottoforma di fotogrammetria diretta, non sono disponibili per i voli analizzati, e perciò i dataset saranno processati facendo ricorso alla triangolazione aerea.

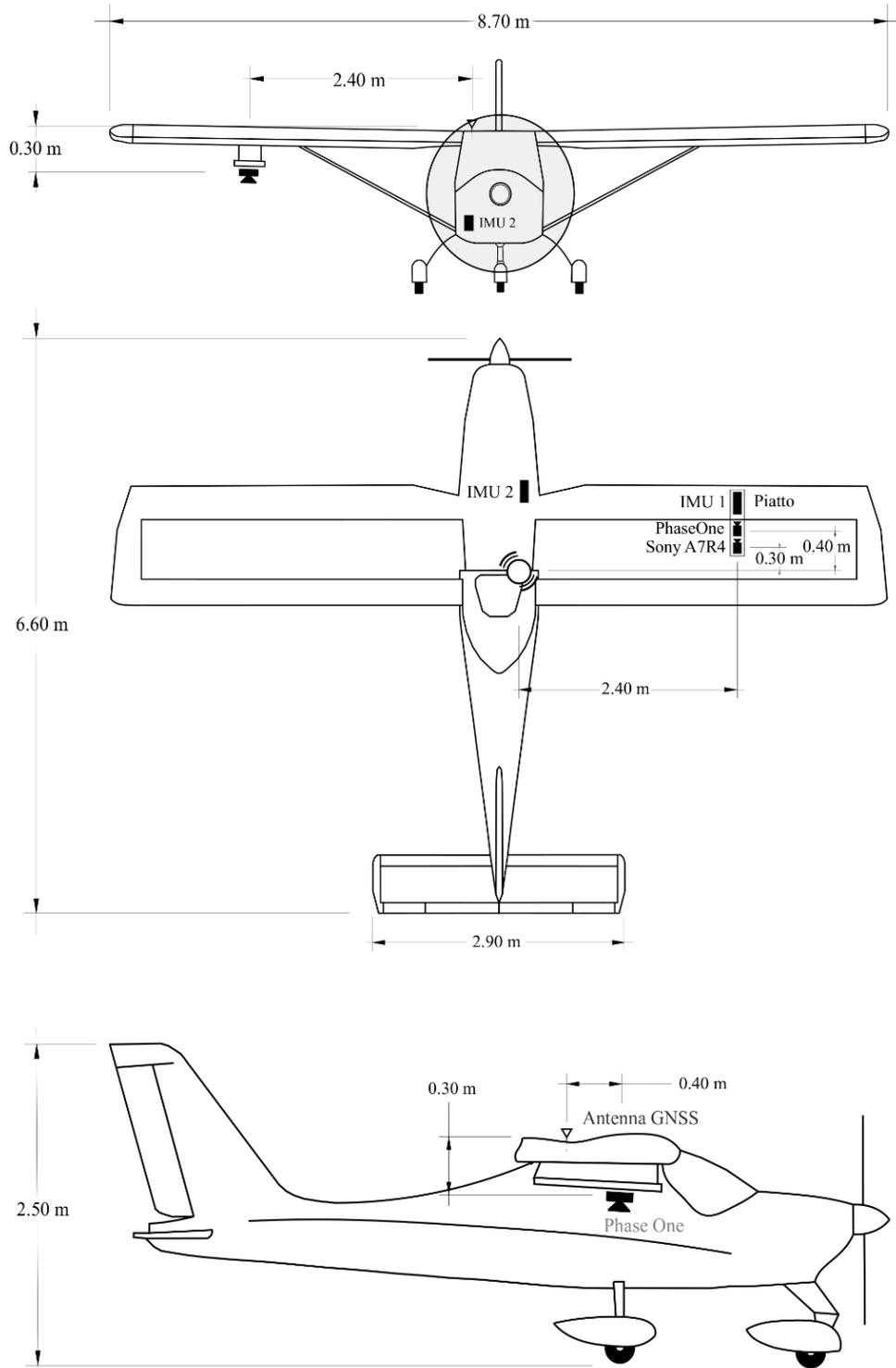


Figura 9: Schema posizione camera aereo [13]

Camera fotografica

La camera fotografica utilizzata è la Phaseone iXM-RS150F, sviluppata per essere utilizzata per l'acquisizione di immagini aeree, garantendo un'alta copertura aerea.



Figura 10: Phaseone iXM-RS150F

Le caratteristiche tecniche principali della camera sono riassunte nella tabella seguente:

iXM-RS150F	
Resolution	150 MP
Aspect ratio	4:3
Pixel size [μm]	3,76
Sensor size [mm]	53,4 x 40,0
Lens mount	Phase one RS
Weight [g]	1000
Dimensions [mm]	90 x 90 x 91
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	- 10 to 40
Humidity [%]	15 - 80

Tabella 2: Caratteristiche camera iXM-RS150F

Tutti e tre i rilievi hanno avuto la medesima zona di sorvolo, la Valpelline, differenziandosi per il numero di voli effettuati per ogni rilievo e per l'estensione della superficie rilevata. Nel seguito sono descritti per ogni volo le caratteristiche principali dei dataset fotografici a disposizione. Per ognuno sono riportati il numero di fotogrammi da cui è composto, la scala media e l'altezza relativa di volo (altezza calcolata tra il terreno e il velivolo), l'abbracciamento medio di ogni fotogramma e il GSD – Ground Sampling Distance, cioè la dimensione a terra di un pixel.

Volo 2020

È stato realizzato con tre diversi piani di volo, ottenendo tre set fotogrammetrici.

- Volo 1 realizzato in data giovedì 9 luglio 2020 tra le ore 14.30 e le 16:30, con un totale di 635 fotogrammi.
- Volo 2 realizzato in data giovedì 3 settembre 2020 tra le 12:50 e le 13:20, con un totale di 183 fotogrammi.
- Volo 3 realizzato in data giovedì 3 settembre 2020 tra le 14:55 e le 15:50, con un totale di 308 fotogrammi.

Le caratteristiche comuni dei tre voli sono:

- Superficie totale ricoperta 90,20 km²
- Altezza relativa di volo: 1050 metri
- Scala media del fotogramma: 1:21000
- Abbracciamento 1121 x 840 m
- Dimensione fotogramma: 14204*10652 pixels
- Distanza focale: 50 mm
- Ground sample distance: 8,88 cm/pix

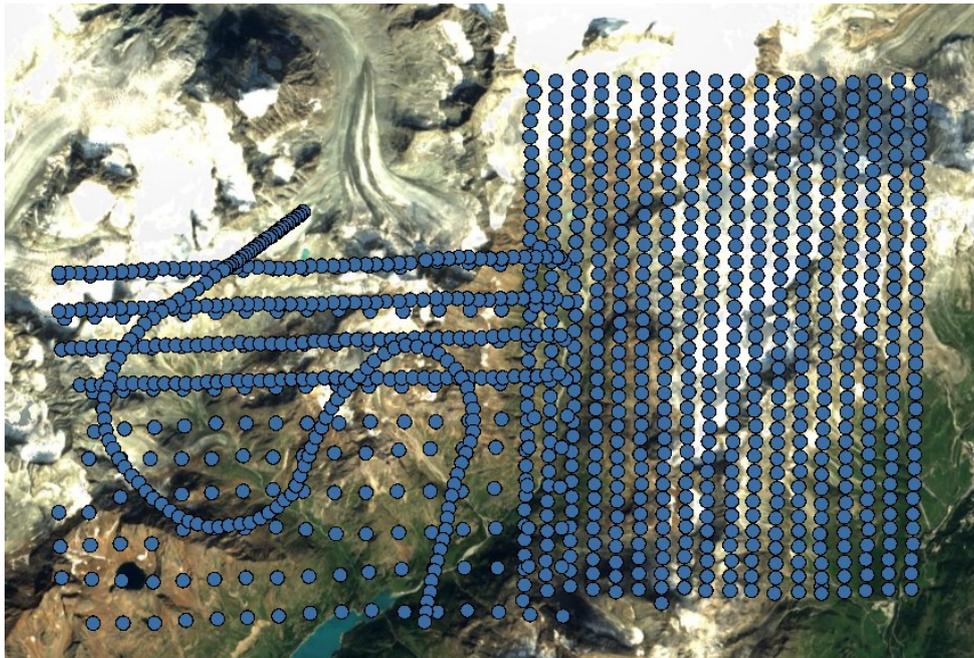


Figura 11: piani di volo 2020

Volo 2022

È stato realizzato con due diversi sorvoli dell'area in esame, producendo due set fotogrammetrici:

- Volo 1 realizzato in data 18 settembre 2022 tra le ore 9:00 e le 10:05 con un totale di 730 fotogrammi.
- Volo 2 realizzato in data 3 ottobre 2022 tra le ore 12:25 e le 14:50 con un totale di 321 fotogrammi.

Le caratteristiche comuni dei due voli sono:

- Superficie totale ricoperta 113,00 km²
- Altezza relativa di volo: 1050 metri
- Scala media del fotogramma: 1:21000
- Abbracciamento 1121 x 840 m
- Dimensione fotogramma: 14204*10652 pixels
- Distanza focale: 50 mm
- Ground sample distance: 7,60 cm/pix

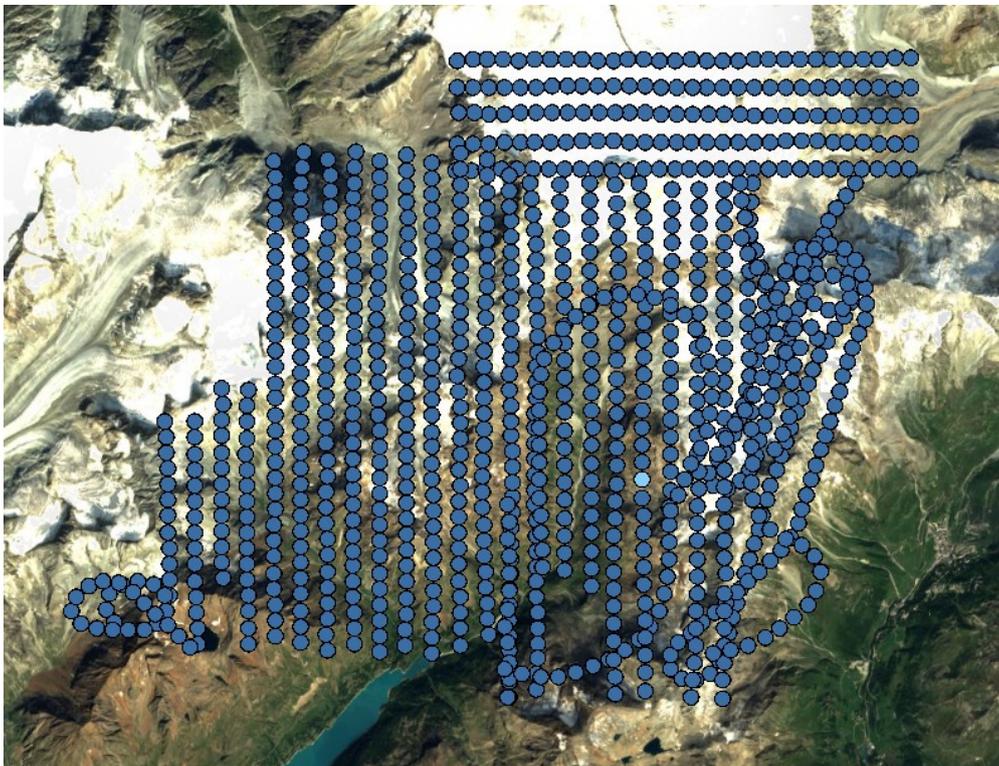


Figura 12: piani di volo 2022

Volo 2024

È stato realizzato in data 11 novembre 2024 tra le ore 11:38 e le 14:58, con un unico sorvolo che ha ricoperto l'intera area di interesse con un totale di 1044 fotogrammi. Seppur la sua esecuzione fosse stata programmata a cavallo tra settembre ed ottobre, è stato necessario posticiparla a causa di condizioni meteo sfavorevoli. Ciò ha fatto sì che le fotografie presentino ombre lunghe, che in fase di restituzione possono causare maggiori problematiche nella gestione dei dati.

Le caratteristiche del volo sono:

- Superficie totale ricoperta 121,00 km²
- Altezza relativa di volo: 1090 metri
- Scala media del fotogramma: 1:21800
- Abbracciamento 1164 x 872 m
- Dimensione fotogramma: 14204*10652 pixels
- Distanza focale: 50 mm
- Ground sample distance: 8,97 cm/pix

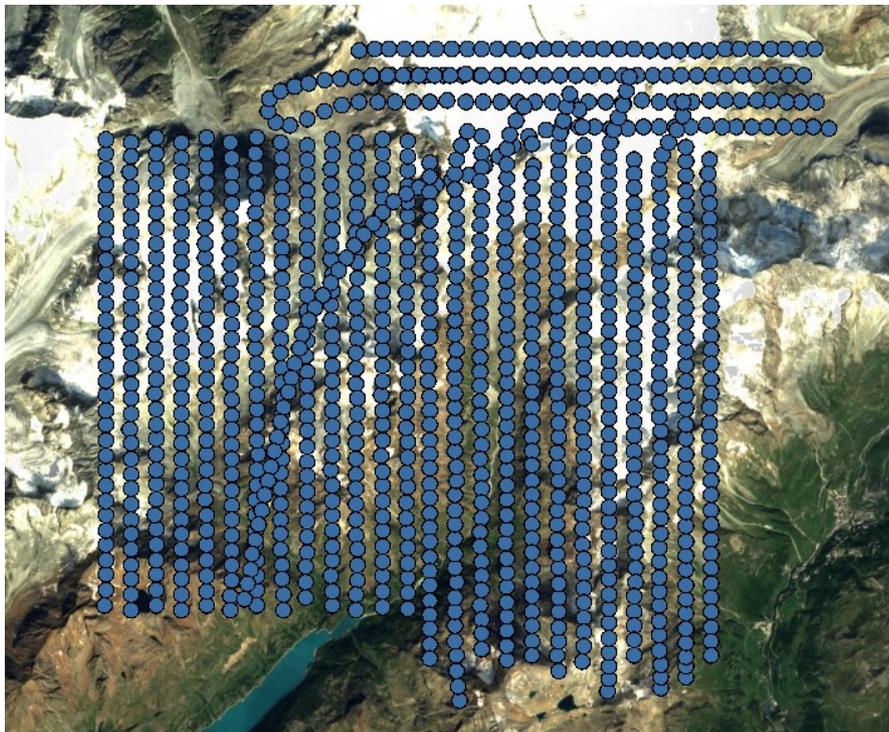


Figura 13: piano di volo 2024

Caratteristiche / Anno	2020	2022	2024
Numero voli	3	2	1
Numero fotogrammi totali	1126	1051	1044
Superficie totale ricoperta [km ²]	90,20	113,00	121,00
Altezza relativa di volo [m]	1050	1050	1090
Scala media del fotogramma	1:21000	1:21000	1:21800
Abbracciamento [m]	1121 x 840	1121 x 840	1164 x 872
Dimensione fotogramma [pixels]	14204 x 10652		
Distanza focale: [mm]	50		
Dimensione del pixel [μ m]	3,76 x 3,76		
Ground sample distance [cm/pix]	8,88	7,60	8,97

Tabella 3: Riepilogo caratteristiche voli

3.1. Ground Control Point

Come introdotto nel capitolo 2.1, al fine di generare un modello fotogrammetrico correttamente orientato rispetto ad un sistema di riferimento, è possibile procedere in due modi, con la tecnica della fotogrammetria diretta nel caso in cui siano note le coordinate e l'assetto dei centri di presa al momento dello scatto, oppure tramite la tecnica della triangolazione aerea, con cui è possibile orientare un blocco fotogrammetrico conoscendo le coordinate di alcuni punti a terra ben visibili denominati GCP. Nei casi in esame in questo elaborato è stata adottata la tecnica della triangolazione aerea, e perciò è necessaria la conoscenza delle coordinate dei GCP, che possono essere determinate attraverso un rilievo GNSS⁸.

La scelta dei GCP deve essere fatta in modo tale che siano ben visibili e identificabili all'interno dei fotogrammi, scegliendo punti al di sopra di elementi stabili che non subiscano variazioni nel tempo. Nell'identificazione dei punti possono essere usati elementi naturali (grosse rocce) o artificiali (spigoli di fabbricati) già presenti sul luogo, oppure materializzati attraverso l'apposizione di marker ben fissati a terra [13].

⁸ GNSS: Global Navigation Satellite System

I dati disponibili in Valpeline

In Valpeline, nel corso degli anni, a seguito di diverse campagne di misura svolte sia dal team del Politecnico di Torino – GlacierLab, sia dall'ARPA, sono stati identificati numerosi GCP rilevati tramite GNSS, sia in modalità statica (con stazionamento minimo di circa 20 minuti) che RTK a seconda delle condizioni di misura durante il rilievo, identificandone la posizione attraverso una tripletta di coordinate espresse nel sistema ETRF2000 UTM 32N.

Data l'ubicazione e la morfologia complessa della valle in cui tali misure sono state realizzate, le tipologie di rilievo GNSS realizzate sono state differenti a seconda delle diverse condizioni ambientali. Per la determinazione della posizione di alcuni punti è stato possibile determinare in RTK con un posizionamento differenziale le coordinate in tempo reale dei punti a terra. In questo caso, in una stazione base di posizione nota viene determinata la correzione differenziale che, trasmessa attraverso un protocollo RTCM al ricevitore di posizione incognita, viene applicata alle osservazioni di range e così determinata la posizione con precisione centimetrica in tempo reale. Nei casi in cui tale tecnica non è stata possibile, è stato realizzato un posizionamento relativo. In questo caso si determina il vettore baseline che unisce due punti, uno di posizione nota e uno incognito. I due ricevitori posti su entrambi i punti registrano per un periodo di tempo variabile da qualche minuto a qualche ora i dati di fase provenienti dagli stessi satelliti. Successivamente, in post-elaborazione, utilizzando un software in grado di elaborare differenze doppie di fase, si determina il vettore baseline e la posizione del punto incognito.

Per l'identificazione dei punti a terra si è fatto ricorso, a seconda dei casi, sia ad elementi naturali, sia ad elementi artificiali facilmente individuabili, come grosse rocce o spigoli di bivacchi in prossimità dei ghiacciai dove è difficile trovare punti naturali ben identificabili. La materializzazione del punto, qualora non coincidesse con un elemento di precisa identificazione (es. spigolo di fabbricato) è stata realizzata con rondella topografica identificativa del punto (Figura 14) di diametro di circa 10 centimetri. In quest'ultimo caso,

durante la fase di elaborazione del blocco fotogrammetrico risulta però difficile identificare con precisione il punto a terra poiché la rondella non è distinguibile all'interno del fotogramma, considerando che in media il GSD dei fotogrammi è di circa otto centimetri. Per questo motivo, nelle più recenti campagne di misura, sono stati utilizzati dei marker di grandi dimensioni.



Figura 14: Esempio rondella identificativa GCP Diati_48

Data la particolare morfologia della valle, che in alcune aree risulta difficilmente accessibile sia con mezzi motorizzati, sia a piedi, la scelta dell'ubicazione dei GCP ha dovuto tener conto della possibilità di accesso alle diverse zone. A causa di ciò risultano sul territorio zone con una presenza maggiore di GCP, mentre altre aree risultano prive di punti d'appoggio. Nel dettaglio la maggior parte dei GCP sono situati lateralmente al corso del torrente Valpelline e nelle vicinanze di Cervinia (vedi immagine seguente).

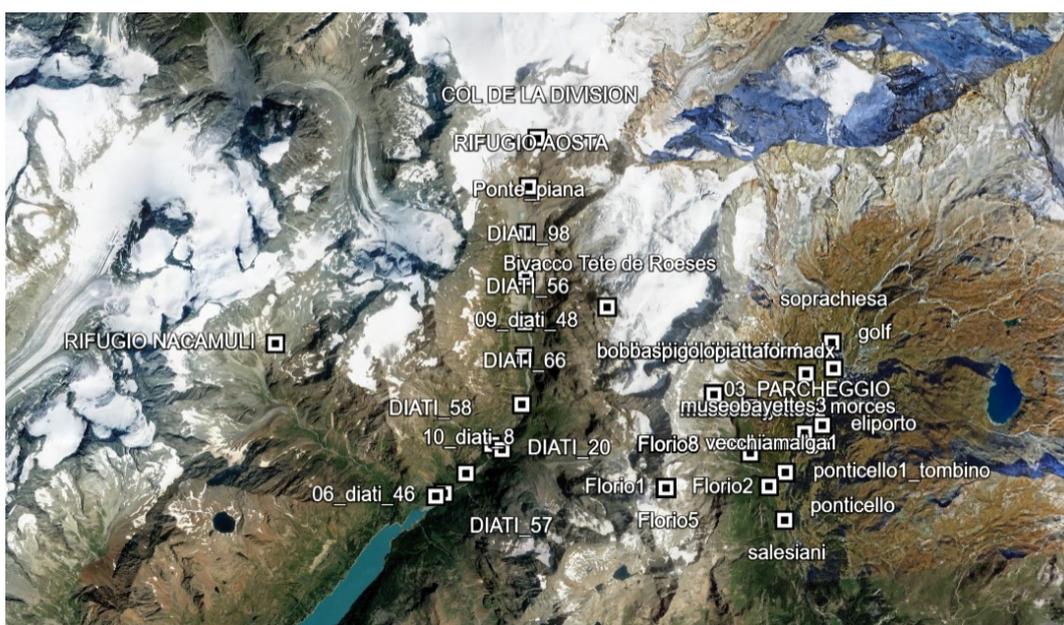


Figura 15: Posizione GCP – Google Earth

Per ogni punto rilevato è stata prodotta una scheda monografica, di cui nel seguito è possibile vederne un esempio, mentre tutte le altre schede monografiche sono inserite nell'allegato 10.1.

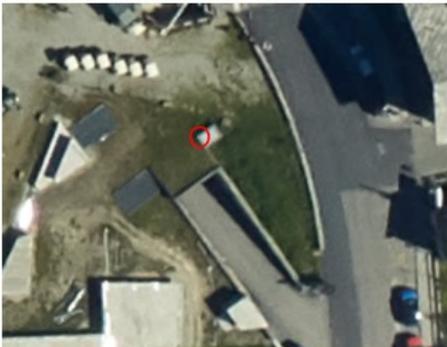
Località: Valtournenche		Data: 12/10/2020	
Nome: GOLF		Foto particolare:	
Ubicazione: Spigolo grata, vicino campo da Golf			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 393686.114	H ortometrica: 2004.442		
Nord: 5087833.963	h ellissoidica: 2059.256		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR4			
Identificativo: 0063****			
Altezza in. [m]: 2.0			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Figura 16: Esempio monografia GCP Golf

Campagna di misura del 25 – 26 settembre 2024

In queste date è stata eseguita una nuova campagna di misura da parte del Politecnico di Torino, al fine di posizionare cinque nuovi marker a terra. A differenza degli scorsi rilievi, sono stati utilizzati come GCP non punti fisici presenti al suolo identificati da rondelle topografiche, ma marker di grosse dimensioni (1*1m) opportunamente ancorati al suolo. La scelta delle dimensioni del marker è stata fatta in modo tale che all'interno del fotogramma fosse distinguibile ed univocamente identificabile così che in fase di elaborazione del blocco fotogrammetrico la collimazione del marker potesse avvenire in modo preciso. Marker di dimensioni inferiori, infatti, non sarebbero risultati visibili considerando il GSD dei fotogrammi utilizzati.



Figura 17: visibilità marker 1*1 m all'interno dei fotogrammi

La scelta dell'ubicazione dei marker è stata fatta a priori, prima di eseguire il posizionamento, scegliendo di posizionarli lungo il lato sinistro del torrente Valpelline. Seppur in tale zona fossero già presenti dei GCP la scelta di installarne di nuovi è stata dettata principalmente da due necessità:

- Di avere dei punti a terra di posizione certa a seguito dell'evento alluvionale manifestatosi all'inizio dell'estate 2024 che ha interessato tutta la zona adiacente al corso d'acqua Valpelline modificandone la morfologia
- Raffittire la maglia dei GCP, considerando però la difficoltà di accesso alla valle, con l'impossibilità di poter installare nuovi marker nelle zone più remote del territorio.

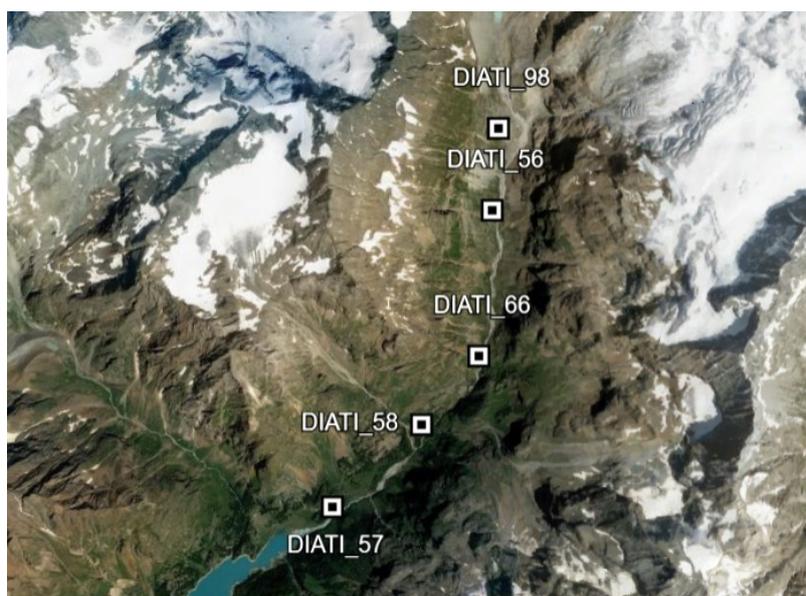


Figura 18: Ubicazione marker campagna 2024 – Google Earth

La posizione è stata misurata con rilievo GNSS, utilizzando un ricevitore Trimble Spectra Precision SP80 in grado di ricevere ed elaborare il segnale dalle costellazioni GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS e SBAS e di supportare lo standard RTCM 3.2 Multiple Signal Messages in modo tale da poter eseguire misure RTK. Nella tabella seguente sono riassunte le principali caratteristiche di precisioni ottenibili con il ricevitore:

Modalità	Precisione Orizzontale	Precisione Verticale
RTK in tempo reale	8 mm + 1 ppm	15 mm + 1 ppm
Statico	3 mm + 0.5 ppm	5.0 mm + 0.5 ppm
Statico ad alta precisione	3 mm + 0.1 ppm	3.5 mm + 0.4 ppm

Tabella 4: Precisioni ricevitore Trimble SP80

Data l'impossibilità di accedere con mezzi motorizzati alle zone rilevate, al fine di ridurre il peso del materiale necessario, per posizionare il ricevitore al di sopra dei punti da rilevare non è stato utilizzato un treppiede, ma è stato realizzato uno stazionamento utilizzando, per ciascun punto ancore e tiranti in grado di tenere in posizione il ricevitore (vedi figura seguente).



Figura 19: Esempio marker Diati_66

La determinazione della posizione è stata fatta utilizzando due diverse tecniche di misura, a seconda delle condizioni ambientali. Per due punti (Diati_57 e Diati_58) si è proceduto con un rilievo RTK, posizionando la stazione base sul punto Diati_46 e trasmettendo via radio la correzione differenziale calcolata al ricevitore rover. In questo modo è stato possibile ottenere in tempo reale le coordinate dei punti battuti. Gli altri tre punti (Diati_56, Diati_66, Diati_98) sono stati rilevati in modalità rapido-statico con un tempo di acquisizione di trenta minuti. In quest'ultimo caso, la post-elaborazione dei dati raccolti al fine di risalire alle coordinate del punto, è stata effettuata con il servizio della rete dati SPIN3⁹ che ha restituito i valori espressi in coordinate geografiche (latitudine, longitudine e altezza ellissoidica) convertiti in coordinate piane UTM ETRF 2000 utilizzando il software ConveRgo tramite cui è possibile, utilizzando i grigliati IGM, passare anche dall'altezza ellissoidica alla quota ortometrica. Le monografie dei punti sono visibili nell'allegato 10.2, qui sono riportate le coordinate ottenute al termine dell'elaborazione.

Nome GCP	EST [m]	NORD [m]	Quota ortometrica [m]
DIATI_57	386421,680	5086365,222	2007,002
DIATI_58	387378,641	5087155,649	2071,199
DIATI_66	387997,362	5087821,819	2189,894
DIATI_98	388319,892	5090089,584	2428,478
DIATI_56	388216,032	5089284,267	2299,835

Tabella 5: coordinate GCP campagna 2024

⁹ SPIN3: Servizio di posizionamento interregionale Piemonte, Valle d'Aosta e Lombardia che permette di ottenere i dati di posizione nel sistema di riferimento geodetico nazionale [22].

4. Descrizione dei software fotogrammetrici

All'interno di questo capitolo, dopo una breve presentazione dei due software fotogrammetrici utilizzati in questa tesi, per ciascuno di essi verrà presentata la procedura di elaborazione dei dati, descrivendone per le parti principali di maggior interesse per l'elaborazione all'interno di questa tesi, sia le procedure che le metodologie adottate da ciascun software. Alla base dell'elaborazione di entrambi i software vi è la teoria della fotogrammetria descritta nel capitolo 2.

Il software Agisoft Metashape

Agisoft Metashape è un software stand-alone¹⁰ sviluppato dalla società Agisoft LLC con sede a San Pietroburgo in Russia, che consente la gestione di set fotogrammetrici digitali ottenuti sia con volo aereo che con drone, permettendo di elaborare modelli spaziali 3D da cui è possibile ottenere nuvole di punti, DSM e ortofoto, utili per una successiva gestione in ambiente GIS¹¹. Il software è in grado di elaborare fino a 50 mila fotogrammi per ogni file di lavoro, grazie allo sviluppo di una tecnica altamente automatizzata di gestione dei dati; inoltre, in post-elaborazione, è possibile migliorare il modello ottenuto grazie ad algoritmi che permettono l'eliminazione di ombre ed elementi non utili al rilievo. Con l'utilizzo di specifici marker codificati il programma è in grado di riconoscere e identificare in modo automatico i punti a terra, velocizzando le operazioni di orientamento del modello [14].

¹⁰ Stand-alone: "software capace di funzionare da solo o in maniera indipendente da altri oggetti o software" [24].

¹¹ GIS: "Geographic Information System (Sistema Informativo Geografico)", sistema per la gestione ed analisi di dati geografici e spaziali.

Il software Cube 3d

Cube 3d è un software sviluppato dalla Stonex, società con sede in Italia che dal 2010 produce e distribuisce strumentazioni di precisione per il rilievo del territorio. Permette di processare set fotogrammetrici composti da immagini o video e di ottenere nuvole di punti che possono essere a loro volta ulteriormente elaborate modificando o inserendo all'interno nuovi dati direttamente dall'interfaccia del programma. Oltre a ciò, sono implementati alcuni tool utili alla gestione dei prodotti cartografici, come la possibilità di eseguire sezioni longitudinali e trasversali sul modello, di calcolare i volumi compresi tra due diversi modelli, di realizzare mappe a curve di livello e di modificare in ambiente CAD il modello ottenuto senza l'utilizzo di software di terze parti. Con l'utilizzo di specifici marker codificati, così come con Metashape, il programma è in grado di riconoscere e identificare in modo automatico i marker a terra [15].

4.1. Agisoft Metashape

L'elaborazione con il software Metashape segue un flusso logico che si riassume nei seguenti punti:

- Caricamento dei dati all'interno del software
- Allineamento delle immagini e costruzione del modello tridimensionale
- Realizzazione della nuvola densa
- Realizzazione del DSM
- Realizzazione dell'ortofoto
- Esportazione dei dati

Le caratteristiche principali di ciascun punto sono descritte nel seguito, descrivendone le metodologie di elaborazione da parte del software.

Caricamento delle immagini:

Il caricamento delle immagini all'interno del software può avvenire in due modi diversi, utilizzando l'apposto comando *"add photos"* oppure trascinando all'interno dell'interfaccia le immagini precedentemente selezionate.

Allineamento dei fotogrammi:

Dopo aver inserito le foto è possibile procedere con la fase di allineamento dei fotogrammi, che corrisponde all'orientamento relativo e assoluto del blocco fotogrammetrico, procedendo alla determinazione dei parametri di orientamento interno ed esterno. L'allineamento dei fotogrammi è realizzato in modo automatico dal software. Dopo aver selezionato *"Align Photos"* è necessario settare alcuni parametri prima di avviare la procedura:

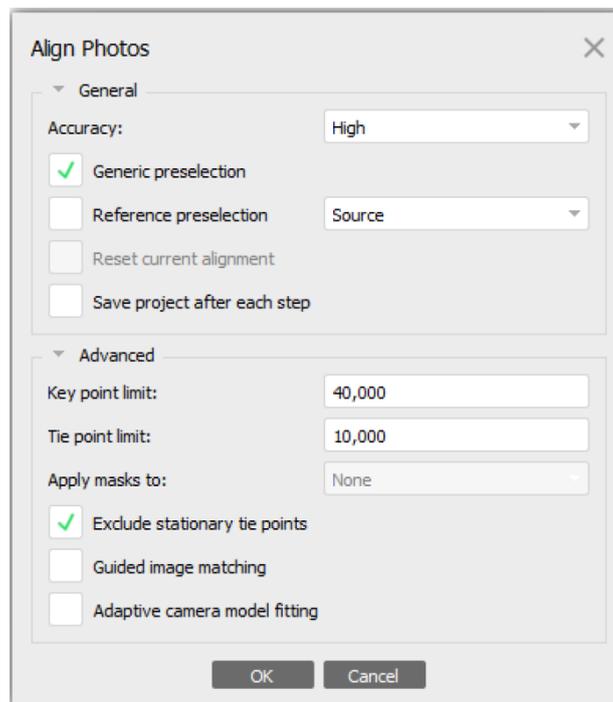


Figura 20: Parametri allineamento foto Metashape

La voce *accuracy* descrive il livello richiesto di precisione nella determinazione dei centri di presa delle camere. La spunta su *"Generic Preselection"* velocizza la prima fase di allineamento dei fotogrammi, elaborando le immagini a gruppi a non singolarmente. Nel campo *"Reference preselection"* occorre selezionare la strategia di elaborazione delle immagini. Selezionando *"Source"* l'allineamento avviene sfruttando le posizioni delle

camere. Tale metodo è utilizzabile solamente quando i dati di posizione delle camere sono note. Selezionando “*Estimated*” il software utilizza le coordinate dei centri di presa precedentemente calcolate in una elaborazione già effettuata. Questo metodo è utilizzabile solamente quando si esegue un ri-allineamento dei fotogrammi. Nel caso in cui nessuna delle precedenti opzioni è utilizzabile è possibile scegliere “*Sequential*”, in cui il software analizza le immagini seguendo la cronologia di scatto. Infine, nel campo “*Tie point limit*” occorre inserire il limite massimo di punto omologhi da individuare tra i fotogrammi.

Indispensabili nella fase di allineamento, sono i parametri di calibrazione della camera al fine di definire l'orientamento interno dei fotogrammi. Tali dati possono essere caricati all'interno del software se sono noti attraverso un certificato di calibrazione oppure determinati in modo automatico attraverso un processo di calibrazione implementato nel software. In questo secondo caso, a seconda della tipologia di camera utilizzata per realizzare le fotografie (Fisheye, Spherical o Cylindrical), il software adotta il modello di calcolo adatto al fine di determinare i parametri necessari:

- f : lunghezza focale
- c_x, c_y : coordinate del punto principale
- b_1, b_2 : coefficienti di distorsione affine e di taglio
- k_1, k_2, k_3, k_4 : coefficienti di distorsione radiale
- p_1, p_2 : coefficienti di distorsione tangenziale

Terminata la fase di allineamento dei fotogrammi, che a seconda delle dimensioni del dataset può impiegare fino a qualche ora, è necessario procedere con l'orientamento esterno del modello. A tal fine è possibile procedere in due modi (vedi capitolo 2.1). Se sono note le coordinate dei centri di presa, queste possono essere caricate all'interno del software prima di eseguire l'allineamento, così che il modello sia già generato georeferenziato. Nel caso di questa tesi, è stata utilizzata la tecnica della triangolazione aerea e quindi, selezionando il tasto “Import Reference” è possibile caricare le coordinate dei GCP e le relative accuracy nel software

utilizzando un file nel formato .csv o .txt contenente tali informazioni. Prima di procedere al caricamento deve essere selezionato il corretto sistema di riferimento (Figura 21), che nel caso di questa tesi è l'ETRF2000 alla data 2008.0, codificato nell'EPSG 6707.

Label	Accuracy	Rotation	Accuracy
Easting: 2	8	Yaw: 5	11
Northing: 3	9	Pitch: 6	12
Altitude: 4	10	Roll: 7	13
Enabled flag: 10			

Figura 21: Importazione reference

Terminato il caricamento dei marker occorre collimarli all'interno delle immagini. La procedura può essere fatta in due modi: manualmente, collimando per ogni marker il punto corrispondente su almeno due fotogrammi, oppure in alternativa può essere utilizzato l'approccio guidato: dopo aver collimato il punto su almeno un fotogramma, il software riproietta la sua posizione negli altri fotogrammi identificandoli con una bandierina blu. Spetta all'operatore la correzione manuale della posizione effettuata dal software trasformando la bandierina da blu a verde.

Terminata la fase di allineamento è possibile eseguire l'ottimizzazione delle camere, con cui vengono affinati i parametri di orientamento interno ed esterno precedentemente calcolati, utilizzando tutti i dati a disposizione (posizioni dei centri di presa, dei GCP...). Terminata quest'ultima procedura è possibile computare il modello tridimensionale definitivo selezionando *"Build Model"*.

Realizzazione della nuvola densa:

Ottenuto il modello tridimensionale georeferenziato è possibile calcolare la nuvola densa selezionando la voce “*Build point cloud*”

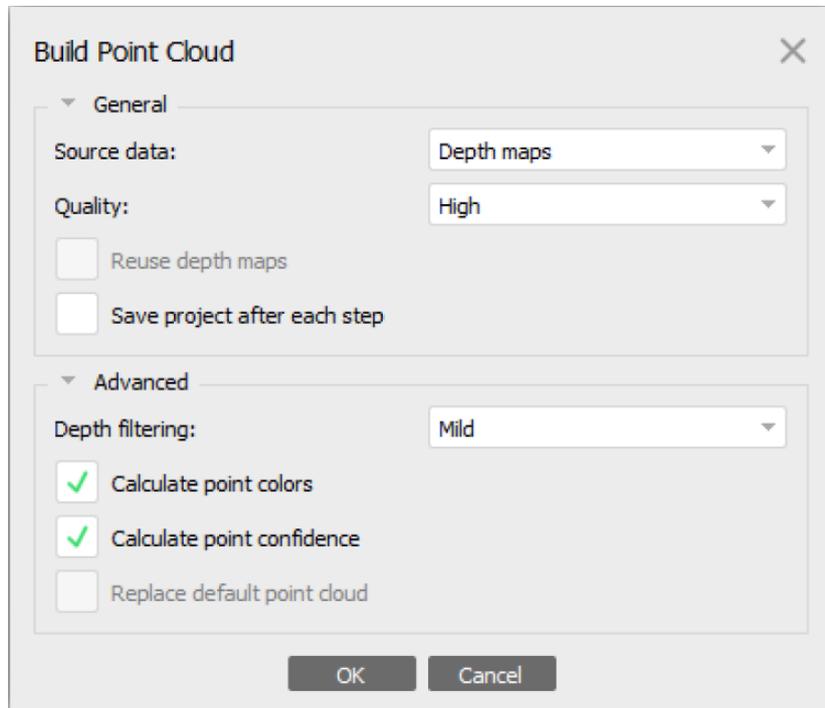


Figura 22: Impostazioni nuvola densa

Per primo occorre selezionare il modello di partenza per la costruzione della nuvola nella voce “Source data”. Depth maps è la sorgente consigliata, in quanto è quella che contiene maggiori informazioni. Dalla scelta della qualità di elaborazione dipende il grado di dettaglio dell’elaborato finale, in particolare il numero medio di punti della nuvola al metro quadro. Nella scelta occorre considerare sia il grado di dettaglio che si vuole ottenere, sia le dimensioni del dataset; infatti, maggiore sarà la qualità scelta e maggiori saranno i tempi di elaborazione. Infine, nel menù “Depth filtering” occorre selezionare il tipo di filtraggio degli outliers che si possono presentare durante l’elaborazione della nuvola. Selezionando “Mild” vengono rimossi in modo “lieve” gli outliers all’interno del modello, preservando possibili elementi di dettaglio presenti (modalità consigliata in caso di fotogrammetria aerea). Al contrario, la modalità “Aggressive” rimuove la maggior parte dei

valori anomali. Con la modalità “*Moderate*” si ottiene un risultato a metà tra i precedenti.

Realizzazione del DSM:

Ottenuta la nuvola densa di punti è possibile procedere alla realizzazione del DSM “*Digital Surface Model*”, anche nominato in Metashape DEM “*Digital Elevation Model*”. Esso è la rappresentazione della superficie sottoforma di matrice regolare contenente all’interno di ogni cella i valori di elevazione (quota) del terreno a cui corrispondono.

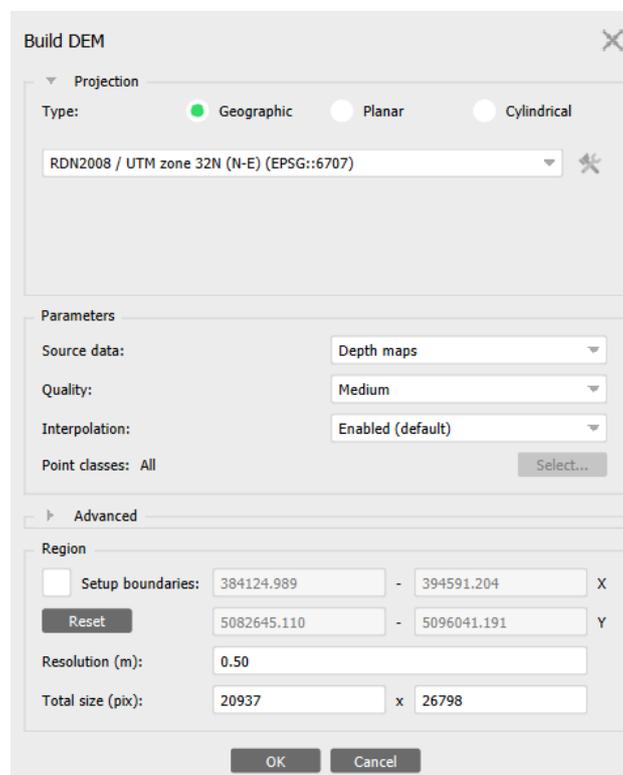


Figura 23: Impostazione DEM

Le principali impostazioni da inserire, prima dell’elaborazione del DEM sono:

- Sistema di riferimento, selezionando “*Geographic*” è possibile selezionare il sistema di riferimento utilizzato per il progetto, mentre se si seleziona “*Planar*” è possibile definire un piano di riferimento passante per tre marker selezionati all’interno del modello. La modalità “*Cylindrical*” prende come superficie di riferimento un cilindro.

- Source data: occorre selezionare la sorgente da cui elaborare il DSM. È consigliato selezionare “*Depth maps*” o “*Dense cloud*”.
- Resolution: occorre selezionare la dimensione di campionamento desiderata, definendo quindi la risoluzione al suolo effettiva del DSM.

Realizzazione dell'ortofoto:

Terminata l'elaborazione del DSM è possibile ottenere l'ultimo prodotto di interesse, l'ortofoto.

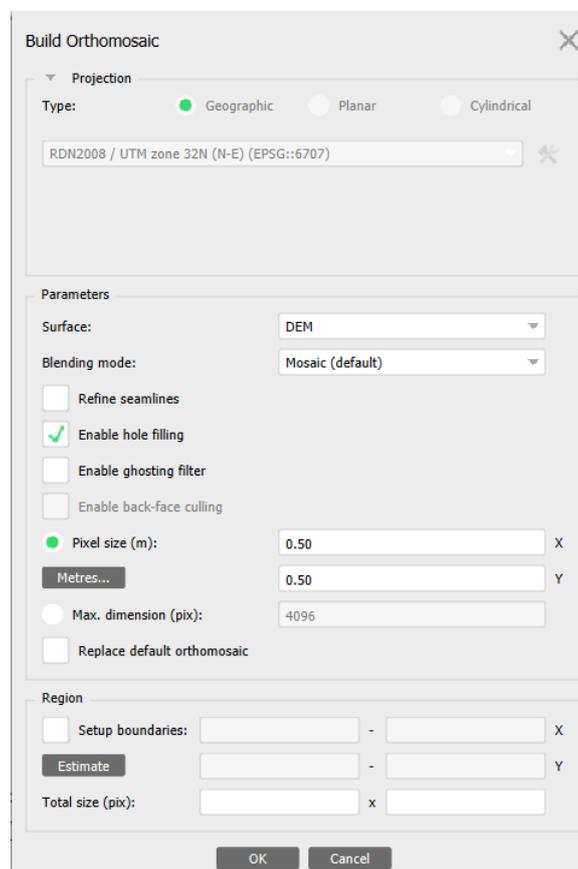


Figura 24: Impostazioni ortofoto

In questo caso occorre definire solamente pochi parametri: la superficie di riferimento al di sopra della quale calcolare l'ortofoto (consigliata DEM o Model) e la dimensione effettiva del pixel, cioè la dimensione di campionamento dell'ortofoto finale. È possibile, inoltre, selezionare il

riempimento automatico dei buchi, nel caso in cui siano presenti delle zone all'interno del modello dove non sono presenti dati.

Esportazione dei dati:

Tutti i prodotti elaborati all'interno di Metashape possono essere esportati e salvati all'esterno del software per poter essere elaborati in un secondo momento con altri programmi. Dal menu "Export..." è possibile selezionare il prodotto di interesse ed esportarlo. In particolare, nel caso di questa tesi, risulta di interesse l'esportazione del DSM e dell'ortofoto, che può essere effettuata nel formato .TIFF. Oltre a tali prodotti è possibile esportare i valori stimati durante l'orientamento del modello delle coordinate dei centri di presa e degli errori calcolati come scarti ai minimi quadrati della posizione dei marker utilizzati come GCP. Tali dati saranno utili nella trattazione di questa tesi per valutare la bontà del risultato ottenuto. Infine, il software è in grado di elaborare un report riepilogativo contenente tutti i dati utilizzati nell'elaborazione fotogrammetrica [22].

4.2. Stonex Cube 3d

L'elaborazione dei blocchi fotogrammetrici all'interno del software Cube 3d viene organizzata in due fasi differenti. La prima consiste nell'elaborazione del blocco fotogrammetrico, fino ad arrivare ad ottenere il modello tridimensionale georeferenziato dell'area rilevata. Successivamente in una seconda fase è possibile utilizzare tale modello per la produzione degli elaborati cartografici e la loro esportazione. I passaggi principali di elaborazione sono:

- Fase 1:
 - Aggiustamento di blocco
 - Orientamento
 - Ricostruzione della nuvola densa

- Fase 2:
 - Generazione DSM
 - Generazione ortofoto
 - Esportazione

Fase 1:

Aggiustamento di blocco

Per procedere all'elaborazione del blocco fotogrammetrico occorre caricare all'interno del software le immagini selezionando il menu "*load images*". Occorre far attenzione che tutte le fotografie di interesse siano contenute all'interno della stessa cartella, altrimenti in fase di elaborazione il software genererà un errore. Nel caso in cui siano noti i parametri di orientamento delle immagini è possibile caricarli sottoforma di file .csv dal menu "*import telemetry*". Allo stesso modo se i parametri di calibrazione della camera sono noti è possibile inserirli all'interno del software, altrimenti il programma è in grado di calcolarli in modo automatico grazie all'algoritmo di calcolo implementato al suo interno. Caricate le immagini e i parametri a disposizione è possibile selezionare "*aggiustamento di blocco*" per procedere con l'allineamento delle immagini e il calcolo dei parametri di orientamento interno (Figura 25).

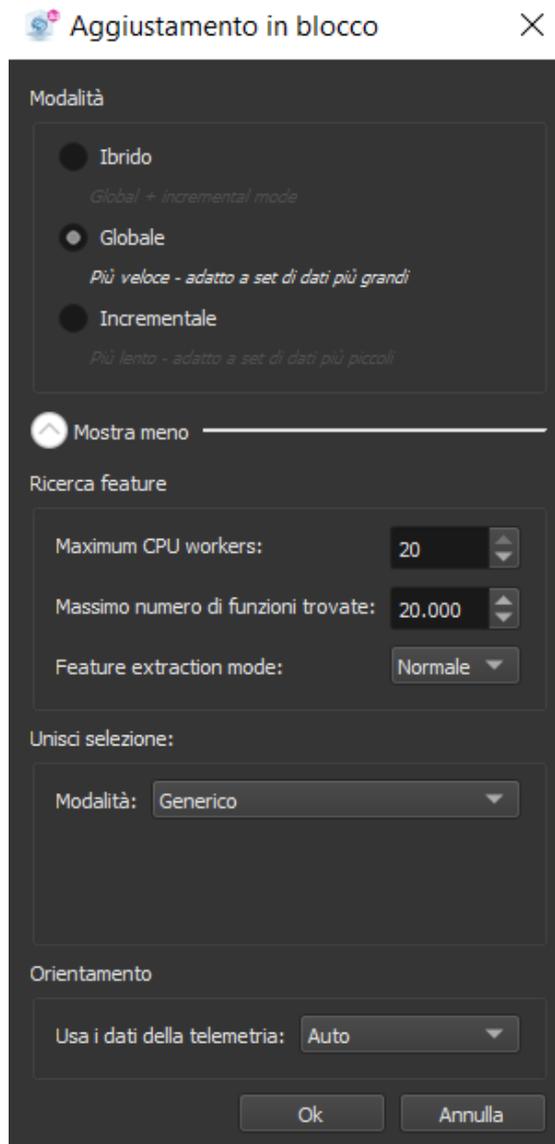


Figura 25: Impostazioni aggiustamento di blocco

Sono disponibili tre diverse modalità di elaborazione:

- Globale: è il metodo più veloce che consente di ottenere un modello con un numero di punti omologhi limitato. È consigliato procedere in prima analisi con questa impostazione, per poi passare ad una di livello superiore.
- Incrementale: è il metodo più preciso, ma anche il più lento. Il suo uso è consigliato qualora il dataset non abbia un ricoprimento elevato.
- Hybrid: è una combinazione dei due precedenti metodi. È il metodo consigliato per l'elaborazione.

Dal menu *“unisci selezione”* è necessario scegliere l'ordine di elaborazione delle immagini:

- Telemetria: elabora i fotogrammi utilizzando i dati di orientamento dei centri di presa, se disponibili.
- Generale: seleziona in modo casuale le immagini e cerca tra di loro punti omologhi.
- Sequenziale: utilizza l'ordine di scatto per ricercare i punti omologhi all'interno delle immagini.
- Tutto: utilizza tutti e tre i precedenti metodi per allineare le foto.

Orientamento:

Eseguito l'allineamento è possibile visualizzare il modello del rilievo, non ancora georeferenziato. Selezionando orienta è possibile caricare all'interno del software i dati relativi ai GCP, selezionando dal menu il corretto sistema di riferimento. L'operazione di orientamento assoluto viene svolta in modo semi-automatico dal software; l'operatore collima manualmente i punti di coordinate note nei diversi fotogrammi e il software orienta il modello. In particolare, collimando almeno tre punti diversi all'interno del modello, il programma è in grado di generare un primo orientamento che consente quindi una più facile individuazione dei punti successivi, poiché la loro posizione viene già ipotizzata dal software stesso e mostrata in una unica schermata, dove con poche semplici mosse è possibile collimare in modo preciso il punto di interesse. Nel caso in cui in un fotogramma non fosse possibile identificare in modo univoco e preciso il punto a terra è possibile disattivarlo con un doppio clic del mouse, facendolo diventare rosso (vedi immagine seguente).

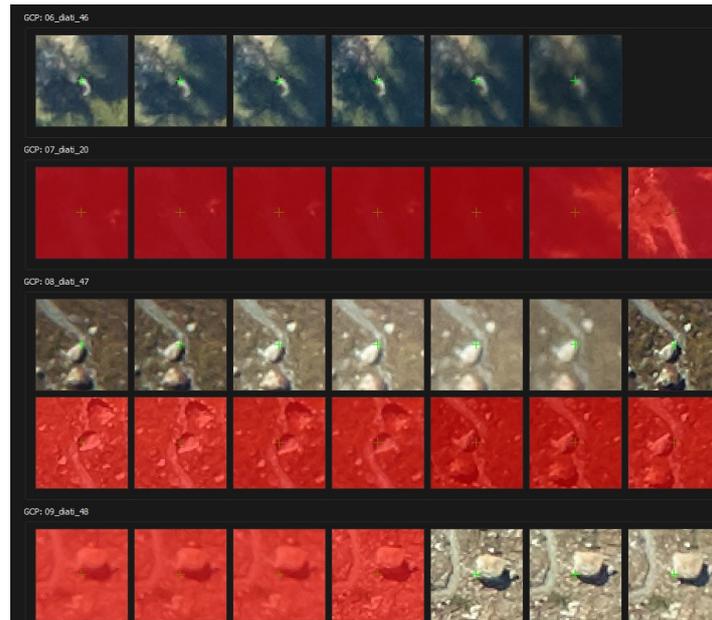


Figura 26: schermata di collimazione dei marker Cube 3d

Terminata la collimazione il software genera il modello orientato e mostra a video gli errori stimati nella collimazione dei marker.

Ricostruzione della nuvola densa:

Selezionando “Ricostruzione” è possibile procedere all’elaborazione della nuvola densa:

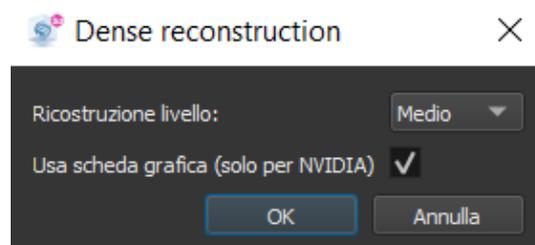


Figura 27: Impostazioni nuvola densa

È possibile scegliere tra quattro diversi livelli di qualità: basso, medio, alto, estremo, che differiscono per la densità di punti ottenibili nella nuvola e dal tempo di elaborazione. Terminata l’elaborazione della nuvola è possibile manipolare direttamente all’interno di Cube 3d la nuvola ottenuta e salvare il risultato ottenuto. Nel dettaglio è possibile ripulire e aggiungere punti, sezionare la nuvola longitudinalmente o trasversalmente per realizzare profili e ricampionare la nuvola.

Fase 2:

Generazione DSM:

Terminata la prima fase di elaborazione del blocco fotogrammetrico ed ottenuto il modello tridimensionale è possibile procedere al calcolo del DSM

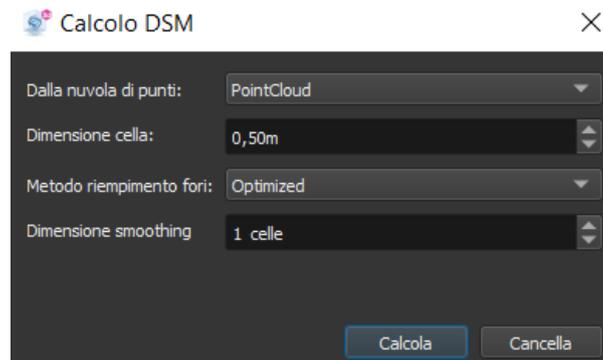


Figura 28: Impostazioni DSM

In questo caso è necessario selezionare la dimensione di campionamento del DSM e scegliere se attivare la modalità di riempimento dei possibili buchi all'interno del modello in cui mancano informazioni per la definizione del DSM.

Generazione ortofoto:

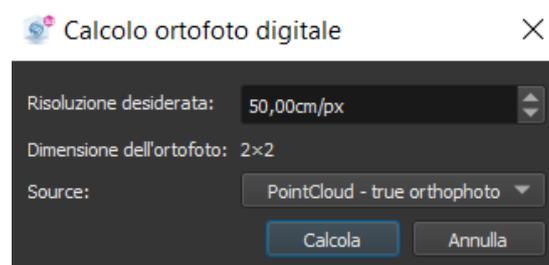


Figura 29: Impostazioni ortofoto

Per la realizzazione dell'ortofoto è sufficiente selezionare la fonte di riferimento che può essere scelta tra il DSM e la nuvola densa. Successivamente è necessario selezionare la dimensione del pixel e quindi di campionamento dell'ortofoto.

Esportazione dei risultati:

Terminata l'elaborazione con Cube 3d è possibile esportare nei diversi formati i file di interesse. Nel caso in esame saranno esportati i dati relativi al DSM e all'ortofoto nel formato .TIFF. In aggiunta è possibile esportare i parametri ottenuti durante la fase di allineamento e orientamento dei fotogrammi relativi ai centri di presa (posizione e assetto) e ai parametri di calibrazione delle camere in formato .txt. Al termine dell'elaborazione è anche possibile generare un report contenete tutte le informazioni inerenti al processamento del blocco fotogrammetrico.

5. *Analisi del volo 2022*

Il questo capitolo, facendo riferimento agli aspetti teorici del capitolo 2 e alle caratteristiche dei software presentati nel capitolo 4 saranno elaborati i dati inerenti ai voli realizzati nell'anno 2022. Nello specifico sarà approfondito l'uso di due software diversi per l'elaborazione e la ricostruzione del blocco fotogrammetrico: Metashape, di comprovato utilizzo e tuttora molto diffuso nell'uso per tali scopi e Cube 3d, un software relativamente nuovo che unisce insieme alle funzioni classiche di elaborazione, anche altre funzioni grafiche per la gestione dei prodotti cartografici. L'obbiettivo è di analizzare, prendendo come riferimento i dati ottenuti da Metashape, considerato un software convalidato in grado di elaborare correttamente i set fotogrammetrici, la capacità e la precisione di calcolo del software Cube 3d in relazione a set fotogrammetrici di grandi dimensioni. A tal fine saranno analizzati e confrontati i parametri di orientamento e i prodotti cartografici ottenuti con i due software dall'elaborazione dello stesso dataset fotogrammetrico del 2022.

5.1. Elaborazione del blocco fotogrammetrico

5.1.1. Elaborazione con il software Cube 3d dei voli 2022

Le fasi di gestione del software seguono la procedura descritta nel capitolo 4.2. Nel seguito sono riportate le caratteristiche inerenti all'elaborazione dei voli 2022 con Cube 3d.

Orientamento relativo ed assoluto

Il primo passo da eseguire è il caricamento delle immagini da elaborare all'interno del programma, che successivamente grazie ad un processo automatizzato di correlazione, permetterà di individuare i punti omologhi nei diversi fotogrammi e risolvere le equazioni di collinearità eseguendo l'operazione di orientamento relativo. In questo modo si ottiene il primo modello tridimensionale che rappresenta l'area di rilievo, senza ancora essere georeferenziato rispetto ad un sistema di coordinate assoluto. Nel caso specifico dell'elaborazione del rilievo in esame, in prima battuta si è provato ad esaminare l'intero rilievo che era stato eseguito con due voli in due date diverse, quello seguito il 18 settembre 2022 e quello realizzato il 3 ottobre 2022. L'orientamento dei fotogrammi dei due voli con il software Cube 3d ha generato dei problemi, che nonostante diversi e ripetuti tentativi non è stato possibile risolvere. Il primo modello ottenuto infatti presenta un evidente problema nella sovrapposizione dei due voli, visibile dallo shift delle due nuvole di punti all'interno del modello. Nell'immagine successiva è possibile visualizzare tale differenza nel punto evidenziato in rosso.

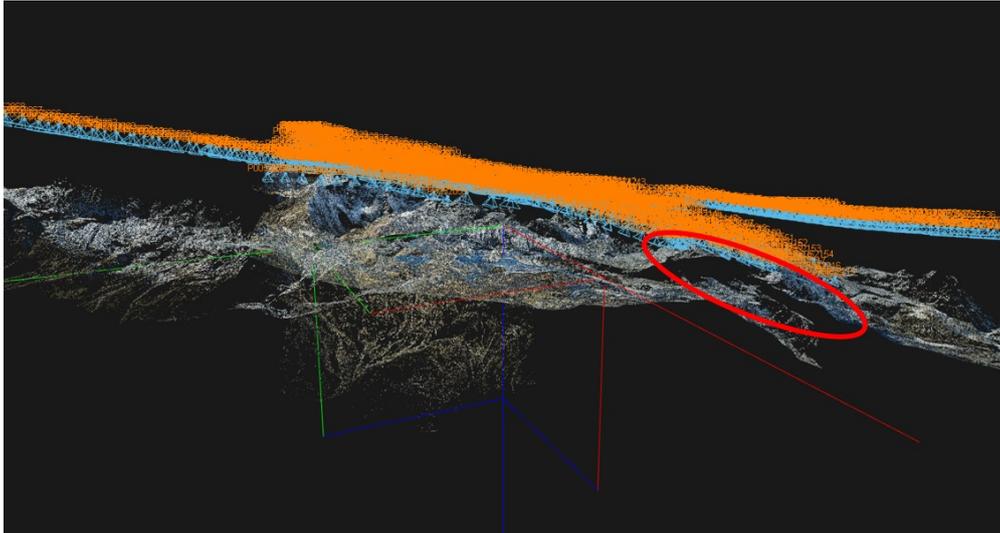


Figura 30: modello Cube 3d voli 18/09 e 03/10

Al fine di ottenere un modello corretto si è provata una diversa metodologia di analisi, partendo dal processamento del solo volo eseguito in data 18 settembre 2022 per poi aggiungere su questo modello, in una seconda fase, i dati provenienti dall'altro volo.

È stato quindi eseguito l'orientamento relativo dei fotogrammi del solo volo del 18 settembre e successivamente l'orientamento assoluto al fine di ottenere un modello georeferenziato. Nel caso in esame sono stati utilizzati i GCP situati su punti stabili e ben individuabili (vedi paragrafo 3.1) già determinati in precedenti rilievi in Valpelline. Per l'operazione di orientamento del modello in esame sono stati usati 18 marker ottenendo uno scarto ai minimi quadrati massimo pari a 25 cm. In particolare, i marker denominati Diati_20 e Bobba_bagno, seppur collimati in fase iniziale, sono poi stati disabilitati poiché generavano un valore maggiore di 30 cm. Nella tabella sottostante, sono riportati i marker e i relativi errori ottenuti come scarti ai minimi quadrati in Nord, Est e quota, nonché l'errore tridimensionale ottenuto come:

$$\Delta 3D = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta H^2}$$

Nel grafico che segue è possibile analizzare l'andamento dell'errore tridimensionale per i diversi marker.

ID Punto	Scarti ai minimi quadrati			
	ΔN [m]	ΔE [m]	ΔH [m]	$\Delta 3D$ [m]
Diati_46	0,003	0,037	0,024	0,044
Diati_47	-0,008	-0,008	0,007	0,014
Diati_48	-0,016	-0,006	0,006	0,018
Diati_8	0,006	-0,072	-0,056	0,092
Parcheggio	-0,086	0,051	-0,139	0,171
Bivacco Tete de Roeses	-0,007	0,009	-0,013	0,017
Rifugio Aosta	-0,000	0,002	0,001	0,003
Col de la Division	-0,001	0,000	0,003	0,003
Florio1	-0,001	0,021	-0,019	0,028
Florio2	0,020	0,013	0,090	0,093
Florio4	-0,140	0,015	-0,158	0,212
Ponticello	-0,051	-0,055	0,053	0,092
Morces	0,029	-0,131	0,054	0,145
Golf	-0,003	0,040	0,054	0,067
Bobba_spigolo_piattaforma_dx	-0,010	0,009	-0,027	0,030
Museo_bayettes	0,012	0,144	-0,153	0,210
Museo_bayettes_2	0,001	-0,146	0,081	0,167
Museo_bayettes_3	-0,025	0,130	0,105	0,169
Media	-0,015	0,003	-0,005	0,088
Sqm	0,039	0,071	0,077	0,072

Tabella 6: Scarti ai minimi quadrati marker orientamento assoluto CUBE 3D

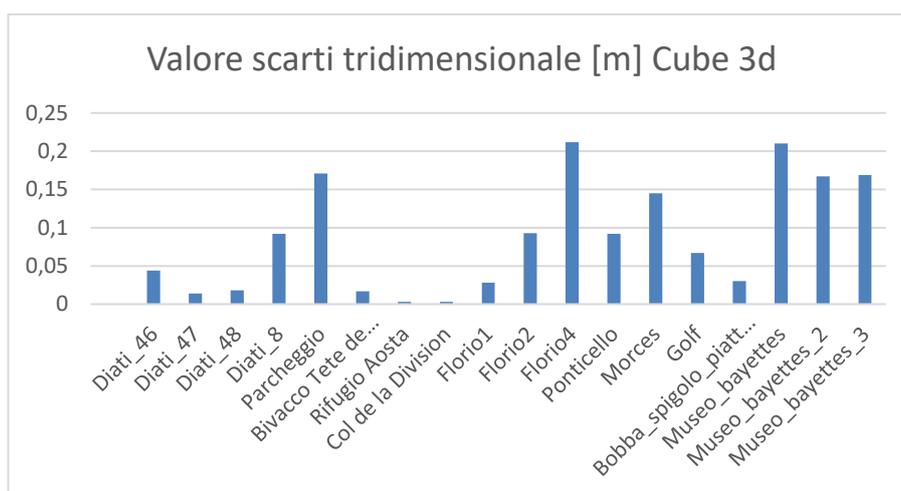


Figura 31: Grafico scarti minimi quadrati Cube 3d

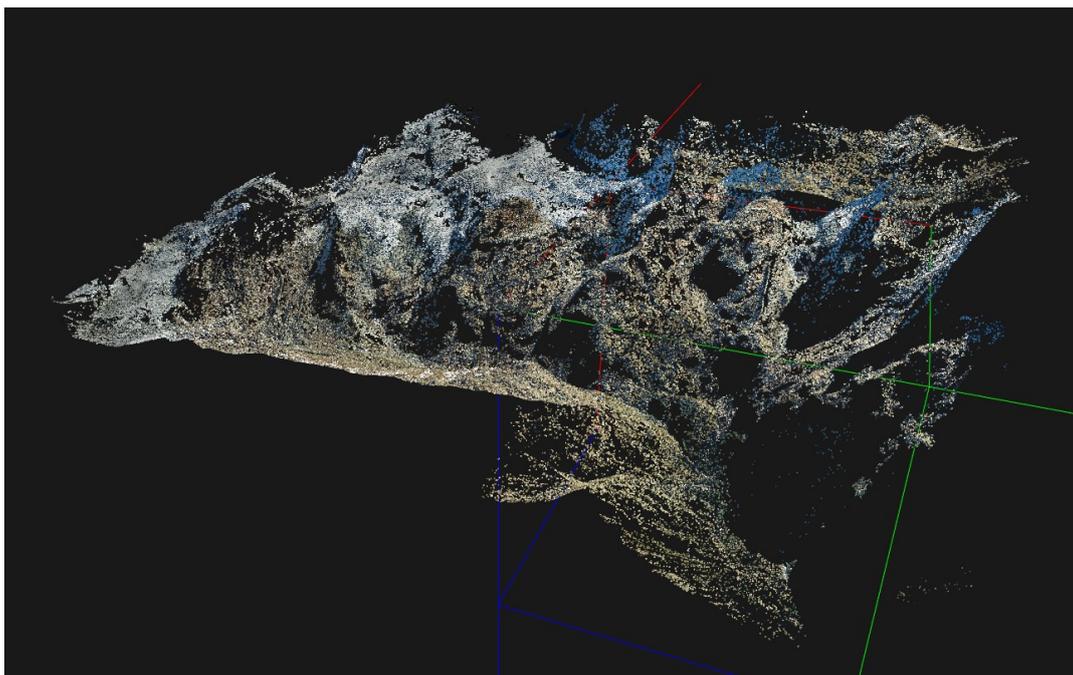


Figura 32: modello tridimensionale volo 18/09/2022 CUBE 3D

Terminata questa fase il software è in grado di restituirci la stima delle coordinate e dei parametri di assetto dei centri di presa dei singoli fotogrammi di cui è possibile vederne un estratto in tabella 7.

#Label	X_est	Y_nord	Z_quota	Yaw	Pitch	Roll
P0052048	387174,548	5085470,345	3736,863	-35,417	-80,496	31,279
P0052049	387185,677	5085738,143	3766,202	-28,740	-82,257	30,734
P0052050	387200,254	5086000,904	3783,844	-42,539	-83,190	36,454
P0052051	387168,094	5086291,423	3794,103	-39,664	-81,162	24,279
P0052052	387134,457	5086546,254	3815,417	-20,217	-81,653	16,701
P0052053	387181,114	5086819,088	3857,261	-24,399	-79,187	17,239
P0052054	387188,987	5087098,716	3862,281	-21,505	-79,973	10,848
P0052055	387193,473	5087371,933	3855,090	-19,162	-81,486	11,151
P0052056	387202,087	5087627,710	3841,955	-27,890	-83,552	17,359
P0052057	387183,014	5087903,342	3832,643	-27,272	-81,451	15,002
...

Tabella 7: Estratto coordinate e parametri di assetto Cube 3d

Con tali valori è stato possibile eseguire una seconda prova di allineamento dell'intero rilievo fissando, utilizzando la tecnica della fotogrammetria diretta (paragrafo 2.1), i parametri di orientamento del primo volo, precedentemente calcolati, e forzando su di questi l'allineamento del secondo volo. Per far ciò è stato aperto un nuovo file, dove, dopo aver caricato entrambi i set

fotografici, sono stati caricati i dati di orientamento e assetto del volo 1. Tale operazione non è stata immediata poiché non si è riusciti a caricare all'interno del software i dati; per risolvere il problema è stato necessario contattare telefonicamente due tecnici della società Stonex, che dopo aver analizzato il problema sono riusciti a risolverlo. Per caricare i dati relativi all'orientamento è necessario settare in fase di caricamento il sistema di riferimento locale e non quello georeferenziato utilizzato nel progetto. Successivamente, dopo aver caricato i dati di orientamento dei fotogrammi, è necessario modificare il sistema di riferimento del file, cambiandolo da locale a georeferenziato selezionando il corretto sistema di riferimento utilizzato nel progetto (RDN2008 / UTM zone 32N (N-E) — EPSG:6707).

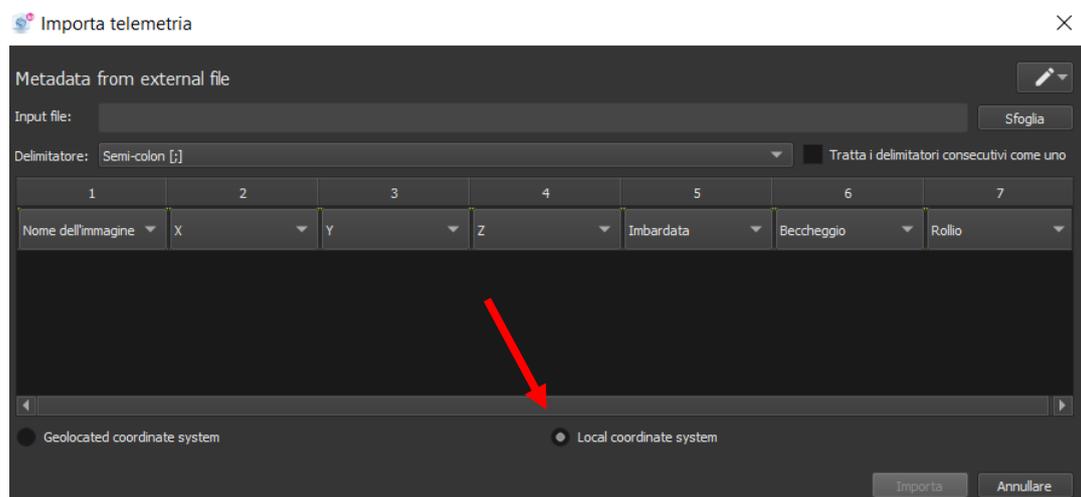


Figura 33: Impostazione importazioni dati di telemetria

Nonostante questa seconda prova, il risultato ottenuto è del tutto simile a quello visibile in Figura 30, con ancora un errore nella sovrapposizione delle due nuvole.

Infine, è stata eseguita una terza prova di processamento del solo volo realizzato in data 3 ottobre 2022, che però non è riuscito poiché il software non è stato in grado di allineare nessun fotogramma. Appurato quindi che il problema nella gestione dei dati da parte di Cube 3d fosse nel secondo volo, si è deciso di continuare utilizzando solamente i dati e quindi il modello ottenuto con il primo volo.

Elaborazione del modello

È stata quindi avviata l'elaborazione della nuvola densa con risoluzione impostata su bassa, che ha generato una point cloud con circa 1 pt ogni 2m² con un tempo di elaborazione di 4 ore. Per aumentare la densità dei punti si è provato ad elaborare la nuvola in alta risoluzione, il cui risultato ha una densità di circa 32 pt. al m², ma il file al termine dell'elaborazione si presenta inutilizzabile poiché non si riesce a gestire con il computer in ambiente Cube 3d. Allo stesso modo l'elaborazione in media qualità ha portato ad una nuvola con circa 15 punti a m².

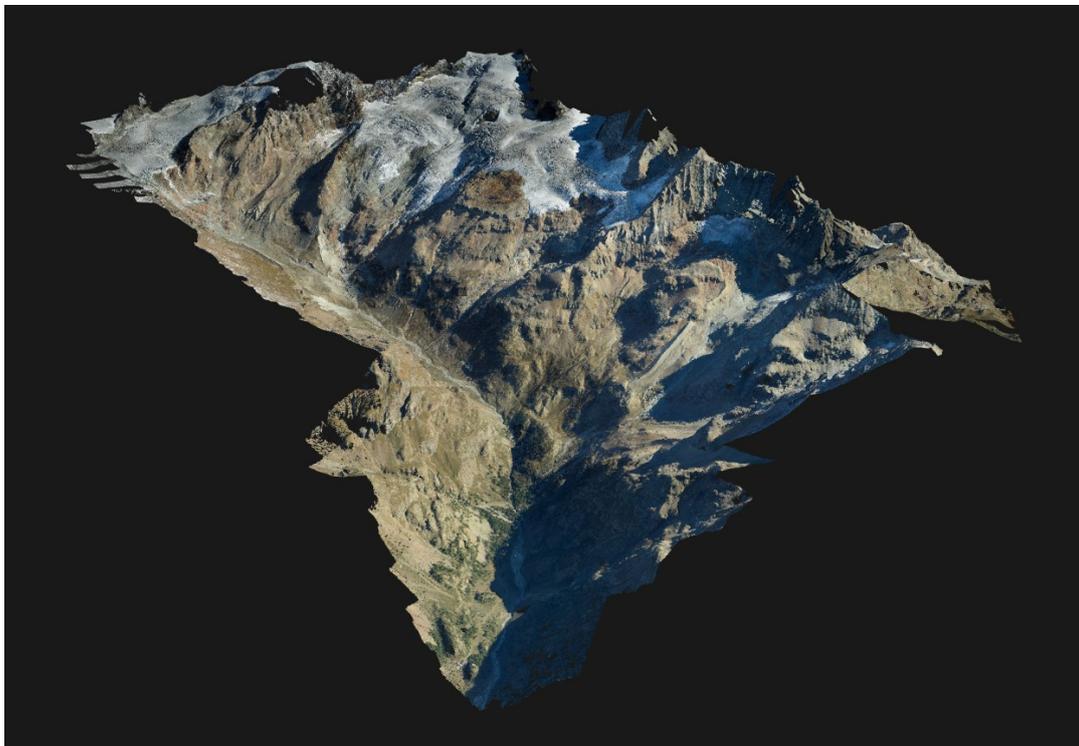


Figura 34: nuvola densa CUBE 3D

In questo caso seppur il file sia molto pesante e per svolgere una semplice operazione ci vogliono diversi minuti si è riusciti a calcolare il DSM a 50 cm in media qualità. Dopodiché è stato esportato nel formato .TIFF, ma non è stato possibile generare l'ortofoto perché il file di Cube 3d non consentiva di eseguire nessun'altra operazione poiché bloccato. L'elaborazione dell'ortofoto è stata possibile solo in bassa qualità. Vista l'impossibilità di proseguire con l'analisi dei prodotti cartografici ottenuti direttamente

all'interno del software Cube 3d, le successive analisi sono state effettuate esportando il DSM e l'ortofoto e utilizzando software diversi per eseguire le analisi.

5.1.2. Elaborazione con il software Agisoft Metashape dei voli 2022

In questo sottocapitolo viene descritta l'elaborazione dello stesso volo precedentemente trattato utilizzando Agisoft Metashape. Anche in questo caso verrà trattato solo il volo del 18/09/2022 al fine di ottenere un modello il più possibile uguale a quello ottenuto con Cube 3d. È necessario sottolineare come la stessa elaborazione descritta nei paragrafi che seguono era già stata eseguita anche con entrambi i voli realizzati, sia quello del 18 settembre sia quello del 3 ottobre 2022, riuscendo, a differenza di Cube 3d, a generare un modello completo. In questa trattazione è stato scelto di proseguire con il solo primo volo poiché il modello che sarà realizzato dovrà essere confrontato con quello ottenuto precedentemente. La procedura di elaborazione è spiegata nel capitolo 4.1. Nel seguito sono riportate le caratteristiche inerenti all'elaborazione dei voli 2022 con Metashape.

Orientamento relativo

Caricate le immagini del volo all'interno del programma è stato avviato l'allineamento automatico dei fotogrammi impostando l'accuratezza su medio e la tipologia di selezione dei fotogrammi su sequential. Il programma permette in modo automatico l'individuazione di punti omologhi e quindi la ricostruzione del modello, effettuando l'orientamento relativo dei fotogrammi.

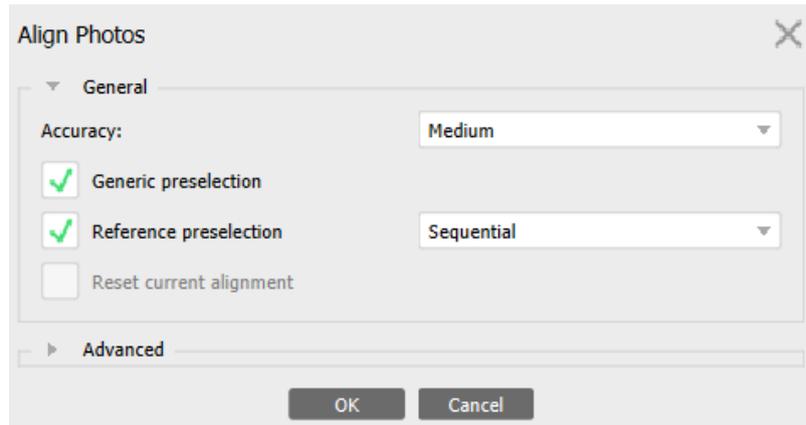


Figura 35: impostazioni di allineamento dei fotogrammi - Metashape

Il modello così ottenuto rappresenta tridimensionalmente l'area oggetto di rilievo, senza ancora essere georeferenziato.

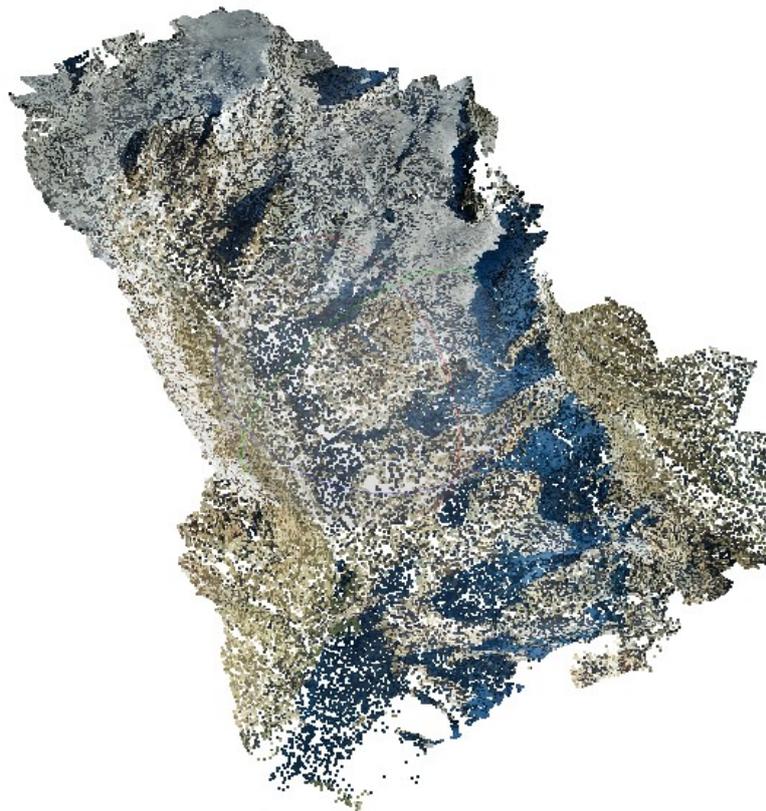


Figura 36: modello ottenuto dall'orientamento relativo dei fotogrammi – Metashape

Orientamento assoluto

Dopo aver ottenuto il modello è necessario effettuare l'orientamento assoluto, in modo da ottenere un modello nel sistema di riferimento scelto. Si è quindi proceduto all'orientamento, tramite triangolazione aerea, avendo l'accortezza di usare gli stessi marker, così da avere un risultato finale che differisse da quello elaborato con Cube 3d solamente per fattori interni al software, limitando al massimo le differenze dovute a parametri esterni. Nella tabella sottostante sono riportati gli scarti ai minimi quadrati ottenuti per le coordinate in Est, Nord e quota, nonché l'errore tridimensionale ottenuto come:

$$\Delta 3D = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta H^2}$$

Nel grafico che segue è possibile analizzare l'andamento dell'errore tridimensionale per i diversi marker.

Nome	$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
Diati_46	0,124	0,033	0,119	-0,009
Diati_47	0,232	0,198	0,103	0,061
Diati_48	0,123	-0,005	-0,107	-0,060
Diati_8	0,166	-0,084	-0,142	-0,012
Parcheggio	0,090	-0,045	0,070	-0,035
Bivacco tete de Roeses	0,101	-0,033	0,095	-0,013
Rifugio Aosta	0,025	0,000	-0,024	-0,005
Col De La Division	0,051	-0,045	0,010	0,020
Florio_1	0,175	-0,077	0,141	-0,068
Florio_2	0,209	0,095	0,007	0,186
Florio_4	0,086	-0,007	-0,058	-0,063
Ponticello	0,092	0,040	0,076	-0,031
Morces	0,110	0,035	0,099	0,031
Golf	0,061	0,036	0,043	0,026
Bobba_spigolo_piattaforma_dx	0,268	0,092	-0,115	-0,224
Museo_bayettes	0,239	-0,123	-0,172	0,111
Museo_bayettes_2	0,065	-0,055	0,036	0,004
Museo_bayettes_3	0,138	-0,131	-0,040	0,013
Media	0,131	-0,004	0,008	-0,004
Sqm	0,068	0,080	0,093	0,081

Tabella 8: Scarti minimi quadrati GCP modello elaborato con Metashape

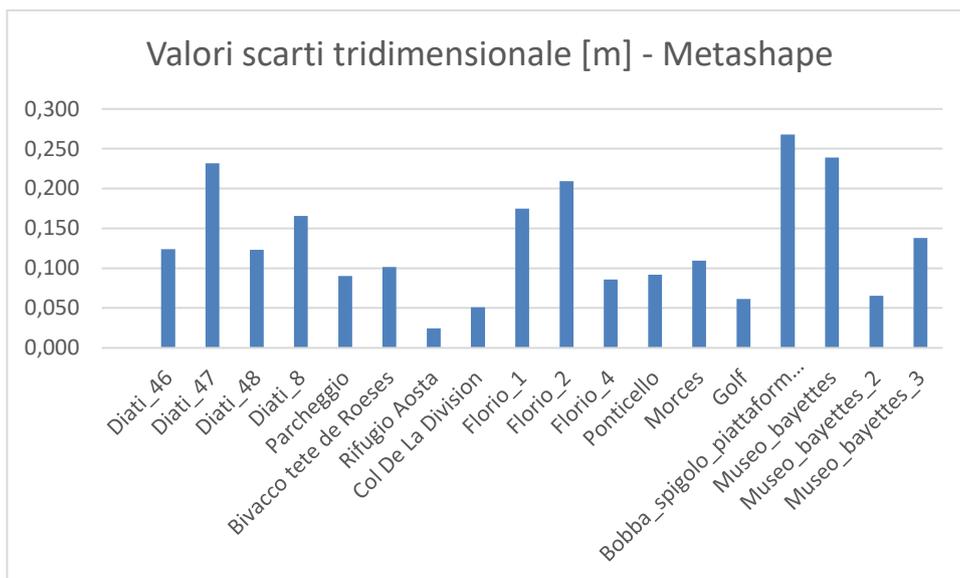


Figura 37: Grafico scarti minimi quadrati Metashape

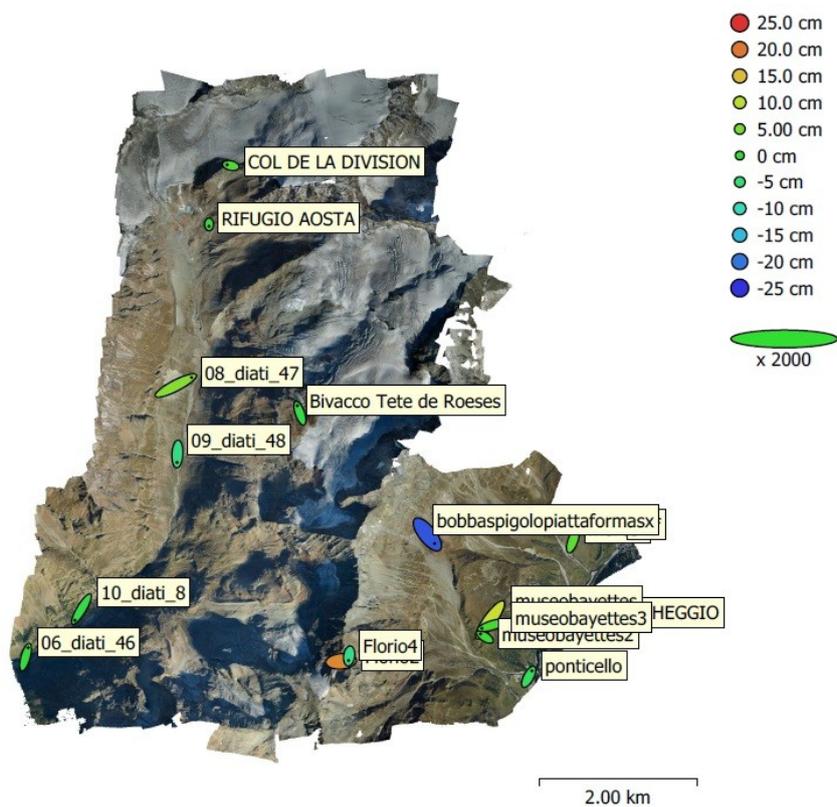


Figura 38: GCP e relative ellissi d'errore stimate

Da un primo confronto con i valori presenti in Figura 31 è possibile osservare un andamento simile con quanto ottenuto con Cube 3d (Tabella 6) nella determinazione degli scarti ai minimi quadrati sulla posizione dei marker, con un valore massimo che non raggiunge in entrambi i casi i 30 centimetri.

Elaborazione del modello

Dopo aver ottenuto il modello orientato è possibile procedere all'elaborazione della nuvola densa in media qualità, la cui elaborazione viene eseguita in automatico dal software, con una durata di circa 12 ore. Il risultato ottenuto è una nuvola con una densità di 13 punti al m².

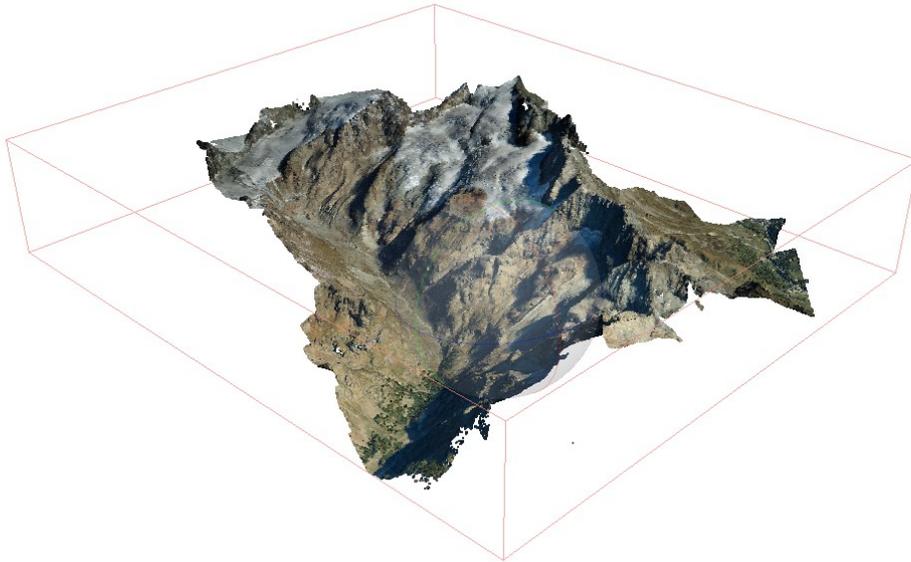


Figura 39: Nuvola densa in media qualità - Metashape

Infine, è possibile calcolare il DSM e l'ortofoto dell'area oggetto di rilievo. Il DSM o DEM è stato generato con un campionamento a 0.50m e una qualità media, così come per l'ortofoto è stata impostata una dimensione del pixel di 0.50 * 0.50 m.

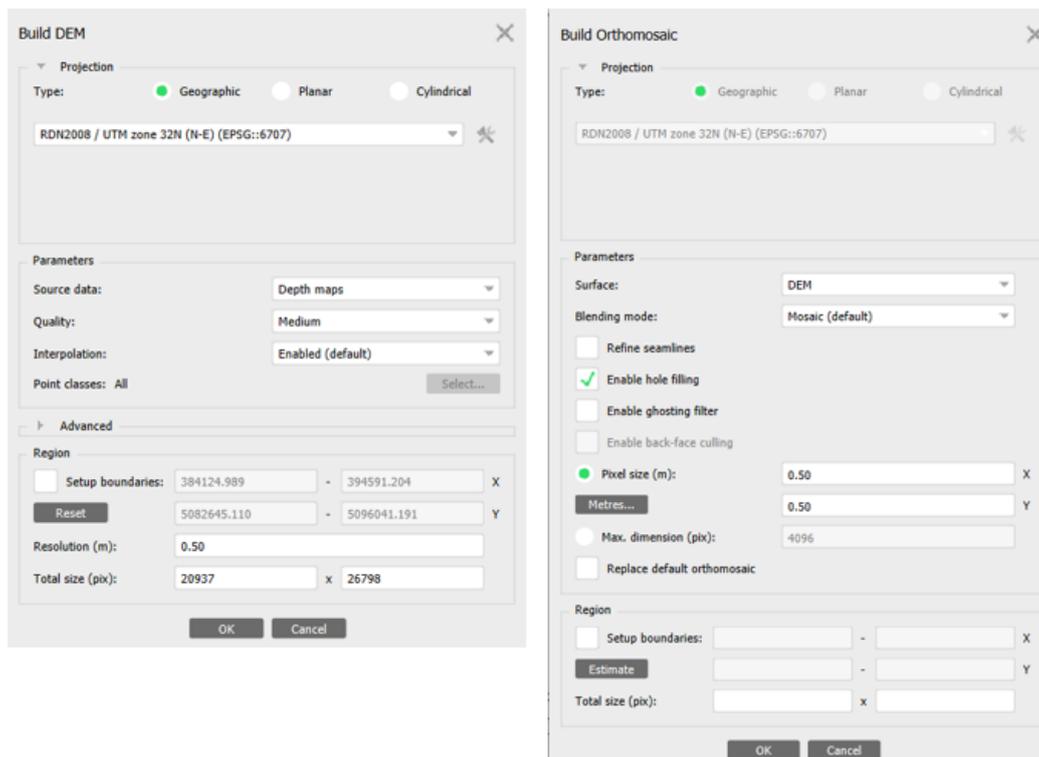


Figura 40: impostazioni DEM e ortofoto Metashape

5.1.3. Prodotti cartografici 2022

Nel seguito di questo paragrafo sono rappresentati i prodotti cartografici definitivi ottenuti al termine dell'esecuzione dei due software, estraendo da entrambi i modelli sia il DSM, che l'ortofoto. Il DSM è composto da una matrice al cui interno è salvato il valore di quota del punto rappresentato da ogni cella e permette di descrivere l'andamento altimetrico del terreno. L'ortofoto è la rappresentazione cartografica sottoforma di immagine digitale georeferenziata. Essa è ottenuta come proiezione dell'area oggetto di rilievo sul piano cartografico di riferimento e viene memorizzata sottoforma di matrice dove ad ogni cella viene associato il valore RGB corrispondente al pixel rappresentato [10].

Seppur l'area analizzata sia la stessa, i prodotti presentano delle differenze visive dovute ad un modo diverso di lavoro dei due programmi, in particolare, il DSM e l'ortofoto prodotti con Cube 3d hanno una rifinitura sul bordo più omogenea e meno frastagliata poiché il software, a differenza di Metashape, ripulisce in modo automatico gli elaborati. I prodotti cartografici sono stati

esportati nel formato .TIFF, un formato di salvataggio raster che permette di memorizzare in forma matriciale i diversi dati di interesse, e visualizzati con il software QGIS. Per la rappresentazione del DSM si è applicata la tecnica del falso colore che permette di visualizzare in una scala cromatica scelta dall'utente la variazione del valore di quota rappresentato. In questo modo è più facile interpretare visivamente i dati rappresentati.

Le caratteristiche dei prodotti estratti sono:

- Campionamento DSM: 0.50m
- Dimensione del pixel dell'ortofoto: 0.50m

Nel paragrafo 5.2 verranno poi utilizzati tali dati cartografici per eseguire delle analisi di validazione dei modelli ottenuti.

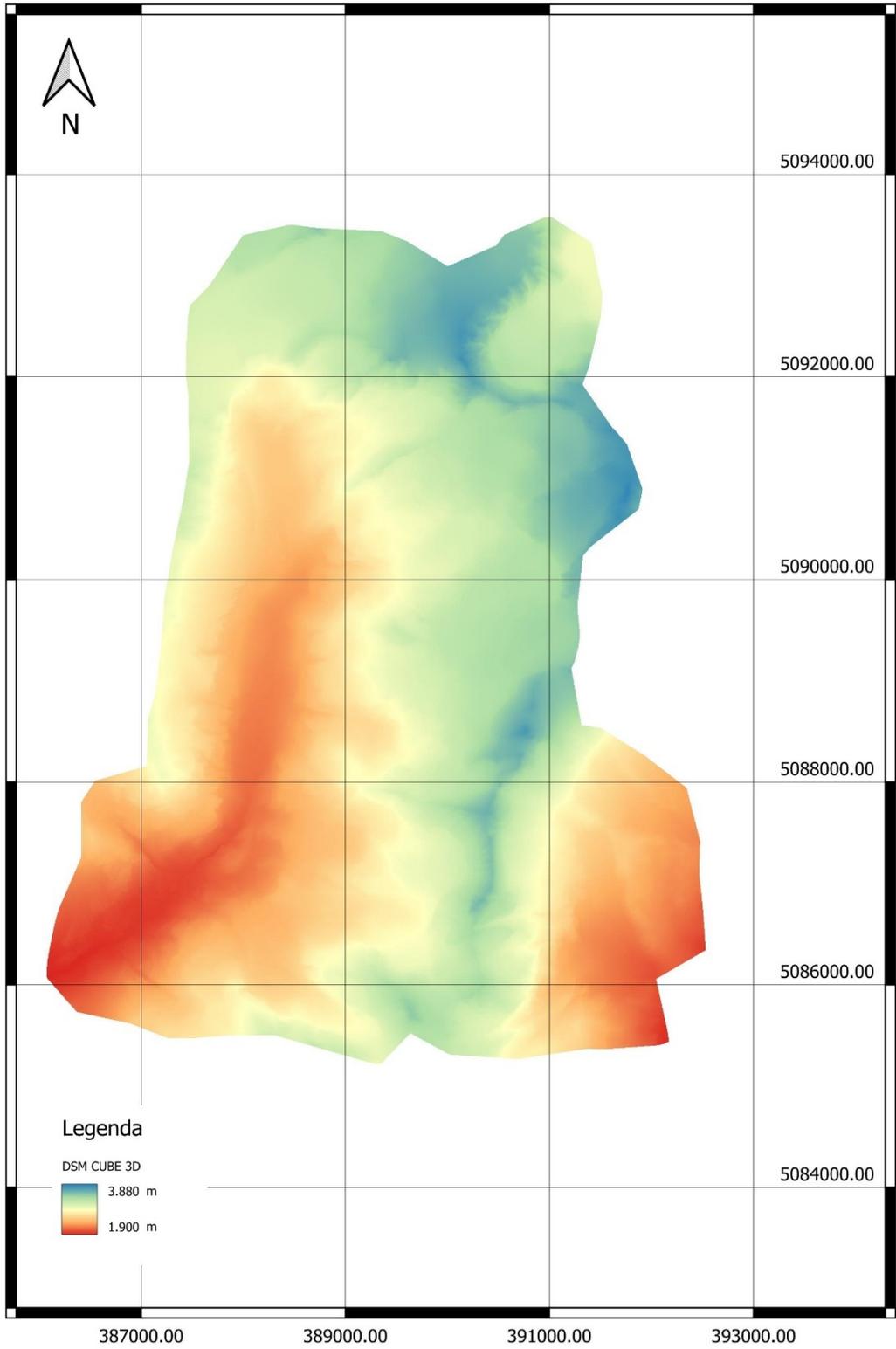


Figura 41: DSM Cube 3d – campionamento 50cm

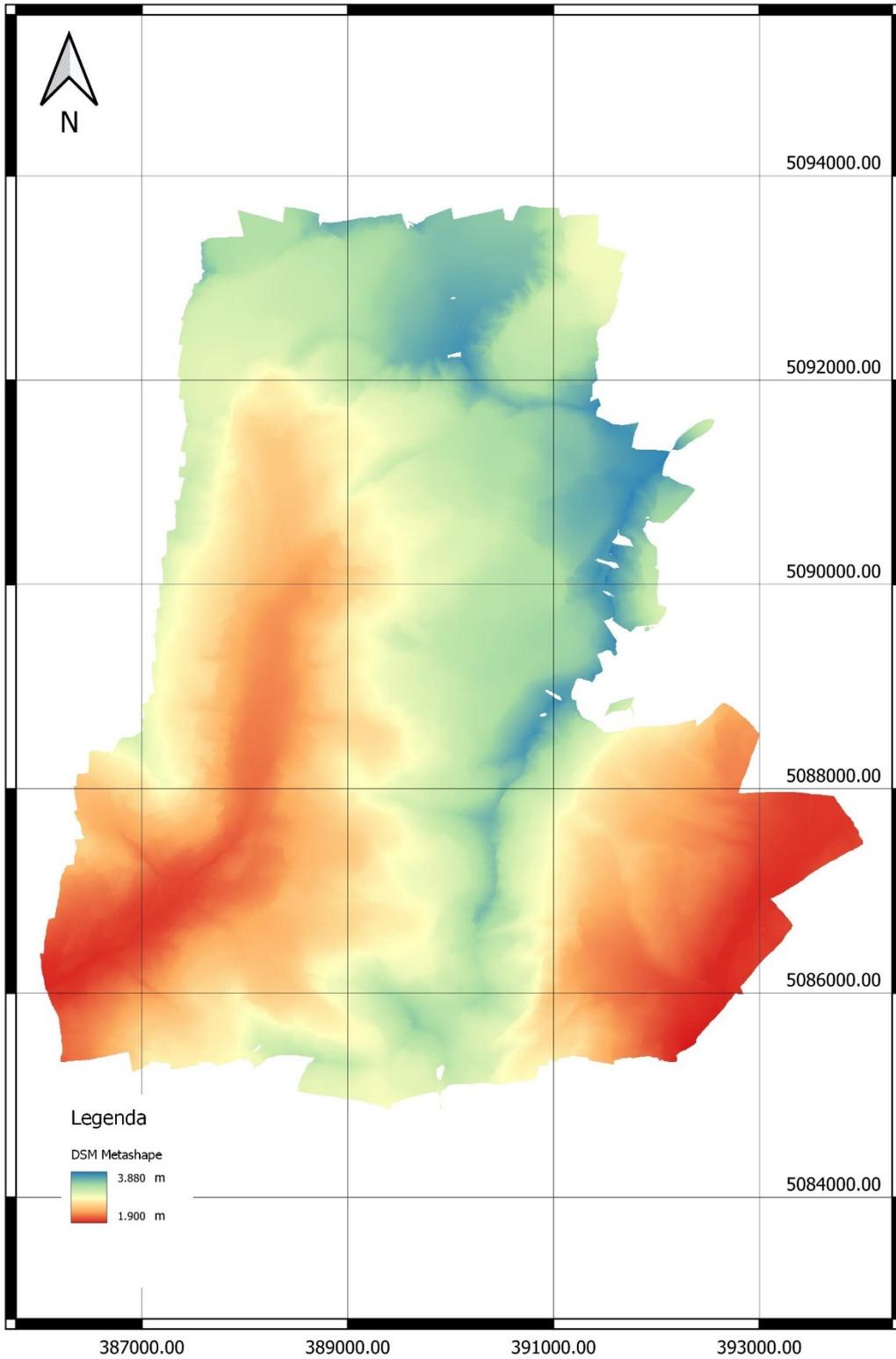


Figura 42: DSM Metashape – campionamento 50cm

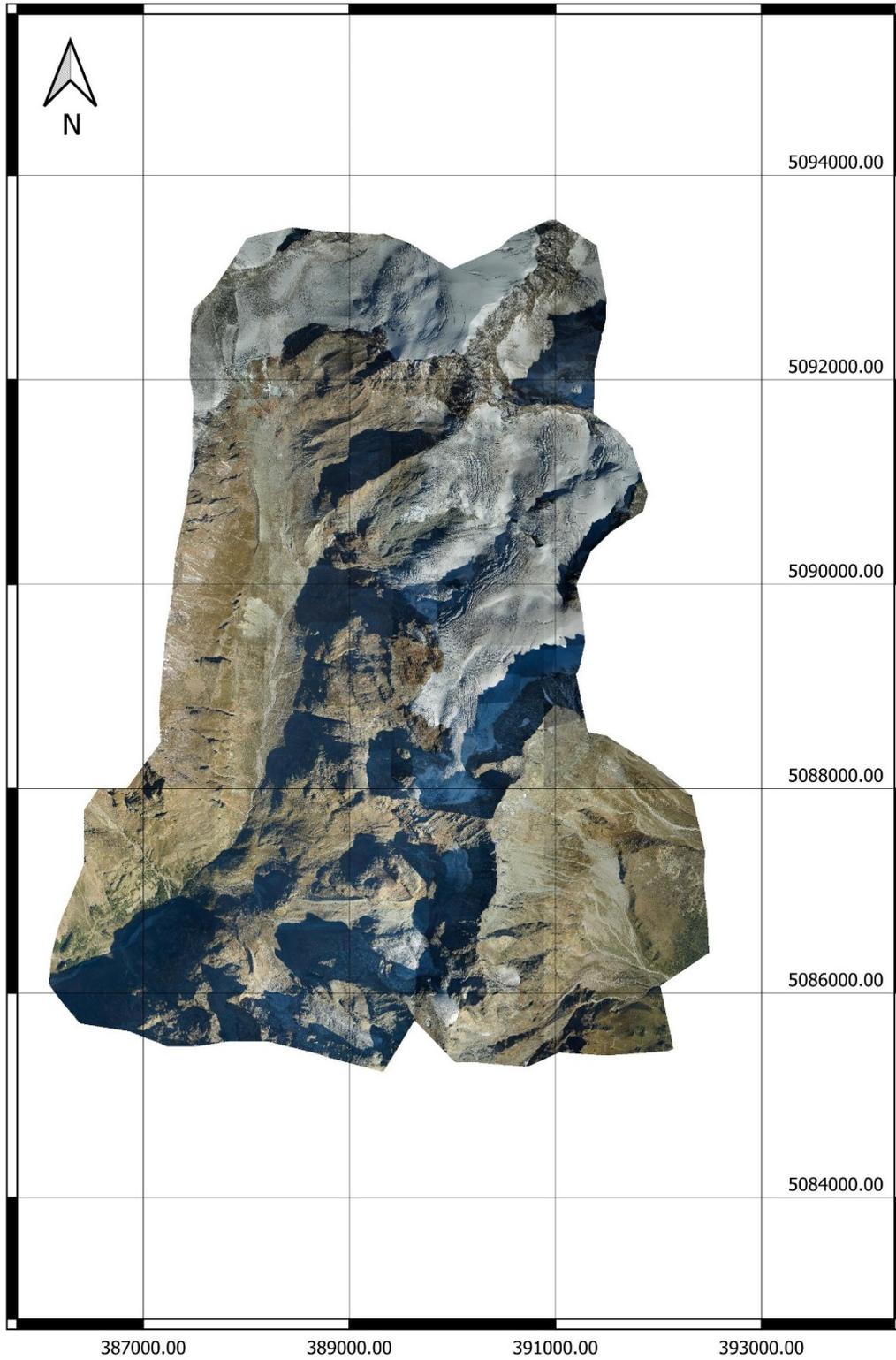


Figura 43: ortofoto Cube 3d -- campionamento 50cm

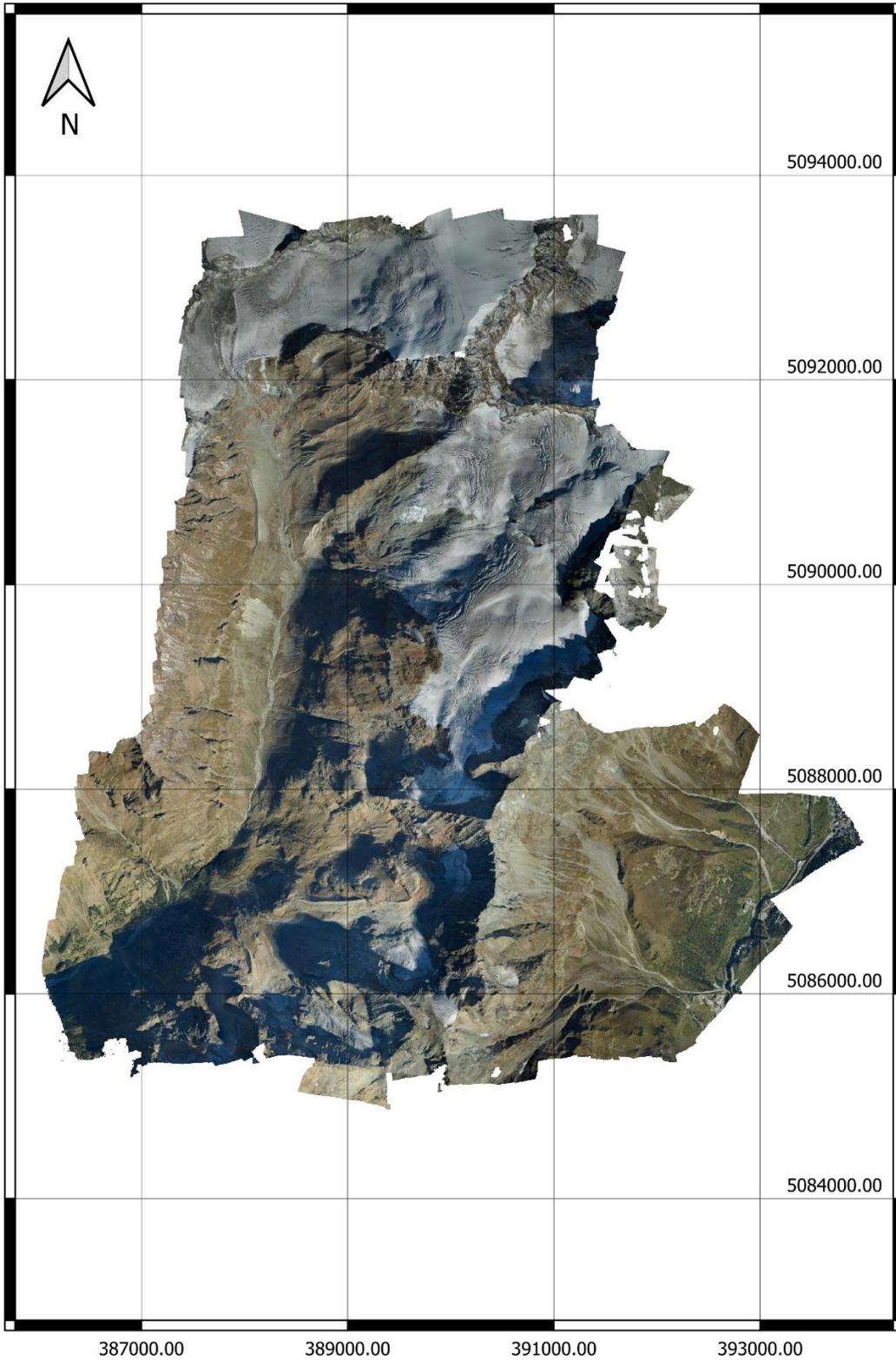


Figura 44: ortofoto Metashape – campionamento 50cm

5.2. Confronto dei risultati

Metodologie e dati analizzati

Scopo di questo sottocapitolo è determinare la capacità e la precisione di elaborazione fotogrammetrica di dati di grandi dimensioni del software Cube 3d confrontandolo con i risultati ottenuti con il software Metashape, assunto come modello di riferimento, dato il grande e comprovato utilizzo. A tal proposito sono stati analizzati e confrontati i risultati ottenuti analizzandone le differenze dei seguenti parametri, ottenuti al termine dell'elaborazione:

- Coordinate centri di presa: terminata la fase di orientamento del modello tramite triangolazione aerea, i due software stimano le coordinate dei centri di presa al momento dello scatto dei fotogrammi. È così possibile effettuare un'analisi sulle differenze ottenute sulle posizioni delle camere al momento dello scatto.
- Parametri di calibrazione della camera: in modo analogo a quanto detto prima, durante il processamento dei fotogrammi sono stimati dai software i parametri di calibrazione della camera. È quindi possibile verificare la corretta calibrazione della camera da parte di Cube 3d.
- DSM: al termine dell'elaborazione sono stati calcolati i DSM dell'area in esame (paragrafo 5.1.3), che rappresentano il modello altimetrico del territorio in esame. Confrontando tali informazioni è possibile analizzare in modo generale il diverso funzionamento dei due software, verificando la presenza o meno di errori sistematici e di outliers all'interno del modello.

In via teorica, avendo analizzato il medesimo volo ed utilizzato gli stessi GCP per l'orientamento del blocco, i risultati ottenuti dai due software per i parametri succitati dovrebbero assumere valore uguale. Analizzandone le differenze sarà possibile stabilire la capacità di elaborazione di Cube 3d.

5.2.1. *Analisi e confronto coordinate centri di presa e parametri della camera*

Analisi coordinate centri di presa

Dopo aver terminato l'elaborazione dei modelli è possibile ottenere i dati relativi alla stima delle coordinate dei centri di presa dei fotogrammi utilizzati nel modello. Tali coordinate sono determinate direttamente dal software durante la procedura di orientamento e permettono quindi, confrontando i valori ottenuti dai due diversi software, di realizzare una prima analisi relativa alla vicinanza dei risultati ottenuti. Sono stati considerati i valori calcolati con Metashape come riferimento e fatta la differenza dei termini delle tre coordinate, Est, Nord e quota, con quelli ottenuti con Cube 3d per verificare la presenza di errori sistematici nella determinazione delle coordinate. I valori completi delle coordinate e delle differenze sono visualizzabili nell'allegato 10.4, qui di seguito vengono riportati i grafici e i valori statistici di rilevanza relativi alle differenze tra le coordinate ottenute con Metashape e Cube 3d.

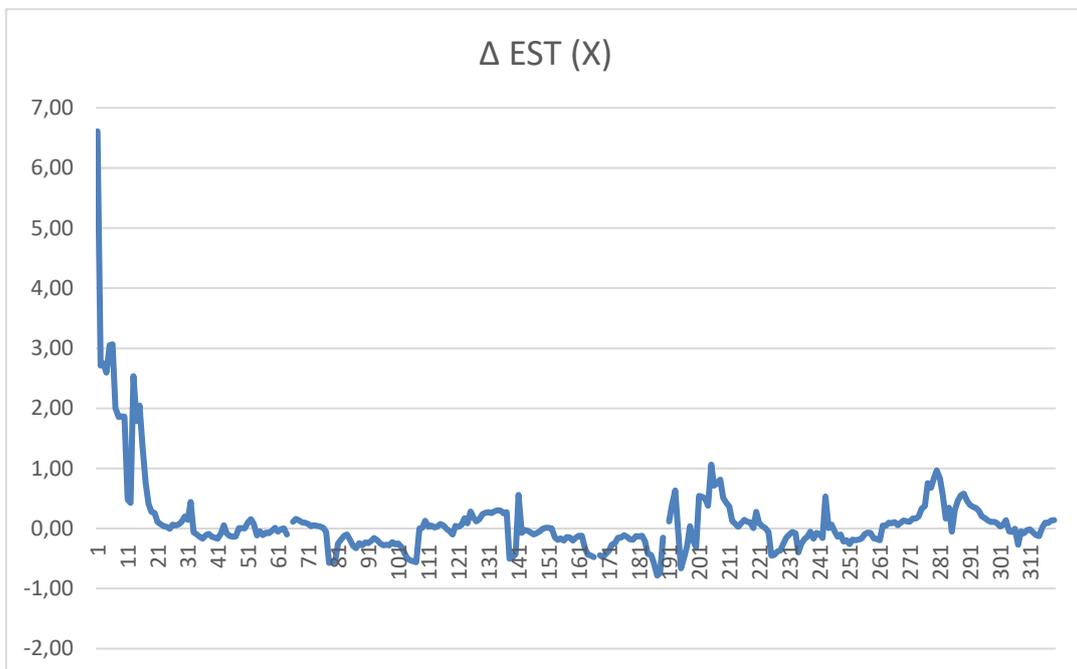


Figura 45: differenze coordinata EST (Metashape - Cube 3d)

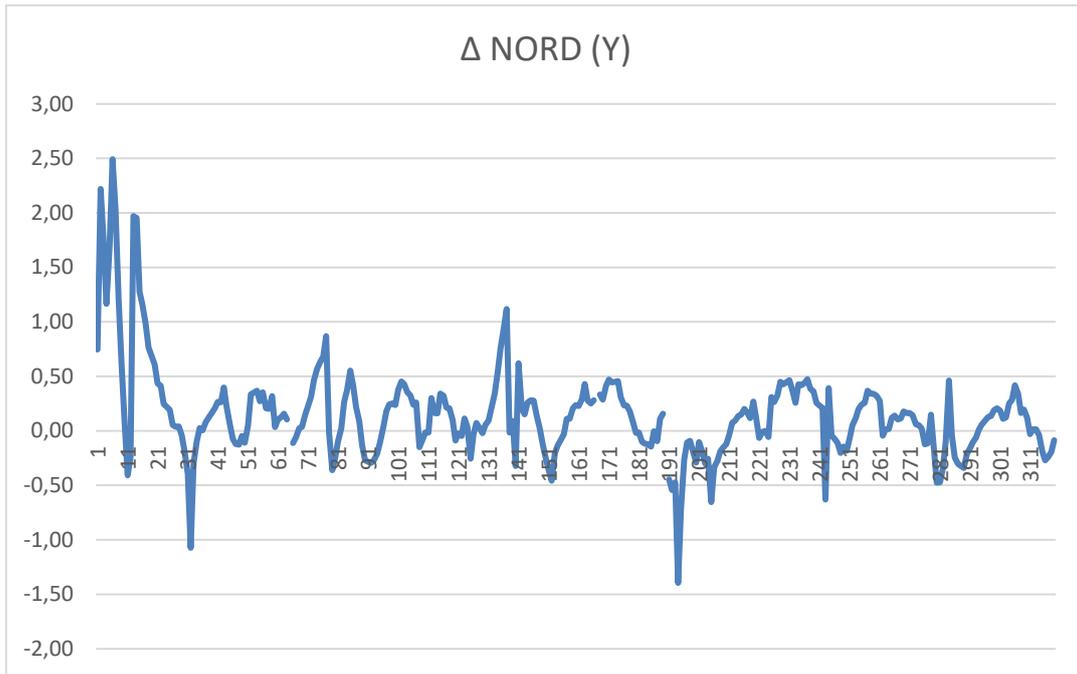


Figura 46: differenze coordinata NORD (Metashape - Cube 3d)

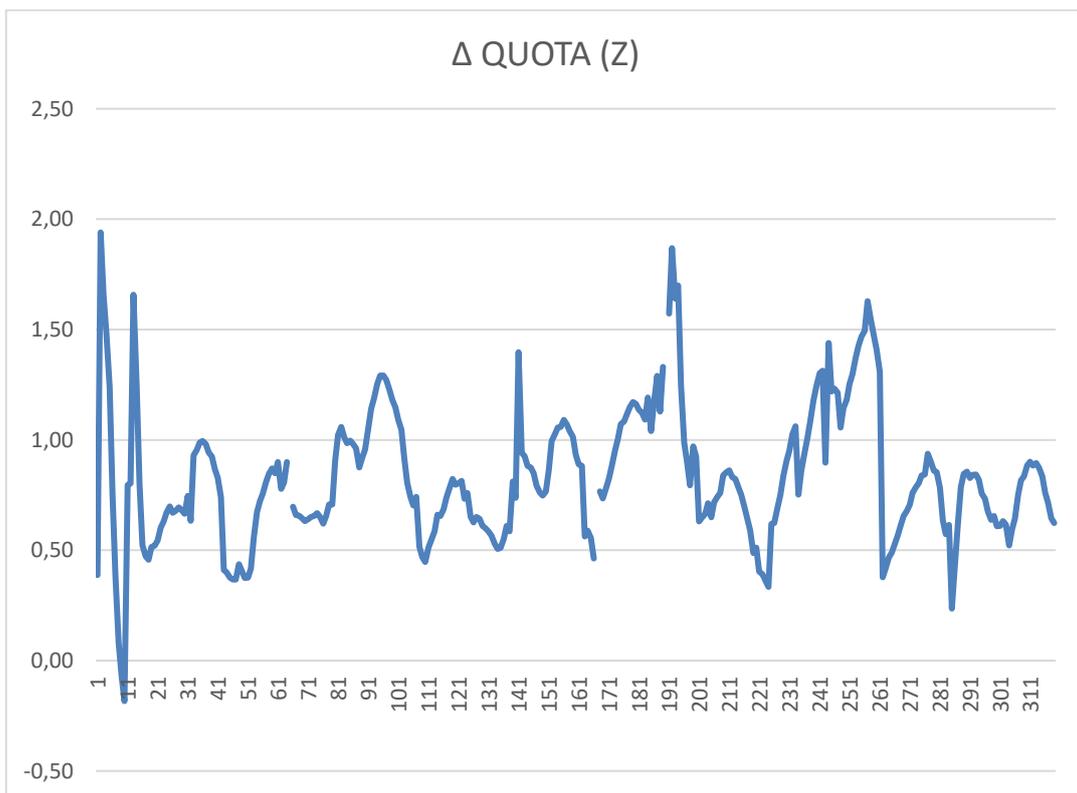


Figura 47: differenze quota ortometrica (Metashape - Cube 3d)

I valori statistici sono stati determinati sia per la serie completa, sia eliminando dieci fotogrammi iniziali, poiché, come visibile dai grafici, generano un errore elevato nella determinazione della posizione dei centri di

presa, dovuto probabilmente alla difficoltà di allineamento dei fotogrammi di bordo, che quindi generano errori nella determinazione dei centri di presa.

	Δ EST (X)	Δ NORD (Y)	Δ QUOTA (Z)
valore max	6,610	2,493	1,940
valore min	-0,784	-1,395	-0,183
valore medio	0,110	0,149	0,831
dev. standard	0,657	0,427	0,303

Tabella 9: parametri statistici serie completa

	Δ EST (X)	Δ NORD (Y)	Δ QUOTA (Z)
valore max	2,534	1,971	1,868
valore min	-0,784	-1,395	-0,183
valore medio	0,033	0,110	0,827
dev. standard	0,367	0,343	0,279

Tabella 10: parametri statistici senza i dieci parametri iniziali

È possibile notare che per le coordinate planimetriche Est e Nord la differenza si mantiene limitata in un intervallo compreso tra +/- 1m ad esclusione dei fotogrammi di testa. Per effetto dell'alternarsi del segno, il valore della media non è utile a definire la precisione delle coordinate, mentre è più rappresentativo il dato dello scarto quadratico medio, che assume un valore compreso tra i 30 e 40 centimetri se si escludono i fotogrammi di testa dove, come è possibile vedere dal grafico, sono presenti notevoli differenze di calcolo.

Se si analizza l'andamento delle differenze dei valori di quota ortometrica si riscontra invece un andamento differente rispetto alle variazioni planimetriche, con dei picchi che si susseguono anche nelle zone centrali. Da un'analisi puntuale è emerso che in corrispondenza di tali picchi i fotogrammi interessati presentano ampie zone di ombra e/o ghiaccio, ad eccezione del punto 192 (vedi Figura 48), così come è possibile notare che il valore della quota ortometrica di Cube 3d presenta quasi sempre un valore minore rispetto a quello di Metashape, data la positività delle differenze. Inoltre, osservando la Figura 47 è possibile ipotizzare un errore sistematico nella determinazione del valore di quota ortometrica di circa 80 centimetri che si mantiene costante in tutti i fotogrammi.

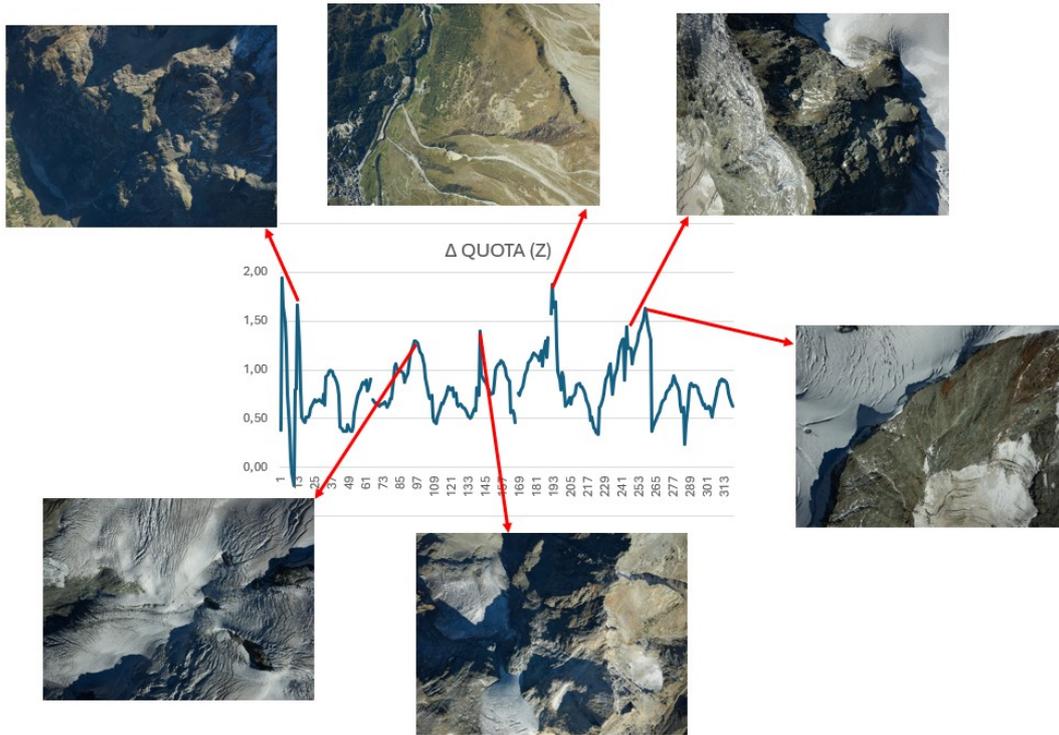


Figura 48: analisi puntuale differenze quota ortometrica

Analisi valori di calibrazione della camera:

I fotogrammi utilizzati sono stati realizzati con una camera Phaseone iXM-RS150F (vedi capitolo 3) i cui parametri di calibrazione, non essendo noti, sono stati stimati in modo automatico dai software utilizzati.

I fattori di calibrazione confrontati sono:

- Coordinate del punto principale e focale:

Metashape [pixel]	
Cx	57,399
Cy	-8,668
Cube 3D [pixel]	
Cx	7158,242
Cy	5316,238

Tabella 11: Coordinate del punto principale

Le coordinate del punto principale sono differenti a causa del sistema di riferimento adottato dai due software (Figura 49); infatti, conoscendo le dimensioni in pixels del fotogramma (14204*10652) è possibile riportare nel

sistema di riferimento di Metashape le coordinate del punto principale di Cube 3d e si ottiene:

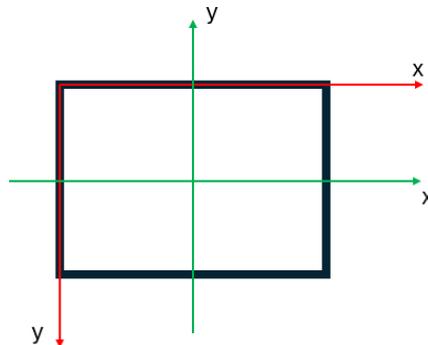


Figura 49: Sistemi di riferimento dei due software (in rosso Cube 3d, in verde Metashape)

Metashape [pixel]	
Cx	57,399
Cy	-8,668
Cube 3D [pixel]	
Cx	56,242
Cy	-9,762

Tabella 12: Posizione punto principale

Da cui si evince come la posizione del punto principale venga determinata in modo equivalente, con una differenza di:

Differenza [pixel]	
Cx	1,157
Cy	1,094

Tabella 13: Differenze posizione punto principale

che considerando la dimensione del pixel di 3.76 x 3.76 μm risulta accettabile. Allo stesso modo la differenza tra il valore calcolato di focale risulta accettabile se considerato il valore di dimensione del pixel:

Focale [pixel]	
Metashape	13734,30
Cube 3d	13735,05
Differenza	-0,75

Tabella 14: Distanza focale

- Parametri di distorsione radiale:

A causa della curvatura delle lenti all'interno della camera, le immagini subiscono una distorsione radiale che deve essere compensata attraverso l'identificazione di alcuni parametri di correzione (vedi paragrafo 2.1). Nel caso in esame sono stati stimati dai software i parametri k_1 , k_2 , k_3 i cui valori sono visibile nella tabella:

	Metashape	Cube 3D	Media	Sqm
k1	-0,04042	-0,04025	-0,04033	0,00008
k2	0,03773	0,03738	0,03756	0,00017
k3	-0,01290	-0,01318	-0,01304	0,00014

Tabella 15: Coefficienti di distorsione radiale

Analizzando il valore di media e scarto quadratico medio è possibile stabilire che Cube 3d determina in modo analogo a Metashape tali valori, applicando quindi alle immagini processate la medesima correzione di distorsione radiale.

5.2.2. Analisi e confronto DSM

Dai DSM ottenuti dall'elaborazione dei modelli sono stati elaborati dei dati statistici per valutare quanto i valori di elevazione del modello calcolati dai due software si discostassero l'uno dall'altro, utilizzando due diversi programmi di calcolo, QGIS e Matlab. Sono state analizzate le DoD "Differences of DSM" tra i valori ottenuti con Metashape e Cube 3d, con l'obbiettivo di identificare la presenza di errori sistematici e/o accidentali all'interno del modello e definire le probabili cause che generano tali errori. Sono state analizzate, tra le principali cause di errore, la presenza di zone con una texture omogenea che rende difficile la correlazione dei fotogrammi, così come la presenza di versanti con una forte pendenza che amplificano gli effetti in altimetria di piccoli errori planimetrici.

Elaborazione in ambiente GIS

Il programma QGIS consente in modo automatizzato di gestire i file in formato raster dei DSM, offrendo la possibilità di creare delle sezioni all'interno del modello utilizzando un tool implementato all'interno del software e di calcolare il DoD calcolando un nuovo file raster contenente le differenze tra i due DSM, in modo tale poter effettuare delle analisi estese a tutto il modello.

Una prima analisi è stata svolta sezionando in quattro punti diversi il modello al fine di verificare il comportamento reciproco dei due DSM, eseguendo le sezioni in punti specifici, quali zone caratterizzate dalla presenza di ghiaccio (vedi Figura 51) e ombra (vedi Figura 52) ed in corrispondenza dei marker a terra (vedi Figura 53 e Figura 54) al fine di verificare che in quei punti i DSM combaciassero.

Nelle sezioni seguenti la linea rossa rappresenta il profilo ottenuto con Metashape, quella blu quello con Cube 3d.

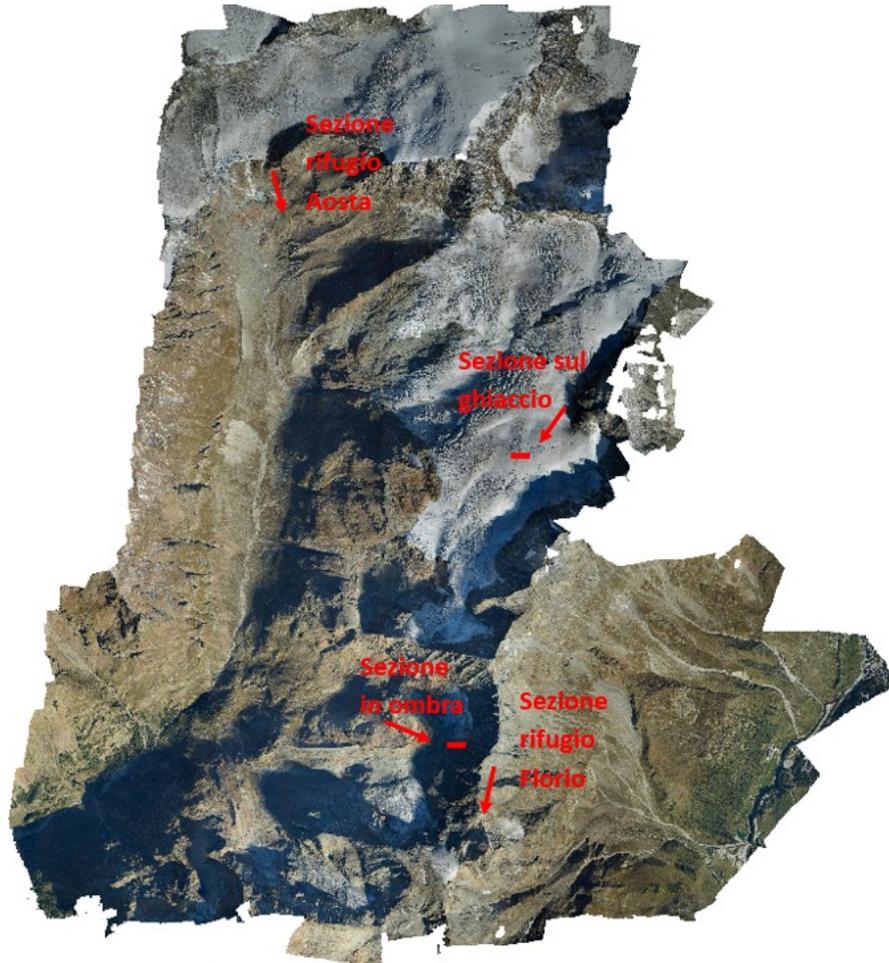


Figura 50: Posizione sezioni

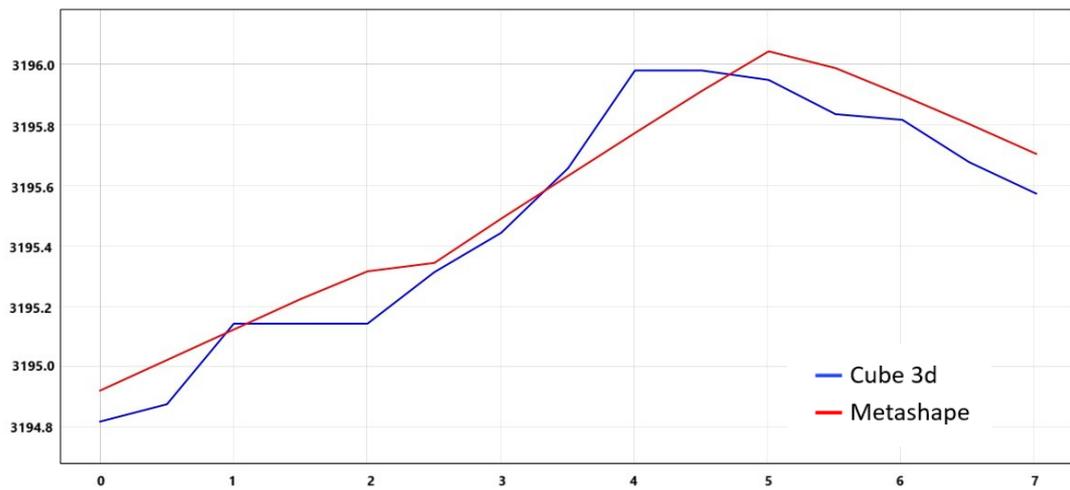


Figura 51: Sezione in zona di ghiaccio

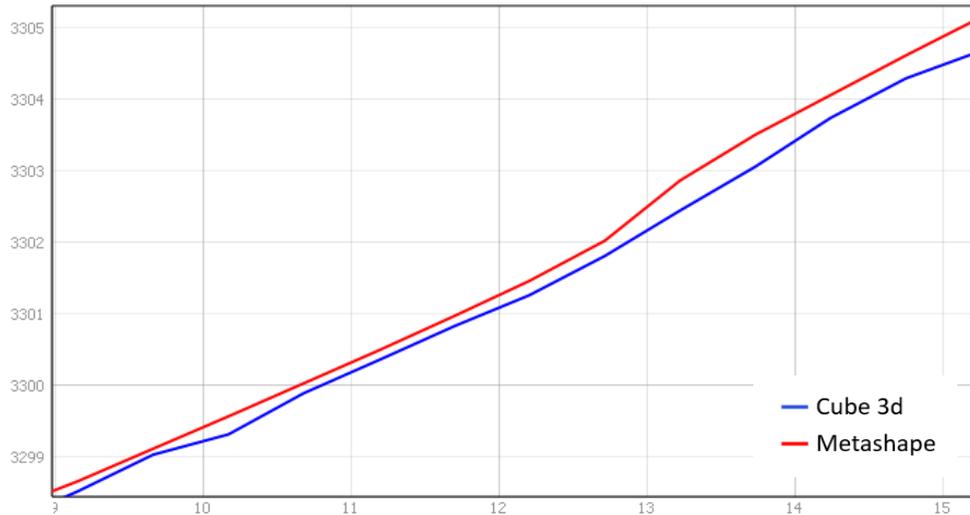


Figura 52: Sezione in zona di ombra

Dall'analisi di queste due diverse sezioni è possibile osservare come i due modelli presentino uno shift variabile dai 25 ai 35 centimetri.

Sono state eseguite anche due sezioni in corrispondenza di due diversi marker utilizzati per l'orientamento del modello:

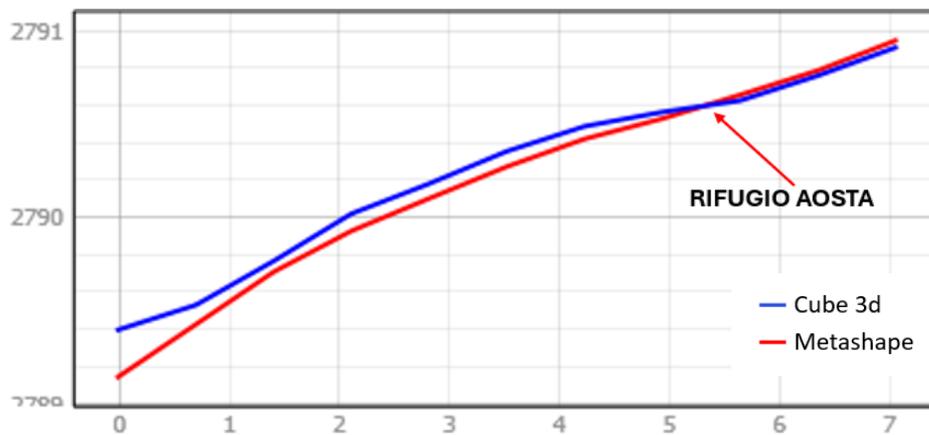


Figura 53: sezione in corrispondenza del marker Rifugio Aosta

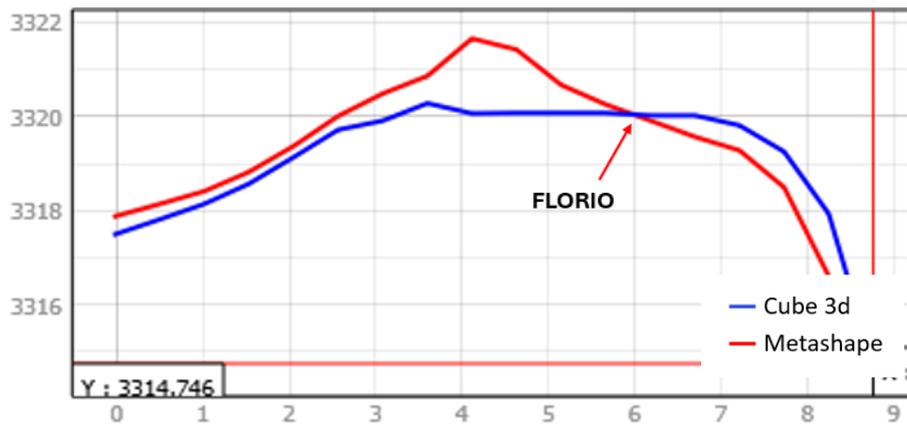


Figura 54: sezione in corrispondenza del marker Florio

In questo caso, correttamente, i due modelli coincidono in corrispondenza dei punti a terra a cui è stata assegnata la coordinata, con la particolarità di avere un andamento molto diverso nelle immediate vicinanze del punto. Ciò è particolarmente visibile in Figura 54, dove ad appena un metro e mezzo di distanza dal marker i modelli si discostano in altimetria di circa 1,50 metri.

In una seconda fase è stato analizzato l'intero DSM eseguendo la differenza tra i due file raster all'interno dell'applicativo QGIS, che tramite la funzione "calcolatore raster" permette di realizzare il calcolo. Il risultato ottenuto (Figura 55) presenta evidenti problemi di calcolo poiché vengono generate delle "strisciate" (cerchiate in nero in figura 55) all'interno del modello che corrisponderebbero a degli "scalini" tra i due DSM che nella realtà non esistono. Questo problema di calcolo può essere attribuito a due fattori: il primo è la differenza con cui i due file .TIFF sono stati generati e quindi campionati dai due software (Metashape e Cube 3d); il secondo è la difficoltà di gestione di dataset di grandi dimensioni da parte di QGIS.

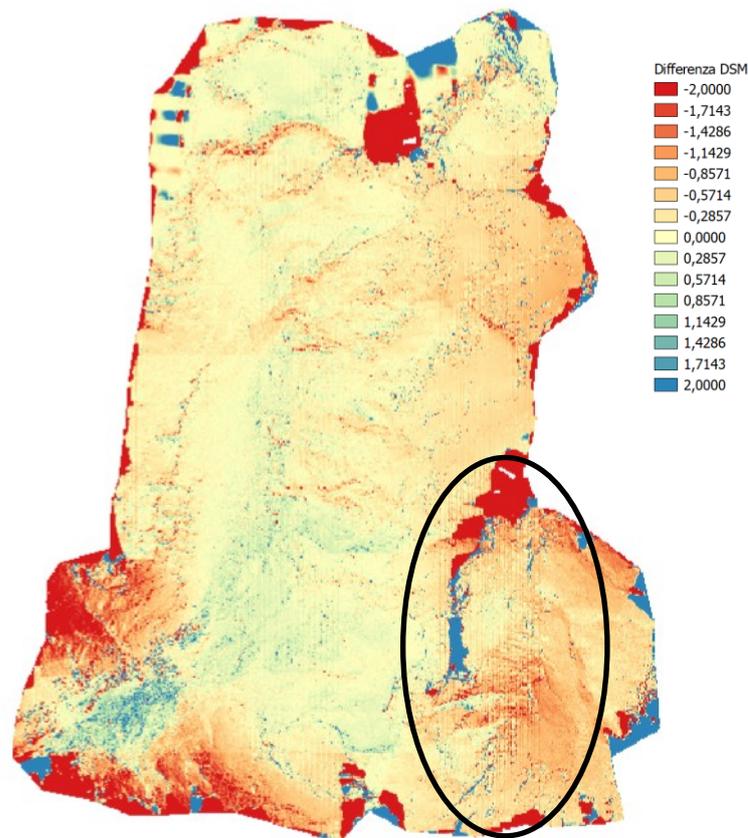


Figura 55: Raster differenza DSM Cube – Metashape. Sono visibili le “strisciate” di errore generate dal calcolatore raster di QGIS.

Elaborazione in ambiente Matlab

Per risolvere il problema di calcolo riscontrato in QGIS, sono stati analizzati i file DSM all'interno del software MATLAB utilizzando un codice di calcolo fornito dal Prof. Alberto Cina, il cui script è possibile trovare nell'allegato 10.5. Tramite questo codice è possibile elaborare la differenza tra due DSM e plottarla in una scala di grigio (Figura 56) dove più il colore è scuro e più il valore di differenza rappresentato è piccolo e quindi i due DSM coincidono. Il presupposto nell'utilizzo di tale programma di analisi è il caricamento all'interno di Matlab del file .TIFF contenente i dati dei due DSM da analizzare. I file così caricati vengono letti come delle matrici con all'interno di ogni cella il valore di quota a cui fa riferimento. Al fine di rendere confrontabili i due file, il campionamento dei due DSM e il sistema di riferimento adottato devono essere gli stessi per entrambi e la prima cella in alto a sinistra deve corrispondere planimetricamente allo stesso punto in

entrambi i DSM al fine di avere la corretta sovrapposizione, poiché Matlab non gestisce la georeferenziazione dei dati, ma li interpreta come due matrici da confrontare tra di loro. Successivamente, dopo aver caricato le due matrici dei DSM, attraverso un ciclo iterativo vengono rimossi i valori corrispondenti ai “no data” e registrati in una nuova matrice, di medesime dimensioni di quella di partenza, i valori delle differenze così determinati:

$$\Delta_{DSM} = DSM_1 - DSM_2$$

Determinata la matrice delle differenze, è possibile rappresentare graficamente in scala di grigi il risultato (Figura 56) ed ottenere i parametri statistici di media e deviazione standard dei dati registrati. L’analisi statistica può essere condotta sull’intero campione, oppure su di un campione a cui sono state rimosse le code del 5% al fine di eliminare quei valori soggetti ad errori accidentali. Lo stesso codice di calcolo permette di eseguire anche un’analisi considerando un valore di soglia, determinando i parametri statistici per i valori compresi al di sotto di tale valore limite preimpostato.



Figura 56: differenze tra DSM CUBE 3D – Metashape

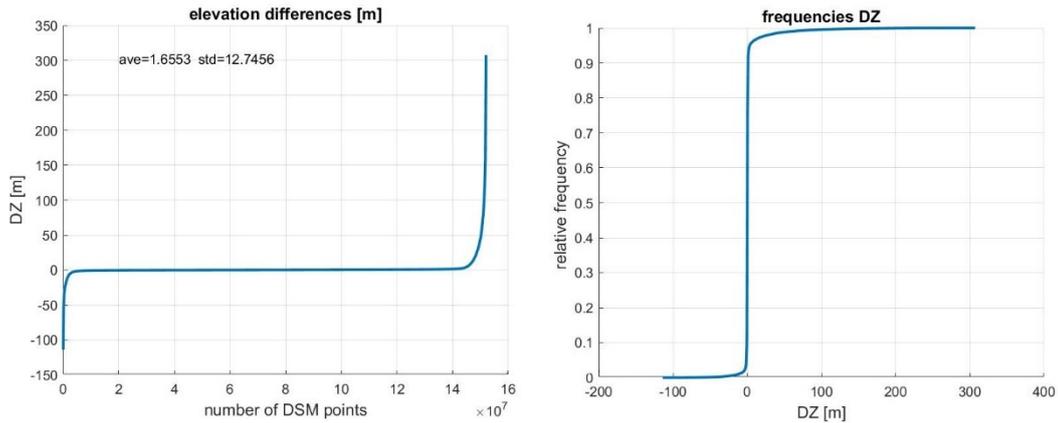


Figura 57: Andamento statistico intero campione

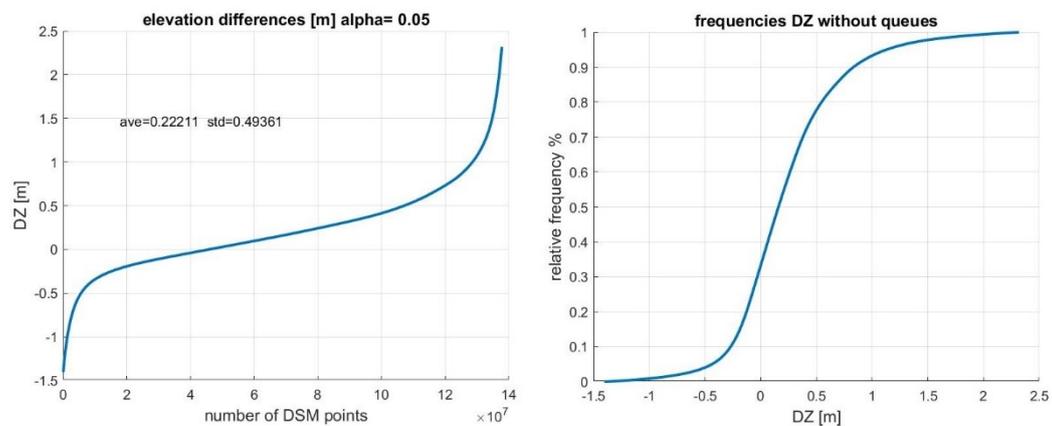


Figura 58: Andamento statistico campione senza le code del 5%

In Figura 56 è possibile osservare il modello che descrive, in scala di grigi, la differenza ottenuta tra i due DSM confrontati, con una maggiore corrispondenza tra i due nella fascia centrale, mentre si discostano maggiormente sui bordi. La Figura 57 e la Figura 58 rappresentano la distribuzione dei valori di differenza considerando l'intero campione (Figura 57) oppure escludendo dal calcolo le code al 5% (Figura 58). Nel caso dell'intero campione la media e la deviazione standard assumono valori molto elevati dovuti al fatto che alcuni punti hanno valore di differenza maggiore di 100 metri. Ciò fa sì che i parametri siano influenzati da questi punti soggetti ad errori grossolani che rendono poco rappresentativi e utili tali dati. Per eliminare l'influenza degli errori grossolani sono state escluse dal calcolo le code pari al 5% del numero dei dati disponibili. Così facendo si ottengono i grafici visibili in Figura 58, con valore medio di 22 cm e

deviazione standard di 49 cm. In questo caso il valore della media suggerisce la presenza di un errore sistematico di circa 20 centimetri all'interno del modello.

Una differente analisi può essere fatta imponendo all'interno del codice Matlab un valore di soglia limite, al fine determinare la percentuale di punti con entità maggiore alla soglia impostata; inoltre è possibile plottare in forma grafica in bianco e nero i punti sopra o sotto soglia, identificando quindi la posizione in cui ricadono.

Nel caso in esame sono stati impostati sei diversi valori di soglia, 10, 5, 1, 0.5, 0.25, 0.10 metri, mentre graficamente sono stati plottati in nero i valori al di sotto della soglia e in bianco quelli al di sopra.

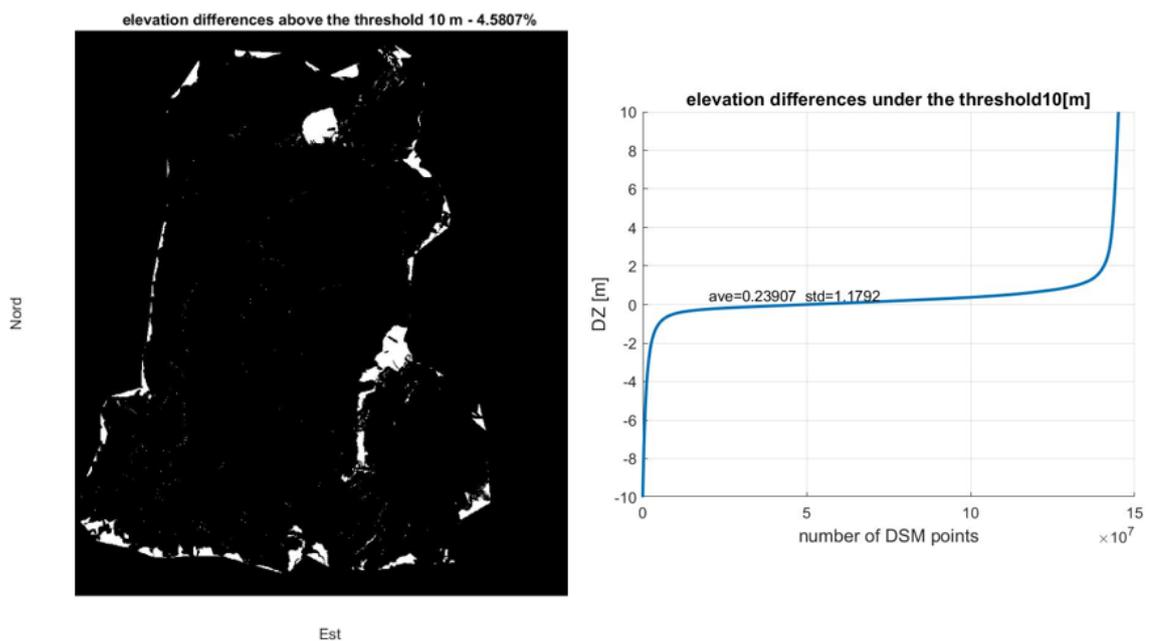


Figura 59: Errore con soglia 10m

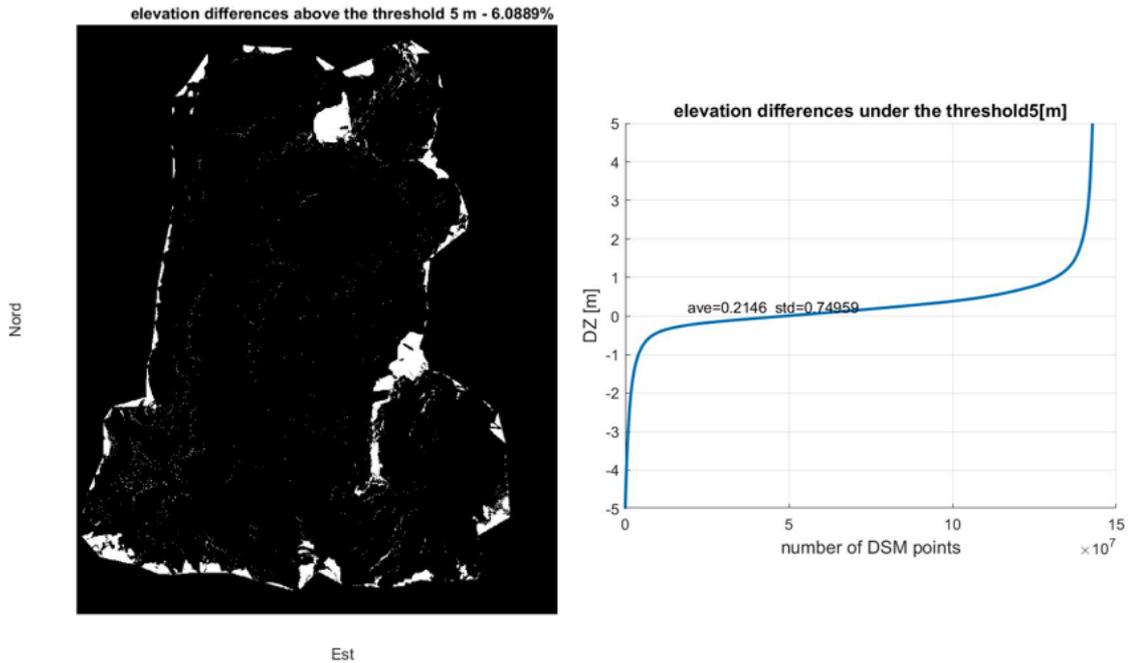


Figura 60: Errore con soglia 5m

Da queste due analisi è possibile notare come impostando una soglia di 10 o 5 metri non sono visibili grandi differenze:

	media	deviazione standard	punti sopra soglia [%]
soglia 10m	0,239	1,179	4,58%
soglia 5m	0,215	0,750	6,09%

il valore della media rimane circa uguale, mentre diminuisce la deviazione standard impostando una soglia più bassa. La percentuale di punti sopra soglia non subisce un grosso incremento passando da 10m a 5m, così come se si analizza la posizione dei punti si nota come questi siano concentrati maggiormente sulle zone di bordo o al disopra dei corpi glaciali dove generalmente vi è una maggior difficoltà da parte dei programmi di fotogrammetria ad allineare le immagini.

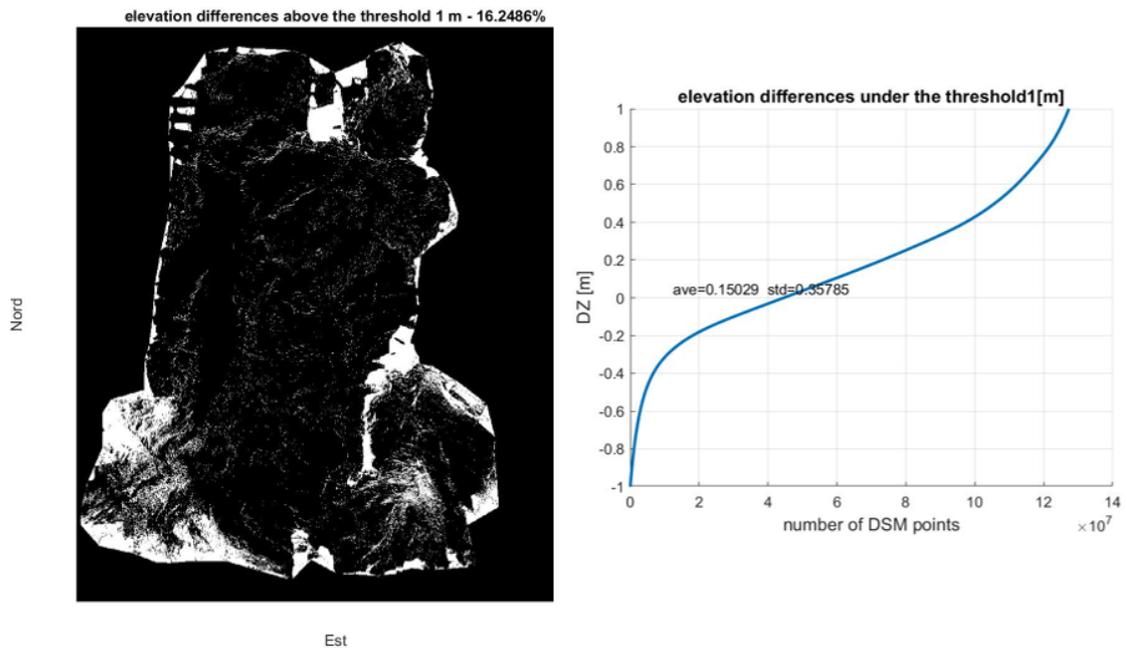


Figura 61: Errore con soglia 1m

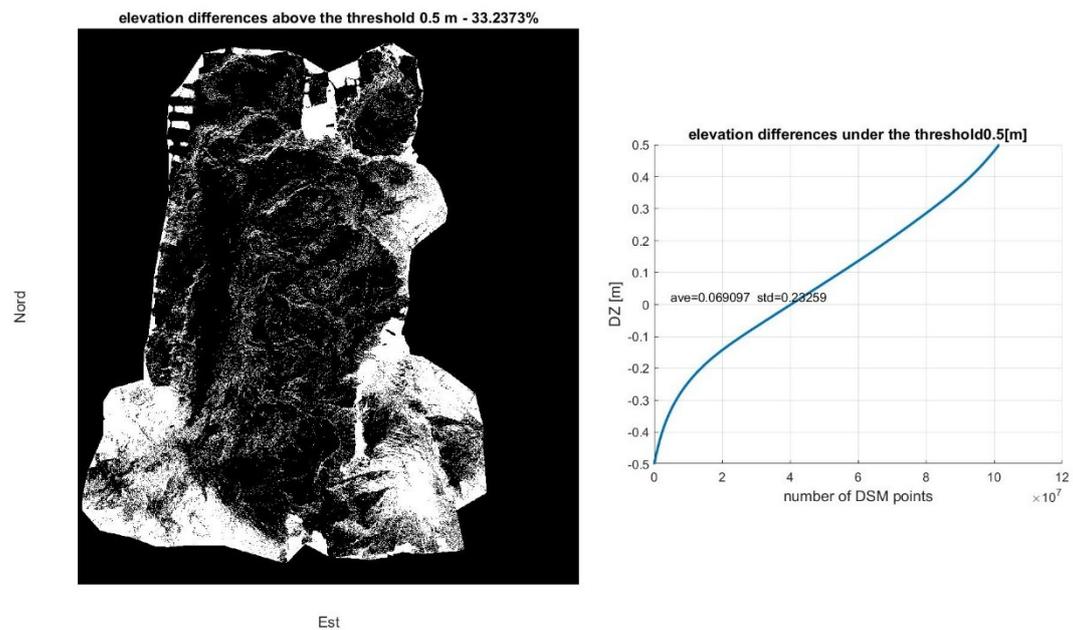


Figura 62: Errore con soglia 0,50m

Impostando la soglia ad un valore di 1m e 0,50m iniziano a comparire alcune variazioni rispetto ai casi precedenti:

	media	deviazione standard	punti sopra soglia [%]
soglia 1m	0,150	0,358	16,25%
soglia 0,50m	0,069	0,233	33,24%

Il valore di deviazione standard si abbassa, raggiungendo 23 centimetri nel caso di soglia 0,50m mentre la percentuale di errore aumenta al 16,25% e al 33,24%, rispettivamente. Inoltre, si nota come i punti sopra soglia non siano più posizionati solamente nelle zone di bordo, ma inizino a propagarsi nella parte inferiore dell'area di rilievo. Interessante osservare che sia nella parte in basso a destra in prossimità di Cervinia, dove il rilievo risulta fortemente appoggiato data la presenza di numerosi marker, e sia la parte in basso a sinistra dove vi è carenza di marker, restituiscano un comportamento simile con un distacco notevole dei due DSM.

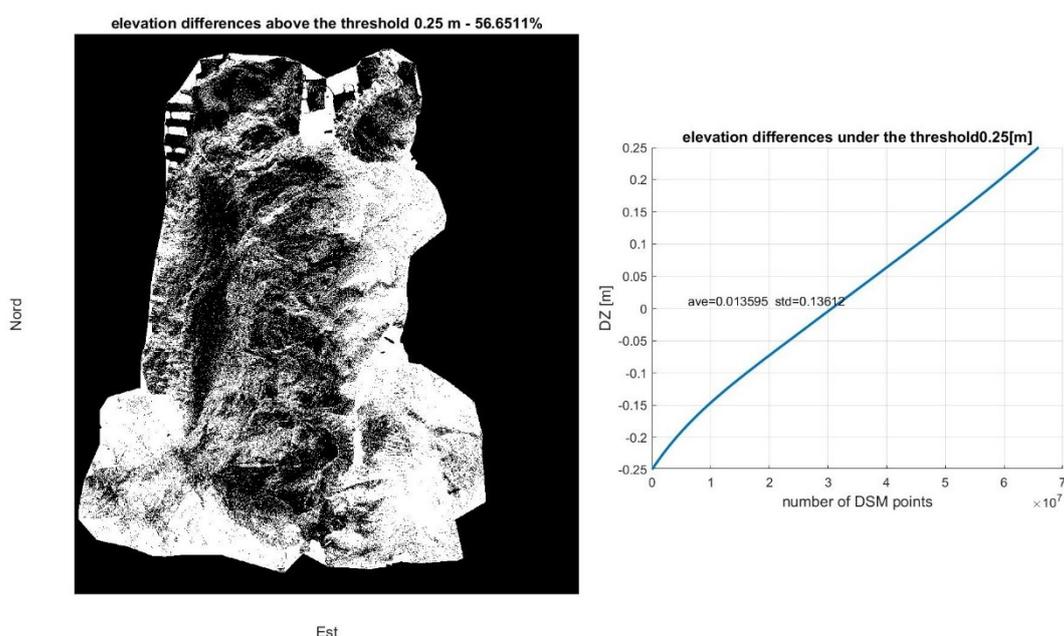


Figura 63: Errore con soglia 0.25m

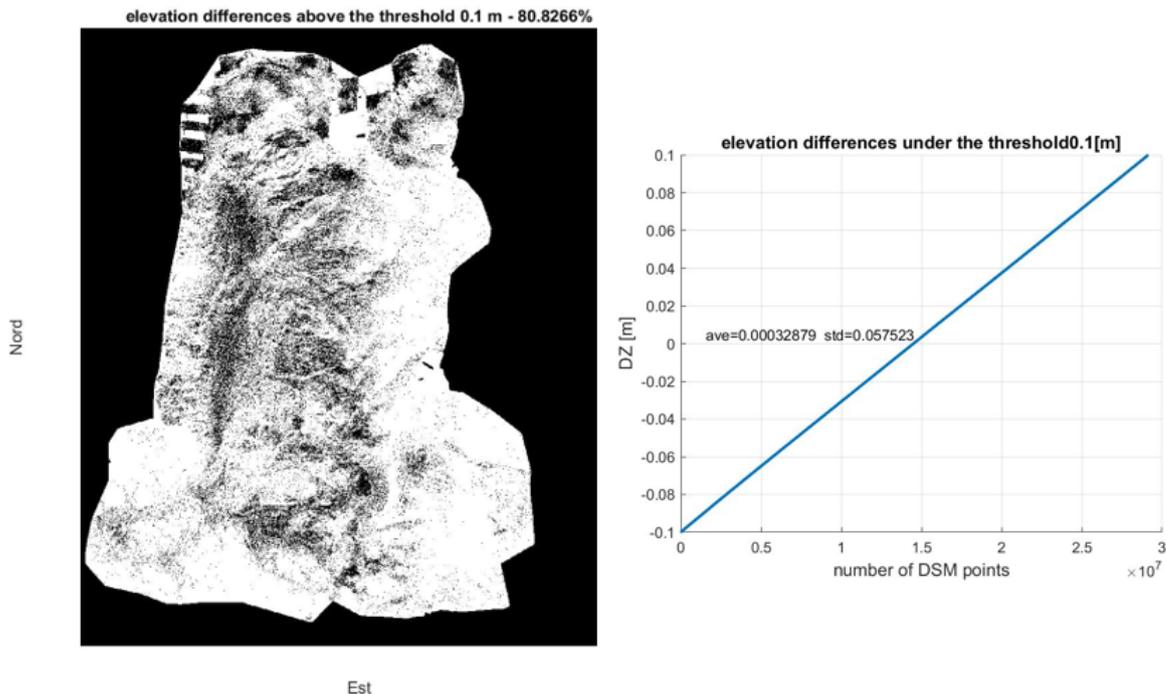


Figura 64: Errore con soglia 0.10m

In questi due ultimi casi analizzati è evidente come l'errore sopra soglia assuma un valore molto rilevante, superando il 50% e sfiorando l'80% nel caso di soglia a 0,10m. Nel dettaglio, facendo un confronto anche con i risultati che si sono ottenuti nei precedenti paragrafi, dove sia dall'analisi dei centri di presa, sia dall'analisi delle sezioni, si era notato come ci fosse un offset più o meno costante di circa 30-40 centimetri in altezza, anche qui è visibile come passando da una soglia di 0,50m a 0,25m, oltre all'aumento della percentuale di errore, lo stesso passi da una concentrazione in alcune zone ad una distribuzione più uniforme su tutto il modello. Infine, analizzando l'errore con soglia a 0,10m, si raggiunge un livello di errore del 80,83%, che può essere dovuto in parte anche all'errore di campionamento dei DSM.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori di media, deviazione standard e percentuale di errore degli otto casi analizzati precedentemente:

	media	deviazione standard	punti sopra soglia [%]
generale	1,655	12,746	/
senza code del 5%	0,222	0,494	4,58%
soglia 10m	0,239	1,179	4,58%
soglia 5m	0,215	0,750	6,09%
soglia 1m	0,150	0,358	16,25%
soglia 0,50m	0,069	0,233	33,24%
soglia 0,25m	0,014	0,136	56,65%
soglia 0,10m	0,000	0,058	80,83%

Tabella 16: valori analisi differenze DSM

Analisi della relazione tra errore ΔH e pendenza

Come ultima analisi si è voluto approfondire la possibile correlazione tra la differenza ΔH dei due DSM calcolati con i due software e la pendenza dei versanti dell'area di rilievo. Come visibile in Figura 66, un possibile errore ϵ di proiezione del fotogramma può generare una imprecisione all'interno del modello a seconda della differente pendenza del versante. Nel caso in cui il terreno sia pianeggiante l'errore viene riscontrato principalmente in termini di posizione planimetrica, mentre se la pendenza del versante è molto accentuata diventa rilevante anche l'errore altimetrico.

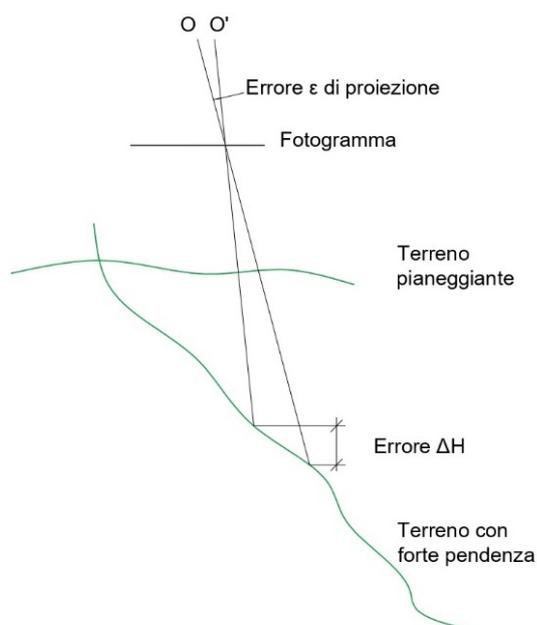


Figura 65: Errore ΔH di proiezione

Utilizzando il programma QGIS è stata quindi elaborata, utilizzando il tool implementato al suo interno, la carta delle pendenze dell'area rilevata, classificandole in quattro range diversi ($0^\circ - 20^\circ$, $20^\circ - 40^\circ$, $40^\circ - 60^\circ$, $>60^\circ$). In modo similare è stata prodotta anche la carta delle differenze ΔH dei due DSM (Cube 3d e Metashape), precedentemente calcolata in Matlab (Figura 56) suddividendola in quattro range (0 - 0.25m, 0.25 - 0.50m, 0.50 - 1.00m, $>1.00m$)

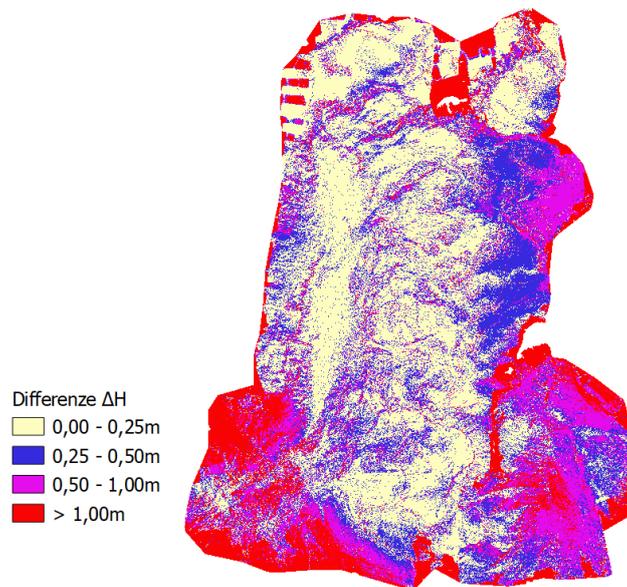


Figura 66: Carte delle differenze ΔH

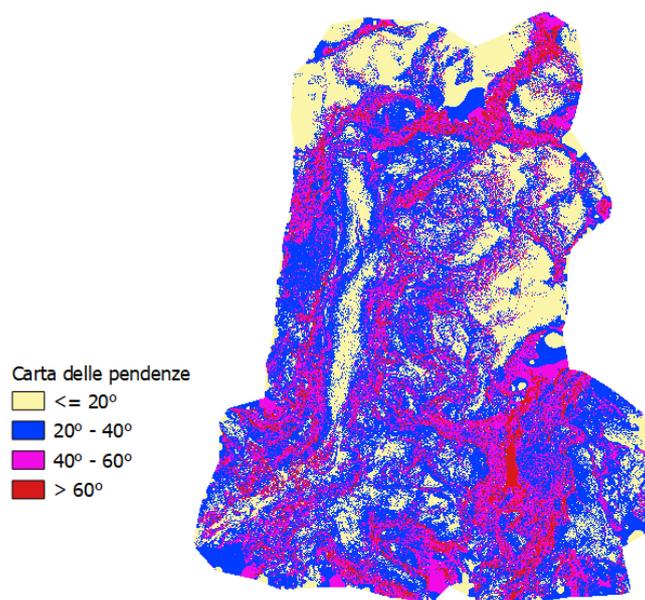


Figura 67: Carta delle pendenze

Dall'analisi delle due carte prodotte non si riscontra una correlazione diretta uniforme su tutto il rilievo tra la pendenza del versante e la differenza di quota dei due DSM. Confrontando le zone evidenziate nell'immagine seguente:

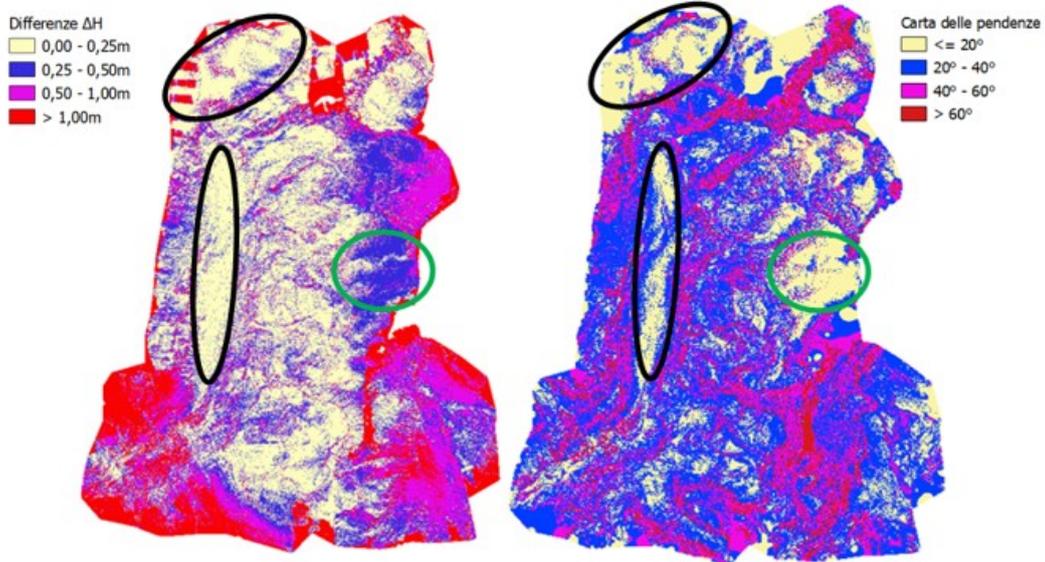


Figura 68: correlazione pendenze – differenze ΔH

è possibile osservare tre zone in cui sono presenti delle possibili correlazioni tra i due parametri analizzati. Prima di analizzarle occorre fare una considerazione sull'area cerchiata in verde. Seppur la pendenza in quella zona è limitata, l'errore presenta un valore elevato poiché è situata al di sopra dei ghiacciai, dove come visto nel paragrafo precedente l'allineamento dei fotogrammi fallisce probabilmente a causa dell'omogeneità della texture. Esclusa tale zona, per le altre due cerchiata in nero è possibile osservare un possibile legame tra una pendenza bassa e un errore limitato tra i modelli. Occorre comunque evidenziare che esistono altre zone in cui, nonostante la pendenza sia elevata, il modello elaborato con cube 3d presenta differenze limitate rispetto al modello di Metashape. Non è quindi possibile definire una correlazione generalizzata a tutto il modello tra il valore di pendenza e l'errore generato tra i due modelli

5.2.3. Considerazioni finali

Terminata l'analisi dei dati fotogrammetrici utilizzando i due software è possibile fare alcune considerazioni.

Il primo punto riguarda la gestione dei dati, dove il software Cube 3d non è stato in grado di elaborare il volo completo, composto da due set fotografici, ma solamente il primo set del 18 settembre 2022, mentre al contrario con il software Metashape si era già riusciti ad elaborare l'intero rilievo. Per quanto riguarda i tempi e la facilità di elaborazione, Metashape risulta più veloce, ed in particolare ha generato meno problemi di blocco del software durante l'elaborazione dei dati, soprattutto per quanto riguarda l'impossibilità di elaborare il progetto su Cube 3d in qualità migliori rispetto a quella bassa. Dal confronto dei parametri e dei prodotti cartografici ottenuti è possibile osservare come per quanto riguarda i parametri di calibrazione della camera i due software lavorino in maniera molto simile, ottenendo analoghi parametri di calibrazione. Dall'analisi dei valori delle coordinate dei centri di presa e dei due DSM, prendendo come riferimento i dati ottenuti da Metashape, è possibile verificare la presenza un errore sistematico di circa 30 centimetri nella determinazione del valore altimetrico all'interno del modello. Inoltre, la modellazione presenta marcate differenze sui valori vicini ai bordi e in corrispondenza dei ghiacciai, dove l'allineamento dei fotogrammi è più difficile. Allo stesso modo non è possibile definire una dipendenza dell'errore di calcolo dovuta alla pendenza dei versanti. È quindi possibile definire, che al momento il programma che offre le migliori prestazioni di calcolo per l'analisi di set fotogrammetrici di grandi dimensioni è Metashape, poiché l'elaborazione con Cube 3d presenta, ad oggi, difficoltà nella gestione dei dataset fotogrammetrici di grandi dimensioni, con riferimento alla difficoltà d'uso per i problemi di blocco del software.

6. *Analisi del volo 2024*

Nel seguente capitolo viene analizzato il volo eseguito in data 11 novembre 2024 sul territorio della Valpelline, con un piano di volo simile a quello effettuato nel 2022. Tale elaborazione ha permesso di ottenere i prodotti cartografici, quali DSM e ortofoto, con cui sarà possibile fare un confronto con i valori ottenuti nel precedente volo del 2022, con particolare attenzione alla zona del ghiacciaio Des Grandes Murailles e alla zona interessata dalla frana avvenuta in data 29 giugno 2024 che ha variato non solo la morfologia limitrofa alla zona di distacco, ma di tutta la valle, fino ad arrivare alla diga di Place Moulin, che ha necessitato di un intervento di rimozione dei detriti accumulati all'interno del bacino. Nel dettaglio, nella seconda parte di questo capitolo, sarà approfondito l'utilizzo dei GCP a terra per l'orientamento, stabilendo attraverso un'analisi ripetuta del modello quali siano maggiormente importanti per ottenere una corretta elaborazione del blocco fotogrammetrico. Tale analisi è stata effettuata considerando la difficoltà di accesso della valle dovuta alla sua morfologia e quindi la complessità di apporre sul territorio nuovi marker. Al termine di questa analisi sarà quindi possibile stabilire quali e quanti GPC a terra sono necessari e definire, in ottica di una futura campagna di misura dove posizionarli.

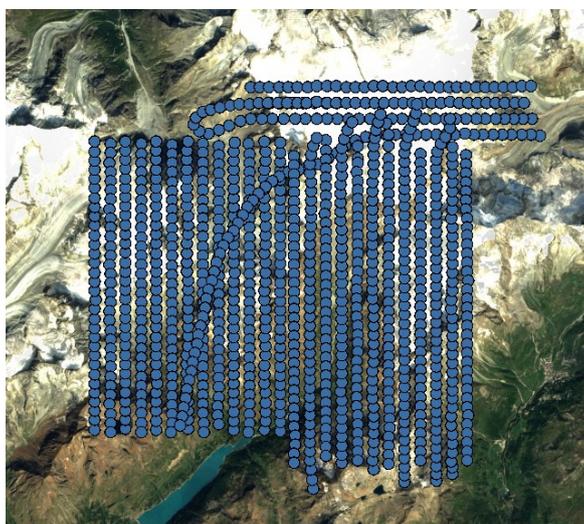


Figura 69: Piano di volo 2024

6.1. Elaborazione del blocco fotogrammetrico 2024

Il processo di elaborazione è stato eseguito con il software Metashape, e riprende nei passaggi fondamentali quello descritto nel capitolo 4.1, con l'introduzione di alcune tecniche aggiuntive di analisi e gestione del modello.

6.1.1. Orientamento del modello

In prima analisi è stato effettuato un orientamento relativo dei fotogrammi scattati con il volo dell'11 novembre 2024, ottenendo il modello tridimensionale della zona oggetto di rilievo.

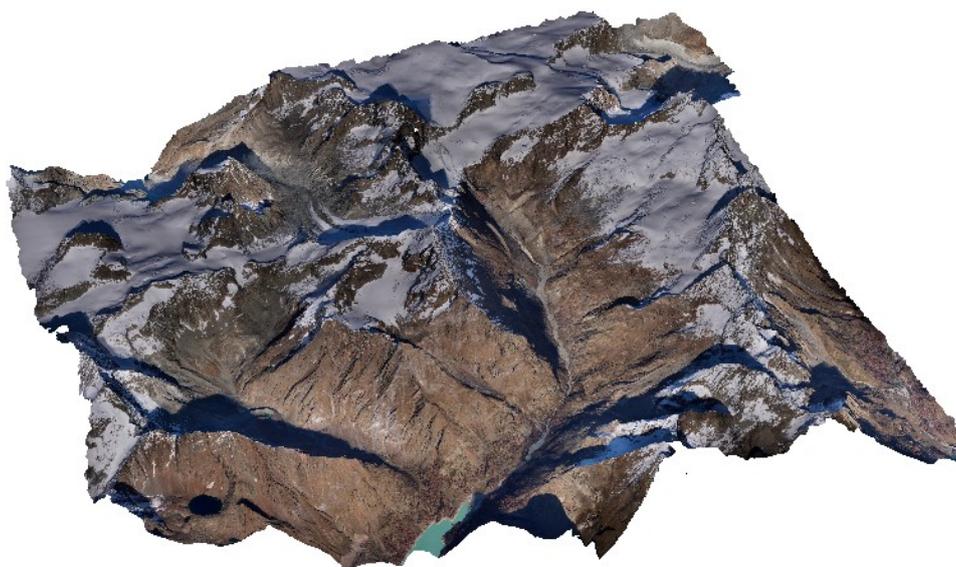


Figura 70: modello tridimensionale 2024

Terminata tale procedura è stato eseguito l'orientamento assoluto utilizzando i GCP di coordinate note a disposizione (paragrafo 3.1).

Oltre ai punti già noti negli anni precedenti ed utilizzati nell'orientamento del modello 2022, sono stati aggiunti sei nuovi punti facilmente identificabili da marker di dimensioni 1m*1m, dei quali cinque determinati durante la campagna di rilievo eseguita in data 25 e 26 settembre 2024 dal team del DIATI Polito (vedi pagina 27) ed uno ottenuto da un rilievo eseguito dall'ARPA

(Ponte_piana) in data 9 settembre 2023. Le monografie dei GCP utilizzati sono inserite nell'allegato 10.1 e 10.2. Nell'esecuzione dell'orientamento assoluto del modello, collimando i GCP a disposizione, si è riscontrato un problema nell'utilizzo del software. In particolare, si è notato come Metashape utilizzi per l'orientamento non solo i punti collimati direttamente dall'operatore, rappresentati da una bandierina verde, ma anche quelli che il software stesso ipotizza e auto collima e che sono raffigurati con una bandierina blu. Si è resa quindi necessaria una selezione manuale dei punti andando a disabilitare quelli che generano un errore all'orientamento del modello valutando nelle proprietà di ciascun marker l'errore di collimazione stimato espresso in pixels.

Nella tabella seguente sono riportati i valori stimati degli scarti ai minimi quadrati dei GCP:

MARKER	$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
Diati_46	0,049	0,020	0,015	0,043
Diati_48	0,211	-0,055	-0,104	-0,175
Bivacco Tete de Roeses	0,122	0,040	0,070	0,092
RIFUGIO_AOSTA	0,018	-0,014	-0,010	-0,003
RIFUGIO_NACAMULI	0,043	0,020	0,030	0,024
Florio1	0,092	-0,015	-0,002	0,091
Florio2	0,142	-0,030	0,000	0,139
Florio3	0,167	0,078	-0,123	-0,081
Florio4	0,160	0,126	-0,038	-0,091
salesiani	0,140	-0,122	-0,055	-0,043
Vecchia_malga1	0,160	0,159	0,018	0,003
Bobba_spigolo_sx	0,119	-0,023	0,066	-0,096
Museo_bayettes	0,161	-0,011	0,016	0,159
Museo_bayettes2	0,175	-0,157	0,078	-0,007
Museo_bayettes3	0,079	0,052	-0,041	-0,043
DIATI_20	0,181	-0,113	-0,053	-0,131
DIATI_58	0,144	0,043	0,130	0,045
DIATI_57	0,077	0,056	-0,022	0,048
Ponte_piana	0,084	0,043	0,030	0,066
DIATI_66	0,062	-0,007	0,022	0,057
DIATI_98	0,218	-0,186	-0,111	-0,021
DIATI_56	0,069	0,059	0,018	0,029
Diati_18	0,128	0,037	0,064	-0,104
Media	0,122	0,000	0,000	0,000
Sqm	0,054	0,082	0,062	0,084

Tabella 17: scarti ai minimi quadrati GCP modello 2024

Dal risultato ottenuto è possibile osservare un valore medio molto basso, se non persino nullo in alcuni casi. Allo stesso modo anche lo scarto quadratico medio dei residui presenta un valore basso, al di sotto dei dieci centimetri.

6.1.2. Co-registrazione dei fotogrammi 2022

Al termine della fase di orientamento si è appurato che il piano di volo aveva escluso dal rilievo i GCP di bordo denominati Parcheggio, Eliporto e Morces; nonché il punto denominato Col De La Division non fosse visibile in quanto ricoperto dalla neve. Per ovviare a questa problematica e cercare di recuperare i GCP precedentemente citati, si è sperimentata una tecnica di co-registrazione di fotogrammi appartenenti ad un volo svolto in un anno precedente. Dal database dei fotogrammi 2022 sono stati selezionati quelli contenenti i GCP di interesse e sono stati caricati all'interno del software. In totale sono stati inseriti 25 fotogrammi ed è stato rieseguito l'allineamento relativo dei fotogrammi del volo 2024 più i 25 del volo 2022 mantenendo come base il precedente allineamento e selezionando come "reference preselection" "Estimated" (vedi capitolo 4.1). In questo modo l'elaborazione risulta molto veloce, impiegando solamente dieci minuti.

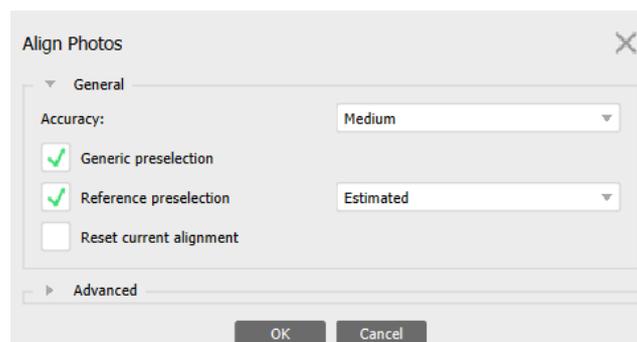


Figura 71: Impostazioni di riallineamento Metashape

Il software è riuscito ad allineare la quasi totalità delle foto riguardanti i punti Parcheggio, Eliporto e Morces, mentre per quanto riguarda il punto Col De La Division, non si è riusciti ad ottenere l'allineamento, probabilmente a causa dell'elevato innevamento della zona. Si è quindi provato nuovamente a ripetere la procedura allargando la fascia di fotogrammi considerati, ma

anche in questo caso l'area attorno a Col De La Division non è stata allineata. Ottenuto il nuovo modello si è proceduto con l'orientamento assoluto, dove a differenza del precedente, si è potuto collimare i punti che erano stati esclusi dal volo. Terminata tale fase, prima di procedere con l'elaborazione della nuvola densa, del DSM e dell'ortofoto, sono stati eliminati i fotogrammi del 2022 che erano stati inseriti, in modo tale che non influissero sui prodotti cartografici finali. In questo modo l'orientamento del modello è stato rafforzato da ulteriori tre Marker di bordo, molto importanti per la loro posizione.

MARKER	$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
Diati_46	0,057	0,034	0,023	0,039
Diati_48	0,212	-0,058	-0,102	-0,176
Bivacco Tete de Roeses	0,132	0,032	0,059	0,113
RIFUGIO_AOSTA	0,023	-0,013	-0,019	0,001
RIFUGIO_NACAMULI	0,034	0,023	0,024	0,006
Florio1	0,174	-0,028	-0,034	0,169
Florio2	0,141	-0,049	0,011	0,132
Florio3	0,154	0,059	-0,113	-0,087
Florio4	0,146	0,107	-0,027	-0,096
salesiani	0,137	-0,111	-0,071	-0,037
Vecchia_malga1	0,183	0,183	0,010	0,001
Bobba_spigolo_sx	0,184	-0,044	0,100	-0,147
Museo_bayettes	0,142	0,008	-0,009	0,141
Museo_bayettes2	0,180	-0,156	0,089	-0,016
Museo_bayettes3	0,094	0,073	-0,038	-0,045
DIATI_20	0,192	-0,123	-0,029	-0,145
Diati_18	0,080	0,034	0,049	-0,053
DIATI_58	0,155	0,049	0,140	0,043
DIATI_57	0,083	0,070	-0,014	0,043
Ponte_piana	0,081	0,044	0,022	0,064
DIATI_66	0,063	-0,009	0,031	0,054
DIATI_98	0,223	-0,184	-0,121	-0,033
DIATI_56	0,067	0,057	0,016	0,029
Media	0,128	0,000	0,000	0,000
sqm	0,057	0,085	0,064	0,091

Tabella 18: Scarti ai minimi quadrati GCP dopo co-registrazione

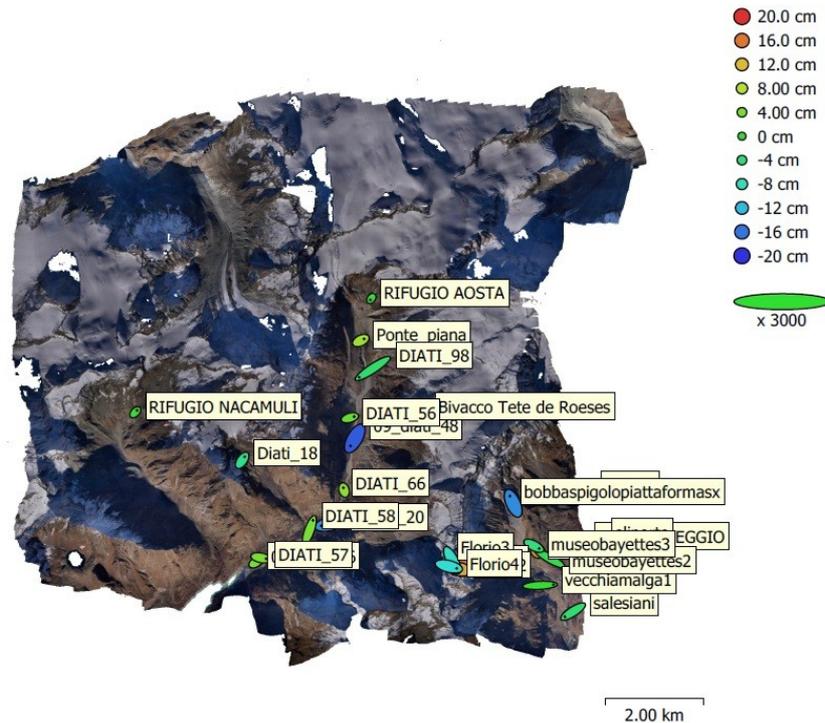


Figura 72: GCP e relative ellissi d'errore stimate

Si può notare come gli errori stimati sui sei nuovi marker (al fondo della tabella) siano inferiori rispetto a quelli stimati sugli altri. Questo perché grazie al posizionamento a terra di grossi marker la collimazione è più precisa rispetto a quella di punti naturali, che sono facilmente individuabili, ma con precisione minore. Un'altra considerazione che può essere fatta è che osservando i valori di media e scarto quadratico medio prima e dopo l'aggiunta dei tre marker collimati eseguendo la co-registrazione dei fotogrammi del volo 2022, non ci sia un miglioramento della precisione globale; nonostante ciò, l'aggiunta di questi tre punti risulta importante per vincolare e limitare le distorsioni del modello sul bordo.

Si ottiene quindi il modello tridimensionale definitivo da cui è possibile elaborare successivamente i prodotti cartografici: DSM e ortofoto.

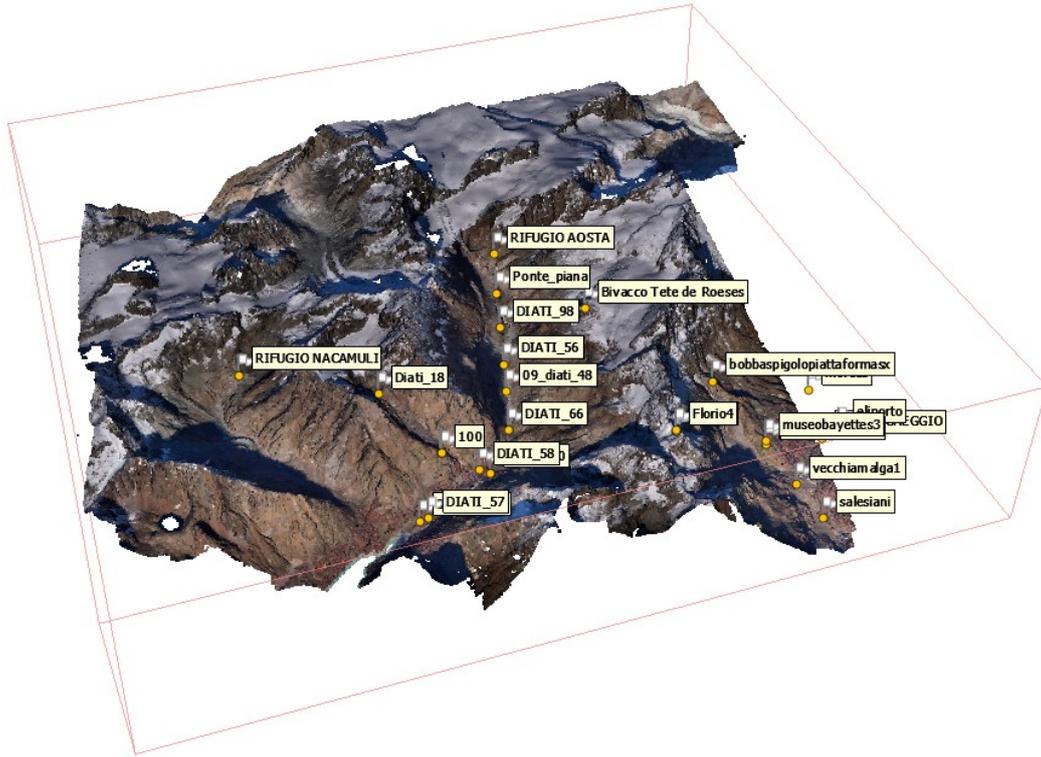


Figura 73: modello definitivo orientato 2024

6.2. Prodotti cartografici 2024

Sono qui riportati i prodotti cartografici definitivi ottenuti dal modello 2024, che saranno utilizzati nel capitolo 8 per la valutazione dell'ablazione dei ghiacciai e della morfologia della valle a seguito dell'evento alluvionale dell'estate 2024.

I prodotti cartografici sono stati esportati nel formato .TIFF, che permette di memorizzare in forma matriciale i diversi dati di interesse, e visualizzati con il software QGIS. Il DSM è stato rappresentato con la tecnica del falso colore che permette di visualizzare in una scala cromatica scelta dall'utente la variazione del valore di quota rappresentato. In questo modo è più facile interpretare visivamente i dati rappresentati.

Le caratteristiche dei prodotti estratti sono:

- Campionamento DSM: 0.50m
- Dimensione del pixel dell'ortofoto: 0.50m

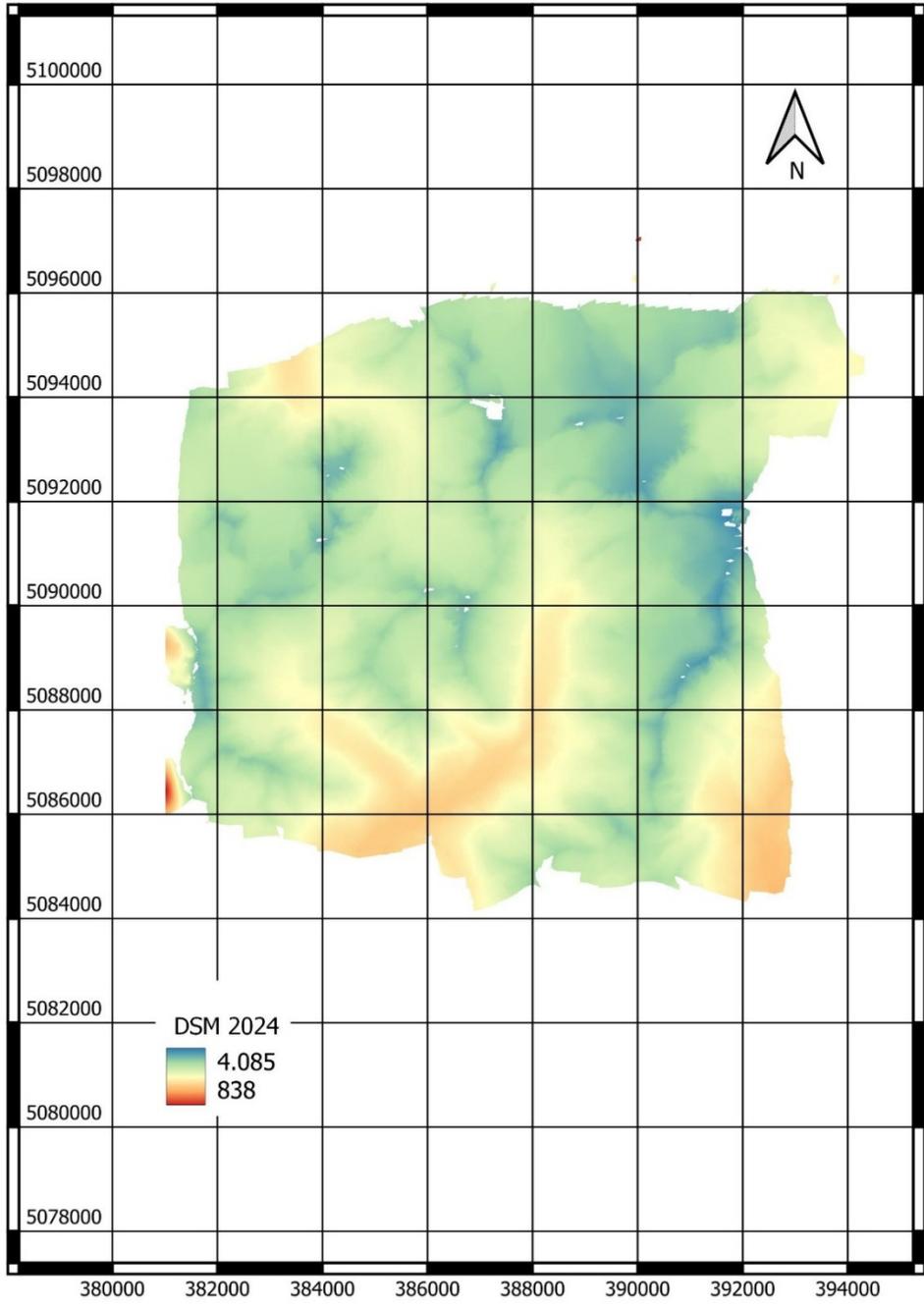


Figura 74: DSM volo 2024

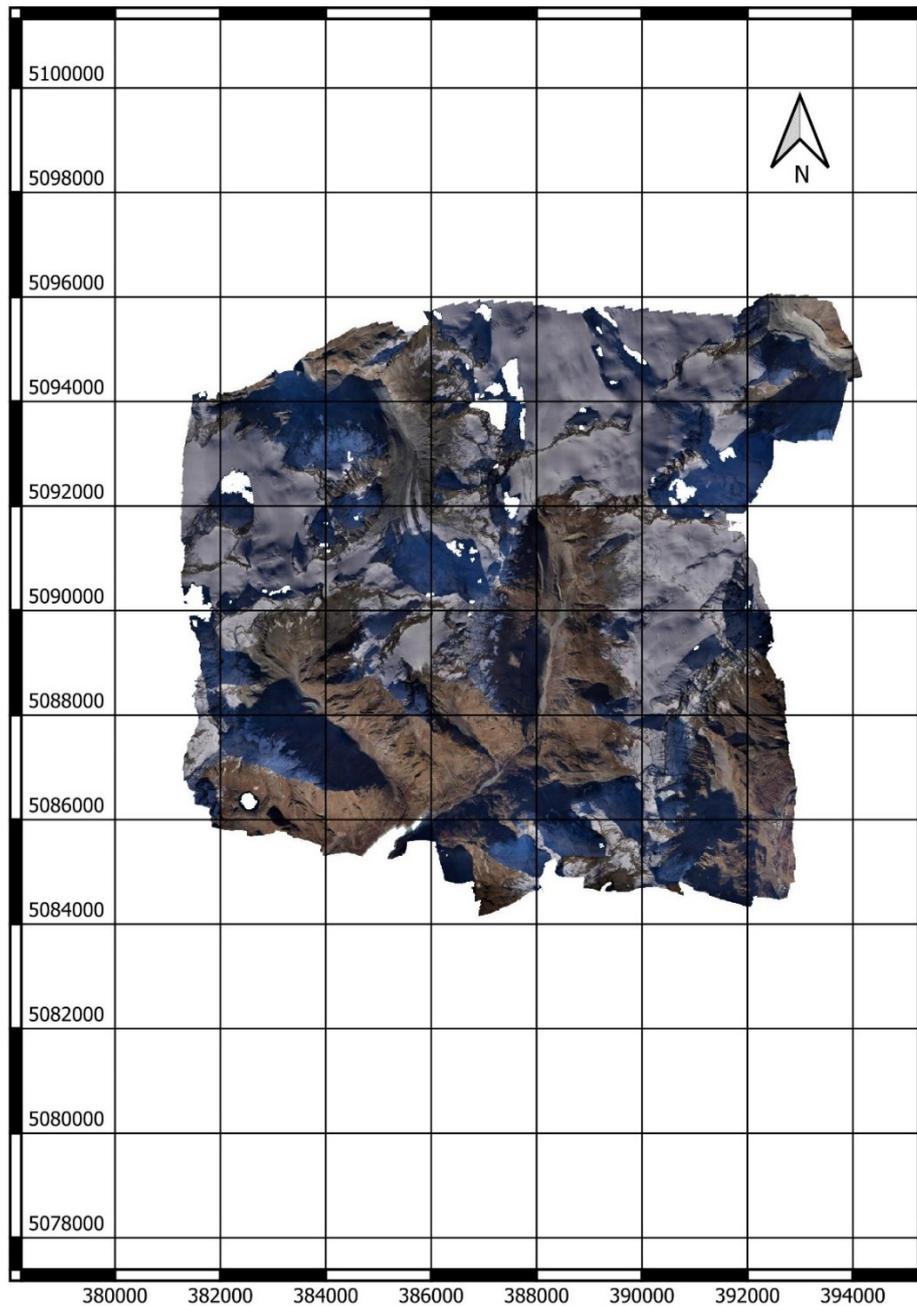


Figura 75: Ortofoto volo 2024

Per valutare la bontà del risultato ottenuto è stata eseguita una prova di controllo verificando la posizione di tre punti, materializzati dagli spigoli di un nuovo bivacco, denominato S.A.S.S.O.¹², realizzato per il monitoraggio ambientale della Valpelline e che è stato progettato dal Team Shelters -

¹² S.A.S.S.O. : acronimo di Small Alpine Shelter for Scientific Observation.

Architectures for the Alps del Politecnico di Torino. L'installazione è avvenuta nei giorni precedenti il volo aereo dell'11 novembre 2024, perciò risulta visibile all'interno dei fotogrammi, ma i dati relativi alla posizione sono stati resi disponibili solamente dopo il processamento del blocco fotogrammetrico, per cui non è stato utilizzato come punto per l'orientamento, ma per effettuare una verifica in post-elaborazione. Le coordinate sono state rilevate con rilievo GNSS RTK e le monografie dei punti sono visibili nell'allegato 10.3.

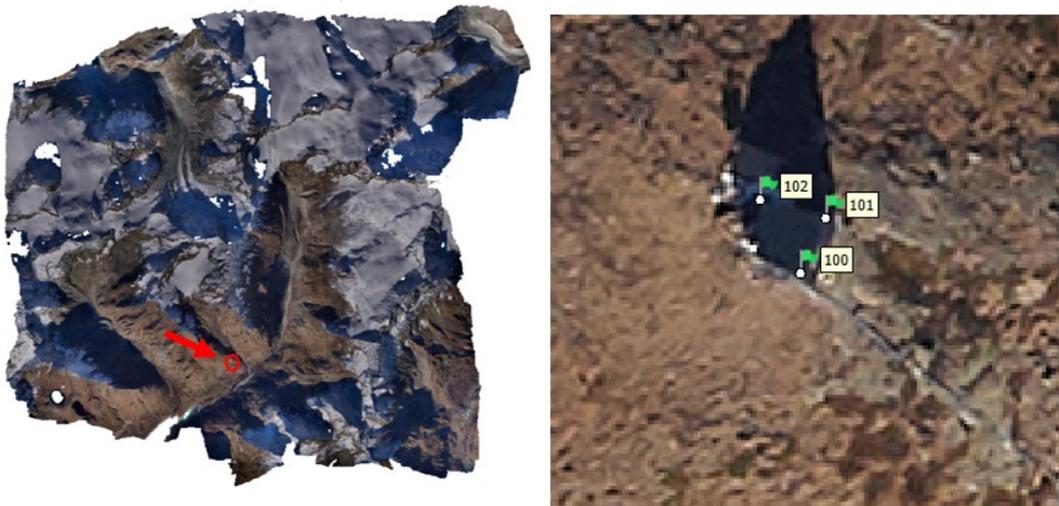


Figura 76: Bivacco S.A.S.S.O.

Collimando i tre spigoli è possibile ottenere la tripletta delle coordinate stimate sul modello, che confrontate con quelle determinate dal rilievo GNSS permettono di stabilire la precisione con cui è stato elaborato il modello ottenuto.

Punto	Coordinate misurate		
	Est [m]	Nord [m]	Quota [m]
100	386803,937	5087319,390	2425,487
101	386804,942	5087321,698	2425,477
102	386802,623	5087322,329	2424,413
	Coordinate stimate dal modello		
100	386803,926	5087319,511	2425,249
101	386804,824	5087321,526	2425,377
102	386802,616	5087322,229	2424,365
	Errore sul modello		
100	0,011	-0,121	0,238
101	0,118	0,172	0,100
102	0,007	0,100	0,048

Tabella 19: Coordinate bivacco SASSO misurate e stimate

Confrontando i risultati è possibile avere la conferma del buon modellamento ottenuto per l'area rilevata; infatti, gli errori si mantengono al di sotto dei 20 centimetri per quanto riguarda la parte planimetrica, mentre in altimetria si raggiungono i 24 centimetri di errore, dovuti anche alla difficoltà di collimare con precisione il punto all'interno del modello, dal momento che non è stato rilevato a terra, ma in corrispondenza dello spigolo superiore del tetto del bivacco.

6.3. *Analisi sui check point del volo 2024*

Introduzione

Nei capitoli precedenti i modelli tridimensionali del terreno sono stati ottenuti attraverso la tecnica della triangolazione aerea, che permette di ricostruire l'orientamento in un dato sistema di riferimento, note le coordinate di alcuni punti a terra.

In ambienti difficilmente accessibili come quello in esame, dove posizionare GCP in quota risulta spesso complesso, oltre che per le difficoltà di accesso, anche per quelle relative alla determinazione della posizione, spesso i GCP a disposizione non sono numerosi e soprattutto non omogeneamente distribuiti nel modello.

In questo paragrafo si vuole quindi esaminare l'apporto, in termini di precisione, dei diversi marker a terra utilizzati per l'orientamento del modello al fine di determinare quali siano di maggiore importanza per ottenere un modello tridimensionale del terreno. Riprocessando più volte il modello con diverse configurazioni di GCP, sarà infatti possibile analizzare come l'errore di posizionamento cambi in funzione dei punti utilizzati.

6.3.1. *Definizione delle configurazioni dei GCP e check point*

Sono state definite tre diverse configurazioni di GCP, al fine di analizzare l'apporto di ciascuna al modello finale:

- Configurazione 1: sono stati rimossi i cinque marker rilevati durante la campagna di misura 2024 e il marker Ponte_piana determinato dall'ARPA;
- Configurazione 2: sono stati rimossi metà dei marker di bordo presenti nelle vicinanze di Cervinia;

- Configurazione 3: sono stati rimossi, in modo uniforme, metà dei marker su tutto il modello.

Per ogni configurazione è stato processato il modello, definendo lo scarto ai minimi quadrati sui GCP utilizzati, mentre i punti non adoperati per l'orientamento sono stati utilizzati come check point, così da analizzare l'andamento dello scarto, confrontandolo con la soluzione generale ottenuta.

Soluzione generale, stima scarti ai minimi quadrati sui GCP (vedi paragrafo 6.1.2 tabella 18) con densità dei GCP ottenuta di 1 marker ogni 5,26 km²:

Configurazione iniziale		$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
Diatl_46	fisso	0,057	0,034	0,023	0,039
Diatl_48	fisso	0,212	-0,058	-0,102	-0,176
Bivacco Tete de Roeses	fisso	0,132	0,032	0,059	0,113
Rifugio Aosta	fisso	0,023	-0,013	-0,019	0,001
Rifugio Nacamuli	fisso	0,034	0,023	0,024	0,006
Florio1	fisso	0,174	-0,028	-0,034	0,169
Florio2	fisso	0,141	-0,049	0,011	0,132
Florio3	fisso	0,154	0,059	-0,113	-0,087
Florio4	fisso	0,146	0,107	-0,027	-0,096
salesiani	fisso	0,137	-0,111	-0,071	-0,037
vecchiamalga1	fisso	0,183	0,183	0,010	0,001
bobbaspigolosx	fisso	0,184	-0,044	0,100	-0,147
museobayettes	fisso	0,142	0,008	-0,009	0,141
museobayettes2	fisso	0,180	-0,156	0,089	-0,016
museobayettes3	fisso	0,094	0,073	-0,038	-0,045
DIATI_20	fisso	0,192	-0,123	-0,029	-0,145
DIATI_58	fisso	0,155	0,049	0,140	0,043
DIATI_57	fisso	0,083	0,070	-0,014	0,043
Ponte_piana	fisso	0,081	0,044	0,022	0,064
DIATI_66	fisso	0,063	-0,009	0,031	0,054
DIATI_98	fisso	0,223	-0,184	-0,121	-0,033
DIATI_56	fisso	0,067	0,057	0,016	0,029
Diatl_18	fisso	0,080	0,034	0,049	-0,053
	max	0,223	0,183	0,140	0,169
	min	0,023	-0,184	-0,121	-0,176
	media	0,128	0,000	0,000	0,000
	Dev. Standard	0,057	0,085	0,064	0,091

Tabella 20: Configurazione generale marker – scarti GCP volo 2024

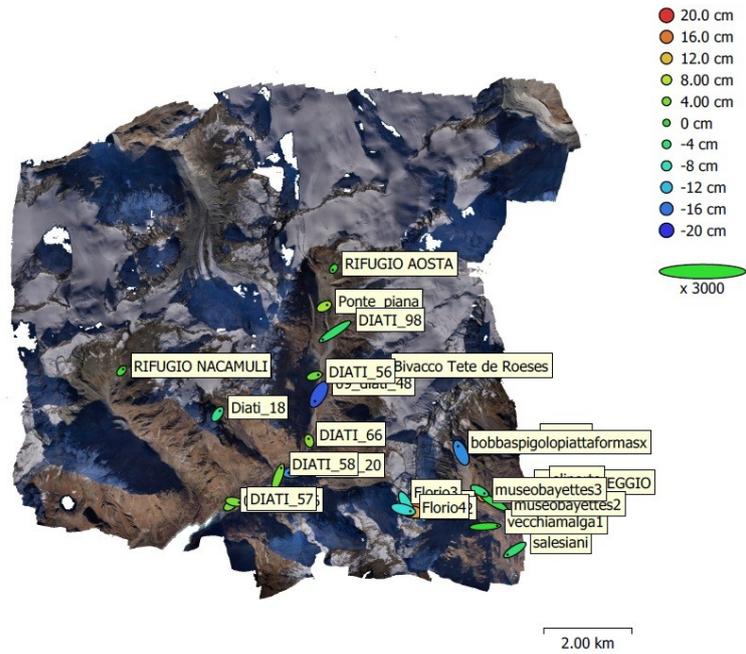


Figura 77: Configurazione iniziale ed ellissi d'errore

Configurazione 1

In questa prima analisi sono stati rimossi i marker denominati Diati_56, Diati_57, Diati_58, Diati_66, Diati_98 e Ponte_piana, al fine di stabilire l'apporto dato al rilievo dalla campagna di misura svolta a fine estate 2024. La densità di GCP ottenuta è di 1 marker ogni 7,12 km²

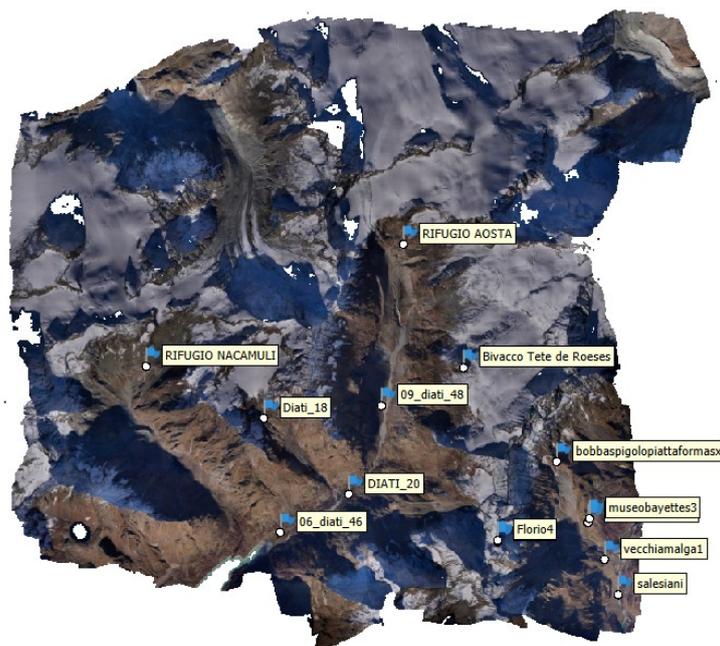


Figura 78: Schema configurazione 1

Configurazione 1		$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
DIATI_46	Fisso	0,099	0,067	0,048	0,056
DIATI_48	Fisso	0,154	-0,052	-0,095	-0,109
Bivacco Tete de Roeses	Fisso	0,141	0,046	0,069	0,115
Rifugio Aosta	Fisso	0,037	-0,023	-0,019	0,021
Rifugio Nacamuli	Fisso	0,022	0,018	0,008	0,009
Florio1	Fisso	0,166	-0,014	-0,043	0,160
Florio2	Fisso	0,129	-0,035	0,003	0,124
Florio3	Fisso	0,169	0,073	-0,120	-0,094
Florio4	Fisso	0,160	0,120	-0,033	-0,100
salesiani	Fisso	0,144	-0,126	-0,052	-0,045
vecchiamalga1	Fisso	0,166	0,164	0,026	0,010
bobbaspigolosx	Fisso	0,195	-0,044	0,109	-0,156
museobayettes	Fisso	0,146	-0,011	-0,002	0,146
museobayettes2	Fisso	0,197	-0,172	0,096	0,009
museobayettes3	Fisso	0,070	0,054	-0,036	-0,025
DIATI_20	Fisso	0,131	-0,104	-0,005	-0,079
DIATI_58	check point	0,251	0,071	0,175	0,165
DIATI_57	check point	0,164	0,111	0,019	0,119
Ponte_piana	check point	0,195	0,032	0,016	0,192
DIATI_66	check point	0,212	0,001	0,049	0,206
DIATI_98	check point	0,259	-0,209	-0,134	0,073
DIATI_56	check point	0,272	0,080	0,023	0,259
DIATI_18	Fisso	0,071	0,041	0,043	-0,040
Statistica sui check point	max	0,272	0,111	0,175	0,259
	min	0,164	-0,209	-0,134	0,073
	media	0,226	0,014	0,025	0,169
	dev. Standard	0,038	0,106	0,090	0,060

Tabella 21: Valori degli scarti configurazione 1

Analizzando i risultati ottenuti è possibile osservare sui check point un valore totale medio di 22 centimetri, con una deviazione standard di 4 cm, mentre se analizziamo nel dettaglio i valori planimetrici ed altimetrici, si riscontra che planimetricamente il modello funziona molto bene, con invece uno scarto maggiore in altimetria. In generale è possibile dedurre che l'uso dei nuovi marker posizionati lungo la valle non genera un apporto rilevante, ed una loro eventuale non considerazione in fase di modellazione comporta un

errore accettabile, con un ordine di grandezza simile a quello ottenuto nella configurazione completa.

Configurazione 2

Al fine di monitorare l'effetto dei GCP di bordo, nella seconda configurazione sono stati disabilitati sei marker presenti nelle vicinanze di Cervinia (zona identificabile dal cerchio rosso nella Figura 79): Salesiani, Vecchia_malga_1, Bobba_spigolo_sx, Museo_bayettes, Museo_bayettes_2 e Museo_bayettes_3. In questa configurazione il modello risulta quindi fortemente appoggiato nella fascia centrale, mentre le due zone laterali sono libere. La densità di GCP ottenuta è di 1 marker ogni 7,12 km²

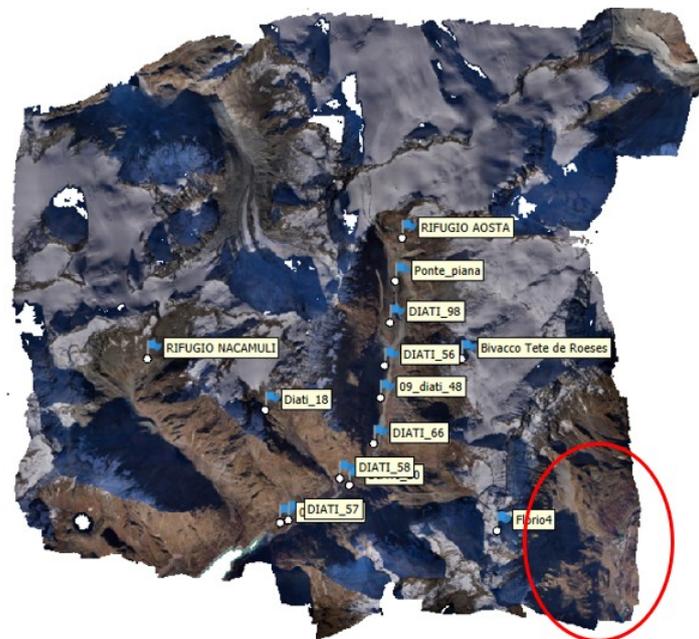


Figura 79: Schema configurazione 2

Configurazione 2		$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
DIATI_46	Fisso	0,049	0,031	0,025	0,029
DIATI_48	Fisso	0,214	-0,072	-0,102	-0,173
Bivacco Tete de Roeses	Fisso	0,111	0,050	0,063	0,077
Rifugio Aosta	Fisso	0,025	-0,003	-0,016	-0,019
Rifugio Nacamuli	Fisso	0,028	0,015	0,023	0,009
Florio1	Fisso	0,148	-0,023	-0,016	0,146
Florio2	Fisso	0,123	-0,045	0,030	0,110
Florio3	Fisso	0,156	0,064	-0,093	-0,107
Florio4	Fisso	0,158	0,112	-0,005	-0,111
salesiani	Check point	0,746	-0,554	0,108	-0,487
vecchiamalga1	Check point	0,471	-0,091	0,147	-0,439
bobbaspigolosx	Check point	0,593	-0,160	0,115	-0,559
museobayettes	Check point	0,893	-0,433	0,005	0,781
museobayettes2	Check point	0,514	-0,488	0,146	-0,063
museobayettes3	Check point	0,351	-0,178	-0,005	-0,302
DIATI_20	Fisso	0,192	-0,137	-0,028	-0,132
DIATI_58	Fisso	0,155	0,038	0,141	0,052
DIATI_57	Fisso	0,075	0,066	-0,011	0,035
Ponte_piana	Fisso	0,077	0,043	0,020	0,060
DIATI_66	Fisso	0,075	-0,024	0,031	0,064
DIATI_98	Fisso	0,230	-0,192	-0,122	-0,031
DIATI_56	Fisso	0,058	0,045	0,016	0,032
DIATI_18	Fisso	0,068	0,032	0,045	-0,039
Statistica sui check point	max	0,893	-0,091	0,147	0,781
	min	0,351	-0,554	-0,005	-0,559
	media	0,594	-0,317	0,086	-0,178
	dev. Standard	0,179	0,180	0,063	0,458

Figura 80: Valori di scarto configurazione 2

Analizzando questo secondo caso è evidente come, rispetto al caso precedente, gli scarti totali sui check point siano maggiori. Infatti, il valore medio è di 59 centimetri, con una deviazione standard di 18 centimetri. In aggiunta, un'analisi differenziata sui valori planimetrici ed altimetrici rivela che in questa configurazione lo scarto è elevato in entrambi i casi. Si può quindi affermare che i GCP di bordo siano molto importanti per vincolare il modello ed ottenere un risultato più aderente al terreno.

Configurazione 3

Nell'ultima configurazione è stata analizzata l'utilità o meno di un numero elevato di GCP a terra per l'orientamento, diminuendo da 23 a 11 i punti utilizzati, lasciando i marker impiegati distribuiti in modo uniforme su tutto il modello. La densità di GCP ottenuta è di 1 marker ogni 11 km²

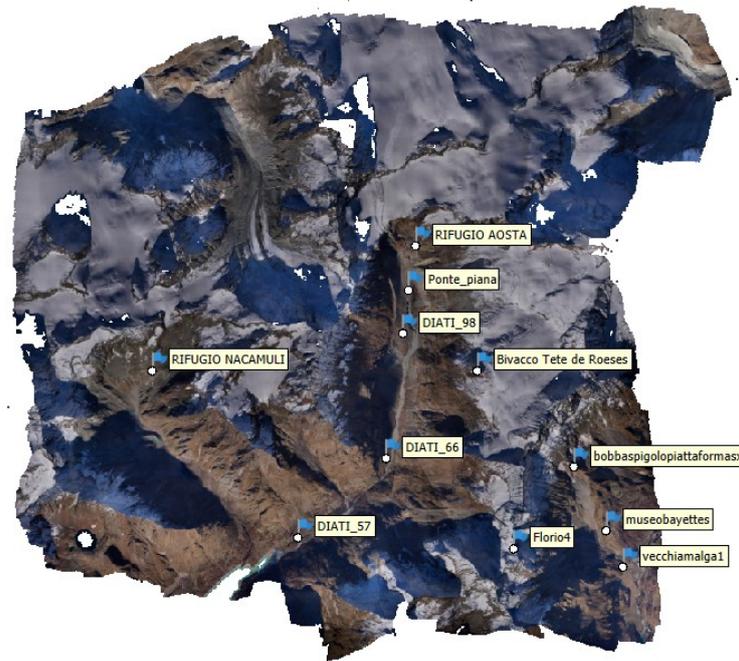


Figura 81: Schema configurazione 3

Configurazione 3		$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
DIATI_46	Check point	0,047	0,007	0,044	0,016
DIATI_48	Check point	0,521	-0,043	-0,107	-0,508
Bivacco Tete de Roeses	Fisso	0,160	0,048	0,075	0,133
Rifugio Aosta	Fisso	0,008	-0,004	-0,003	-0,007
Rifugio Nacamuli	Fisso	0,059	0,042	0,041	0,000
Florio1	Check point	0,603	-0,068	-0,074	0,594
Florio2	Check point	0,548	-0,097	-0,025	0,538
Florio3	Check point	0,169	0,037	-0,161	0,034
Florio4	Fisso	0,121	0,084	-0,080	-0,032
Salesiani	Check point	0,410	-0,355	-0,103	-0,176
vecchiamalga1	Fisso	0,059	0,050	-0,011	-0,028
bobbaspigolosx	Fisso	0,164	-0,070	0,071	-0,131
museobayettes	Fisso	0,161	-0,072	-0,050	0,135

museobayettes2	Check point	0,331	-0,302	0,046	0,127
museobayettes3	Check point	0,147	0,007	-0,102	-0,105
DIATI_20	Check point	0,382	-0,153	-0,050	-0,347
DIATI_58	Check point	0,156	0,029	0,137	-0,069
DIATI_57	Fisso	0,040	0,039	0,000	0,011
Ponte_piana	Fisso	0,080	0,061	0,039	0,034
DIATI_66	Fisso	0,039	-0,011	0,018	-0,032
DIATI_98	Fisso	0,211	-0,167	-0,099	-0,083
DIATI_56	Check point	0,113	0,102	0,041	-0,028
DIATI_18	Check point	0,231	0,043	0,103	-0,202
Statistica sui check point	max	0,603	0,102	0,137	0,594
	min	0,047	-0,355	-0,161	-0,508
	media	0,305	-0,066	-0,021	-0,010
	dev. Standard	0,179	0,135	0,090	0,306

Tabella 22: Valori di scarto configurazione 3

In questo caso i valori di scarto sui check point seguono un andamento simile sia in planimetria che altimetria. In particolare, occorre far attenzione che seppur il valore medio risulti basso, la deviazione standard assume valore più elevato, soprattutto in altimetria.

6.3.2. Considerazioni finali

Dall'analisi effettuata è possibile stabilire alcune considerazioni in merito a quali marker siano maggiormente utili per ottenere un buon modello, limitando gli errori sui punti adottati come check point. In particolare, è possibile notare come i nuovi marker misurati nella campagna 2024 non portino ad un aumento considerevole della qualità della soluzione, mentre al contrario risultano fondamentali per una buona precisione i GCP situati nelle zone di bordo, al fine di limitare la deriva del modello. Infine, dalla terza configurazione è possibile dedurre che si può ottenere un buon risultato con una distribuzione dei GCP uniforme, anche non troppo fitta. Infatti con una densità di 11 km² per marker (configurazione 3) si ottiene un risultato confrontabile con quello ottenuto con una densità di 5,26 km² per marker (configurazione originale.)

In conclusione, quindi si può affermare che è preferibile, in una futura campagna di misura, raffittire i marker di bordo, soprattutto in quelle zone del rilievo in cui vi è una carenza, mentre risulta più superfluo un raffittimento dei GCP nella fascia centrale del modello.

7. Recupero set fotogrammetrico 2020 e miglioramento 2022

Il rilievo realizzato nell'anno 2020, già processato ed elaborato nello stesso anno, aveva portato ad un risultato non ottimale data la scarsa presenza di GCP a terra, che limitava la possibilità di modellare coerentemente con il terreno il blocco fotogrammetrico. Si è quindi sperimentata, in questo capitolo, una tecnica di recupero con lo scopo di migliorare il modello eseguito nel 2020 utilizzando informazioni rese disponibili solamente negli anni successivi. In modo simile, seppur il risultato ottenuto nel capitolo 5 fosse già buono, verrà rivisto il modello 2022, aggiungendo alcuni punti di appoggio che sono stati materializzati dopo l'esecuzione del volo.

Tecniche di gestione utilizzate

Come riportato nel paragrafo 3.1 ad oggi in Valpeltine sono disponibili numerosi GCP a terra, che sono stati identificati in modo diverso, sia con elementi naturali o artificiali già presenti in loco, sia con l'apposizione di marker a terra. Data la differente identificazione dei punti sono state utilizzate due diverse tecniche di gestione dei GCP all'interno del modello. Per i punti che erano stati identificati, successivamente alla realizzazione del volo, al di sopra di elementi presenti sul territorio, la collimazione è potuta avvenire direttamente all'interno dei fotogrammi originali poiché gli elementi misurati erano già presenti, seppur la loro posizione sia stata determinata in un secondo momento. Differente invece la procedura utilizzata nel caso di marker posizionati successivamente alla realizzazione del volo, per cui non erano visibili all'interno dei fotogrammi. Si è resa necessaria la co-registrazione di altri fotogrammi in cui questi punti fossero visibili in modo tale

da renderli disponibili anche nel modello 2020 e 2022. La procedura esatta di esecuzione è descritta nel paragrafo che segue.

7.1. Gestione del modello fotogrammetrico anno 2020

L'analisi del volo fotogrammetrico realizzato nell'anno 2020 è stata eseguita con il software Metashape seguendo il processo di elaborazione descritto nel paragrafo 4.1. Come già accennato nel paragrafo precedente, al fine di recuperare la posizione di sei nuovi marker posizionati quattro anni dopo aver effettuato il volo è stato necessario sperimentare una tecnica di co-registrazione di fotogrammi provenienti da un altro set fotogrammetrico.

Creazione del set fotogrammetrico di appoggio

Il primo passo è stato l'identificazione all'interno delle immagini del volo 2024, dei fotogrammi in cui ricadessero i marker di interesse, cioè i punti denominati DIATI_56, DIATI_57, DIATI_58, DIATI_66, DIATI_98 e Ponte_piana. Per ciascuno sono stati individuati dagli 8 ai 15 fotogrammi in cui fossero ben visibili e riconoscibili:

Nome GCP	Numero fotogrammi
DIATI_56	13
DIATI_57	14
DIATI_58	12
DIATI_66	8
DIATI_98	11
Ponte_piana	15

Tabella 23: Numero fotogrammi per marker

Si è quindi proceduto a determinare, per i fotogrammi individuati, i valori di posizione ed assetto delle camere. Nel dettaglio, dal file dell'elaborazione del set fotogrammetrico 2024 (capitolo 6) è possibile estrarre i valori stimati di

posizione ed assetto per i fotogrammi di interesse e per essi ottenere anche i valori di scarto quadratico medio con cui sono stati determinati.

I valori così ottenuti sono stati organizzati all'interno di un file .txt in tredici colonne in cui le prime sette contengono oltre al nome identificativo della foto, i valori di posizione (Est, Nord e quota) e di assetto (Yaw, Pitch, Roll), mentre le altre sei contengono i valori di deviazione standard ottenuti da Metashape, ed utilizzati come valore di accuracy del risultato ottenuto. È qui riportato un estratto del file, quello completo è visibile nell'allegato 10.6:

#Label	X_est	Y_nord	Z_quota	Yaw	Pitch	Roll
P0086168.jpg	388831.048	5089948.184	4198.852	178.649	1.614	-0.451
P0086169.jpg	388825.846	5089712.191	4202.784	178.481	2.995	-0.729
P0086170.jpg	388822.276	5089475.342	4205.853	175.597	-1.323	0.117
P0086171.jpg	388829.123	5089239.826	4199.894	174.474	0.432	-0.128
.....

#Label	X_sqm	Y_sqm	Z_sqm	Yaw_sqm	Pitch_sqm	Roll_sqm
P0086168.jpg	0.109	0.103	0.094	0.012	0.019	0.020
P0086169.jpg	0.106	0.098	0.094	0.012	0.018	0.019
P0086170.jpg	0.103	0.095	0.094	0.012	0.018	0.019
P0086171.jpg	0.099	0.093	0.094	0.012	0.017	0.018
.....

Tabella 24: Estratto tabelle parametri calcolati centri di presa

Processamento del modello

È stato quindi riaperto il progetto contenente il modello elaborato nell'anno 2020 e all'interno sono stati caricati i fotogrammi precedentemente individuati, che contenessero i marker di interesse. Cliccando sul tasto Import Reference appare la schermata in cui è possibile caricare all'interno del file i parametri di orientamento e assetto delle camere. Nel dettaglio si è proceduto ad inserire il file precedentemente preparato, utilizzando il valore di scarto quadratico medio come accuracy del parametro corrispondente (Figura 82). Potendo caricare tali informazioni si facilita e migliora l'allineamento dei nuovi fotogrammi su quelli vecchi, considerando anche che tra i due voli fotogrammetrici sono intercorsi quattro anni.

Import CSV

Coordinate System: RDN2008 / UTM zone 32N (N-E) (EPSG::6707)

Rotation angles: Yaw, Pitch, Roll

Ignore labels Threshold (m): 0.1

Delimiter: Tab Semicolon Comma Space Other:

Combine consecutive delimiters

Columns:

Label: 1	<input checked="" type="checkbox"/> Accuracy	<input checked="" type="checkbox"/> Rotation	<input checked="" type="checkbox"/> Accuracy
Easting: 2	8	Yaw: 5	11
Northing: 3	9	Pitch: 6	12
Altitude: 4	10	Roll: 7	13
		Enabled flag: 10	

Start import at row: 2 Items: Cameras

First 20 lines preview:

	Label	Easting	Northing	Altitude	Yaw	Pitch	Roll
1	#Label	X_est	Y_est	Z_est	Yaw_est	Pitch_est	Roll_est
2	P0086168.jpg	388831.047804	5089948.183760	4198.852438	178.649267	1.614376	-0.000000
3	P0086169.jpg	388825.845790	5089712.191384	4202.784032	178.480517	2.994502	-0.000000
4	P0086170.jpg	388822.276452	5089475.342379	4205.852685	175.597119	-1.322528	0.000000
5	P0086171.jpg	388829.122894	5089239.825701	4199.893532	174.473599	0.432332	-0.000000

Figura 82: Importazione parametri camera

È stato quindi avviato l'allineamento automatico delle immagini, che in pochi minuti ha restituito il modello aggiornato, riuscendo ad allineare tutti i nuovi fotogrammi. A questo punto è necessario procedere con l'aggiornamento dell'orientamento del modello, aggiungendo ai GCP già identificati, sia i sei marker visibili su i fotogrammi 2024, sia sette GCP che erano stati rilevati in data successiva a quella di primo processamento del volo e che sono individuabili nelle foto originali 2020 poiché materializzati attraverso elementi già presenti: Rifugio_Aosta, Florio_2, Florio_4, Bivacco_tete_de_Roeses, Museo_bayettes, Museo_bayettes_2, Museo_bayettes_3.

Validazione dei risultati ottenuti

A questo punto, al fine di valutare se il risultato ottenuto fosse valido o meno, è stata analizzata la precisione ottenuta analizzando i valori di scarto sulle posizioni dei GCP e le differenze nella determinazione della posizione dei centri di presa.

Per valutare l'accuratezza con cui le nuove immagini sono state allineate su quelle vecchie è possibile analizzare l'errore, sia sulle coordinate che sugli angoli di assetto. Sono qui riportati, in forma tabellare, i parametri di minimo, massimo, media e scarto quadratico medio degli errori calcolati, ottenuti come differenza tra i valori imposti e i valori stimati da Metashape a seguito dell'allineamento:

	Errore totale [m]	Errore X [m]	Errore Y [m]	Errore [Z]	Errore totale [°]	Errore Yaw [°]	Errore Pitch [°]	Errore Roll [°]
Min	0,000	-0,009	-0,010	-0,022	0,022	-0,410	-0,173	-0,197
Max	0,030	0,018	0,018	0,007	0,487	0,235	0,101	0,181
Media	0,005	0,000	0,000	-0,001	0,129	-0,053	0,000	-0,009
Sqm	0,005	0,004	0,003	0,005	0,084	0,118	0,047	0,068

Tabella 25: statistica di errore posizione camera

È possibile osservare come l'allineamento sia riuscito in maniera precisa e con piccoli errori che planimetricamente si mantengono al disotto dei 5 centimetri, mentre angolarmente l'errore si aggira mediamente attorno al centesimo di grado, con qualche picco che sfiora qualche decimo di grado.

Una seconda analisi per validare la tecnica adottata è stata svolta sugli scarti ai minimi quadrati nella determinazione della posizione dei GCP a terra:

GCP	$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
01_GOLF	0,011	0,007	0,008	0,004
02_SOPRA_CHIESA	0,007	0,005	0,003	0,003
03_PARCHEGGIO	0,002	0,001	0,000	-0,002
04_ELIPORTO	0,012	0,005	0,011	0,002
05_SALESIANI	0,004	0,001	0,003	-0,002
06_diati_46	0,008	-0,002	-0,007	0,004
07_diati_20	0,007	-0,006	-0,002	0,001
08_diati_47	0,016	-0,012	0,010	-0,001
09_diati_48	0,039	-0,028	0,027	-0,006
10_diati_8	0,005	-0,001	0,000	-0,004
11_diati_19	0,019	0,013	-0,008	0,011
12_diati_10	0,014	-0,011	-0,008	0,003
13_diati_18	0,020	-0,017	-0,009	0,003
drone_1	0,030	-0,017	0,019	0,014
drone_2	0,040	-0,019	-0,035	-0,005

drone_3	0,019	0,013	-0,005	-0,012
drone_4	0,062	0,035	0,048	-0,015
Bivacco Tete de Roeses	0,010	-0,006	-0,001	0,007
RIFUGIO AOSTA	0,004	0,001	0,000	0,004
museobayettes	0,027	-0,003	-0,016	0,022
museobayettes2	0,047	-0,033	0,032	-0,011
museobayettes3	0,011	0,007	-0,008	-0,001
DIATI_58	0,007	-0,004	-0,003	0,004
DIATI_57	0,002	-0,001	-0,001	0,000
Ponte_piana	0,011	0,000	0,011	0,002
DIATI_66	0,022	0,014	0,014	0,009
DIATI_98	0,024	0,006	0,022	0,009
DIATI_56	0,078	0,034	-0,071	0,005
Florio2	0,016	-0,007	0,014	0,003
Florio4	0,014	-0,003	-0,007	0,012
morces	0,010	-0,005	-0,009	-0,001
bobbaspigolosx	0,121	0,111	-0,006	-0,049
bobbaspigolodx	0,080	-0,075	-0,024	0,013

Tabella 26: Scarti GCP modello 2020

GCP	$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
Min	0,002	-0,075	-0,071	-0,049
Max	0,121	0,111	0,048	0,022
Media	0,024	0,000	0,000	0,001
Sqm	0,026	0,027	0,020	0,012

Tabella 27: Parametri statistici scarti GCP modello 2020

GCP	$\Delta 3D$ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	ΔH [m]
Media	0,053	0,000	0,000	0,000
Sqm	0,066	0,034	0,074	0,025

Tabella 28: Parametri statistici prima della co-registrazione GCP 2020

Dall'analisi degli scarti stimati da Metashape si osserva come i valori ottenuti siano molto ridotti, limitandosi ad errori massimi di 12 centimetri in planimetria e persino inferiori in altimetria, dove non si superano i cinque centimetri di errore. Confrontando i valori di media e scarto quadratico medio prima e dopo la co-registrazione è possibile osservare come la precisione sui GCP venga mantenuta nello stesso ordine di grandezza, pur

aggiungendo altri GCP, riuscendo a rafforzare il numero di punti di appoggio a terra.

Considerazioni finali

In generale è possibile affermare che, nonostante i fotogrammi utilizzati siano stati realizzati a distanza di quattro anni, con la problematica di avere possibili incongruenze dovute ad un cambiamento dell'area monitorata, nonché siano registrati con luci ed ombre differenti, il software riesce ad allinearli con elevata precisione al di sopra del modello precedente, permettendo quindi il recupero e il miglioramento della modellazione nei confronti della superficie del terreno. Si può quindi validare la tecnica sperimentata di recupero e miglioramento di set fotogrammetrici esistenti, che consiste nella co-registrazione al di sopra di un modello già esistente di ulteriori fotogrammi provenienti da un diverso volo, svolto anche in anni differenti, contenenti informazioni utili a migliorare l'orientamento del modello.

Elaborazione del modello finale

Validato il risultato ottenuto si è proceduto con l'elaborazione del modello, rimuovendo dal file i fotogrammi 2024 che erano stati aggiunti per l'orientamento e calcolando successivamente la nuvola densa, il DSM e l'ortofoto. La rimozione dei fotogrammi aggiunti è necessaria al fine che quest'ultimi non interferiscano nella realizzazione dei prodotti cartografici, che devono essere riferiti alle condizioni originali dell'anno 2020.

Al termine è stato possibile estrarre:

- DSM con campionamento a 0.50m
- Ortofoto con dimensione del pixel di 0.50m

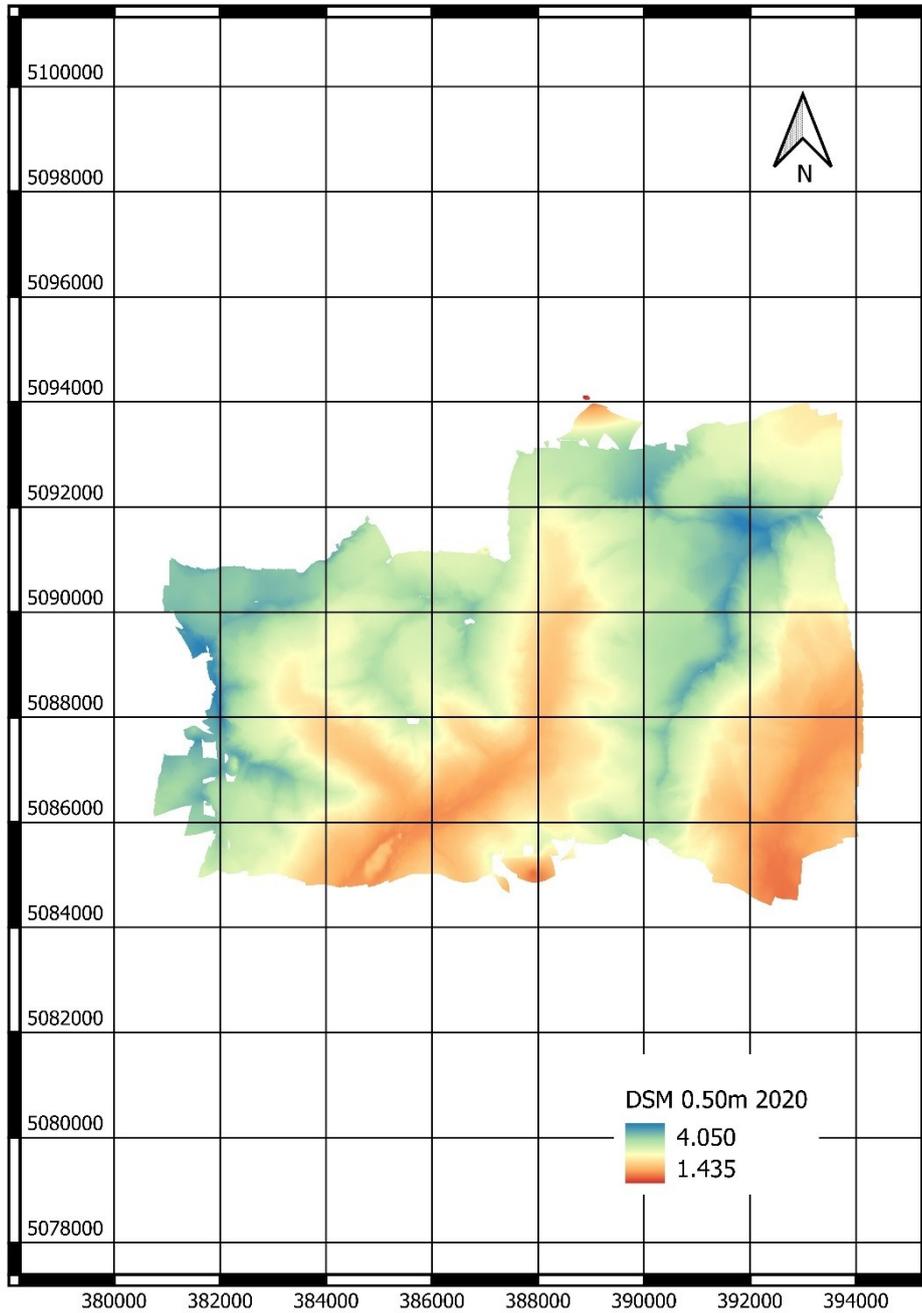


Figura 83: DSM 2020

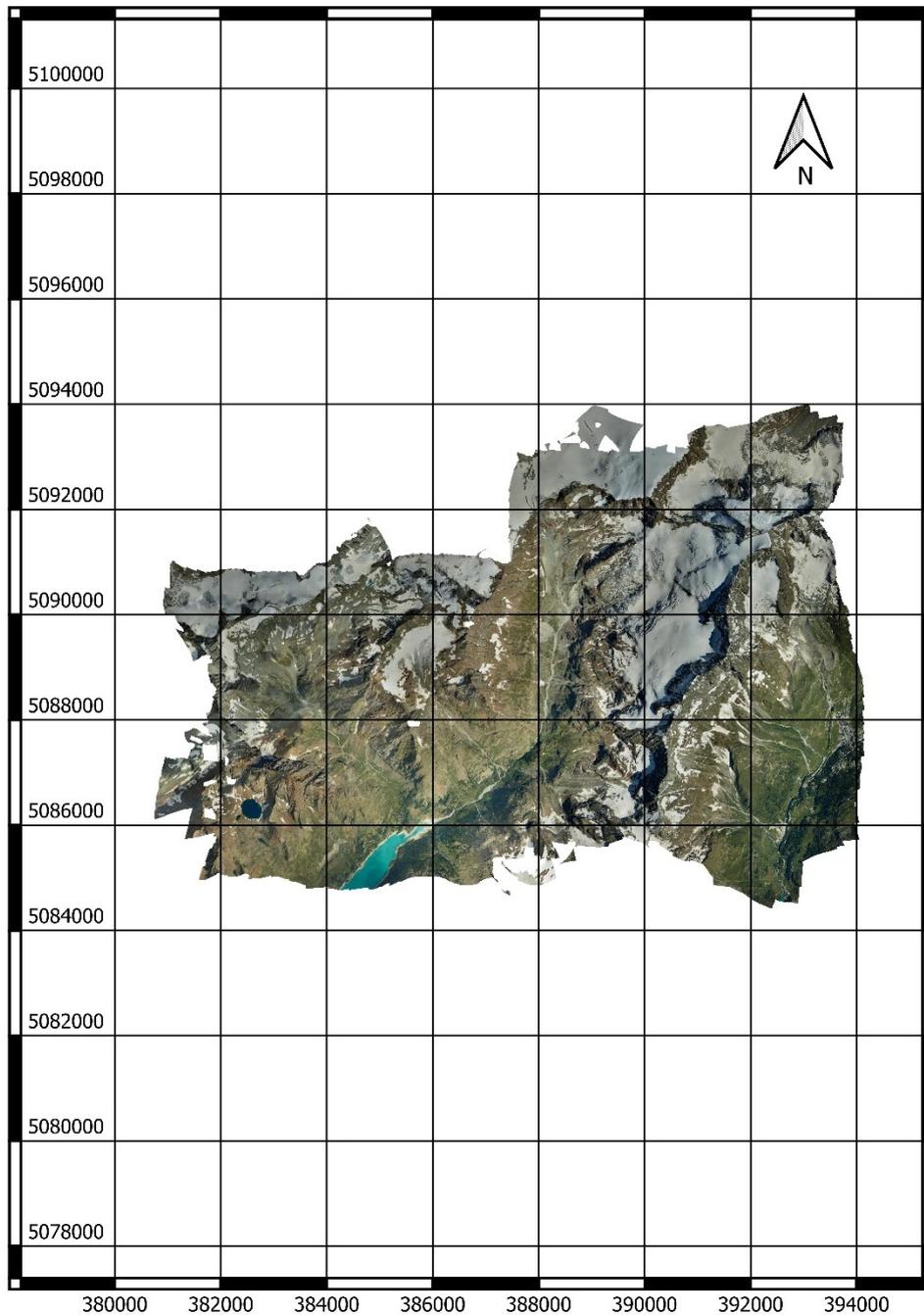


Figura 84: Ortofoto 2020

7.2. *Tecnica di co-registrazione nel modello* *2022*

Terminata la fase di gestione del modello 2020 e convalidata la tecnica utilizzata, si è sperimentata la stessa all'interno del modello 2022 già processato nel capitolo 5, al fine di aggiungere i marker rilevati nella campagna di misura realizzata a settembre 2024 (vedi pagina 27). Sono state aggiunte al modello le immagini identificate nel paragrafo precedente che contenessero i sei marker di interesse e i parametri dei centri di presa: posizione e assetto. Eseguito il nuovo allineamento sono stati collimati i sei nuovi marker. Nel dettaglio si è riusciti a collimare i cinque marker denominati Diati_56, Diati_57, Diati_58, Diati_66, Diati_98, ma non il marker Ponte_piana poiché genera un errore elevato all'interno del modello, dovuto probabilmente ad un non corretto allineamento al di sopra del modello esistente dei fotogrammi che lo riguardano. Terminata la fase di orientamento del modello sono stati rimossi i fotogrammi che erano stati aggiunti e sono stati calcolati il DSM e l'ortofoto definitivi.

Validazione dei risultati ottenuti

In modo analogo a quanto fatto nel paragrafo 7.1 è stato verificato il risultato ottenuto valutando l'errore commesso in fase di calcolo sulla determinazione della posizione dei centri di presa e dei GCP:

	Errore totale [m]	Errore X [m]	Errore Y [m]	Errore Z [m]	Errore totale [°]	Errore Yaw [°]	Errore Pitch [°]	Errore Roll [°]
Max	0,007	0,003	0,001	0,004	1,019	0,224	0,722	1,005
Min	0,000	-0,002	-0,001	-0,006	0,016	-0,251	-0,167	-0,299
Media	0,001	0,000	0,000	0,000	0,135	0,001	0,034	0,003
Sqm	0,001	0,001	0,000	0,002	0,195	0,086	0,127	0,178

Tabella 29: statistica di errore posizione camere 2022

L'esecuzione della tecnica di co-registrazione sul modello 2022 ha portato a dei buoni risultati in termini di precisioni ottenute; infatti, analizzando gli errori

registrati sul posizionamento dei centri di presa delle camere si nota un errore molto basso nella determinazione della posizione, mentre risulta leggermente più alto nei valori di assetto. L'analisi sugli errori ottenuti sui marker può essere svolta eseguendo un confronto sulle precisioni che si erano ottenute prima della co-registrazione delle immagini (capitolo 5) qui riportati:

GCP	Errore totale [m]	Errore Est [m]	Errore Nord [m]	Errore quota [m]
Media	0,131	-0,004	0,008	-0,004
Sqm	0,068	0,080	0,093	0,081

Tabella 30: Errori marker prima della co-registrazione delle immagini

GCP	Errore totale [m]	Errore Est [m]	Errore Nord [m]	Errore quota [m]
Media	0,114	-0,002	0,000	0,007
Sqm	0,051	0,070	0,090	0,051

Tabella 31: Statistica errore GCP 2024 dopo co-registrazione

Si può osservare che seppur i risultati ottenuti fossero già buoni vi è stato un leggero miglioramento, con la riduzione sia dei valori medi che degli scarti quadratici medi. Quindi, confermando quanto già ottenuto nel paragrafo precedente, si evince come il metodo sperimentato sia valido sia per recuperare set fotogrammetrici in cui vi erano pochi dati a disposizione, sia per migliorare la precisione di modelli fotogrammetrici già processati in modo corretto.

8. *Analisi del ghiacciaio Grandes Murailles e della morfologia della valle*

Terminate le procedure di analisi e gestione dei blocchi fotogrammetrici e ricavati i prodotti cartografici finali (DSM ed ortofoto), è possibile procedere all'analisi finale per determinare con un'analisi 4D l'evoluzione nel tempo delle condizioni del corpo glaciale delle Grandes Murailles e della morfologia della valle a seguito dell'evento alluvionale straordinario avvenuto all'inizio dell'estate 2024. In questo capitolo, dopo aver definito nella prima parte il livello di accuratezza attribuibile a ciascun prodotto cartografico elaborato, saranno determinati i valori di ablazione del ghiacciaio. In particolare, sarà determinata la variazione di spessore e il bilancio di massa del ghiacciaio Grandes Murailles tra gli anni 2022 e 2024. Sia la fase di valutazione della precisione dei DSM, sia l'analisi degli spessori del ghiacciaio sono stati svolti utilizzando il software QGIS.

8.1. *Validazione dei DSM*

Prima di procedere all'analisi dei DSM è necessario validarne la buona elaborazione determinando il livello di precisione con cui sono stati calcolati. Nel caso in esame la validazione è stata effettuata valutando la precisione ottenuta confrontando i valori dei DSM al di sopra di aree stabili, in cui il profilo definito dal DSM deve rimanere invariato anche se l'elaborazione riguarda anni differenti. Nel dettaglio è stata realizzata un'analisi di tipo puntuale individuando nell'ortofoto alcune aree che presentassero caratteristiche tali da poter essere considerate stabili, ricercando zone rocciose non soggette ad erosione e trasporto dei sedimenti. Dopo averle

individuare, su tali aree sono state eseguite delle sezioni utilizzando il software QGIS e sono stati analizzati i comportamenti dei DSM relativi ai tre anni di analisi.

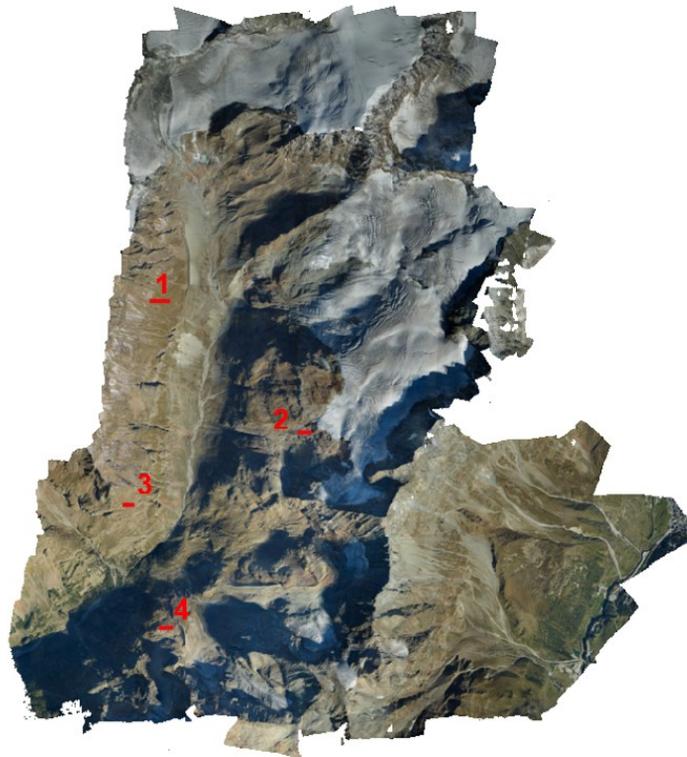


Figura 85: Individuazione sezioni su aree stabili

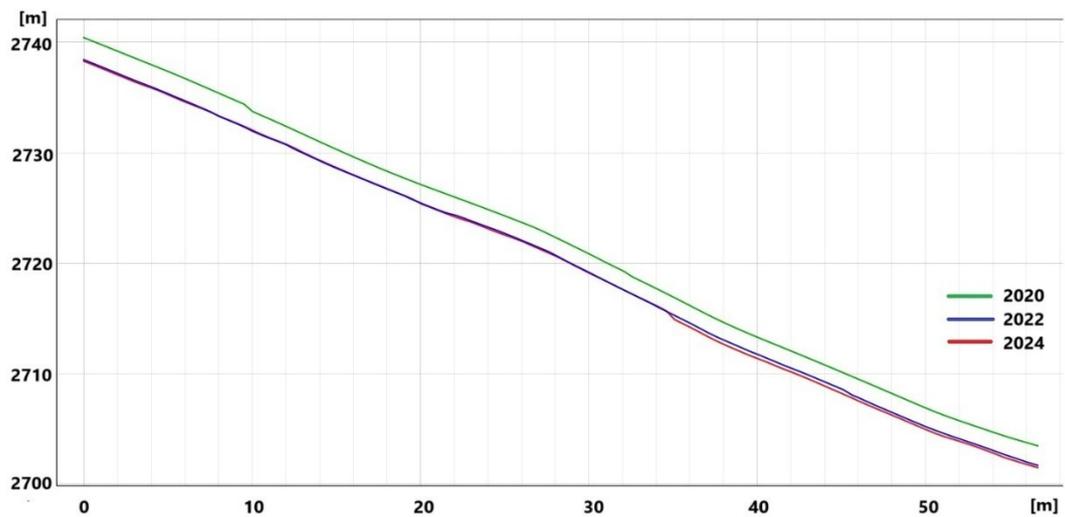


Figura 86: Sezione 1

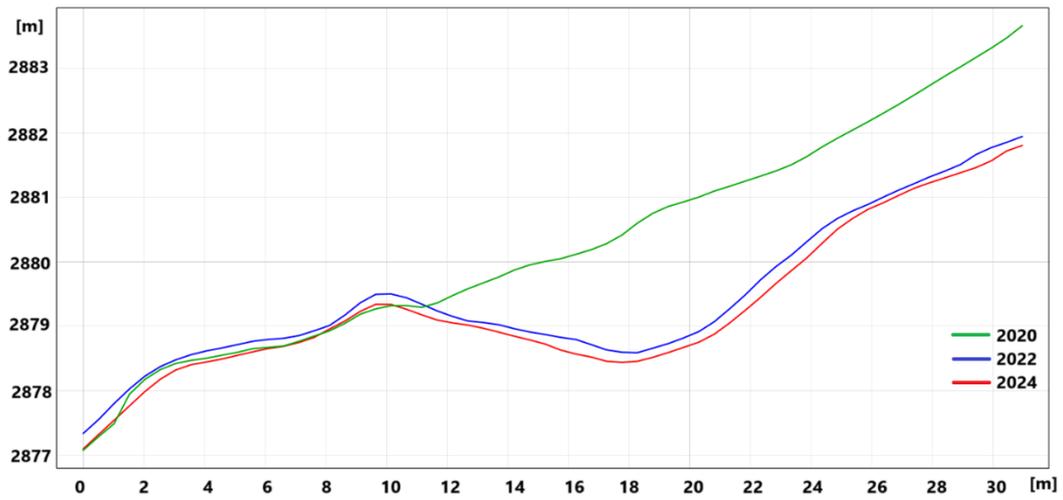


Figura 87: Sezione 2

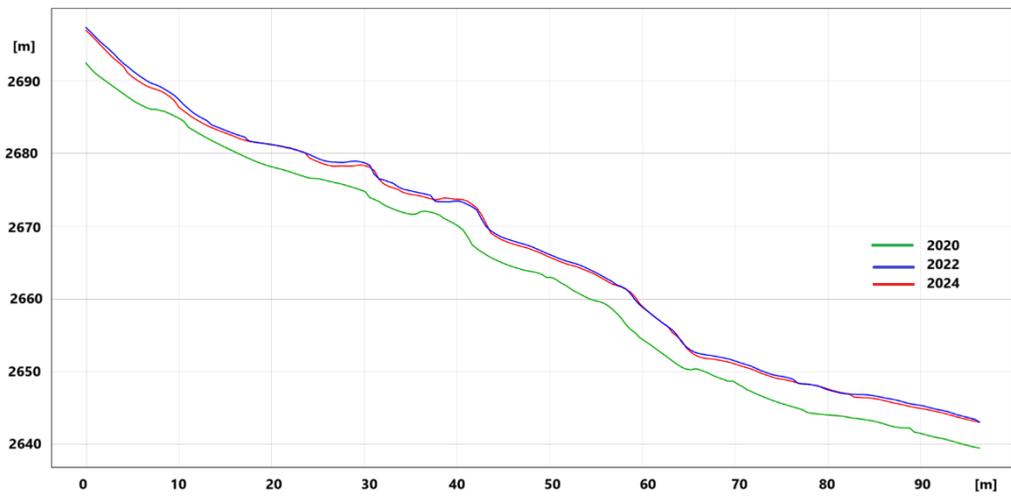


Figura 88: Sezione 3

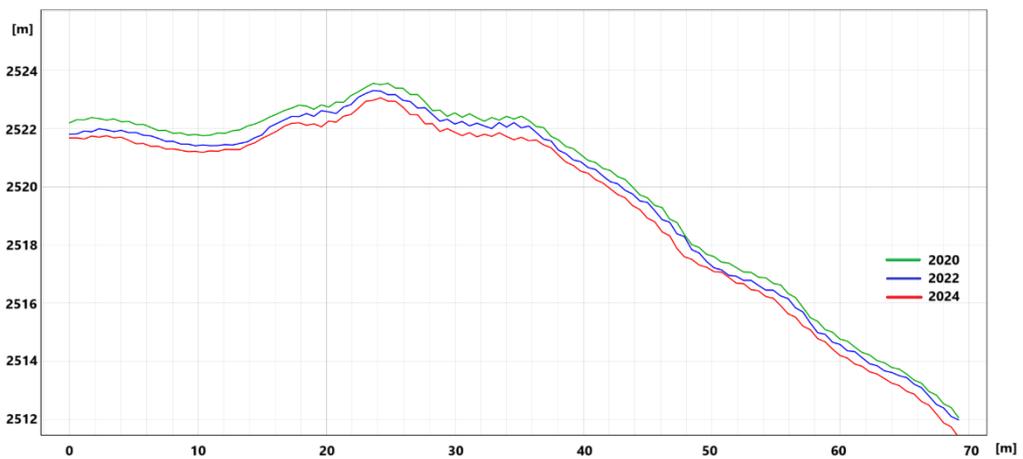


Figura 89: Sezione 4

Dall'analisi dei profili realizzati al di sopra di quattro diverse zone stabili, che per definizione dovrebbero rimanere invariate nel tempo, è possibile fare alcune valutazioni e considerazioni in merito ai DSM ottenuti. Una prima analisi tra i DSM 2022 e 2024 rivela una buona corrispondenza dei valori ottenuti, con una differenza valutabile nelle sezioni che si aggira mediamente attorno ai 20 centimetri, che corrisponde al valore di scarto quadratico medio dei GCP dei DSM che erano stati calcolati. Diverso invece il risultato ottenuto per il DSM 2020, che, se confrontato con gli altri due, presenta alcune evidenti differenze. In alcune zone, come nella sezione 4, ha un andamento simile agli altri due modelli con una differenza sistematica nell'ordine dei 20-30 centimetri. Nelle sezioni 1 e 3 presenta uno shift più elevato di circa un metro, mentre in altre zone, come visibile nella sezione 2 ha un andamento diverso rispetto ai modelli 2022 e 2024. Quindi, nonostante nel capitolo 7.1 i risultati ottenuti come precisione del modello indicassero che si fosse ottenuto un buon risultato finale, dal confronto con gli altri modelli del 2022 e del 2024 è possibile notare come ci siano dei problemi nella modellazione del territorio. Una possibile spiegazione a tale problema potrebbe essere data dal fatto che il rilievo 2020 è stato realizzato con tre voli diversi, che sono poi stati elaborati insieme in un unico blocco. L'unione di più voli potrebbe aver causato delle problematiche all'elaborazione dell'intero blocco fotogrammetrico, portando agli errori visibili nelle sezioni precedentemente descritte. A causa di questo errore e quindi di una non corretta modellazione del rilievo 2020 l'analisi dell'ablazione del ghiacciaio Des Grandes Murailles è stata condotta considerando i modelli 2022 e 2024.

8.2. Determinazione dell'ablazione del ghiacciaio Grandes Murailles 2022-2024

Verificato dal paragrafo precedente che i DSM relativi agli anni 2022 e 2024 hanno un livello di confidenza di circa 20-30 centimetri, si è proceduto alla valutazione della variazione di spessore del ghiacciaio Grandes Murailles. Nella valutazione occorre tener conto che il rilievo eseguito nel 2024 ha subito un ritardo nella realizzazione del volo, che è stato eseguito l'11 novembre, a seguito di una nevicata. Ciò comporta un errore nella determinazione dello spessore dei ghiacci poiché nel DSM è contenuto anche il valore di tale strato di neve. I valori ottenuti prospettano uno scenario mediamente migliore di quello reale, poiché lo spessore di ghiaccio reale del modello 2024 è inferiore a quello rappresentato nel modello. Per lo stesso motivo non è stato possibile definire l'arretramento del ghiacciaio poiché a causa della presenza della neve non è possibile definire il limite dei ghiacci del modello 2024.

La prima analisi è stata fatta sull'intero corpo del ghiacciaio calcolando con il software QGIS le differenze tra il $DSM_{2024} - DSM_{2022}$ in modo tale da definirne la variazione dello spessore:

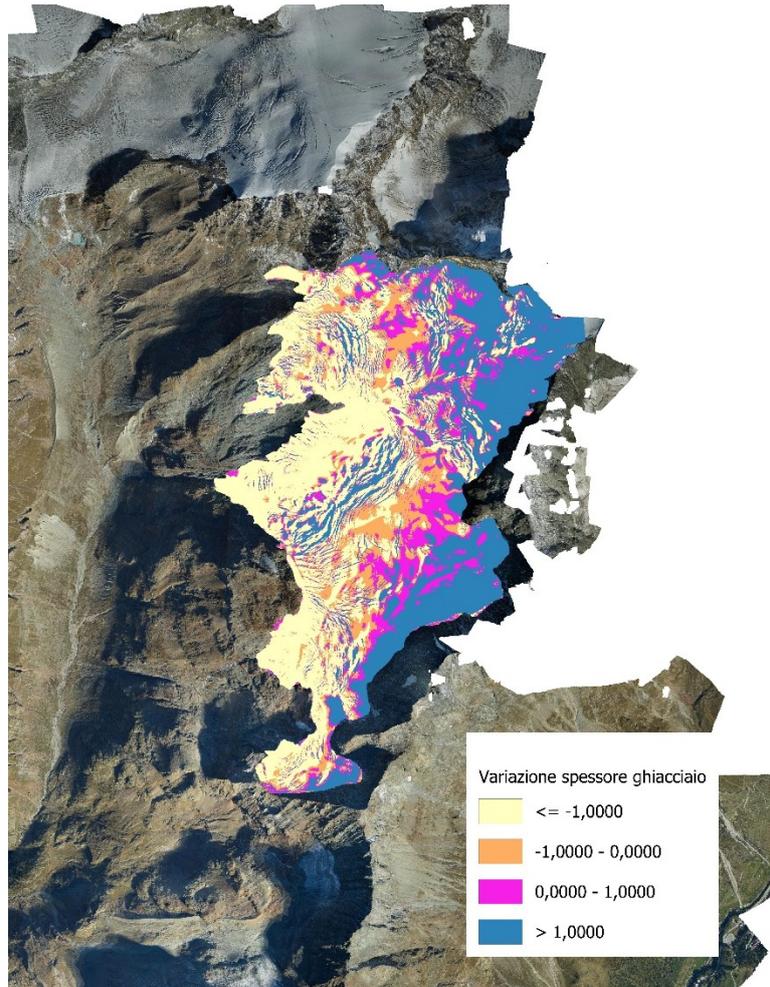


Figura 90: Variazione spessore ghiacciaio 2024-2022

È possibile osservare da questa raffigurazione come vi sia un comportamento differente a seconda delle zone del ghiacciaio analizzate. Le aree ad una quota minore (che si trovano a sinistra) hanno subito una variazione negativa dello spessore del ghiaccio, con un delta superiore al metro di spessore (colore giallo). Spostandoci verso la cima del ghiacciaio (a destra) invece si riscontra un comportamento diverso, con un aumento dello spessore del ghiaccio, anche maggiore di un metro (blu). Occorre comunque considerare il grado di incertezza di tali misure, dovuto alla nevicata avvenuta prima del volo 2024.

Sono state quindi analizzate quattro sezioni per definire la variazione locale di spessore:

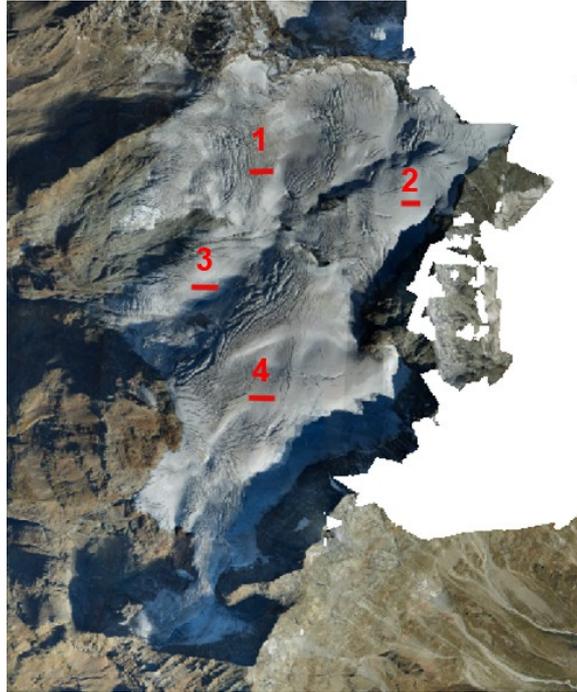


Figura 91: Ghiacciaio Grandes Murailles - identificazione delle sezioni

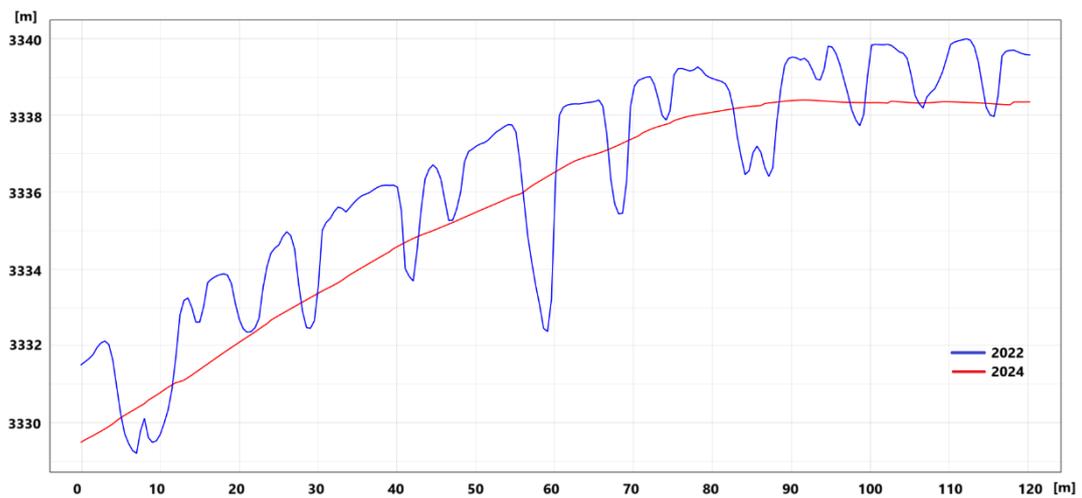


Figura 92: Sezione 1 - Zona crepacci – Zona di fusione

In questa prima sezione, realizzata al di sopra di una zona di crepacci, è possibile osservare l'effetto della nevicata avvenuta prima del sorvolo effettuato nel 2024. L'andamento del modello 2024 è lineare, senza la presenta apparente di nessun crepaccio, poiché riempiti dalla neve.

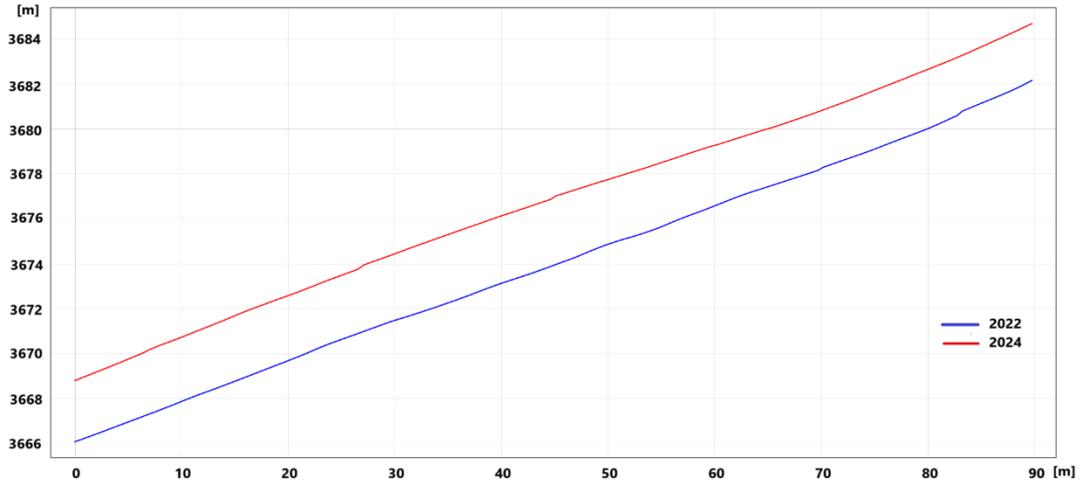


Figura 93: Sezione 2 – zona di accumulo

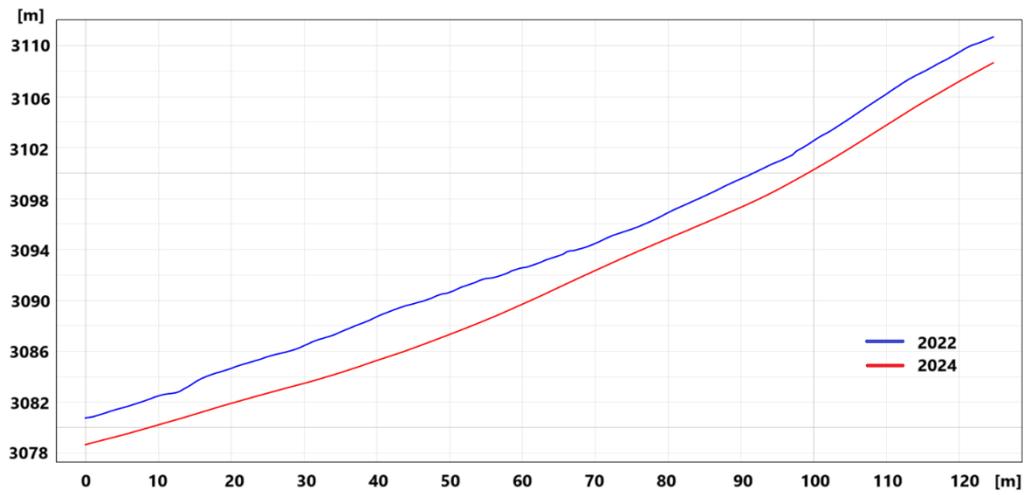


Figura 94: Sezione 3 – zona di fusione

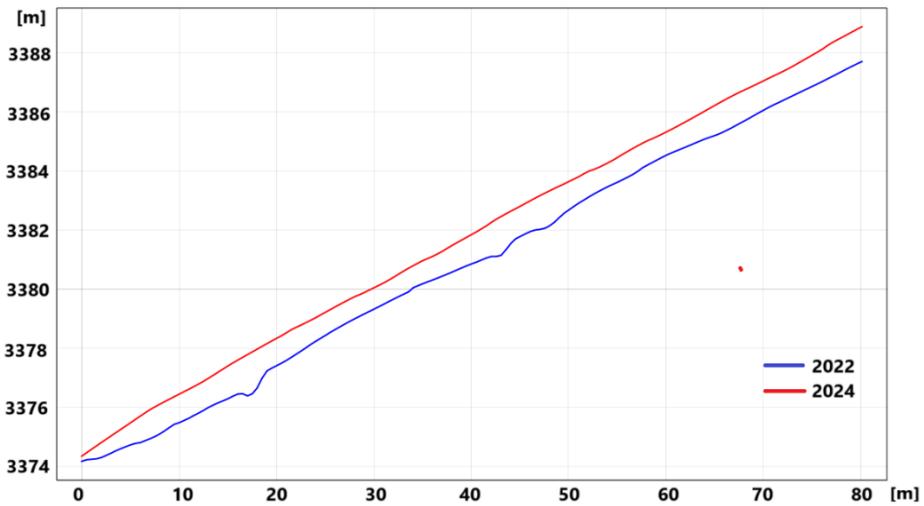


Figura 95: Sezione 4 zona di accumulo

Dall'analisi delle sezioni è possibile osservare nel dettaglio il comportamento delle diverse zone. Nella sezione 2 e 4 sono visibili due zone in cui lo spessore del ghiacciaio è aumentato passando dal 2022 al 2024. L'aumento è variabile da qualche decina di centimetro a spessori dell'ordine di un metro. Le sezioni 1 e 3 rappresentano una zona di fusione con una diminuzione media dello spessore del ghiacciaio di 2-2,50 metri. È quindi possibile distinguere due diversi comportamenti del ghiacciaio. A quote superiori ai 3350-3400 metri vi è stato un aumento degli spessori, mentre al di sotto il ghiacciaio ha subito un ritiro.

Infine, per definire se il bilancio di massa totale del ghiacciaio Des Grandes Murailles fosse positivo o negativo, sono state calcolate le variazioni di volume (positivo e negativo) tra i DSM 2022 e 2024. Utilizzando il tool presente all'interno di QGIS è stata impostata come superficie di riferimento quella del DSM 2022 e calcolata la differenza di volume con quella definita dal DSM 2024:

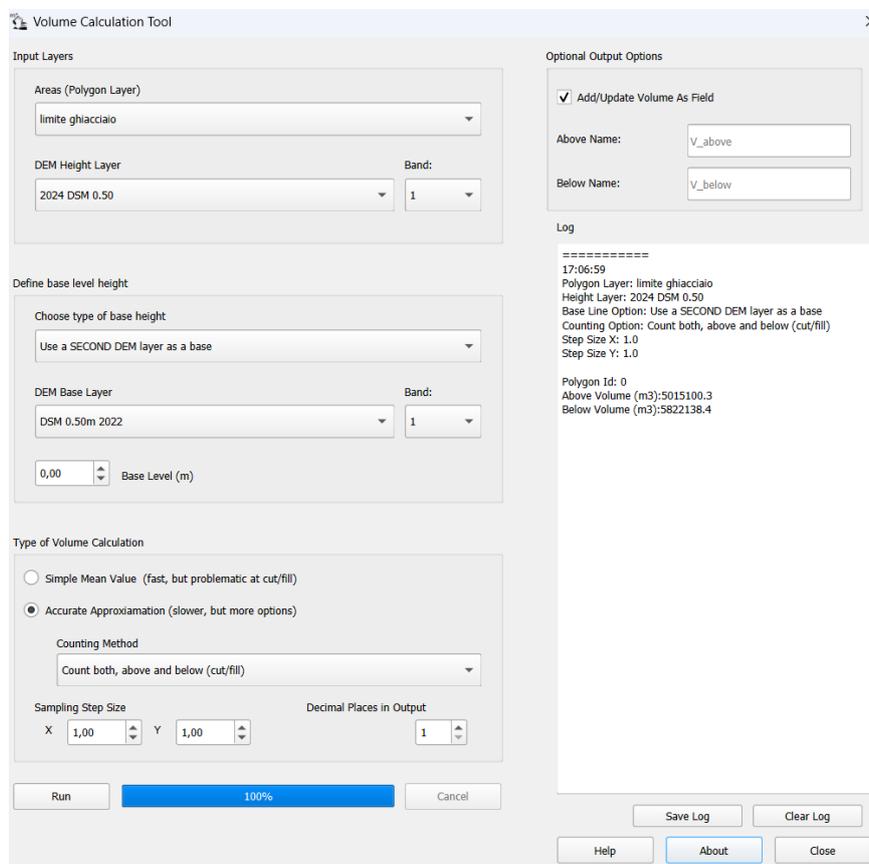


Figura 96: Calcolo bilancio di massa

Si è ottenuto:

- Volume di ghiaccio fuso: 5.822.138,4 m³
- Volume di ghiaccio accumulato: 5.015.100,3 m³

Facendo la differenza tra i due volumi ottenuti si ottiene che il bilancio di massa complessivo del ghiacciaio Des Grandes Murailles per gli anni 2022 – 2024 è negativo, con una perdita di 807.038,1 m³ di volume. Nello stato reale il volume perso è probabilmente superiore a quello calcolato poiché all'interno di questo calcolo è stato considerato anche l'apporto (positivo) della neve presente al suolo. È possibile, inoltre, calcolare l'abbassamento medio del ghiacciaio, considerando la superficie totale del ghiacciaio che è pari a 5,38 km² si ottiene:

$$\text{Abbassamento medio} = \frac{\text{volume}}{\text{superficie}} = \frac{8070038}{5380000} = 1.50m$$

8.3. Analisi del distacco nella morena del ghiacciaio Tza de Tzan

Le forti precipitazioni avvenute il 29 giugno 2024 sul territorio Valpellesino hanno provocato il distacco di una massa enorme dalla morena laterale del ghiacciaio Tza de Tzan, che ha interessato l'intera vallata, modificandone la morfologia, con fenomeni di erosione e deposito. Un volume di circa sei milioni di metri cubi di acqua e detriti si sono riversati nella valle raggiungendo la diga di Place Moulin, provocando un innalzamento del livello del lago di 4 metri in poche ore. L'area di collasso si sviluppa su una superficie di circa di 60 mila m² [17] [18] ed è visibile nelle immagini che seguono.

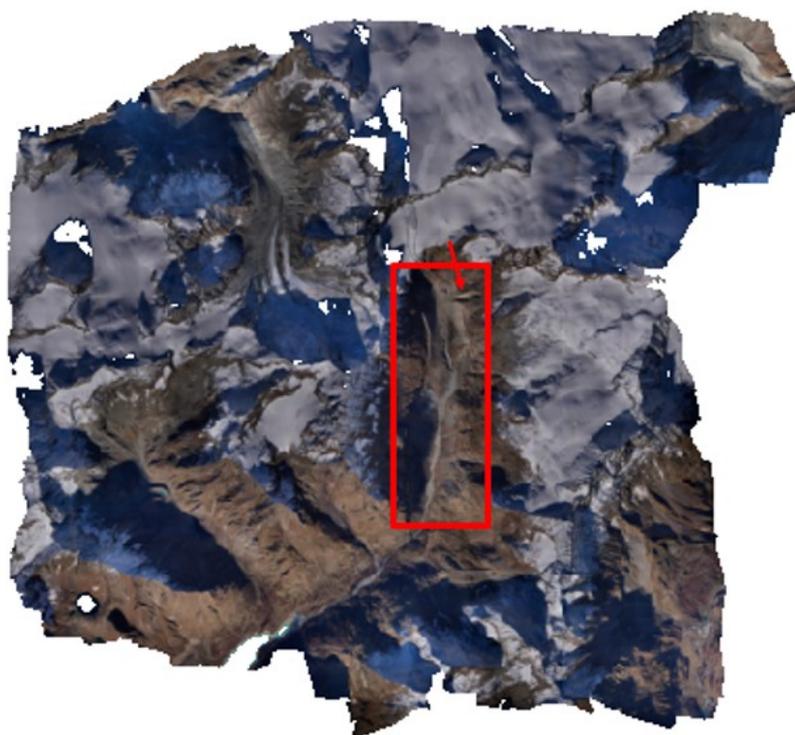


Figura 97: Individuazione della porzione di valle interessata dell'evento alluvionale

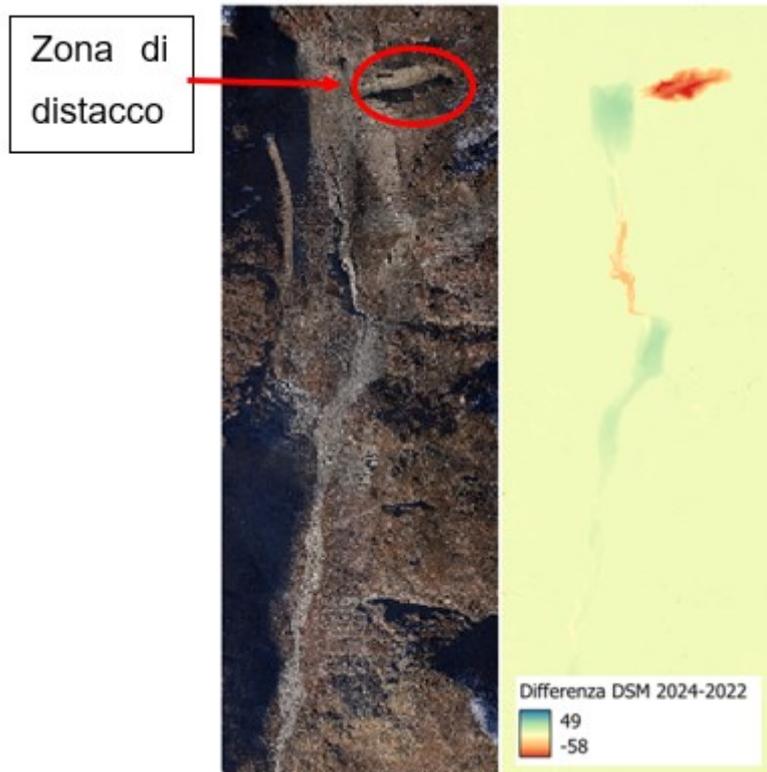


Figura 98: ingrandimento zona interessata dall'evento alluvionale

Un'analisi più approfondita è stata svolta eseguendo delle sezioni in corrispondenza del corpo frana e della valle per definire come la morfologia e il profilo del terreno sia variato. Le sezioni sono state eseguite con il tool implementato all'interno del software QGIS. Sono state tracciate tre sezioni trasversali e una longitudinale nel punto di stacco della frana e altre tre sezioni trasversali lungo la valle al fine di analizzare come il materiale staccatosi della frana si fosse depositato. Nelle sezioni seguenti la linea rossa materializza il livello 2024 e quella blu il livello 2022



Figura 99: identificazione delle sezioni

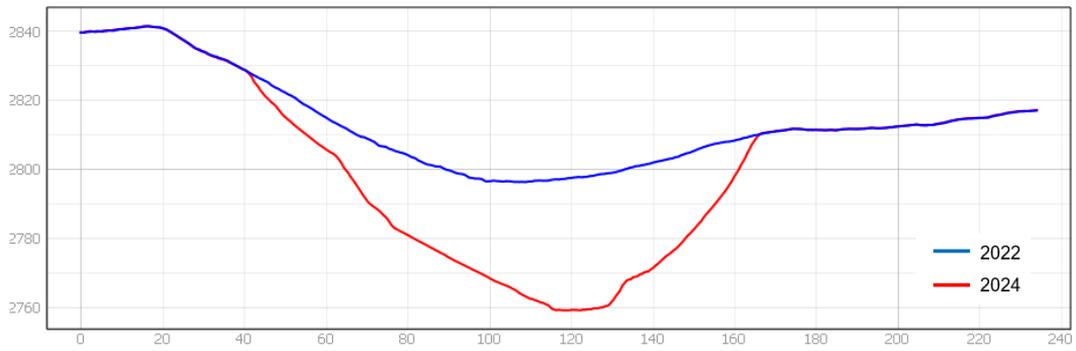


Figura 100: Sezione 1

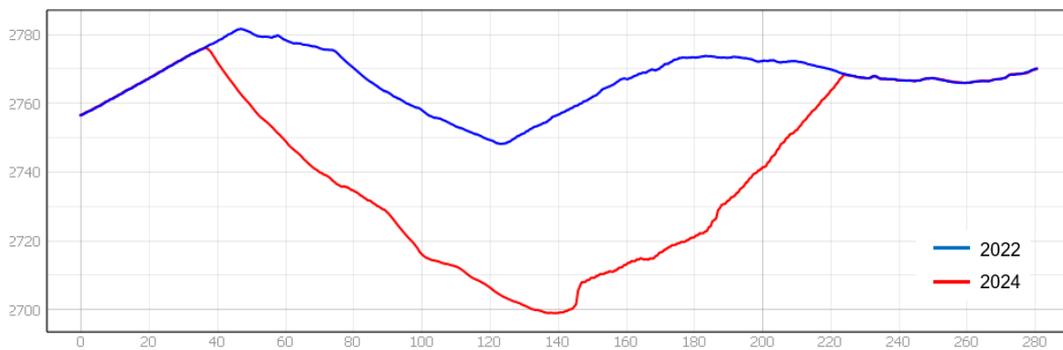


Figura 101: Sezione 2

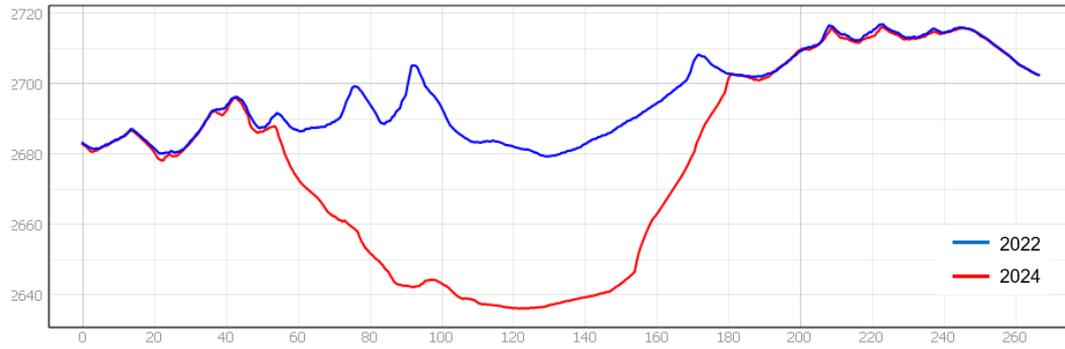


Figura 102: Sezione 3

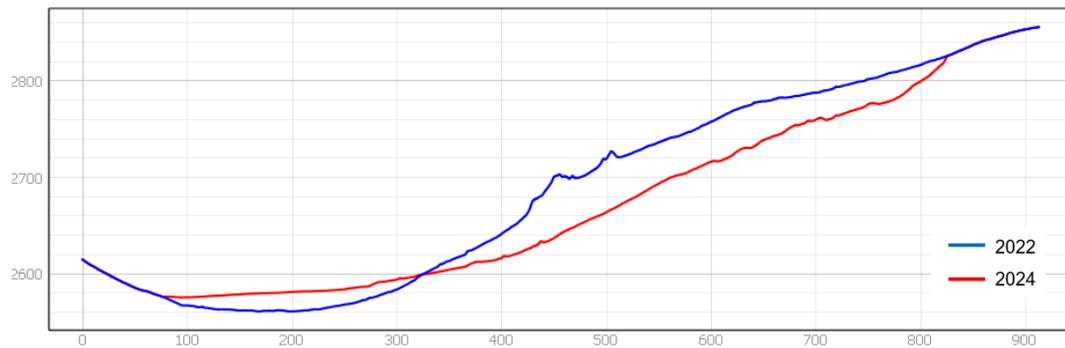


Figura 103: Sezione 4 - longitudinale



Figura 104: sezione 5 - Zona di deposito lungo la valle

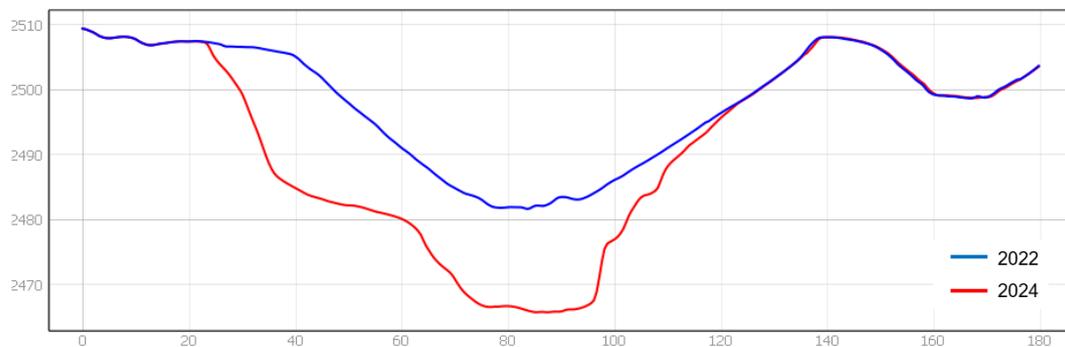


Figura 105: Sezione 6 – Zona di erosione lungo la valle

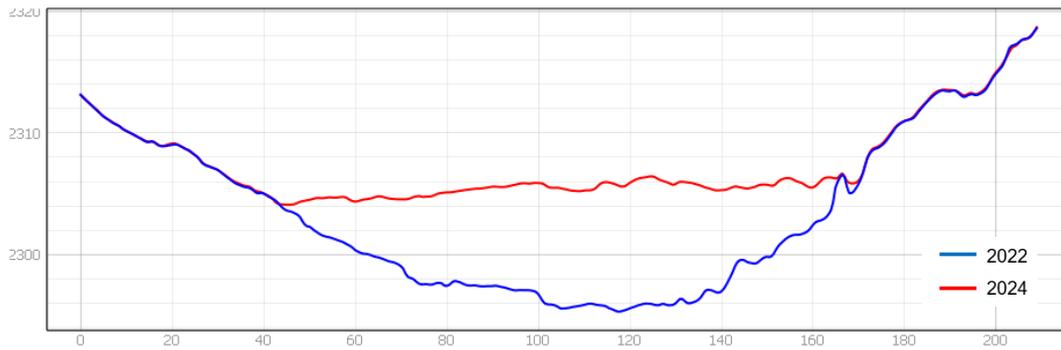


Figura 106: Sezione 7 – Zona di deposito lungo la valle

Analizzando le sezioni ottenute si può definire la profondità della frana che ha interessato il versante, arrivando, nel punto di massimo sviluppo ad un dislivello che supera i 50 metri. Inoltre, nella sezione trasversale e in quelle a valle della zona di distacco (sezioni 4, 5, 6, 7) possiamo notare, così come è possibile farlo in Figura 98, che si susseguono lungo la valle zone di erosione e di deposito dei detriti, con spessori che variano tra i 5 e i 10 metri.

Utilizzando un altro tool disponibile all'interno di QGIS è stato possibile computare anche il volume di materiale che si è distaccato dal versante. È stato necessario delimitare con una linea di contorno l'area della frana e successivamente implementare il calcolo come differenza tra il DSM 2022 e il DSM 2024.

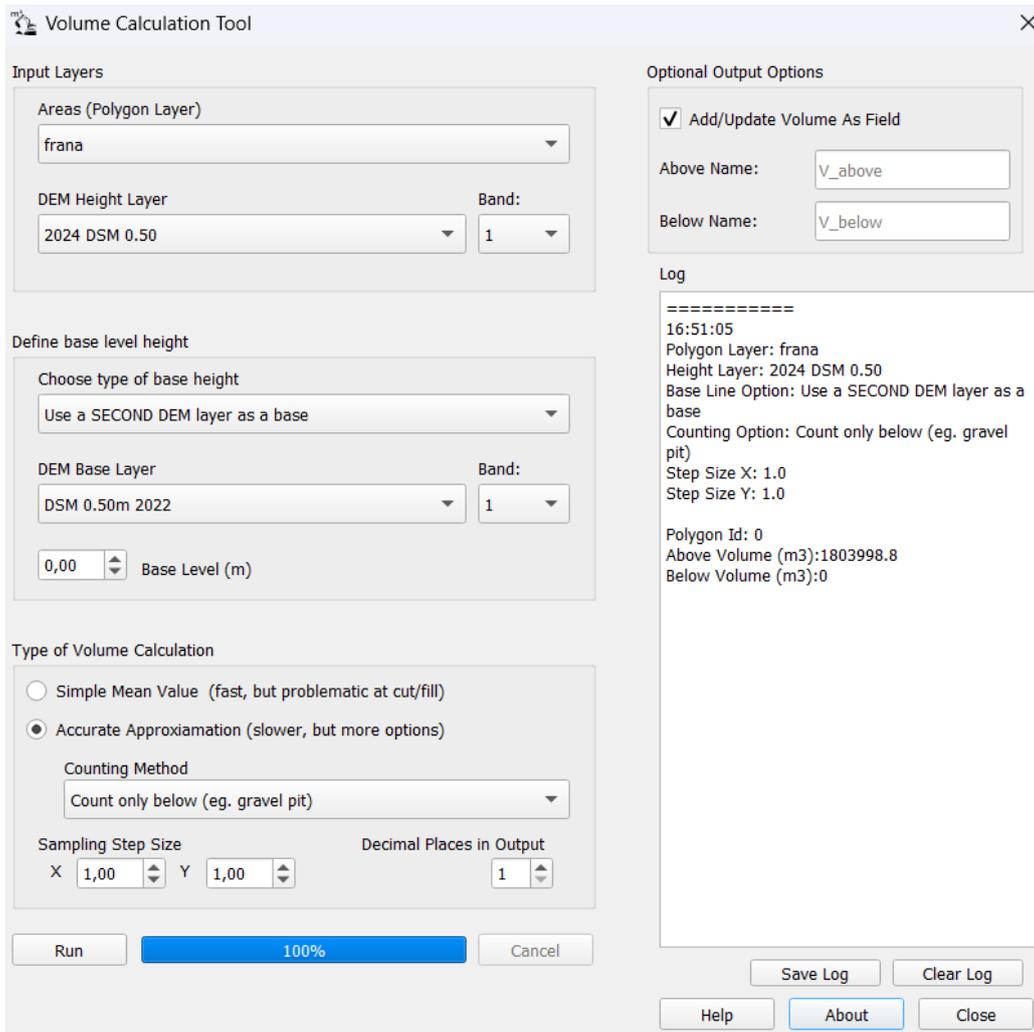


Figura 107: Calcolo del volume della frana

Si può quindi definire il volume distaccato durante l'evento alluvionale che è pari a un milione e 800 mila metri cubi.

9. Conclusioni

All'interno di questa tesi è stato approfondito l'uso della tecnica geomatica della fotogrammetria da aereo come metodo per la ricostruzione del modello tridimensionale di un ambiente alpino, al fine di ottenere un modello utile per effettuare un'analisi in quattro dimensioni dell'evoluzione dei corpi glaciali. Il caso studio che è stato analizzato è quello della Valpelline, vallata alpina situata in Valle d'Aosta, all'interno della quale ricade il ghiacciaio Des Grandes Murailles, che è stato l'oggetto di analisi della tesi. Al termine della trattazione dei dati è stato infatti possibile definire il bilancio di massa e la riduzione dello spessore del ghiacciaio Des Grandes Murailles utilizzando i risultati ottenuti dall'elaborazione fotogrammetrica.

I dati a disposizione comprendono tre diversi rilievi fotogrammetrici effettuati da aereo negli anni 2020, 2022 e 2024, ciascuno con caratteristiche diverse (capitolo 3). Nel dettaglio per ciascun dataset sono state sperimentate delle tecniche di analisi differenti a seconda delle caratteristiche dei dati a disposizione.

La prima analisi è stata svolta sul dataset 2022 in cui è stato sperimentato l'uso di due software, Cube 3d e Metashape, per l'elaborazione del blocco fotogrammetrico, al fine di determinare la capacità e la precisione di elaborazione di Cube 3d, un software nuovo non ancora sperimentato per l'analisi di dataset di grandi dimensioni, confrontandolo con il risultato ottenuto dall'elaborazione dello stesso blocco fotogrammetrico con il comprovato software Metashape. I risultati di tale analisi, descritti nel capitolo 5, hanno mostrato come Cube 3d non posseda le stesse capacità e potenzialità di calcolo di Metashape, generando alcuni problemi durante il processamento del modello e restituendo un risultato finale in termini di DSM che si discosta da quello ottenuto con Metashape, preso di riferimento, di una quantità variabile tra i 20 e i 30 centimetri (paragrafo 5.2). ad oggi quindi il software migliore per l'elaborazione di grandi set fotogrammetrici rimane

Metashape, sia per velocità e capacità di calcolo, sia per qualità dei prodotti finali ottenibili.

Nella seconda parte della tesi è stato analizzato il volo eseguito nel 2024, processandolo con il software Metashape (capitolo 6). In questo caso è stata eseguita un'analisi sull'utilizzo dei GCP a terra utili per l'orientamento del blocco fotogrammetrico, qualora si adotti, come in questa tesi, la tecnica della triangolazione aerea. In particolare, il territorio in esame si presenta come una vallata stretta e con versanti acclivi in cui il posizionamento e la determinazione delle coordinate dei GCP non sempre è possibile in modo uniforme su tutta l'area di rilievo. Per tale motivo è stato analizzato l'apporto dei diversi GCP presenti sul territorio, definendo che il raffittimento dei marker nella parte centrale del rilievo non ha portato ad un aumento considerevole della precisione del modello, mentre risultano molto più decisivi, per una buona modellazione del rilievo, i marker di bordo. Per tale motivazione in una futura campagna di misura è preferibile inserire dei nuovi marker di bordo che limitano la deriva del modello, mentre la fascia centrale risulta già sufficientemente vincolata (paragrafo 6.3).

Nella terza parte della tesi è stato analizzato il rilievo effettuato nel 2020 (capitolo 7). Tale rilievo, che era già stato processato quando era stato realizzato, aveva presentato dei problemi dovuti alla carenza di punti di appoggio a terra per eseguire l'orientamento. Negli anni successivi al rilievo sono stati determinati nuovi GCP a terra identificati sia attraverso elementi già presenti al suolo, sia con l'apposizione di marker a terra. Per recuperare la posizione di quest'ultimi all'interno del modello 2020, è stata sperimentata una tecnica di co-registrazione di fotogrammi provenienti da un set fotogrammetrico realizzato in un anno diverso, all'interno dei quali fosse possibile individuare i marker di interesse. Eseguendo la co-registrazione dei fotogrammi aggiuntivi al di sopra del modello già processato, utilizzando anche i dati di posizione e assetto di quest'ultimi, è stato possibile aggiungere tali GCP utili per l'orientamento del modello, con una precisione molto elevata, con un errore stimato come scarto ai minimi quadrati inferiore ai 20 centimetri. Questa tecnica, sperimentata nel caso di questa tesi sia sul

modello 2020 che sul modello 2022, permette il recupero di modelli realizzati in passato, permettendo quindi il miglioramento della modellazione di un rilievo anche a posteriori, qualora ci si accorga che i punti di appoggio a terra non sono sufficienti solo dopo l'esecuzione del volo.

Al termine delle elaborazioni fotogrammetriche succitate, sono stati prodotti i seguenti elaborati cartografici:

- DSM 2020 con campionamento 0.5m
- DSM 2022 con campionamento 0.5m
- DSM 2024 con campionamento 0.5m
- Ortofoto 2020 con campionamento 0.5m
- Ortofoto 2022 con campionamento 0.5m
- Ortofoto 2024 con campionamento 0.5m

Nella parte finale della tesi tali elaborati sono stati utilizzati per determinare l'ablazione del corpo del ghiaccio Des Grandes Murailles e la modifica della morfologia della valle a seguito dell'evento alluvionale di inizio estate 2024.

Nel capitolo 8 è stata descritta tale trattazione. In particolare, la determinazione dei bilanci di massa del ghiacciaio è stata possibile per l'arco temporale tra il 2022 e il 2024, definendo per tale periodo il limite delle nevi perenni ad una quota di 3350-3400 metri ed un bilancio di massa negativo, con una perdita di circa 807 mila metri cubi di ghiaccio e un abbassamento medio di 1,50m. L'analisi della zona oggetto della frana del 29 giugno 2024 (paragrafo 8.3) ha evidenziato come questo evento abbia avuto ripercussioni su tutta la valle, dove la massa distaccata dal versante del ghiacciaio Tza de Tzan di circa un milione e 800 mila metri cubi di materiale ha modificato l'intera vallata generando zone di accumulo e di erosione con una differenza di quota variabile tra i 5 e i 10 metri.

10. Allegati

10.1. Allegato 1 – Monografie GCP

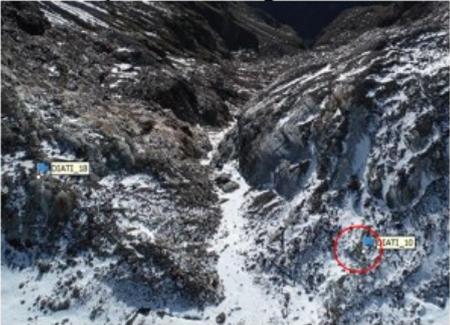
Località: Valpelline – Mont Brulé	Data: 29/09/2020
Nome: DIATI 46	Foto particolare:
Ubicazione: Rifugio Parajet	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 386266.983	H ortometrica: 1995.888
Nord: 5086330.540	h ellissoidica: 2050.5392
Note	
Ricevitore: SP80 – TR2 Identificativo: 00692730 Altezza in. [m]: 0.701	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: Valpelline – Mont Brulè		Data: 29/09/2020	
Nome: DIATI 20		Foto particolare:	
Ubicazione: sul palo di legno del ponte			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 387550.599	H ortometrica: 2067.642		
Nord: 5087041.740	h ellissoidica: 2122.337		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR1			
Identificativo: 00832730			
Altezza in. [m]: 0.0			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Valpelline – Mont Brulé		Data: 29/09/2020	
Nome: DIATI 47		Foto particolare:	
Ubicazione: lungo il sentiero, masso bianco poco sotto al masso rosso			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 388325.984	H ortometrica: 2320.503		
Nord: 5089761.376	h ellissoidica: 2375.291		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR1			
Identificativo: 00832731			
Ritrovato in data 25 set. 2024 dopo frana in buono stato			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Valpelline – Mont Brulè		Data: 29/09/2020	
Nome: DIATI 48		Foto particolare:	
Ubicazione: masso lungo il sentiero			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 388142.782	H ortometrica: 2236.802		
Nord: 5088682.023	h ellissoidica: 2291.558		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR1		Foto generale: 	
Identificativo: 00832732			
Altezza in. [m]: 0.0			
Inquadramento generale:			
			

Località: Valpelline – Mont Brulè		Data: 29/09/2020
Nome: DIATI 8		Foto particolare: 
Ubicazione: masso lungo il sentiero poco dopo il rifugio		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 386854.479	H ortometrica: 2021.961	
Nord: 5086680.035	h ellissoidica: 2076.633	
Note		
Ricevitore: SP80 – TR1		
Identificativo: 00832733		
Altezza in. [m]: 0.0		
Inquadramento generale:		Foto generale:
		

Località: Valpelline – Mont Brulé	Data: 30/09/2020
Nome: DIATI 10	Foto particolare:
Ubicazione: parte bassa del ghiacciaio, destra orografica	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 385920.131	H ortometrica: 2840.342
Nord: 5088415.713	h ellissoidica: 2895.058
Note	
Ricevitore: SP80 – TR4	
Identificativo: 00632741	
Altezza in. [m]: 1.545	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: Valpelline – Mont Brulè	Data: 30/09/2020	
Nome: DIATI 18	Foto particolare:	
Ubicazione: parte bassa del ghiacciaio, sinistra orografica		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 385986.448		H ortometrica: 2846.159
Nord: 5088459.154		h ellissoidica: 2900.876
Note		
Ricevitore: SP80 – TR1 Identificativo: 00832740 Altezza in. [m]: 1.455		
Inquadramento generale:	Foto generale:	
		

Località: Valpelline – Mont Brulè	Data: 30/09/2020
Nome: DIATI 19	Foto particolare:
Ubicazione: parte bassa del ghiacciaio, sinistra orografica	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 386132.875	H ortometrica: 2907.222
Nord: 5088501.829	h ellissoidica: 2961.941
Note	
Ricevitore: SP80 – TR3 Identificativo: 01272741 Altezza in. [m]: 1.34	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: Valpelline – Mont Brulè		Data: 30/09/2020	
Nome: LIDAR 1		Foto particolare:	
Ubicazione: parte bassa del ghiacciaio			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 385865.023	H ortometrica: 2844.263		
Nord: 5088549.751	h ellissoidica: 2898.970		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR2			
Identificativo: 00692741			
Altezza in. [m]: 0.0			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Valpelline – Mont Brulè	Data: 30/09/2020
Nome: VOLO 2	Foto particolare:
Ubicazione: parte alta del ghiacciaio	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 385674.812 H ortometrica: 3025.955	
Nord: 5089228.456 h ellissoidica: 3080.6698	
Note	
Ricevitore: SP80 – TR1	
Identificativo: 00832741	
Altezza in. [m]: 0.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

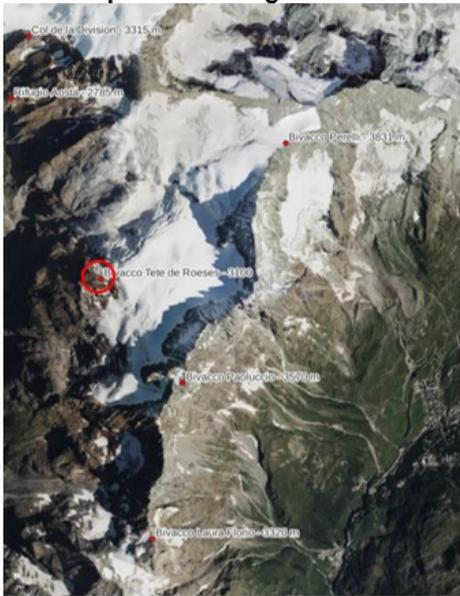
Località: Valtournenche		Data: 12/10/2020	
Nome: GOLF		Foto particolare:	
Ubicazione: Spigolo grata, vicino campo da Golf			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 393686.114	H ortometrica: 2004.442		
Nord: 5087833.963	h ellissoidica: 2059.256		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR4 Identificativo: 0063**** Altezza in. [m]: 2.0			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Valtournenche		Data: 12/10/2020	
Nome: SOPRA CHIESA		Foto particolare:	
Ubicazione: angolo muretto			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 393694.892	H ortometrica: 2093.029		
Nord: 5088309.021	h ellissoidica: 2147.849		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR4 Identificativo: 0063**** Altezza in. [m]: 2.0		Foto generale:	
Inquadramento generale: 			

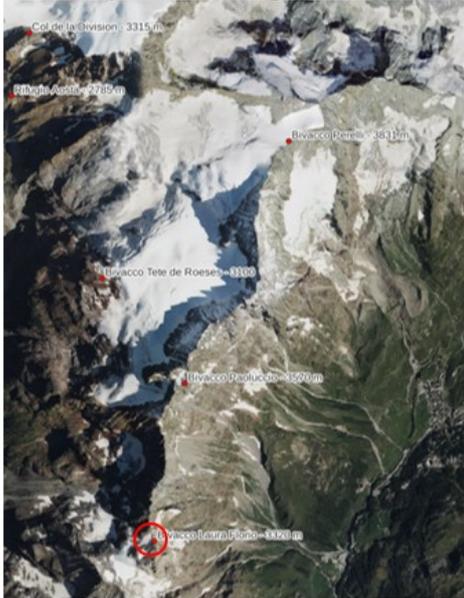
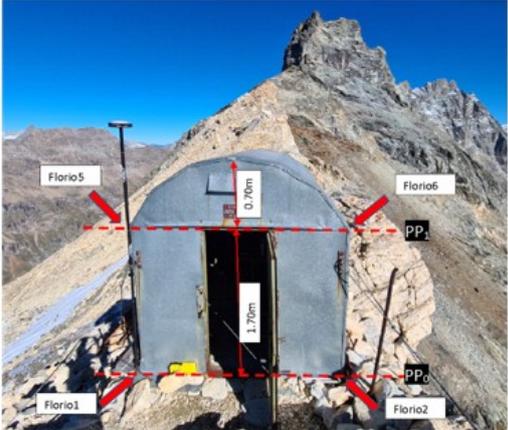
Località: <i>Valtournenche</i>	Data: 12/10/2020	
Nome: PARCHEGGIO	Foto particolare:	
Ubicazione: Cambio materiale pavimentazione		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 393029.603		H ortometrica: 1986.708
Nord: 5086723.520		h ellissoidica: 2041.451
Note		
Ricevitore: SP80 – TR4 Identificativo: 0063**** Altezza in. [m]: 2.0		
Inquadramento generale:	Foto generale:	
		

Località: Valtournenche	Data: 12/10/2020	
Nome: ELIPORTO	Foto particolare:	
Ubicazione: interno lettera H		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 393356.045		H ortometrica: 2050.532
Nord: 5086832.021		h ellissoidica: 2105.289
Note		
Ricevitore: SP80 – TR4 Identificativo: 0063**** Altezza in. [m]: 2.0		
Inquadramento generale:	Foto generale:	
		

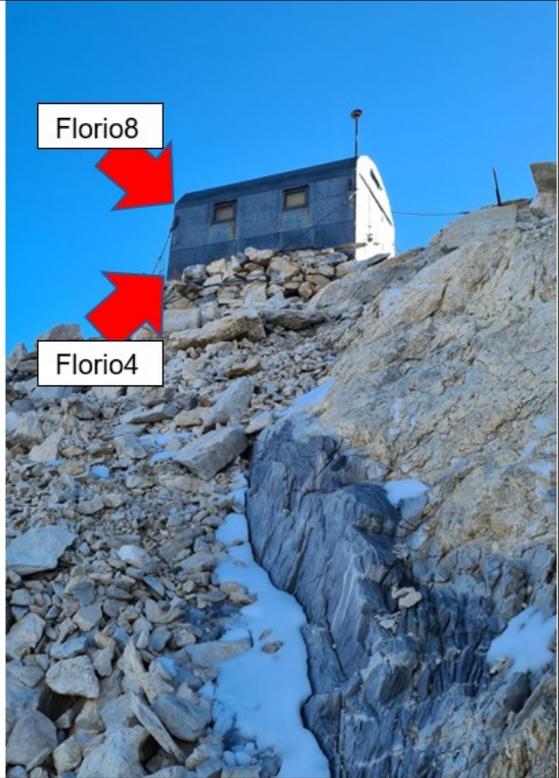
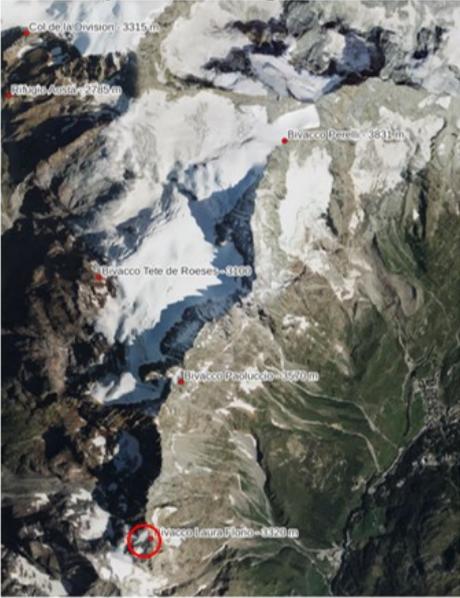
Località: Valtournenche		Data: 12/10/2020	
Nome: SALESAINI		Foto particolare:	
Ubicazione: Casolare vicino oratorio Salesiani			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 392509.243	H ortometrica: 1861.565		
Nord: 5085175.411	h ellissoidica: 1916.206		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR4 Identificativo: 0063**** Altezza in. [m]: 2.0			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

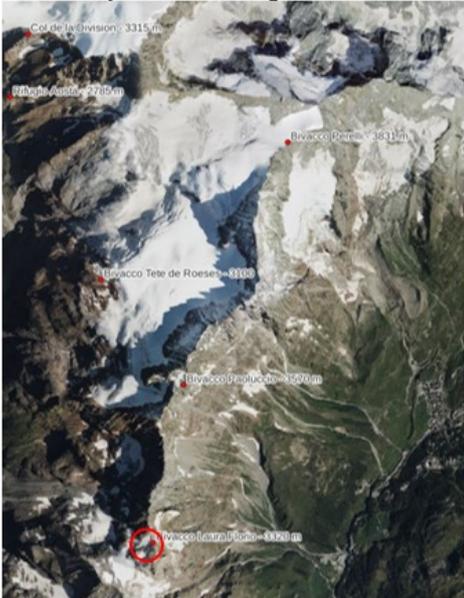
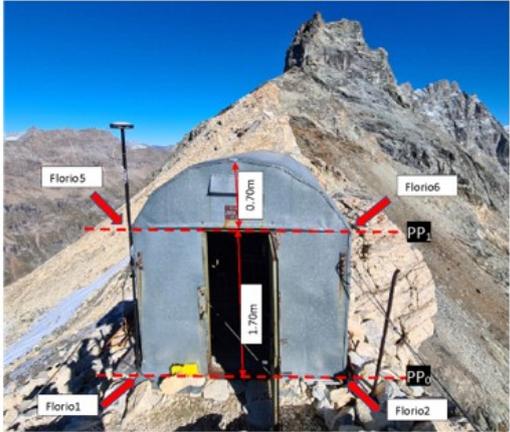
Località: Valpelline	Data: 26/09/2023
Nome: Bivacco Tete de Roeses	Foto particolare:
Ubicazione: spigolo bivacco	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 389658.482	H ortometrica: 3209.094
Nord: 5089402.177	h ellissoidica: 3263.878
Note	
Ricevitore: SP80 – TR Altezza in. [m]: 2.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

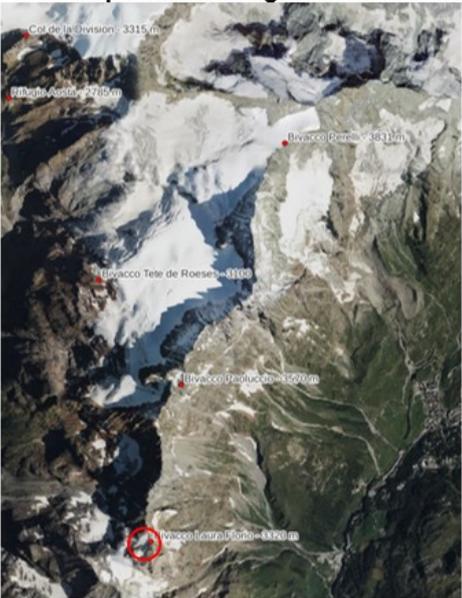
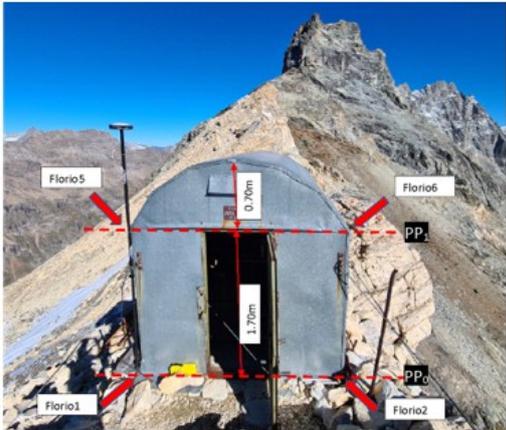
Località: Valpelline	Data: 26/09/2023
Nome: Bivacco Laura Florio	
Ubicazione: spigolo bivacco	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 390302.960	H ortometrica: 3320.156
Nord: 5086165.995	h ellissoidica: 3374.940
Note	
Ricevitore: SP80 – TR	
Altezza in. [m]: 2.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:

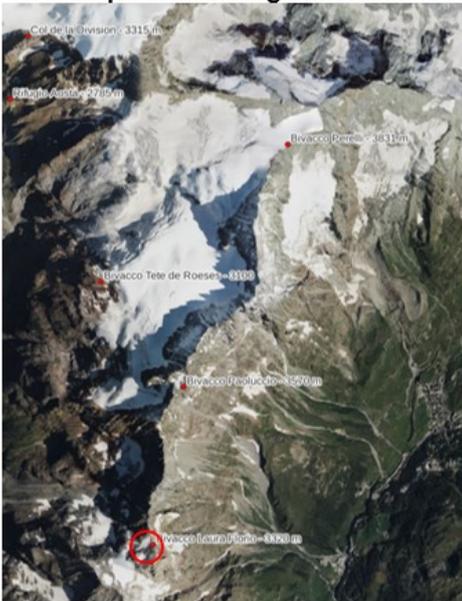
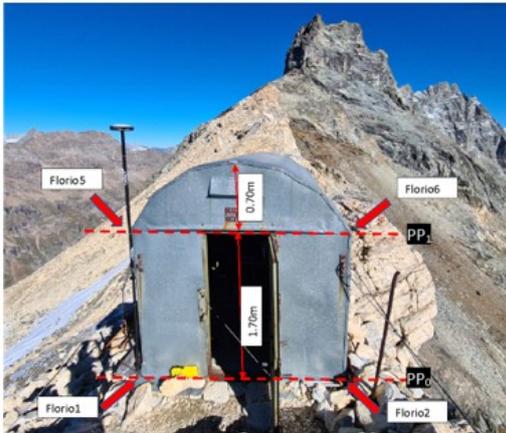
Località: Valpelline		Data: 26/09/2023	
Nome: Bivacco Laura Florio			
Ubicazione: spigolo bivacco			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 390305.235	H ortometrica: 3320.248		
Nord: 5086166.322	h ellissoidica: 3375.032		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR			
Altezza in. [m]: 2.0			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Valpelline	Data: 26/09/2023
Nome: Bivacco Laura Florio	
Ubicazione: spigolo bivacco	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 390302.528	H ortometrica: 3320.325
Nord: 5086169.489	h ellissoidica: 3375.109
Note	
Ricevitore: SP80 – TR Altezza in. [m]: 2.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:

Località: Valpelline		Data: 26/09/2023	
Nome: Bivacco Laura Florio 4			
Ubicazione: spigolo bivacco			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 390304.731	H ortometrica: 3320.325		
Nord: 5086169.803	h ellissoidica: 3375.109		
Note			
Ricevitore: SP80 – TR			
Altezza in. [m]: 2.0			
Inquadramento generale:			
			

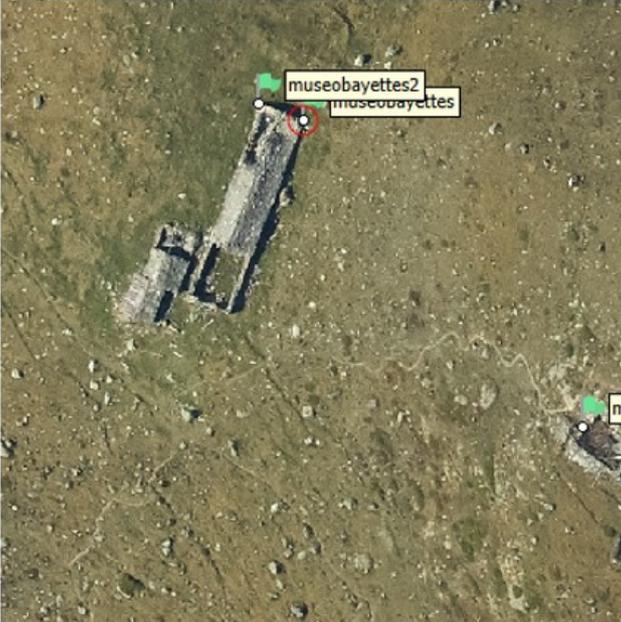
Località: <i>Valpelline</i>	Data: 26/09/2023
Nome: Bivacco Laura Florio 5	
Ubicazione: spigolo bivacco	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 390302.984	H ortometrica: 3321.946
Nord: 5086165.957	h ellissoidica: 3376.730
Note	
Ricevitore: SP80 – TR Altezza in. [m]: 2.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: <i>Valpelline</i>	Data: 26/09/2023
Nome: Bivacco Laura Florio	
Ubicazione: spigolo bivacco	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 390305.205	H ortometrica: 3321.978
Nord: 5086166.288	h ellissoidica: 3376.762
Note	
Ricevitore: SP80 – TR	
Altezza in. [m]: 2.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: <i>Valpelline</i>	Data: 26/09/2023
Nome: Bivacco Laura Florio	
Ubicazione: spigolo bivacco	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 390302.452	H ortometrica: 3321.969
Nord: 5086169.476	h ellissoidica: 3376.753
Note	
Ricevitore: SP80 – TR Altezza in. [m]: 2.0	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: Valpelline	Data: 26/09/2023	
Nome: Rifugio NACAMULI	Foto particolare:	
Ubicazione: spigolo tetto bivacco		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 383793.987		H ortometrica: 2835.45
Nord: 5089409.628		h ellissoidica:
Note		
<p>H riferita allo spigolo del tetto del bivacco</p>		
Inquadramento generale:		
		

Località: <i>Cervinia</i>	Data: 07/2024
Nome: MORCES	Foto particolare:
Ubicazione:	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 393168.089	H ortometrica: 2057.688
Nord: 5087792.759	h ellissoidica: 2112.488
Note	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: <i>Cervinia</i>		Data: 07/2024	
Nome: MUSEO DI BAYETTES		Foto particolare:	
Ubicazione:			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 391966.276	H ortometrica: 2290.818		
Nord: 5086512.665	h ellissoidica: 2345.524		
Note			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Cervinia		Data: 07/2024	
Nome: MUSEO DI BAYETTES 2		Foto particolare:	
Ubicazione:			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 391967.119	H ortometrica: 2292.036		
Nord: 5086505.314	h	ellissoidica:	
	2346.742		
Note			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Cervinia		Data: 07/2024	
Nome: MUSEO DI BAYETTES 3		Foto particolare:	
Ubicazione:			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 391985.411	H ortometrica: 2308.634		
Nord: 50866576.319	h ellissoidica: 2363.344		
Note			
<p>ingresso rudere pietra rosa</p>			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

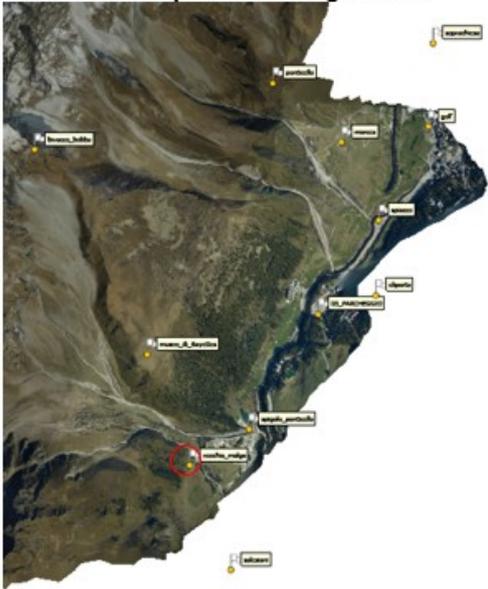
Località: <i>Cervinia</i>	Data: 07/2024	
Nome: SPIGOLO PONTICELLO	Foto particolare:	
Ubicazione:		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 392615.005		H ortometrica: 1949.376
Nord: 5086037.732		h ellissoidica: 2004.069
Note		
Inquadramento generale:	Foto generale:	
		

Località: Cervinia		Data: 07/2024	
Nome: BOBBA BAGNO		Foto particolare:	
Ubicazione:			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 391381.678	H ortometrica: 2770.758		
Nord: 5087660.269	h ellissoidica: 2825.516		
Note			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: Cervinia	Data: 07/2024	
Nome: BOBBA spigolo dx	Foto particolare:	
Ubicazione:		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 391384.312		H ortometrica: 2770.134
Nord: 5087649.608		h ellissoidica: 2824.887
Note		
<p>Spigolo basamento dx spalle rifugio</p>		
Inquadramento generale:	Foto generale:	
		

Località: Cervinia	Data: 07/2024	
Nome: BOBBA spigolo sx	Foto particolare:	
Ubicazione:		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 391389.024		H ortometrica: 2770.246
Nord: 5087653.634		h ellissoidica: 2824.999
Note		
<p>Spigolo basamento sx spalle rifugio</p>		
Inquadramento generale:	Foto generale:	
		

Località: Cervinia	Data: 07/2024
Nome: VECCHIA MALGA	Foto particolare:
Ubicazione:	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 392270.0415	H ortometrica: 1982.855
Nord: 5085833.4155	h ellissoidica: 2037.53
Note	
<p>Spigolo sporgenza tetto TRIMBLE E392270.019 N 5085833.389 Hell 2037.463</p>	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: Cervinia	Data: 07/2024
Nome: VECCHIA MALGA 1	Foto particolare:
Ubicazione:	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 392275.849	H ortometrica: 1981.713
Nord: 5085835.522	h ellissoidica: 2036.388
Note	
Spigolo muretto/cordolo	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

10.2. Allegato 2 - Monografie GCP rilevati nella campagna 2024

Località: <i>Valpeline</i>	Data: 25/09/2024	
Nome: DIATI57	Foto particolare: 	
Ubicazione: poco dopo rifugio Prarajet		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 386421.680		H ortometrica: 2007.002
Nord: 5086365.222	h ellissoidica: 2061.656	
Note		
Chiodo con rondella DIATI e Marker da 1 m su affioramento roccioso piatto. 3 tasselli per stazionamento con ancore		
Inquadratura generale:	Foto generale:	
		
Rilevato 25/9/2024 in modalità RTK radio con base GNSS sul punto masso Prarajet DIATI 46 con coordinate N=5686330.540, E=386266.983 h=2050.539		

Località: Valpelline		Data: 25/09/2024
Nome: DIATI58		Foto particolare:
Ubicazione: a monte del sentiero per il rifugio Aosta a circa 1 km da DIATI57		
Coordinate UTM ETRF2000 [m]		
Est: 387378.641	H ortometrica: 2071.199	
Nord: 5087155.649	h ellipsoidica: 2125.897	
Note		
Chiodo con rondella DIATI e Marker da 1 m su masso piatto. 3 tasselli per stazionamento con ancore		
		Foto generale:
		
Rilevato 25/9/2024 in modalità RTK radio con base GNSS sul punto masso Prarajet DIATI 46 con coordinate N=5686330.540, E=386266.983 h=2050.539		

Località: Valpelline		Data: 25/09/2024						
Nome: DIATI66		Foto particolare:						
Ubicazione:								
Coordinate UTM ETRF2000 [m]								
Est: 387997.362	H ortometrica: 2189.894							
Nord: 5087821.819	h ellissoidica: 2244.625							
Note								
<p>Chiodo con rondella DIATI e Marker da 1 m su masso piatto. 3 tasselli per stazionamento con ancore</p>								
		Foto generale:						
								
<p>Rilevato 25/9/2024 in modalità rapido statico rate 1s e 30 minuti di acquisizione con Trimble TR1. Calcolato con servizio elaborazione SPIN3</p>								
ID-Punto	Tipo Soluzione	Occupazioni / Baseline	WGS84 Latitudine	WGS84 Longitudine	WGS84 Ell. Quota [m]	SD Latitudine	SD Longitudine	SD Quota
7777	Fase Fissato	2/10	45° 56' 05.3957" N	7° 33' 18.7409" E	2244.5083 m	0.0077 m	0.0078 m	0.0237 m
dat056	Fase Fissato	1/5	45° 56' 05.3987" N	7° 33' 18.8344" E	2244.6250 m	0.0328 m	0.0212 m	0.0215 m
dat058	Fase Fissato	1/5	45° 57' 19.0436" N	7° 33' 31.9038" E	2483.2744 m	0.0098 m	0.0132 m	0.0159 m
Unknown Marker	Fase Fissato	1/5	45° 56' 52.8969" N	7° 33' 27.7574" E	2354.8564 m	0.0192 m	0.0083 m	0.0174 m
dat056	Fase Fissato	1/5	45° 56' 52.8979" N	7° 33' 27.7573" E	2354.6082 m	0.0200 m	0.0101 m	0.0137 m

Località: Valpelline		Data: 25/09/2024						
Nome: DIATI98		Foto particolare:						
Ubicazione: poco a monte del sentiero in fronte alla Gran Muraille								
Coordinate UTM ETRF2000 [m]								
Est: 388319.892	H ortometrica: 2428.478							
Nord: 5090089.584	h ellissoidica: 2483.274							
Note								
Chiodo con rondella DIATI e Marker da 1 m su grosso masso piatto. 3 tasselli per stazionamento con ancore.								
		Foto generale:						
								
Rilevato 25/9/2024 in modalità rapido statico rate 1s e 30 minuti di acquisizione con Trimble TR1. Calcolato con servizio elaborazione SPIN3								
ID-Punto	Tipo Soluzione	Occupazioni / Baseline	WGS84 Latitudine	WGS84 Longitudine	WGS84 ELL Quota [m]	SD Latitudine	SD Longitudine	SD Quota
????	Fase Fissato	2/10	45° 58' 05,3957" N	7° 33' 18,7409" E	2244,5083 m	0,0077 m	0,0078 m	0,0237 m
dat096	Fase Fissato	1/5	45° 58' 05,3987" N	7° 33' 18,8344" E	2244,6250 m	0,0328 m	0,0212 m	0,0215 m
dat098	Fase Float	1/5	45° 57' 19,0436" N	7° 33' 31,9038" E	2483,2744 m	0,0098 m	0,0132 m	0,0159 m
Unknown Marker	Fase Fissato	1/5	45° 58' 52,8969" N	7° 33' 27,7574" E	2354,6564 m	0,0192 m	0,0083 m	0,0174 m
dat056	Fase Fissato	1/5	45° 58' 52,8970" N	7° 33' 27,7573" E	2354,6082 m	0,0200 m	0,0101 m	0,0137 m

Località: Valpelline		Data: 25/09/2024						
Nome: DIATI56		Foto particolare:						
Ubicazione:								
Coordinate UTM ETRF2000 [m]								
Est: 388216.032	H ortometrica: 2299.835							
Nord: 5089284.267	h ellissoidica: 2354.608							
Note								
<p>Chiodo con rondella DIATI e Marker da 1 m su affioramento roccioso piatto. 3 tasselli per stazionamento con ancore</p>								
		Foto generale:						
								
<p>Rilevato 25/9/2024 in modalità rapido statico rate 1s e 30 minuti di acquisizione con Trimble TR1. Calcolato con servizio elaborazione SPIN3</p>								
ID-Punto	Tipo Soluzione	Occupazioni / Baseline	WGS84 Latitudine	WGS84 Longitudine	WGS84 Ell. Quota [m]	SD Latitudine	SD Longitudine	SD Quota
7777	Fase Fissato	2/10	45° 56' 05.3957" N	7° 33' 18.7409" E	2244.5083 m	0.0077 m	0.0078 m	0.0237 m
dat056	Fase Fissato	1/5	45° 56' 05.3987" N	7° 33' 18.8344" E	2244.6250 m	0.0328 m	0.0212 m	0.0215 m
dat098	Fase Float	1/5	45° 57' 19.0430" N	7° 33' 31.9038" E	2483.2744 m	0.0098 m	0.0132 m	0.0159 m
Unknown Marker	Fase Fissato	1/5	45° 56' 52.8969" N	7° 33' 27.7574" E	2354.6564 m	0.0192 m	0.0083 m	0.0174 m
DIATI56	Fase Fissato	1/5	45° 56' 52.8975" N	7° 33' 27.7573" E	2354.6082 m	0.0200 m	0.0101 m	0.0137 m

Località: <i>Valpelline</i>	Data: 25/09/2024		
Nome: Ponte Piana	Foto particolare:		
Ubicazione: sotto rifugio Aosta			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 388418.413			H ortometrica: 2543.277
Nord: 5090878.220			h ellipsoidica: 2598.084
Note			
<p>Marker da 1m x 1m su masso piatto.</p>			
	Foto generale:		
			
Rilevato da ARPA VdA 9 set 2023 in modalità statica, calcolato con servizio PP rete SPIN3			

10.3. Allegato 3 – Monografie rifugio S.A.S.S.O.

Località: Valpelline - bivacco Sasso		Data:2024	
Nome: 100			
Ubicazione:			
Coordinate UTM ETRF2000 [m]			
Est: 386803.937	H ortometrica: 2425.487		
Nord: 5087319.39	h ellissoidica: 2480.219		
Note			
spigolo tetto Bivacco Sasso			
Inquadramento generale:		Foto generale:	
			

Località: <i>Valpelline - bivacco Sasso</i>	Data: 2024
Nome: 101	
Ubicazione:	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 386804.951	H ortometrica: 2425.477
Nord: 5087321.689	h ellissoidica: 2480.222
Note	
spigolo tetto Bivacco Sasso	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

Località: <i>Valpelline - bivacco Sasso</i>	Data: 2024
Nome: 102	
Ubicazione:	
Coordinate UTM ETRF2000 [m]	
Est: 386802.622	H ortometrica: 2424.413
Nord: 5087322.312	h ellissoidica: 2479.168
Note	
spigolo tetto Bivacco Sasso	
Inquadramento generale:	Foto generale:
	

10.4. Allegato 4 - Coordinate centri di presa e differenze elaborazione volo 2022

COORDINATE [m] CUBE			
NOME FOTO	EST (X) [m]	NORD (Y) [m]	QUOTA (Z) [m]
P0052048	387171,143	5085467,780	3735,997
P0052049	387182,202	5085735,859	3765,701
P0052050	387196,920	5085999,181	3783,772
P0052051	387164,949	5086290,473	3794,249
P0052052	387130,806	5086544,907	3815,776
P0052053	387177,790	5086817,000	3858,158
P0052054	387186,686	5087096,886	3863,481
P0052055	387191,362	5087370,919	3856,556
P0052056	387200,016	5087627,269	3843,528
P0052057	387180,973	5087903,411	3834,249
P0052058	387201,875	5088171,752	3830,847
P0052059	387180,995	5088433,815	3792,388
P0052060	387132,007	5085882,698	3979,943
P0052061	387395,355	5085813,204	3989,732
P0052062	387670,215	5085775,167	4007,200
P0052063	387945,432	5085781,649	4029,379
P0052064	388215,402	5085839,355	4051,265
P0052065	388472,626	5085929,510	4081,870
P0052066	388716,635	5086040,276	4099,137
P0052067	388945,356	5086177,814	4116,173
P0052068	389170,159	5086343,427	4152,903
P0052069	389348,146	5086542,585	4162,589
P0052070	389479,768	5086776,111	4177,519
P0052071	389567,696	5087041,716	4206,850
P0052072	389614,929	5087310,094	4240,600
P0052073	389622,476	5087578,657	4262,747
P0052074	389620,979	5087845,464	4283,782
P0052075	389621,130	5088114,046	4311,928
P0052076	389635,516	5088384,678	4342,181
P0052077	389647,634	5088654,380	4367,279
P0052078	389655,658	5088927,507	4393,508
P0052079	389659,539	5089195,359	4402,091
P0052080	389657,920	5089461,998	4407,267
P0052081	389661,421	5089729,959	4409,791
P0052082	389665,064	5089999,274	4412,282
P0052083	389665,220	5090268,850	4409,471
P0052084	389656,269	5090536,967	4399,360
P0052085	389652,926	5090807,689	4390,779

P0052086	389654,440	5091083,195	4384,512
P0052087	389659,016	5091359,862	4379,008
P0052088	389665,187	5091628,915	4367,190
P0052089	389667,909	5091898,654	4363,285
P0052090	389674,774	5092170,805	4359,522
P0052091	389680,471	5092444,277	4356,855
P0052092	389678,581	5092717,488	4356,245
P0052093	389682,103	5092991,799	4358,012
P0052094	389674,484	5093263,699	4353,578
P0052095	389174,875	5093384,315	4351,233
P0052096	389223,521	5093116,627	4351,509
P0052097	389253,506	5092848,667	4347,103
P0052098	389261,053	5092577,965	4343,654
P0052099	389262,690	5092307,722	4338,240
P0052100	389262,873	5092040,524	4324,625
P0052101	389262,047	5091770,779	4309,780
P0052102	389259,685	5091501,368	4303,019
P0052103	389256,994	5091231,612	4295,526
P0052104	389250,400	5090958,887	4288,765
P0052105	389243,910	5090693,247	4284,066
P0052106	389240,301	5090422,257	4280,417
P0052107	389236,615	5090152,907	4278,940
P0052108	389234,040	5089884,000	4278,040
P0052109	389231,796	5089613,034	4278,545
P0052110	389230,478	5089344,644	4281,013
P0052111	389230,083	5089073,501	4282,521
P0052113	389234,216	5088534,601	4284,885
P0052114	389236,387	5088265,758	4286,227
P0052115	389239,977	5087994,983	4287,845
P0052116	389244,980	5087724,439	4288,901
P0052117	389250,368	5087455,460	4292,618
P0052118	389256,306	5087185,204	4300,048
P0052119	389260,686	5086913,504	4309,152
P0052120	389263,413	5086644,330	4312,906
P0052121	389266,077	5086375,068	4322,300
P0052122	389271,570	5086104,849	4330,332
P0052123	389276,556	5085834,487	4338,379
P0052124	389278,711	5085563,993	4351,941
P0052125	390453,291	5085446,161	4361,229
P0052126	390461,500	5085722,484	4367,433
P0052127	390469,490	5085992,772	4368,549
P0052128	390476,118	5086258,555	4362,306
P0052129	390480,553	5086526,198	4365,342
P0052130	390477,254	5086793,701	4366,072
P0052131	390473,981	5087060,055	4374,472

P0052132	390494,248	5087354,382	4429,116
P0052133	390487,483	5087613,746	4438,387
P0052134	390483,510	5087877,433	4451,382
P0052135	390490,950	5088149,120	4475,427
P0052136	390487,513	5088419,869	4499,613
P0052137	390488,991	5088686,918	4511,177
P0052138	390482,533	5088954,835	4524,161
P0052139	390479,420	5089223,783	4538,111
P0052140	390477,724	5089494,200	4551,068
P0052141	390476,310	5089764,621	4558,706
P0052142	390475,983	5090035,863	4562,700
P0052143	390478,512	5090305,949	4557,684
P0052144	390481,890	5090576,481	4549,464
P0052145	390482,586	5090847,434	4534,920
P0052146	390480,548	5091117,975	4522,814
P0052147	390482,021	5091389,528	4512,630
P0052148	390482,688	5091658,400	4497,784
P0052149	390479,506	5091930,644	4492,442
P0052150	390480,015	5092198,093	4482,073
P0052151	390478,616	5092466,207	4471,389
P0052152	390477,145	5092735,377	4460,601
P0052153	390478,268	5093002,667	4445,975
P0052154	390481,004	5093270,376	4428,041
P0052155	388813,921	5093337,228	4321,810
P0052156	388832,616	5093066,702	4311,362
P0052157	388844,788	5092796,646	4303,912
P0052158	388852,733	5092526,369	4294,971
P0052159	388856,393	5092256,693	4284,844
P0052160	388857,021	5091985,937	4276,913
P0052161	388855,391	5091715,840	4268,643
P0052162	388852,511	5091445,792	4256,937
P0052163	388847,214	5091175,710	4246,410
P0052164	388842,887	5090906,248	4244,749
P0052165	388839,691	5090636,059	4243,240
P0052166	388836,047	5090365,546	4238,342
P0052167	388833,069	5090096,220	4232,594
P0052168	388832,816	5089826,200	4228,142
P0052169	388832,219	5089556,598	4225,554
P0052170	388831,545	5089287,013	4223,994
P0052171	388830,225	5089017,397	4220,549
P0052172	388827,221	5088747,826	4215,526
P0052173	388819,500	5088477,818	4211,163
P0052174	388806,700	5088207,958	4209,404
P0052175	388797,560	5087938,622	4210,136
P0052176	388788,711	5087667,457	4212,396

P0052177	388784,242	5087398,904	4213,019
P0052178	388787,079	5087128,581	4214,122
P0052179	388792,243	5086858,790	4214,521
P0052180	388794,737	5086589,062	4219,368
P0052181	388796,503	5086318,316	4225,249
P0052182	388799,255	5086048,464	4230,550
P0052183	388802,731	5085778,307	4237,908
P0052184	388805,669	5085508,749	4248,963
P0052185	389973,075	5085459,197	4391,064
P0052186	390004,379	5085720,092	4398,202
P0052187	390029,137	5085984,034	4401,108
P0052188	390031,793	5086247,537	4400,452
P0052189	390043,067	5086513,997	4393,884
P0052190	390053,652	5086784,036	4397,491
P0052191	390061,947	5087053,587	4400,028
P0052192	390060,666	5087322,982	4400,231
P0052193	390064,486	5087591,253	4399,498
P0052194	390069,895	5087860,350	4397,053
P0052195	390075,670	5088128,843	4394,931
P0052196	390077,959	5088396,701	4393,475
P0052197	390084,332	5088667,923	4400,280
P0052198	390085,554	5088938,574	4406,132
P0052199	390078,396	5089209,236	4410,979
P0052200	390071,775	5089477,723	4411,371
P0052201	390066,755	5089748,003	4411,515
P0052202	390064,817	5090018,828	4413,411
P0052203	390073,932	5090290,415	4415,511
P0052204	390080,718	5090562,086	4407,878
P0052205	390078,884	5090833,000	4398,292
P0052206	390078,285	5091103,194	4383,014
P0052207	390080,259	5091374,225	4375,502
P0052208	390080,648	5091650,334	4379,310
P0052209	390077,799	5091922,176	4377,561
P0052210	390083,280	5092193,647	4381,037
P0052211	390089,268	5092465,592	4384,593
P0052212	390092,970	5092734,694	4379,289
P0052213	390092,602	5093010,172	4380,931
P0052215	390922,344	5093361,621	4295,516
P0052216	390886,465	5093092,235	4296,871
P0052217	390868,163	5092824,046	4299,554
P0052218	390860,128	5092553,137	4299,221
P0052219	390858,136	5092283,438	4299,919
P0052220	390854,589	5092015,068	4300,760
P0052221	390850,437	5091745,817	4300,065
P0052222	390847,378	5091475,110	4299,255

P0052223	390847,044	5091205,520	4297,967
P0052224	390851,932	5090932,569	4294,044
P0052225	390860,854	5090664,842	4294,197
P0052226	390870,342	5090395,357	4292,729
P0052227	390876,380	5090124,853	4287,582
P0052228	390881,052	5089854,886	4286,735
P0052229	390887,608	5089585,474	4292,708
P0052230	390896,536	5089315,551	4304,891
P0052231	390903,598	5089044,790	4319,467
P0052232	390894,995	5088774,710	4339,111
P0052233	390912,661	5088505,624	4359,669
P0052234	391008,359	5088256,788	4368,928
P0052235	391179,584	5088046,349	4387,330
P0052236	391410,116	5087903,930	4407,440
P0052238	391861,583	5087629,967	4407,379
P0052239	391946,792	5087378,129	4396,825
P0052240	391886,761	5087107,466	4382,296
P0052241	391743,925	5086881,276	4370,996
P0052242	391547,344	5086684,333	4352,426
P0052243	391329,713	5086521,973	4325,719
P0052244	391102,395	5086377,507	4318,225
P0052245	390847,170	5086254,449	4321,046
P0052246	390585,466	5086178,089	4327,120
P0052247	390315,749	5086140,415	4330,893
P0052248	388461,577	5087177,316	4419,719
P0052249	388442,276	5087444,424	4413,984
P0052250	388443,015	5087714,377	4410,234
P0052251	388445,492	5087980,053	4393,633
P0052252	388443,071	5088250,533	4381,305
P0052253	388441,540	5088520,768	4372,170
P0052254	388444,875	5088793,063	4366,110
P0052255	388454,073	5089064,551	4362,944
P0052256	388460,653	5089332,321	4354,666
P0052257	388463,529	5089604,588	4350,119
P0052258	388458,188	5089877,832	4345,132
P0052259	388453,356	5090148,275	4335,370
P0052260	388452,091	5090416,039	4320,692
P0052261	388445,562	5090681,092	4294,725
P0052262	388436,671	5090949,883	4275,004
P0052263	388433,961	5091223,771	4257,076
P0052264	388421,074	5091488,671	4237,062
P0052265	388421,025	5091756,702	4219,451
P0052266	388424,924	5092028,610	4208,169
P0052267	388425,502	5092305,072	4204,921
P0052268	388422,226	5092573,923	4192,943

P0052269	388425,334	5092845,344	4184,291
P0052270	388430,963	5093114,792	4174,882
P0052271	388427,568	5093383,359	4165,808
P0052272	390717,576	5093376,056	4200,836
P0052273	390740,061	5093106,315	4200,058
P0052274	390781,800	5092840,861	4203,895
P0052275	390860,124	5092582,831	4209,148
P0052276	390954,033	5092329,525	4209,819
P0052277	391033,602	5092072,324	4214,427
P0052278	391093,738	5091807,475	4225,839
P0052279	391107,265	5091538,023	4226,894
P0052280	391057,387	5091269,469	4225,739
P0052281	390731,337	5092538,622	4268,007
P0052282	390839,327	5092294,717	4268,070
P0052283	390988,156	5092068,265	4265,740
P0052284	391134,751	5091845,017	4273,209
P0052285	391272,772	5091611,940	4288,370
P0052286	391392,952	5091370,579	4299,458
P0052287	391485,657	5091117,589	4304,072
P0052288	391531,413	5090850,325	4309,578
P0052289	391531,392	5090578,498	4317,165
P0052290	391515,675	5090310,175	4328,263
P0052291	391496,905	5090038,997	4341,123
P0052292	391466,791	5089772,262	4342,232
P0052293	391377,061	5089514,215	4347,309
P0052294	391242,262	5089273,453	4363,553
P0052295	390388,275	5089210,374	4486,488
P0052296	390494,274	5089439,676	4493,606
P0052297	390638,290	5089662,033	4490,799
P0052298	390790,426	5089883,059	4490,148
P0052299	390935,786	5090122,352	4501,022
P0052300	391052,436	5090383,826	4525,118
P0052301	391208,164	5090598,973	4531,750
P0052302	391409,116	5090761,963	4536,613
P0052303	391647,273	5090850,178	4536,680
P0052304	391910,163	5090994,741	4548,449
P0052305	391796,156	5091154,110	4526,093
P0052306	391537,663	5091127,874	4538,821
P0052307	391276,902	5091058,034	4546,791
P0052308	391010,647	5091029,979	4521,339
P0052309	387973,648	5093343,362	4297,960
P0052310	387963,276	5093075,148	4299,748
P0052311	387984,284	5092805,858	4293,220
P0052312	388003,864	5092536,984	4284,204
P0052313	388015,829	5092267,789	4278,754

P0052314	388024,458	5091997,465	4271,993
P0052315	388033,119	5091728,111	4265,391
P0052316	388040,061	5091458,073	4260,147
P0052317	388037,174	5091188,345	4256,005
P0052318	388033,526	5090918,586	4247,273
P0052319	388032,737	5090648,768	4235,790
P0052320	388034,059	5090378,669	4226,812
P0052321	388032,554	5090108,767	4220,252
P0052322	388031,459	5089839,653	4214,375
P0052323	388034,851	5089568,813	4208,072
P0052324	388039,342	5089299,211	4200,533
P0052325	388044,266	5089029,103	4194,262
P0052326	388047,266	5088759,668	4185,380
P0052327	388045,469	5088489,152	4176,937
P0052328	388042,880	5088219,712	4165,091
P0052329	388040,433	5087949,631	4154,270
P0052330	388036,272	5087679,450	4148,294
P0052331	388036,605	5087406,182	4152,256
P0052332	387696,709	5087450,922	4152,025
P0052333	387690,939	5087720,463	4137,744
P0052334	387678,092	5087992,369	4128,386
P0052335	387672,464	5088264,027	4124,130
P0052336	387661,947	5088529,627	4106,219
P0052337	387651,315	5088800,306	4083,597
P0052338	387654,089	5089070,623	4067,207
P0052339	387664,490	5089343,511	4068,390
P0052340	387660,953	5089612,610	4069,767
P0052341	387662,051	5089883,794	4074,911
P0052342	387663,736	5090152,667	4075,956
P0052343	387677,861	5090421,956	4077,382
P0052344	387732,769	5090678,465	4091,631
P0052345	387860,145	5090907,804	4099,093
P0052346	388027,910	5091122,663	4110,127
P0052347	388206,750	5091328,666	4112,187
P0052348	388402,870	5091500,043	4112,290
P0052349	388641,521	5091608,637	4112,362
P0052350	388894,105	5091663,021	4103,549
P0052351	389159,246	5091665,581	4097,576
P0052352	389419,570	5091612,227	4096,003
P0052353	389660,871	5091500,197	4094,376
P0052354	389870,646	5091336,232	4092,153
P0052355	390039,986	5091126,974	4088,452
P0052356	390164,598	5090889,828	4083,045
P0052357	390245,994	5090631,444	4086,584
P0052358	390284,676	5090363,926	4103,761

P0052359	390284,790	5090092,870	4125,855
P0052360	390258,348	5089824,617	4145,997
P0052361	390201,663	5089558,054	4162,669
P0052362	390103,208	5089304,888	4186,899
P0052363	389981,018	5089062,668	4215,591
P0052364	389876,313	5088817,334	4234,033
P0052365	389769,727	5088568,967	4246,733
P0052366	389651,365	5088327,791	4258,228

COORDINATE [m] METASHAPE			
NOME FOTO	EST (X) [m]	NORD (Y) [m]	QUOTA (Z) [m]
P0052048	387177,753	5085468,526	3736,384
P0052049	387184,913	5085738,079	3767,641
P0052050	387199,668	5086000,932	3785,428
P0052051	387167,544	5086291,638	3795,730
P0052052	387133,859	5086546,604	3817,015
P0052053	387180,856	5086819,493	3858,907
P0052054	387188,692	5087098,934	3863,864
P0052055	387193,218	5087372,123	3856,636
P0052056	387201,884	5087627,882	3843,461
P0052057	387182,833	5087903,519	3834,066
P0052058	387202,360	5088171,345	3831,642
P0052059	387181,422	5088433,575	3793,191
P0052060	387134,541	5085884,669	3981,600
P0052061	387397,142	5085815,157	3990,976
P0052062	387672,264	5085776,443	4007,996
P0052063	387946,813	5085782,807	4029,901
P0052064	388216,157	5085840,337	4051,738
P0052065	388473,037	5085930,274	4082,328
P0052066	388716,911	5086040,966	4099,652
P0052067	388945,614	5086178,424	4116,693
P0052068	389170,265	5086343,864	4153,447
P0052069	389348,214	5086542,997	4163,193
P0052070	389479,809	5086776,356	4178,150
P0052071	389567,724	5087041,937	4207,521
P0052072	389614,926	5087310,286	4241,298
P0052073	389622,539	5087578,712	4263,416
P0052074	389621,030	5087845,502	4284,460
P0052075	389621,199	5088114,088	4312,622
P0052076	389635,628	5088384,639	4342,863
P0052077	389647,829	5088654,192	4367,944
P0052078	389655,805	5088927,110	4394,254
P0052079	389659,983	5089194,286	4402,724
P0052080	389657,859	5089461,702	4408,196

P0052081	389661,321	5089729,865	4410,745
P0052082	389664,925	5089999,299	4413,270
P0052083	389665,049	5090268,855	4410,466
P0052084	389656,161	5090537,050	4400,340
P0052085	389652,834	5090807,811	4391,722
P0052086	389654,302	5091083,363	4385,437
P0052087	389658,862	5091360,071	4379,875
P0052088	389665,016	5091629,182	4368,018
P0052089	389667,823	5091898,916	4364,026
P0052090	389674,830	5092171,204	4359,933
P0052091	389680,388	5092444,490	4357,254
P0052092	389678,452	5092717,544	4356,621
P0052093	389681,963	5092991,726	4358,379
P0052094	389674,352	5093263,580	4353,945
P0052095	389174,881	5093384,188	4351,670
P0052096	389223,527	5093116,578	4351,915
P0052097	389253,508	5092848,558	4347,478
P0052098	389261,158	5092578,012	4344,030
P0052099	389262,843	5092308,058	4338,656
P0052100	389262,946	5092040,875	4325,182
P0052101	389261,929	5091771,148	4310,452
P0052102	389259,638	5091501,638	4303,741
P0052103	389256,885	5091231,966	4296,282
P0052104	389250,330	5090959,094	4289,573
P0052105	389243,832	5090693,449	4284,912
P0052106	389240,266	5090422,576	4281,288
P0052107	389236,628	5090152,943	4279,789
P0052108	389233,986	5089884,104	4278,939
P0052109	389231,786	5089613,158	4279,324
P0052110	389230,481	5089344,803	4281,820
P0052111	389229,983	5089073,607	4283,421
P0052113	389234,331	5088534,490	4285,582
P0052114	389236,548	5088265,700	4286,887
P0052115	389240,111	5087995,007	4288,502
P0052116	389245,081	5087724,476	4289,546
P0052117	389250,465	5087455,601	4293,251
P0052118	389256,379	5087185,435	4300,689
P0052119	389260,726	5086913,816	4309,803
P0052120	389263,468	5086644,794	4313,561
P0052121	389266,122	5086375,639	4322,968
P0052122	389271,604	5086105,479	4330,982
P0052123	389276,566	5085835,170	4339,000
P0052124	389278,653	5085564,862	4352,597
P0052125	390452,716	5085446,147	4361,936
P0052126	390460,944	5085722,123	4368,140

P0052127	390468,944	5085992,521	4369,455
P0052128	390475,867	5086258,461	4363,329
P0052129	390480,372	5086526,221	4366,400
P0052130	390477,131	5086793,967	4367,084
P0052131	390473,883	5087060,431	4375,458
P0052132	390494,051	5087354,934	4430,113
P0052133	390487,191	5087614,163	4439,368
P0052134	390483,183	5087877,653	4452,344
P0052135	390490,707	5088149,208	4476,302
P0052136	390487,234	5088419,735	4500,532
P0052137	390488,757	5088686,647	4512,133
P0052138	390482,290	5088954,551	4525,214
P0052139	390479,212	5089223,490	4539,252
P0052140	390477,565	5089493,932	4552,257
P0052141	390476,114	5089764,416	4559,960
P0052142	390475,732	5090035,762	4563,992
P0052143	390478,229	5090305,986	4558,976
P0052144	390481,619	5090576,658	4550,736
P0052145	390482,303	5090847,676	4536,152
P0052146	390480,323	5091118,228	4523,994
P0052147	390481,755	5091389,765	4513,779
P0052148	390482,439	5091658,777	4498,876
P0052149	390479,199	5091931,097	4493,487
P0052150	390479,610	5092198,521	4482,988
P0052151	390478,117	5092466,564	4472,195
P0052152	390476,615	5092735,701	4461,343
P0052153	390477,722	5093002,907	4446,678
P0052154	390480,443	5093270,635	4428,782
P0052155	388813,923	5093337,079	4322,325
P0052156	388832,626	5093066,615	4311,831
P0052157	388844,917	5092796,631	4304,359
P0052158	388852,763	5092526,353	4295,483
P0052159	388856,440	5092256,994	4285,390
P0052160	388857,037	5091986,102	4277,499
P0052161	388855,423	5091716,001	4269,304
P0052162	388852,586	5091446,133	4257,592
P0052163	388847,263	5091176,030	4247,095
P0052164	388842,880	5090906,463	4245,488
P0052165	388839,652	5090636,266	4244,020
P0052166	388835,947	5090365,649	4239,164
P0052167	388833,110	5090096,130	4233,390
P0052168	388832,841	5089826,176	4228,944
P0052169	388832,276	5089556,551	4226,369
P0052170	388831,713	5089287,127	4224,727
P0052171	388830,309	5089017,435	4221,309

P0052172	388827,506	5088747,570	4216,179
P0052173	388819,681	5088477,785	4211,789
P0052174	388806,818	5088208,030	4210,055
P0052175	388797,719	5087938,647	4210,779
P0052176	388788,949	5087667,436	4213,007
P0052177	388784,502	5087398,960	4213,620
P0052178	388787,351	5087128,678	4214,706
P0052179	388792,497	5086859,003	4215,086
P0052180	388795,025	5086589,403	4219,898
P0052181	388796,809	5086318,848	4225,755
P0052182	388799,554	5086049,220	4231,061
P0052183	388802,984	5085779,245	4238,459
P0052184	388805,940	5085509,866	4249,573
P0052185	389972,571	5085459,182	4391,650
P0052186	390003,906	5085720,181	4399,013
P0052187	390028,712	5085983,710	4401,846
P0052188	390032,351	5086248,156	4401,850
P0052189	390042,994	5086514,201	4394,825
P0052190	390053,629	5086784,189	4398,417
P0052191	390061,911	5087053,847	4400,910
P0052192	390060,599	5087323,264	4401,106
P0052193	390064,388	5087591,532	4400,347
P0052194	390069,818	5087860,495	4397,846
P0052195	390075,624	5088128,865	4395,693
P0052196	390077,952	5088396,580	4394,223
P0052197	390084,342	5088667,667	4401,046
P0052198	390085,564	5088938,212	4406,994
P0052199	390078,399	5089208,777	4411,973
P0052200	390071,625	5089477,516	4412,396
P0052201	390066,566	5089747,869	4412,572
P0052202	390064,653	5090018,744	4414,470
P0052203	390073,729	5090290,386	4416,601
P0052204	390080,575	5090562,198	4408,948
P0052205	390078,736	5090833,111	4399,331
P0052206	390078,082	5091103,403	4384,028
P0052207	390080,106	5091374,463	4376,435
P0052208	390080,527	5091650,563	4380,199
P0052209	390077,675	5091922,466	4378,444
P0052210	390082,963	5092194,078	4381,600
P0052211	390088,836	5092465,869	4385,181
P0052212	390092,521	5092734,946	4379,844
P0052213	390092,125	5093010,452	4381,394
P0052215	390921,898	5093361,954	4296,283
P0052216	390885,989	5093092,523	4297,605
P0052217	390867,742	5092824,459	4300,335

P0052218	390859,758	5092553,607	4300,046
P0052219	390857,865	5092283,882	4300,802
P0052220	390854,347	5092015,520	4301,711
P0052221	390850,284	5091746,274	4301,070
P0052222	390847,228	5091475,418	4300,327
P0052223	390846,934	5091205,753	4299,050
P0052224	390851,794	5090932,800	4295,160
P0052225	390860,673	5090665,020	4295,346
P0052226	390870,160	5090395,436	4293,901
P0052227	390876,255	5090124,834	4288,745
P0052228	390880,920	5089854,870	4287,872
P0052229	390887,487	5089585,375	4293,831
P0052230	390896,327	5089315,433	4305,983
P0052231	390903,175	5089044,665	4320,658
P0052232	390894,555	5088774,566	4340,151
P0052233	390912,081	5088505,620	4360,837
P0052234	391007,575	5088256,695	4370,218
P0052235	391178,840	5088046,459	4388,458
P0052236	391409,964	5087904,089	4408,770
P0052238	391861,703	5087629,520	4408,952
P0052239	391947,185	5087377,587	4398,693
P0052240	391887,394	5087106,993	4383,936
P0052241	391743,889	5086879,881	4372,696
P0052242	391546,680	5086683,621	4353,673
P0052243	391329,236	5086521,711	4326,705
P0052244	391102,104	5086377,401	4319,122
P0052245	390847,206	5086254,359	4321,840
P0052246	390585,262	5086177,891	4328,090
P0052247	390315,435	5086140,123	4331,817
P0052248	388462,121	5087177,213	4420,350
P0052249	388442,801	5087444,234	4414,633
P0052250	388443,514	5087714,076	4410,898
P0052251	388445,873	5087979,796	4394,346
P0052252	388444,136	5088249,878	4381,955
P0052253	388442,251	5088520,433	4372,887
P0052254	388445,634	5088792,788	4366,851
P0052255	388454,889	5089064,363	4363,703
P0052256	388461,166	5089332,169	4355,505
P0052257	388463,953	5089604,469	4350,972
P0052258	388458,554	5089877,798	4345,994
P0052259	388453,486	5090148,348	4336,202
P0052260	388452,164	5090416,135	4321,515
P0052261	388445,591	5090681,230	4295,512
P0052262	388436,756	5090950,032	4275,756
P0052263	388434,104	5091223,971	4257,774

P0052264	388421,186	5091488,837	4237,706
P0052265	388421,125	5091756,818	4220,041
P0052266	388424,931	5092028,878	4208,657
P0052267	388425,779	5092305,182	4205,433
P0052268	388422,311	5092573,857	4193,347
P0052269	388425,370	5092845,334	4184,683
P0052270	388430,968	5093114,790	4175,247
P0052271	388427,510	5093383,302	4166,142
P0052272	390717,127	5093376,366	4201,455
P0052273	390739,621	5093106,581	4200,681
P0052274	390781,416	5092841,189	4204,588
P0052275	390859,759	5092583,282	4209,898
P0052276	390953,780	5092329,951	4210,654
P0052277	391033,454	5092072,772	4215,331
P0052278	391093,636	5091807,941	4226,791
P0052279	391107,209	5091538,399	4227,918
P0052280	391057,306	5091269,726	4226,801
P0052281	390730,939	5092539,048	4268,759
P0052282	390839,070	5092295,135	4268,930
P0052283	390987,979	5092068,705	4266,680
P0052284	391134,612	5091845,491	4274,217
P0052285	391272,717	5091612,325	4289,456
P0052286	391392,785	5091370,943	4300,638
P0052287	391485,584	5091117,848	4305,315
P0052288	391531,320	5090850,555	4310,880
P0052289	391531,233	5090578,709	4318,478
P0052290	391516,207	5090309,544	4329,159
P0052291	391496,913	5090039,389	4342,563
P0052292	391466,857	5089772,217	4343,451
P0052293	391377,021	5089514,144	4348,541
P0052294	391242,126	5089273,340	4364,766
P0052295	390388,176	5089210,172	4487,544
P0052296	390494,056	5089439,533	4494,751
P0052297	390638,096	5089661,849	4491,981
P0052298	390790,168	5089882,989	4491,402
P0052299	390935,603	5090122,403	4502,319
P0052300	391052,240	5090383,944	4526,490
P0052301	391207,979	5090599,174	4533,177
P0052302	391408,947	5090762,201	4538,082
P0052303	391647,180	5090850,435	4538,174
P0052304	391910,095	5090995,111	4550,077
P0052305	391796,081	5091154,453	4527,644
P0052306	391537,499	5091128,213	4540,297
P0052307	391276,730	5091058,356	4548,199
P0052308	391010,451	5091030,253	4522,648

P0052309	387973,694	5093343,319	4298,337
P0052310	387963,318	5093075,161	4300,166
P0052311	387984,380	5092805,875	4293,687
P0052312	388003,951	5092537,105	4284,693
P0052313	388015,936	5092267,929	4279,280
P0052314	388024,513	5091997,570	4272,561
P0052315	388033,218	5091728,223	4266,004
P0052316	388040,194	5091458,251	4260,802
P0052317	388037,289	5091188,509	4256,684
P0052318	388033,636	5090918,749	4247,979
P0052319	388032,905	5090648,911	4236,550
P0052320	388034,224	5090378,731	4227,598
P0052321	388032,756	5090108,820	4221,057
P0052322	388031,791	5089839,676	4215,214
P0052323	388035,226	5089568,689	4208,916
P0052324	388040,095	5089299,096	4201,470
P0052325	388044,943	5089029,251	4195,162
P0052326	388048,102	5088759,506	4186,240
P0052327	388046,439	5088488,677	4177,790
P0052328	388043,711	5088219,239	4165,873
P0052329	388040,979	5087949,284	4154,904
P0052330	388036,438	5087679,352	4148,867
P0052331	388036,952	5087406,645	4152,871
P0052332	387696,658	5087450,879	4152,260
P0052333	387691,246	5087720,219	4138,168
P0052334	387678,558	5087992,067	4129,010
P0052335	387673,017	5088263,705	4124,917
P0052336	387662,526	5088529,287	4107,065
P0052337	387651,781	5088800,099	4084,453
P0052338	387654,484	5089070,461	4068,035
P0052339	387664,852	5089343,405	4069,232
P0052340	387661,292	5089612,549	4070,610
P0052341	387662,346	5089883,805	4075,730
P0052342	387663,938	5090152,725	4076,712
P0052343	387678,031	5090422,050	4078,115
P0052344	387732,903	5090678,590	4092,306
P0052345	387860,252	5090907,940	4099,730
P0052346	388028,022	5091122,853	4110,782
P0052347	388206,841	5091328,875	4112,796
P0052348	388402,901	5091500,228	4112,900
P0052349	388641,581	5091608,746	4112,994
P0052350	388894,245	5091663,142	4104,165
P0052351	389159,199	5091665,831	4098,098
P0052352	389419,512	5091612,510	4096,598
P0052353	389660,867	5091500,615	4095,019

P0052354	389870,377	5091336,570	4092,905
P0052355	390039,942	5091127,138	4089,269
P0052356	390164,518	5090890,023	4083,880
P0052357	390245,968	5090631,562	4087,468
P0052358	390284,659	5090363,897	4104,661
P0052359	390284,727	5090092,885	4126,739
P0052360	390258,239	5089824,630	4146,892
P0052361	390201,537	5089558,014	4163,542
P0052362	390103,226	5089304,701	4187,734
P0052363	389981,112	5089062,399	4216,352
P0052364	389876,404	5088817,094	4234,747
P0052365	389769,858	5088568,773	4247,377
P0052366	389651,504	5088327,706	4258,852

DIFFERENZA META - CUBE [m]			
NOME FOTO	Δ EST (X) [m]	Δ NORD (Y) [m]	Δ QUOTA (Z) [m]
P0052048	6,610	0,746	0,387
P0052049	2,711	2,220	1,940
P0052050	2,748	1,751	1,656
P0052051	2,595	1,165	1,481
P0052052	3,053	1,697	1,239
P0052053	3,066	2,493	0,749
P0052054	2,006	2,048	0,383
P0052055	1,856	1,204	0,080
P0052056	1,868	0,613	-0,067
P0052057	1,860	0,108	-0,183
P0052058	0,485	-0,407	0,795
P0052059	0,427	-0,240	0,803
P0052060	2,534	1,971	1,657
P0052061	1,787	1,953	1,244
P0052062	2,049	1,276	0,796
P0052063	1,381	1,158	0,522
P0052064	0,755	0,982	0,473
P0052065	0,411	0,764	0,458
P0052066	0,276	0,690	0,515
P0052067	0,258	0,610	0,520
P0052068	0,106	0,437	0,544
P0052069	0,068	0,412	0,604
P0052070	0,041	0,245	0,631
P0052071	0,028	0,221	0,671
P0052072	-0,003	0,192	0,698
P0052073	0,063	0,055	0,669
P0052074	0,051	0,038	0,678
P0052075	0,069	0,042	0,694

P0052076	0,112	-0,039	0,682
P0052077	0,195	-0,188	0,665
P0052078	0,147	-0,397	0,746
P0052079	0,444	-1,073	0,633
P0052080	-0,061	-0,296	0,929
P0052081	-0,100	-0,094	0,954
P0052082	-0,139	0,025	0,988
P0052083	-0,171	0,005	0,995
P0052084	-0,108	0,083	0,980
P0052085	-0,092	0,122	0,943
P0052086	-0,138	0,168	0,925
P0052087	-0,154	0,209	0,867
P0052088	-0,171	0,267	0,828
P0052089	-0,086	0,262	0,741
P0052090	0,056	0,399	0,411
P0052091	-0,083	0,213	0,399
P0052092	-0,129	0,056	0,376
P0052093	-0,140	-0,073	0,367
P0052094	-0,132	-0,119	0,367
P0052095	0,006	-0,127	0,437
P0052096	0,006	-0,049	0,406
P0052097	0,002	-0,109	0,375
P0052098	0,105	0,047	0,376
P0052099	0,153	0,336	0,416
P0052100	0,073	0,351	0,557
P0052101	-0,118	0,369	0,672
P0052102	-0,047	0,270	0,722
P0052103	-0,109	0,354	0,756
P0052104	-0,070	0,207	0,808
P0052105	-0,078	0,202	0,846
P0052106	-0,035	0,319	0,871
P0052107	0,013	0,036	0,849
P0052108	-0,054	0,104	0,899
P0052109	-0,010	0,124	0,779
P0052110	0,003	0,159	0,807
P0052111	-0,100	0,106	0,900
P0052113	0,115	-0,111	0,697
P0052114	0,161	-0,058	0,660
P0052115	0,134	0,024	0,657
P0052116	0,101	0,037	0,645
P0052117	0,097	0,141	0,633
P0052118	0,073	0,231	0,641
P0052119	0,040	0,312	0,651
P0052120	0,055	0,464	0,655
P0052121	0,045	0,571	0,668

P0052122	0,034	0,630	0,650
P0052123	0,010	0,683	0,621
P0052124	-0,058	0,869	0,656
P0052125	-0,575	-0,014	0,707
P0052126	-0,556	-0,361	0,707
P0052127	-0,546	-0,251	0,906
P0052128	-0,251	-0,094	1,023
P0052129	-0,181	0,023	1,058
P0052130	-0,123	0,266	1,012
P0052131	-0,098	0,376	0,986
P0052132	-0,197	0,552	0,997
P0052133	-0,292	0,417	0,981
P0052134	-0,327	0,220	0,962
P0052135	-0,243	0,088	0,875
P0052136	-0,279	-0,134	0,919
P0052137	-0,234	-0,271	0,956
P0052138	-0,243	-0,284	1,053
P0052139	-0,208	-0,293	1,141
P0052140	-0,159	-0,268	1,189
P0052141	-0,196	-0,205	1,254
P0052142	-0,251	-0,101	1,292
P0052143	-0,283	0,037	1,292
P0052144	-0,271	0,177	1,272
P0052145	-0,283	0,242	1,232
P0052146	-0,225	0,253	1,180
P0052147	-0,266	0,237	1,149
P0052148	-0,249	0,377	1,092
P0052149	-0,307	0,453	1,045
P0052150	-0,405	0,428	0,915
P0052151	-0,499	0,357	0,806
P0052152	-0,530	0,324	0,742
P0052153	-0,546	0,240	0,703
P0052154	-0,561	0,259	0,741
P0052155	0,002	-0,149	0,515
P0052156	0,010	-0,087	0,469
P0052157	0,129	-0,015	0,447
P0052158	0,030	-0,016	0,512
P0052159	0,047	0,301	0,546
P0052160	0,016	0,165	0,586
P0052161	0,032	0,161	0,661
P0052162	0,075	0,341	0,655
P0052163	0,049	0,320	0,685
P0052164	-0,007	0,215	0,739
P0052165	-0,039	0,207	0,780
P0052166	-0,100	0,103	0,822

P0052167	0,041	-0,090	0,796
P0052168	0,025	-0,024	0,802
P0052169	0,057	-0,047	0,815
P0052170	0,168	0,114	0,733
P0052171	0,084	0,038	0,760
P0052172	0,285	-0,256	0,653
P0052173	0,181	-0,033	0,626
P0052174	0,118	0,072	0,651
P0052175	0,159	0,025	0,643
P0052176	0,238	-0,021	0,611
P0052177	0,260	0,056	0,601
P0052178	0,272	0,097	0,584
P0052179	0,254	0,213	0,565
P0052180	0,288	0,341	0,530
P0052181	0,306	0,532	0,506
P0052182	0,299	0,756	0,511
P0052183	0,253	0,938	0,551
P0052184	0,271	1,117	0,610
P0052185	-0,504	-0,015	0,586
P0052186	-0,473	0,089	0,811
P0052187	-0,425	-0,324	0,738
P0052188	0,558	0,619	1,398
P0052189	-0,073	0,204	0,941
P0052190	-0,023	0,153	0,926
P0052191	-0,036	0,260	0,882
P0052192	-0,067	0,282	0,875
P0052193	-0,098	0,279	0,849
P0052194	-0,077	0,145	0,793
P0052195	-0,046	0,022	0,762
P0052196	-0,007	-0,121	0,748
P0052197	0,010	-0,256	0,766
P0052198	0,010	-0,362	0,862
P0052199	0,003	-0,459	0,994
P0052200	-0,150	-0,207	1,025
P0052201	-0,189	-0,134	1,057
P0052202	-0,164	-0,084	1,059
P0052203	-0,203	-0,029	1,090
P0052204	-0,143	0,112	1,070
P0052205	-0,148	0,111	1,039
P0052206	-0,203	0,209	1,014
P0052207	-0,153	0,238	0,933
P0052208	-0,121	0,229	0,889
P0052209	-0,124	0,290	0,883
P0052210	-0,317	0,431	0,563
P0052211	-0,432	0,277	0,588

P0052212	-0,449	0,252	0,555
P0052213	-0,477	0,280	0,463
P0052215	-0,446	0,333	0,767
P0052216	-0,476	0,288	0,734
P0052217	-0,421	0,413	0,781
P0052218	-0,370	0,470	0,825
P0052219	-0,271	0,444	0,883
P0052220	-0,242	0,452	0,951
P0052221	-0,153	0,457	1,005
P0052222	-0,150	0,308	1,072
P0052223	-0,110	0,233	1,083
P0052224	-0,138	0,231	1,116
P0052225	-0,181	0,178	1,149
P0052226	-0,182	0,079	1,172
P0052227	-0,125	-0,019	1,163
P0052228	-0,132	-0,016	1,137
P0052229	-0,121	-0,099	1,123
P0052230	-0,209	-0,118	1,092
P0052231	-0,423	-0,125	1,191
P0052232	-0,440	-0,144	1,040
P0052233	-0,580	-0,004	1,168
P0052234	-0,784	-0,093	1,290
P0052235	-0,744	0,110	1,128
P0052236	-0,152	0,159	1,330
P0052238	0,120	-0,447	1,573
P0052239	0,393	-0,542	1,868
P0052240	0,633	-0,473	1,640
P0052241	-0,036	-1,395	1,700
P0052242	-0,664	-0,712	1,247
P0052243	-0,477	-0,262	0,986
P0052244	-0,291	-0,106	0,897
P0052245	0,036	-0,090	0,794
P0052246	-0,204	-0,198	0,970
P0052247	-0,314	-0,292	0,924
P0052248	0,544	-0,103	0,631
P0052249	0,525	-0,190	0,649
P0052250	0,499	-0,301	0,664
P0052251	0,381	-0,257	0,713
P0052252	1,065	-0,655	0,650
P0052253	0,711	-0,335	0,717
P0052254	0,759	-0,275	0,741
P0052255	0,816	-0,188	0,759
P0052256	0,513	-0,152	0,839
P0052257	0,424	-0,119	0,853
P0052258	0,366	-0,034	0,862

P0052259	0,130	0,073	0,832
P0052260	0,073	0,096	0,823
P0052261	0,029	0,138	0,787
P0052262	0,085	0,149	0,752
P0052263	0,143	0,200	0,698
P0052264	0,112	0,166	0,644
P0052265	0,100	0,116	0,590
P0052266	0,007	0,268	0,488
P0052267	0,277	0,110	0,512
P0052268	0,085	-0,066	0,404
P0052269	0,036	-0,010	0,392
P0052270	0,005	-0,002	0,365
P0052271	-0,058	-0,057	0,334
P0052272	-0,449	0,310	0,619
P0052273	-0,440	0,266	0,623
P0052274	-0,384	0,328	0,693
P0052275	-0,365	0,451	0,750
P0052276	-0,253	0,426	0,835
P0052277	-0,148	0,448	0,904
P0052278	-0,102	0,466	0,952
P0052279	-0,056	0,376	1,024
P0052280	-0,081	0,257	1,062
P0052281	-0,398	0,426	0,752
P0052282	-0,257	0,418	0,860
P0052283	-0,177	0,440	0,940
P0052284	-0,139	0,474	1,008
P0052285	-0,055	0,385	1,086
P0052286	-0,167	0,364	1,180
P0052287	-0,073	0,259	1,243
P0052288	-0,093	0,230	1,302
P0052289	-0,159	0,211	1,313
P0052290	0,532	-0,631	0,896
P0052291	0,008	0,392	1,440
P0052292	0,066	-0,045	1,219
P0052293	-0,040	-0,071	1,232
P0052294	-0,136	-0,113	1,213
P0052295	-0,099	-0,202	1,056
P0052296	-0,218	-0,143	1,145
P0052297	-0,194	-0,184	1,182
P0052298	-0,258	-0,070	1,254
P0052299	-0,183	0,051	1,297
P0052300	-0,196	0,118	1,372
P0052301	-0,185	0,201	1,427
P0052302	-0,169	0,238	1,469
P0052303	-0,093	0,257	1,494

P0052304	-0,068	0,370	1,628
P0052305	-0,075	0,343	1,551
P0052306	-0,164	0,339	1,476
P0052307	-0,172	0,322	1,408
P0052308	-0,196	0,274	1,309
P0052309	0,046	-0,043	0,377
P0052310	0,042	0,013	0,418
P0052311	0,096	0,017	0,467
P0052312	0,087	0,121	0,489
P0052313	0,107	0,140	0,526
P0052314	0,055	0,105	0,568
P0052315	0,099	0,112	0,613
P0052316	0,133	0,178	0,655
P0052317	0,115	0,164	0,679
P0052318	0,110	0,163	0,706
P0052319	0,168	0,143	0,760
P0052320	0,165	0,062	0,786
P0052321	0,202	0,053	0,805
P0052322	0,332	0,023	0,839
P0052323	0,375	-0,124	0,844
P0052324	0,753	-0,115	0,937
P0052325	0,677	0,148	0,900
P0052326	0,836	-0,162	0,860
P0052327	0,970	-0,475	0,853
P0052328	0,831	-0,473	0,782
P0052329	0,546	-0,347	0,634
P0052330	0,166	-0,098	0,573
P0052331	0,347	0,463	0,615
P0052332	-0,051	-0,043	0,235
P0052333	0,307	-0,244	0,424
P0052334	0,466	-0,302	0,624
P0052335	0,553	-0,322	0,787
P0052336	0,579	-0,340	0,846
P0052337	0,466	-0,207	0,856
P0052338	0,395	-0,162	0,828
P0052339	0,362	-0,106	0,842
P0052340	0,339	-0,061	0,843
P0052341	0,295	0,011	0,819
P0052342	0,202	0,058	0,756
P0052343	0,170	0,094	0,733
P0052344	0,134	0,125	0,675
P0052345	0,107	0,136	0,637
P0052346	0,112	0,190	0,655
P0052347	0,091	0,209	0,609
P0052348	0,031	0,185	0,610

P0052349	0,060	0,109	0,632
P0052350	0,140	0,121	0,616
P0052351	-0,047	0,250	0,522
P0052352	-0,058	0,283	0,595
P0052353	-0,004	0,418	0,643
P0052354	-0,269	0,338	0,752
P0052355	-0,044	0,164	0,817
P0052356	-0,080	0,195	0,835
P0052357	-0,026	0,118	0,884
P0052358	-0,017	-0,029	0,900
P0052359	-0,063	0,015	0,884
P0052360	-0,109	0,013	0,895
P0052361	-0,126	-0,040	0,873
P0052362	0,018	-0,187	0,835
P0052363	0,094	-0,269	0,761
P0052364	0,091	-0,240	0,714
P0052365	0,131	-0,194	0,644
P0052366	0,139	-0,085	0,624

10.5. Allegato 5 - Script Matlab confronto DSM

```
% calcolo differenza DSM
nodata=3.5e+4
fl1='Meta_DSM_prova.tif'
fl2='DSM_CUBE_prova.tif'
a=imread(fl1);
b =imread(fl2);
for i=1:1:size(a,1)
    for j=1:1:size(a,2)
        if a(i,j)>0 && b(i,j)>0
            d(i,j)=a(i,j)-b(i,j);
        else
            d(i,j)=nodata;
        end
    end
end
end

save('differenza_dsm.mat','d')

% confronto DSM
clear all
clc
soglia=10; %m
nodata=3.5e+4;
alpha=0.05; %livello di significatività da 0 a 1
tic
disp('legge DSM');
load('differenza_dsm.mat');
DSM_diff=d;
toc
%%%%%%%%%% GENERAZIONE CAMPIONI %%%%%%%%%%%
righe=size(DSM_diff,1);
col=size(DSM_diff,2);
vuota=zeros(righe,col); % matrice degli outliers sopra soglia
contaer=0; % conta errori
contadat_ssoglia=0;
contadat=0; % conta dati
errorvet(1,1)=1;
for i=1:1:righe
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata); %trova errore per no data
            if abs(DSM_diff(i,j))>soglia; %trova errore per soglia
                vuota(i,j)=1; %riempie la matrice degli errori sopra soglia e no data
                contaer=contaer+1;
                errorvet(contaer)=DSM_diff(i,j); %vettore dei punti sopra soglia e no data
```

```

else
contadat_ssoglia=contadat_ssoglia+1;
dativet_ssoglia(contadat_ssoglia)=DSM_diff(i,j);
end
contadat=contadat+1;
dativet(contadat)=DSM_diff(i,j);
end
end
end

dativet=sort(dativet); % campione dei dati
dativet_ssoglia=sort(dativet_ssoglia);
errorvet=sort(errorvet); % campione degli errori
toc

%%%%%%%%%%%%%% STATISTICA %%%%%%%%%%%%%%%

disp('statistica') % statistica media e sqm di tutti
for i=1:1:size(dativet_ssoglia,2); %scrittura size per definire le colonne
freq_ssoglia(i)=i/size(dativet_ssoglia,2);
end
for i=1:1:size(dativet,2); %scrittura size per definire le cononne
freq(i)=i/size(dativet,2);
end
percent=(contae/size(dativet,2))*100;
mediana=median(dativet_ssoglia);
mediana_2=median(dativet);
media=mean(dativet_ssoglia);
media_2=mean(dativet);
sqm=std(dativet_ssoglia);
sqm_2=std(dativet);
v=dativet-media_2;
toc
disp('statistica senza code'); % statistica media e sqm senza code
inizio=fix(size(dativet_ssoglia,2)*alpha/2); % media senza le code ad aplha %
fine=fix(size(dativet_ssoglia,2)*(1-alpha/2));
for i=inizio:1:fine
senzacode(i-inizio+1)=dativet_ssoglia(i);

end
for i=1:1:size(senzacode,2);
freq_senzacode(i)=i/size(senzacode,2);
end
med_senzacode=mean(senzacode);
sqm_senzacode=std(senzacode);
toc

%%%%%%%%%%%%%% figure %%%%%%%%%%%%%%%
figure(1);
set(1,'NumberTitle','off');
set(1,'Name','elevation differences');

```

```

hold all
imshow (DSM_diff);
title(['elevation differences [m]', 'FontSize', 12)
ylabel('Nord', 'FontSize', 12)
xlabel('Est', 'FontSize', 12)

figure(2);
set(2, 'NumberTitle', 'off');
set(2, 'Name', 'elevation differences');
hold all
grid on
plot(dativet, 'LineWidth', 2);
title(['elevation differences [m]', 'FontSize', 12)
xlabel('number of DSM points', 'FontSize', 12)
ylabel('DZ [m]', 'FontSize', 12)
stringa= strcat('ave=', num2str(media_2), ' std=', num2str(sqm_2));
x=size(dativet, 2)/2;
y=max((dativet)+min(dativet))/2*3;
text(x, y, [stringa], 'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment', 'right')

figure(3);
set(3, 'NumberTitle', 'off');
set(3, 'Name', 'frequencies DZ');
hold on
grid on
plot(dativet, freq, 'LineWidth', 2);
title('frequencies DZ ', 'FontSize', 12)
ylabel('relative frequency ', 'FontSize', 12)
xlabel('DZ [m]', 'FontSize', 12)

figure(4);
set(4, 'NumberTitle', 'off');
set(4, 'Name', 'elevation differences');
hold all
grid on
plot(dativet_ssoglia, 'LineWidth', 2);
title(['elevation differences under the threshold ', num2str(soglia), '[m]', 'FontSize', 12)
xlabel('number of DSM points', 'FontSize', 12)
ylabel('DZ [m]', 'FontSize', 12)
stringa= strcat('ave=', num2str(media), ' std=', num2str(sqm));
x=size(dativet_ssoglia, 2)/2; y=max((dativet_ssoglia)+min(dativet_ssoglia))/2*3;
text(x, y, [stringa], 'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment', 'right')

figure(5);
set(5, 'NumberTitle', 'off');
set(5, 'Name', 'elevation differences above the threshold [m]');
hold on
grid on
plot(errorvet, 'LineWidth', 2);
title(['elevation differences above the threshold ', num2str(soglia), ' m - ', num2str(percent), '%'], 'FontSize', 12)

```

```

xlabel('number of DSM points','FontSize',12)
ylabel('DZ [m]','FontSize',12)

figure(6);
set(6,'NumberTitle','off');
set(6,'Name','elevation differences above the threshold');
imshow(vuota);ylabel('Nord','FontSize',12)
title(['elevation differences above the threshold ',num2str(soglia),' m - ',num2str(percent),
'%'], 'FontSize',12)
xlabel('Est','FontSize',12)
ylabel('Nord','FontSize',12)

figure(7);
set(7,'NumberTitle','off');
set(7,'Name','frequencies DZ');
hold on
grid on
plot(dativet_ssoglia,freq_ssoglia,'LineWidth',2);
title(['frequencies DZ under the threshold ( ',num2str(soglia),'[m] ]','FontSize',12)
ylabel('relative frequency ','FontSize',12)
xlabel('DZ [m]','FontSize',12)

figure(8);
set(8,'NumberTitle','off');
set(8,'Name','elevation differences without queues');
hold on
grid on
plot(senzacode,'LineWidth',2)
title(['elevation differences [m] alpha= ',num2str(alpha)], 'FontSize',12)
xlabel('number of DSM points','FontSize',12)
ylabel('DZ [m]','FontSize',12)
stringa=strcat('ave=',num2str(med_senzacode), ' std=',num2str(sqm_senzacode));
x=size(senzacode,2)/2;
y=max((senzacode)+min(senzacode))/2*3;
text(x,y,[stringa],'VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','right')

figure(9);
set(9,'NumberTitle','off');
set(9,'Name','frequencies DZ without queues');
hold on
grid on
plot(senzacode,freq_senzacode,'LineWidth',2)
title('frequencies DZ without queues', 'FontSize',12)
ylabel('relative frequency %','FontSize',12)
xlabel('DZ [m]','FontSize',12)
toc

```

**10.6. Allegato 6 - Posizione ed assetti centri
di presa set fotogrammetrico 2024
marker di appoggio**

#Label	X_est	Y_nord	Z_quota	Yaw	Pitch	Roll
P0086168.jpg	388831,048	5089948,184	4198,852	178,649	1,614	-0,451
P0086169.jpg	388825,846	5089712,191	4202,784	178,481	2,995	-0,729
P0086170.jpg	388822,276	5089475,342	4205,853	175,597	-1,323	0,117
P0086171.jpg	388829,123	5089239,826	4199,894	174,474	0,432	-0,128
P0086196.jpg	388416,447	5087272,790	4019,981	359,050	2,288	-1,198
P0086197.jpg	388421,919	5087508,761	4028,149	2,910	4,024	-1,539
P0086198.jpg	388433,362	5087743,425	4035,327	358,827	2,954	-0,247
P0086199.jpg	388431,093	5087979,763	4035,183	359,008	-0,572	-1,005
P0086203.jpg	388426,652	5088923,746	4006,551	0,538	2,210	-1,161
P0086204.jpg	388432,858	5089160,609	4006,161	358,544	1,958	-0,294
P0086206.jpg	388426,733	5089634,202	4020,860	357,371	4,278	-0,844
P0086245.jpg	388010,469	5089579,858	4161,035	175,303	2,515	-0,893
P0086247.jpg	388017,281	5089108,657	4155,016	172,846	4,213	-1,277
P0085356.jpg	386023,707	5087171,590	3988,586	171,238	3,895	-1,765
P0085357.jpg	386027,315	5086927,098	3989,373	172,109	4,711	-1,666
P0085358.jpg	386023,317	5086683,481	3994,019	173,496	4,137	-1,496
P0085359.jpg	386020,389	5086440,632	3990,781	174,754	1,132	-2,183
P0085360.jpg	386010,524	5086197,051	3985,394	174,942	2,835	-2,036
P0085361.jpg	386427,121	5086253,176	4037,583	5,215	3,885	-1,702
P0085362.jpg	386432,131	5086496,047	4038,871	5,532	3,711	-2,798
P0085363.jpg	386436,203	5086739,834	4038,329	4,368	2,966	-2,036
P0085364.jpg	386438,704	5086983,359	4031,476	4,656	0,616	-2,417
P0085424.jpg	385622,458	5086256,121	3993,999	3,407	3,222	-2,483
P0085425.jpg	385619,660	5086501,454	3997,646	4,293	6,144	-1,735
P0086329.jpg	387190,591	5087297,921	4196,609	177,750	0,290	-1,700
P0085298.jpg	386831,683	5086470,491	4041,489	4,552	3,305	-3,838
P0085299.jpg	386832,624	5086712,660	4035,998	2,182	2,825	-3,000
P0085300.jpg	386829,100	5086956,204	4031,669	0,729	5,229	-3,613
P0085301.jpg	386832,841	5087201,003	4033,707	2,626	4,642	-3,025
P0085302.jpg	386830,172	5087443,931	4032,013	3,683	3,107	-3,527
P0085366.jpg	386426,611	5087469,901	4030,590	7,218	4,600	-2,469
P0086328.jpg	387190,974	5087532,132	4197,574	177,225	1,420	-1,614
P0086251.jpg	388022,363	5088162,420	4156,654	177,921	5,611	-1,274
P0086252.jpg	388017,985	5087926,716	4159,749	176,444	3,538	-0,854
P0086253.jpg	388016,588	5087691,395	4158,715	177,824	0,232	-1,070
P0086165.jpg	388840,874	5090657,306	4185,881	176,736	2,766	-0,316
P0086166.jpg	388838,071	5090421,032	4190,785	177,937	2,401	-0,540

P0086167.jpg	388832,696	5090184,363	4196,339	176,324	2,852	0,250
P0086207.jpg	388425,172	5089869,878	4024,803	359,039	2,322	-0,758
P0086208.jpg	388427,157	5090106,072	4027,402	359,135	3,133	-0,695
P0086209.jpg	388425,776	5090341,192	4030,417	358,704	3,716	-1,329
P0086164.jpg	388842,694	5090892,821	4182,989	177,577	1,703	-0,763
P0086210.jpg	388422,980	5090577,425	4038,736	358,571	1,675	-1,222
P0086211.jpg	388428,428	5090813,124	4042,039	0,462	1,016	-1,102
P0086254.jpg	388012,046	5087456,645	4155,071	176,442	3,315	-0,963
P0086274.jpg	387603,274	5087344,770	4100,536	0,911	1,215	0,012
P0086159.jpg	388836,853	5092074,583	4191,262	176,840	4,841	-1,102
P0086160.jpg	388835,564	5091838,170	4194,316	174,649	1,503	-0,948
P0086161.jpg	388841,755	5091601,156	4189,926	174,423	0,167	-0,520
P0086162.jpg	388844,546	5091365,775	4184,742	176,445	1,088	-0,869
P0086213.jpg	388435,368	5091285,783	4051,271	358,003	0,862	-1,469
P0086214.jpg	388426,793	5091519,962	4051,595	357,947	0,248	-1,920
P0086215.jpg	388415,407	5091754,319	4053,736	358,872	0,961	-1,975
P0086216.jpg	388413,274	5091990,454	4056,938	2,394	1,251	-1,967
P0085303.jpg	386825,194	5087688,746	4032,166	3,488	5,571	-2,582
P0085353.jpg	386019,612	5087904,366	3982,856	171,119	4,770	-1,588
P0085350.jpg	386016,294	5088635,261	3987,889	173,414	3,486	-1,896
P0085351.jpg	386015,783	5088391,625	3985,993	171,072	3,428	-2,463
P0085352.jpg	386018,571	5088147,354	3983,541	171,593	3,286	-1,475
P0085368.jpg	386428,005	5087959,568	4026,930	7,367	4,124	-1,827
P0085432.jpg	385620,244	5088206,876	3999,049	1,748	3,246	-2,216
P0085433.jpg	385614,812	5088450,431	4001,042	4,240	4,983	-2,293
P0085882.jpg	391300,209	5085663,672	4454,579	5,132	5,233	-3,765
P0085884.jpg	391300,672	5086136,159	4456,071	1,986	4,520	-2,526
P0085885.jpg	391293,287	5086371,345	4457,961	359,926	5,277	-2,242
P0085886.jpg	391293,453	5086605,043	4452,398	4,611	3,136	-2,550
P0085887.jpg	391299,088	5086840,684	4452,117	3,751	4,327	-2,558
P0085944.jpg	391707,808	5087103,642	4277,271	174,743	0,763	-0,667
P0085946.jpg	391716,929	5086631,010	4272,191	176,644	2,318	-0,881
P0085879.jpg	391313,348	5085113,898	4445,981	3,208	6,044	-3,580
P0085880.jpg	391304,905	5085273,963	4449,153	1,772	8,485	-3,318
P0085881.jpg	391292,930	5085432,149	4456,031	4,425	6,971	-3,446
P0085883.jpg	391301,382	5085899,733	4456,084	3,313	4,676	-3,270
P0085949.jpg	391699,594	5085921,619	4272,573	176,271	0,967	-1,039
P0085950.jpg	391697,193	5085685,372	4270,888	174,337	1,150	-0,570
P0085951.jpg	391698,014	5085450,147	4270,453	176,858	1,220	-1,089

#Label	X_sqm	Y_sqm	Z_sqm	Yaw_sqm	Pitch_sqm	Roll_sqm
P0086168.jpg	0,012	0,011	0,009	0,00015	0,00037	0,00040
P0086169.jpg	0,011	0,010	0,009	0,00015	0,00033	0,00038
P0086170.jpg	0,011	0,009	0,009	0,00015	0,00032	0,00035
P0086171.jpg	0,010	0,009	0,009	0,00015	0,00030	0,00033
P0086196.jpg	0,012	0,014	0,009	0,00017	0,00047	0,00039
P0086197.jpg	0,012	0,012	0,009	0,00016	0,00040	0,00039
P0086198.jpg	0,013	0,011	0,009	0,00016	0,00039	0,00043
P0086199.jpg	0,013	0,010	0,009	0,00016	0,00036	0,00043
P0086203.jpg	0,015	0,011	0,008	0,00015	0,00038	0,00053
P0086204.jpg	0,016	0,010	0,008	0,00015	0,00035	0,00054
P0086206.jpg	0,019	0,012	0,008	0,00014	0,00044	0,00067
P0086245.jpg	0,014	0,010	0,009	0,00015	0,00035	0,00047
P0086247.jpg	0,016	0,010	0,009	0,00014	0,00033	0,00050
P0085356.jpg	0,009	0,010	0,010	0,00016	0,00033	0,00030
P0085357.jpg	0,010	0,013	0,010	0,00016	0,00040	0,00033
P0085358.jpg	0,012	0,016	0,010	0,00017	0,00048	0,00036
P0085359.jpg	0,014	0,019	0,010	0,00016	0,00056	0,00040
P0085360.jpg	0,022	0,028	0,011	0,00020	0,00084	0,00058
P0085361.jpg	0,023	0,027	0,011	0,00016	0,00075	0,00070
P0085362.jpg	0,018	0,022	0,010	0,00015	0,00060	0,00057
P0085363.jpg	0,013	0,016	0,010	0,00014	0,00046	0,00041
P0085364.jpg	0,011	0,013	0,010	0,00015	0,00038	0,00036
P0085424.jpg	0,016	0,020	0,011	0,00018	0,00061	0,00046
P0085425.jpg	0,014	0,017	0,011	0,00017	0,00053	0,00040
P0086329.jpg	0,013	0,014	0,010	0,00013	0,00042	0,00037
P0085298.jpg	0,022	0,024	0,010	0,00017	0,00066	0,00066
P0085299.jpg	0,021	0,024	0,010	0,00015	0,00070	0,00063
P0085300.jpg	0,015	0,017	0,010	0,00015	0,00050	0,00045
P0085301.jpg	0,012	0,013	0,009	0,00015	0,00042	0,00039
P0085302.jpg	0,011	0,012	0,009	0,00016	0,00040	0,00035
P0085366.jpg	0,011	0,010	0,010	0,00016	0,00035	0,00036
P0086328.jpg	0,011	0,012	0,010	0,00014	0,00036	0,00031
P0086251.jpg	0,014	0,009	0,009	0,00013	0,00029	0,00043
P0086252.jpg	0,014	0,010	0,009	0,00013	0,00032	0,00042
P0086253.jpg	0,015	0,012	0,009	0,00013	0,00038	0,00046
P0086165.jpg	0,012	0,010	0,009	0,00015	0,00036	0,00041
P0086166.jpg	0,012	0,010	0,009	0,00015	0,00037	0,00043
P0086167.jpg	0,012	0,011	0,009	0,00016	0,00040	0,00041
P0086207.jpg	0,019	0,013	0,008	0,00014	0,00046	0,00068
P0086208.jpg	0,019	0,012	0,008	0,00015	0,00044	0,00067
P0086209.jpg	0,018	0,011	0,008	0,00015	0,00042	0,00067
P0086164.jpg	0,011	0,010	0,009	0,00015	0,00038	0,00041
P0086210.jpg	0,017	0,010	0,008	0,00014	0,00040	0,00063
P0086211.jpg	0,017	0,010	0,008	0,00015	0,00041	0,00064

P0086254.jpg	0,015	0,016	0,009	0,00014	0,00048	0,00044
P0086274.jpg	0,015	0,016	0,009	0,00013	0,00047	0,00044
P0086159.jpg	0,010	0,012	0,011	0,00020	0,00049	0,00040
P0086160.jpg	0,010	0,011	0,010	0,00019	0,00047	0,00040
P0086161.jpg	0,011	0,012	0,009	0,00018	0,00047	0,00041
P0086162.jpg	0,012	0,011	0,009	0,00017	0,00045	0,00043
P0086213.jpg	0,016	0,012	0,008	0,00016	0,00049	0,00063
P0086214.jpg	0,013	0,012	0,009	0,00017	0,00051	0,00055
P0086215.jpg	0,012	0,011	0,009	0,00019	0,00051	0,00051
P0086216.jpg	0,011	0,011	0,010	0,00019	0,00052	0,00047
P0085303.jpg	0,010	0,011	0,009	0,00016	0,00040	0,00033
P0085353.jpg	0,007	0,008	0,009	0,00017	0,00032	0,00031
P0085350.jpg	0,010	0,010	0,009	0,00019	0,00045	0,00051
P0085351.jpg	0,009	0,010	0,009	0,00021	0,00044	0,00046
P0085352.jpg	0,008	0,009	0,009	0,00020	0,00038	0,00037
P0085368.jpg	0,012	0,010	0,009	0,00017	0,00044	0,00043
P0085432.jpg	0,007	0,009	0,010	0,00018	0,00041	0,00034
P0085433.jpg	0,009	0,009	0,010	0,00018	0,00046	0,00042
P0085882.jpg	0,013	0,012	0,011	0,00018	0,00033	0,00033
P0085884.jpg	0,013	0,011	0,011	0,00018	0,00033	0,00034
P0085885.jpg	0,013	0,011	0,011	0,00017	0,00032	0,00035
P0085886.jpg	0,012	0,011	0,010	0,00017	0,00034	0,00034
P0085887.jpg	0,012	0,011	0,010	0,00017	0,00035	0,00035
P0085944.jpg	0,014	0,014	0,010	0,00020	0,00041	0,00044
P0085946.jpg	0,015	0,014	0,010	0,00020	0,00040	0,00043
P0085879.jpg	0,014	0,014	0,012	0,00023	0,00039	0,00035
P0085880.jpg	0,014	0,013	0,012	0,00021	0,00036	0,00035
P0085881.jpg	0,013	0,012	0,011	0,00019	0,00034	0,00034
P0085883.jpg	0,013	0,011	0,011	0,00017	0,00032	0,00033
P0085949.jpg	0,016	0,016	0,010	0,00021	0,00043	0,00044
P0085950.jpg	0,017	0,015	0,011	0,00023	0,00042	0,00046
P0085951.jpg	0,017	0,015	0,011	0,00024	0,00043	0,00044

11. Bibliografia e sitografia:

- [1] «Ghiacciaio,» [Online]. Available: <https://dizionari.repubblica.it/Italiano/G/ghiacciaio.html>. [Consultato il giorno 17 dicembre 2024].
- [2] «Densità dei ghiacciai,» [Online]. Available: <https://www.geopop.it/cosa-sono-i-ghiacciai-come-nascono-i-diversi-tipi-e-perche-si-stanno-ritirando/>. [Consultato il giorno 17 Dicembre 2024].
- [3] C. Cavazzuti e D. Damiano, *Biologia*, Zanichelli , 2019.
- [4] «Valpelline,» [Online]. Available: <https://www.treccani.it/enciclopedia/valpelline/>. [Consultato il giorno 20 gennaio 2025].
- [5] «Valpelline,» [Online]. Available: <https://www.esprisarvadzo.com/tour-della-valpelline-introduzione/>. [Consultato il giorno 20 gennaio 2025].
- [6] «Diga di Place Moulin,» [Online]. Available: https://dgdighe.mit.gov.it/categoria/articolo/_dighe_di_rilievo/diga_di_place_moulin. [Consultato il giorno 21 gennaio 2025].
- [7] «Lago Place Moulin,» [Online]. Available: <https://www.lovevda.it/it/banca-dati/7/itinerari-sportivi/bionaz/place-moulin-rifugio-prarayer/1139>. [Consultato il giorno 18 Febbraio 2025].
- [8] «Diga Place Moulin,» [Online]. Available: <https://www.cvaspa.it/diga-di-place-moulin>. [Consultato il giorno 21 gennaio 2025].
- [9] C. Smiraglia e G. Diolaiuti, *Il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani*, 2015.
- [10] V. Bonardo, M. Giardino, S. Perona, V. V. Laura e M. Chiarle, *La carovana dei ghiacciai - Gli effetti della crisi climatica su ghiacciai*, 2024.

- [11] «CNR, innalzamento temperature medie,» [Online]. Available: <https://www.cnr.it/it/news/12134/nuovi-dati-sulle-tendenze-della-temperatura-nelle-alpi#:~:text=Se%20le%20emissioni%20antropogeniche%20manterranno,rispetto%20al%20periodo%201961%2D1990..> [Consultato il giorno 15 Febbraio 2025].
- [12] «IPCC,» [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/srocc/>. [Consultato il giorno 18 Febbraio 2025].
- [13] «ARPA VdA,» [Online]. Available: <https://www.arpa.vda.it/temi/clima>. [Consultato il giorno 18 Febbraio 2025].
- [14] «Fondazione Montagna Sicura,» [Online]. Available: <https://www.fondazionemontagnasicura.org/cabina-di-regia>. [Consultato il giorno 18 Febbraio 2025].
- [15] G. Nuzzo, Tesi di Laurea Magistrale - Geomatica e Cambiamenti Climatici: Osservazione e Monitoraggio di Corpi Glaciali, 2020.
- [16] M. Chiarle, A. Bondesan e L. Carturan, Campagna glaciologica annuale dei ghiacciai italiani (2023).
- [17] A. Cina, «Fotogrammetria, raddrizzamento e ortofoto».
- [18] T. Luhmann, S. Robson e S. Kyle e Jan , Close-range photogrammetry and 3D imaging, Walter de Gruyter, 2013.
- [19] M. A. Gomarasca, Basics of geomatics, Springer Science & Business Media, 2009.
- [20] M. Fronteddu, Tesi di Laurea Magistrale - Tecniche Geomatiche di Monitoraggio, 2020.
- [21] M. M. Macelloni, Tesi di Laurea Magistrale - Drone, aerial and satellite photogrammetry for 4D glacier survey and monitoring, 2022.
- [22] A. LLC, Agisoft Metashape User Manual, 2024.

- [23] Stonex, CUBE 3D user manual, 2022.
- [24] «Collasso morena ghiacciaio Tza de Tzan,» [Online]. Available: <https://aostasera.it/notizie/economia/la-diga-di-place-moulin-ha-evitato-che-la-valpelline-fosse-investita-dal-materiale-crollato/>. [Consultato il giorno 21 Gennaio 2025].
- [25] «Collasso ghiacciaio Tza de Tzan,» [Online]. Available: <https://www.legambiente.it/comunicati-stampa/carovana-dei-ghiacciai-2024-sui-ghiacciai-della-valpelline/>. [Consultato il giorno 22 Gennaio 2025].
- [26] «Stereoscopia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Stereoscopia>. [Consultato il giorno 18 gennaio 2025].
- [27] «Georeferenziazione,» [Online]. Available: [https://www.treccani.it/enciclopedia/georeferenziazione_\(Lessico-del-XXI-Secolo\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/georeferenziazione_(Lessico-del-XXI-Secolo)/). [Consultato il giorno 19 gennaio 2025].
- [28] «Schema ghiacciaio,» [Online]. Available: <https://www.treccani.it/enciclopedia/ghiacciaio/>. [Consultato il giorno 21 Gennaio 2025].
- [29] «Rete SPIN3,» [Online]. Available: <https://www.spingnss.it/>. [Consultato il giorno 23 Gennaio 2025].
- [30] «Morena,» [Online]. Available: <https://www.treccani.it/vocabolario/morena/>. [Consultato il giorno 25 Gennaio 2025].
- [31] «ritiro ghiacciai,» [Online]. Available: <https://www.irpi.cnr.it/focus/ghiacciai-italiani/#:~:text=Dalla%20fine%20della%20Piccola%20Et%C3%A0,ridotte%20di%20circa%20la%20met%C3%A0..> [Consultato il giorno 29 Gennaio 2025].
- [32] «stand-alone,» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Stand-alone_\(informatica\)#:~:text=In%20informatica%2C%20l'espressione%20st](https://it.wikipedia.org/wiki/Stand-alone_(informatica)#:~:text=In%20informatica%2C%20l'espressione%20st)

and,con%20cui%20potrebbe%20altrimenti%20interagire.. [Consultato il giorno 31 gennaio 2025].

- [33] E. Corte, A. Ajmar, C. Camporeale, A. Cina, V. Coviello, F. G. Tonolo, A. Godio, M. M. Macelloni, S. Tamea e A. Vergnano, Multitemporal characterization of a proglacial system: a multidisciplinary approach, Copernicus Publications, 2024.