

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale
**Fotogrammetria diretta da drone
per la misura e il monitoraggio
delle frane**



Relatore:
Prof. Ambrogio Manzino

Candidato:
Fabio Di Marco

Anno accademico 2019/2020

SOMMARIO

1	Basi teoriche della Fotogrammetria	1
1.1	I principi	1
1.1.1	Principio di funzionamento.....	2
1.1.2	Camere da presa.....	5
1.1.3	Immagini digitali	7
1.1.4	Orientamento dei fotogrammi	10
1.1.5	Le equazioni di collinearità	17
1.2	Camere non metriche e loro calibrazione	22
1.2.1	Premessa	22
1.2.2	Procedure di calibrazione	23
1.2.3	Le distorsioni delle camere non metriche.....	24
1.2.4	Caso studio	27
2	La Fotogrammetria diretta	31
2.1	La fotogrammetria diretta con piccoli droni (UAV)	31
2.1.1	Potenzialità e campi di applicazione.....	32
2.1.2	Livelli di precisione attesa.....	35
2.2	Esempi e drone utilizzato.....	38
2.2.1	Tipologie di drone.....	38
2.2.2	DJI Phantom 4 RTK.....	42
2.3	Dal progetto al rilievo con piccoli droni	45
2.3.1	Parametri di volo	45
2.3.2	Possibili problemi nelle fasi di volo.....	51
2.3.3	parametri di volo del caso studio.....	53
3	Il caso di studio.....	57
3.1	Caratteristiche del luogo e della frana	57

3.2	Caratteristiche degli strumenti usati	63
3.2.1	Leica Viva GS14 – Smart antenna GNSS	63
3.2.2	Trimble Spectra Precision SP80.....	65
3.3	Il calcolo cinematico PPK della posizione GNSS dell'antenna del drone ...	66
3.3.1	Planning satellitare.....	66
3.2.1	Il posizionamento differenziale GNSS	69
3.4	Dall'antenna ai punti di presa.....	75
3.5	L'appoggio a terra eseguito	77
3.6	Agisoft Metashape Professional	80
3.6.1	Inserimento delle immagini	80
3.6.2	Allineamento delle immagini (orientamento relativo di tutto il blocco di fotogrammi).....	81
3.6.3	Inserimento delle coordinate dei marker (GCP) e loro utilizzo.....	82
3.6.4	Ottimizzazione dell'allineamento.....	84
4	La fotogrammetria diretta per il controllo della frana	85
4.1	Precisioni riscontrate con il solo appoggio a terra.....	85
4.2	Il calcolo del blocco fotogrammetrico con la fotogrammetria diretta.....	89
4.3	L'appoggio minimale	94
4.4	Uso di tutte le misure di appoggio.....	105
4.5	Il confronto dei terreni digitali.....	108
5	Conclusioni.....	111
	Indice delle figure	117
	Indice delle tabelle.....	121
	Bibliografia.....	123
	Siti web consultati.....	124

1 Basi teoriche della Fotogrammetria

1.1 I principi

La fotogrammetria è quella tecnica che consente di determinare la posizione, la forma e le dimensioni di un oggetto qualsiasi, mettendo in relazione le informazioni metriche e radiometriche contenute in almeno due fotogrammi rappresentanti lo stesso oggetto, ripreso da punti diversi.

In passato, per effettuare un rilievo topografico tradizionale, era necessario andare a rilevare una serie di punti caratteristici che venivano poi "restituiti" e disegnati nella scala opportuna. Questo procedimento era molto oneroso sia in termini di tempo che in termini economici, in quanto il numero di punti da rilevare per andare a tracciare le curve di livello o per rappresentare elementi con geometrie particolari era molto elevato.

Con l'avvento della fotogrammetria è stato possibile andare a ricavare le informazioni necessarie per la costruzione della carta topografica utilizzando pochi punti di coordinate note sull'oggetto, detti "punti di appoggio a terra" o, in inglese, "ground control point". Qualsiasi altro punto caratteristico, necessario alla realizzazione della carta, viene calcolato in post-elaborazione comodamente in ufficio.

Un tempo le camere da presa utilizzate per la fotogrammetria erano particolarmente costose in quanto prive di distorsioni ed aberrazioni. Per questo venivano chiamate camere metriche e la fotografia era chiamata fotogramma per sottolineare che era una esatta proiezione centrale dell'oggetto fotografato.

Anche attualmente serve ricostruire l'esatta metrica della presa, tuttavia, grazie alla fotogrammetria analitica prima e a quella digitale poi, possono utilizzarsi anche camere non metriche purché siano note, con grande precisione, le distorsioni che deviano dal modello teorico della prospettiva centrale, nonché tutte le eventuali aberrazioni.

La fotogrammetria può essere classificata in base al tipo di presa:

- Fotogrammetria terrestre, in cui la camera è posizionata a una distanza dell'ordine della distanza focale della camera rispetto all'oggetto ripreso;
- Fotogrammetria aerea eseguita da un velivolo su un oggetto posto a distanza iperfocale (tutti gli oggetti ripresi sono cioè a fuoco).

Nell'arco della nostra tesi faremo riferimento prevalentemente alla seconda.

I prodotti della fotogrammetria possono essere rappresentazioni del tipo:

- Grafico (mediante curve di livello, disegni, prospetti, carte al tratto);
- Numerico (coordinate di punti in cartografia numerica);
- Immagini (ortofoto, fotopiani);
- DTM (Modello Digitale del Terreno), DSM (Modello Digitale di Superficie).

1.1.1 Principio di funzionamento

Esiste una relazione geometrica tra la posizione tridimensionale del punto reale e la posizione della sua immagine sul fotogramma. Dati due punti A e B nello spazio oggetto (la realtà) avremo dei punti omologhi A' e B' nello spazio immagine (il fotogramma). Ipotizzando valido il modello teorico della prospettiva centrale possiamo dire che i segmenti, chiamati raggi proiettanti, che legano il punto A al punto A' e il punto B al punto B' passano entrambi dal punto O detto centro di presa. I punti A' e B' prendono il nome di punti omologhi. Il centro di presa si trova all'interno dell'obiettivo della camera da presa.

Chiamiamo P punto principale ovvero la proiezione di O sul piano della lastra. Il segmento OP è detto distanza principale p .

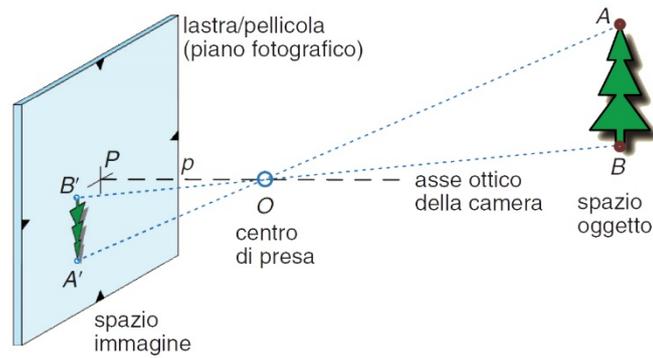


Figura 1.1 Geometria della presa fotografica

Con un solo fotogramma non è possibile andare a determinare la posizione tridimensionale di un punto immagine. Supponiamo infatti di avere un fotogramma in cui il punto reale A viene impresso nello spazio immagine nel punto A' . Questo punto è il punto omologo anche dei A_1 , A_2 e A_3 che si trovano tutti sul raggio proiettante r_1 .

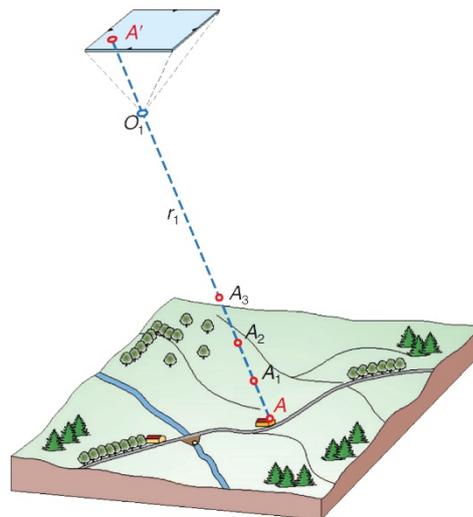


Figura 1.2 Presa con un solo fotogramma

Le informazioni necessarie per andare a determinare le coordinate tridimensionali di un punto si possono ottenere utilizzando due fotogrammi, che hanno una certa distanza tra loro. Solitamente si utilizza una stessa fotocamera che riprende il punto in tempi diversi.

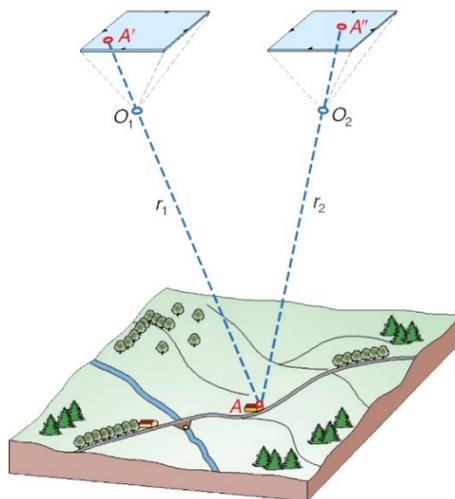


Figura 1.3 Presa con due fotogrammi

Il punto A ha un suo punto omologo A' nel primo fotogramma e un punto omologo A'' nel secondo fotogramma. Conoscendo la posizione dei punti nei fotogrammi, la posizione dei centri di presa O_1 e O_2 e la distanza fra questi, detta base di presa, è possibile determinare la posizione del punto A in quanto il punto di incontro tra i due raggi di proiezione è univoco. Il problema è che le posizioni dei centri di presa sono un'incognita nel nostro problema. Per poter risolvere il problema abbiamo bisogno di alcuni punti di appoggio a terra dei quali sono note le coordinate. Questi punti vengono studiati con tecniche di rilevamento tradizionale.

Senza l'ausilio dei punti a terra di coordinate note è pur sempre possibile riprodurre la forma di un elemento ma questo risulterà a una scala arbitraria che è in funzione della distanza tra i centri di presa che, in questo caso, è incognita.

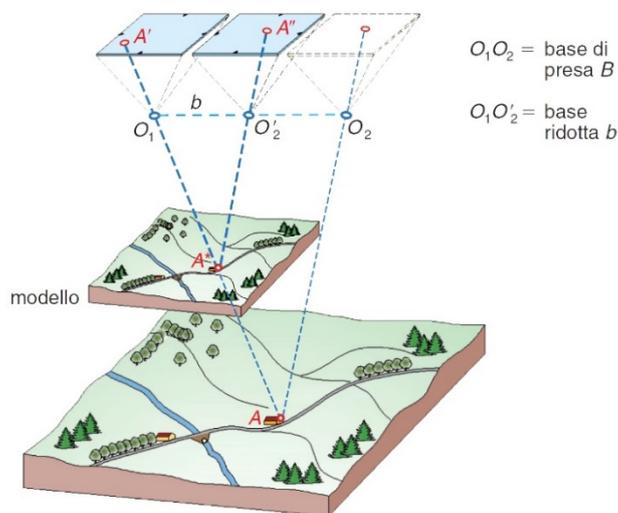


Figura 1.4 Scala del modello al variare del valore della base di presa

Per ottenere l'intersezione dei raggi proiettivi, e quindi le coordinate del punto interessato, il software utilizzato deve risolvere un sistema di equazioni, dette equazioni di collinearità, ottenute da relazioni geometriche sulla geometria di presa.

I passaggi da seguire quando si vuole fare un rilievo fotogrammetrico sono:

- **Acquisizione:** sono le operazioni di presa delle immagini che vengono effettuate per mezzo di opportune camere.
- **Orientamento:** questa fase consiste nell'orientare i fotogrammi in maniera tale da ricostruire le posizioni che questi avevano durante la fase di acquisizione. Questa operazione si divide in:
 - **Orientamento interno:** individuazione dei parametri che permettono di ricostruire la proiezione centrale della camera. Questa operazione viene eseguita una sola volta in quanto dipende solamente dal tipo di camera utilizzata.
 - **Orientamento esterno:** consiste nel determinare la posizione dei fotogrammi. È composta da due fasi:
 - **Orientamento relativo:** viene determinato il posizionamento relativo dei due fotogrammi ovvero si realizza un modello non in scala del terreno o del fabbricato. Non necessita di punti di appoggio a terra.
 - **Orientamento assoluto:** il modello ricavato dall'orientamento relativo viene rototraslato e scalato, i punti ottenuti sono riferiti a un sistema di riferimento assoluto. Sono necessari punti di appoggio a terra.
- **Restituzione:** operazioni che permettono di costruire un modello a una determinata scala

1.1.2 Camere da presa

Possiamo schematizzare la camera da presa come un corpo rigido dove l'obiettivo, costituito in realtà da molte lenti, ha una distanza fissa rispetto al sensore in cui viene impressa l'immagine. Questa distanza prende il nome di distanza principale. Il centro ottico dell'insieme di lenti è detto "punto principale" e la geometria ideale che regola la presa è quella della proiezione centrale, per la quale questo centro è proprio il punto principale.



Figura 1.5 Schema della macchina da presa

Gli elementi che compongono la camera sono:

1. Obiettivo: è la componente che consente il passaggio della luce all'interno della fotocamera. È formato un complesso sistema di lenti che trasmettono l'immagine reale dell'oggetto inquadrato sul piano immagine.
2. Diaframma: è posto all'interno dell'obiettivo e ha il compito di regolare la quantità di luce che entra nella fotocamera e raggiunge il sensore. È costituito da un sistema di lamelle che vanno a formare un piccolo foro il più possibile circolare per diminuire gli effetti di diffrazione dei raggi luminosi.
3. Otturatore: è il componente che regola il tempo di esposizione alla luce del sensore. Le macchine possono essere dotate di due diversi tipi di otturatore: centrale e a tendina. Nel primo l'otturatore è provvisto di una serie di lamelle mobili che si aprono, per un tempo prestabilito, solo quando viene premuto il tasto di scatto. Il secondo otturatore, invece, è formato da due tendine che formano una fessura che scorre su tutto il sensore, esponendolo alla luce.
4. Sensore: coincide con il piano immagine ovvero quel piano in cui si forma un'immagine nitida dell'elemento ripreso. È il componente elettronico sul quale viene impressa l'immagine che viene poi tradotta in un'immagine digitale. Per valutare la qualità di un sensore dobbiamo tener conto della risoluzione massima (i megapixel) e della dimensione del sensore. In commercio i tipi di sensori presenti sono i CCD e i CMOS, i primi sono montati su camere metriche mentre i secondi normalmente su camere amatoriali.

Quando si utilizza una camera devono essere noti i seguenti parametri detti di orientamento interno:

- La posizione del centro di presa O : punto in cui si ha l'intersezione dei raggi omologhi
- La posizione del punto principale P : proiezione del centro di presa sul piano immagine
- L'asse della camera: è dato dalla congiunzione tra il punto principale e il centro di presa. È perpendicolare al piano immagine.
- La distanza principale p : è la distanza tra il punto principale e il centro di presa.

Le camere possono essere classificate come:

- Camere metriche: sono progettate per essere utilizzate in fotogrammetria e sono dotate di obiettivi particolari in cui le distorsioni radiali sono trascurabili. In ogni caso tali distorsioni sono note e fornite nel certificato di calibrazione della camera. I parametri di orientamento interno sono noti.
- Camere non metriche: sono le fotocamere con obiettivo intercambiabile comunemente utilizzate. In queste camere non sono noti i parametri di orientamento interno e devono essere stimati con particolari procedure.

1.1.3 Immagini digitali

L'immagine digitale è composta da una matrice numerica bidimensionale, ad ogni riga-colonna della matrice corrisponde un pixel.

Queste immagini possono essere realizzate o con opportune fotocamere digitali o attraverso la scansione di immagini stampate ottenute da camere analogiche.

In passato per ottenere un'immagine analogica era necessario che i fotoni impattassero i granuli di alogenuro di argento che componevano la pellicola, questa veniva poi sviluppata e, a causa di questo trattamento, subiva delle alterazioni della radiometria e della geometria dell'immagine.

Le fotocamere digitali invece sono dotate di sensori CDC o di sensori CMOS che sono composti da un certo numero di photosites (comunemente chiamati pixel). Questi

componenti sono dei fotodiodi in grado di immagazzinare l'energia luminosa e di quantificarla. I photosites trasformano la luce entrante in un segnale elettrico e questo viene poi convertito da un Analog-Digital (A/D) Converter in un segnale digitale ovvero in un'immagine digitale numerica. Le immagini che vengono catturate dai sensori hanno quindi un formato numerico. La matrice contenente le informazioni, a differenza di quelle analogiche, non subirà modifiche nel trasferimento tra fotocamera e software di elaborazione dell'immagine e quindi le informazioni radiometriche e geometriche non verranno alterate. Occorre tuttavia considerare che entrambe le informazioni derivano da un valore medio percepito in quell'area dal sensore.

L'immagine è rappresentata da una matrice G composta da elementi $g_{i,j}$, dove i e j indicano rispettivamente il numero di riga e il numero di colonna.

Si definisce un sistema di riferimento x, y proprio dell'immagine la cui origine è posizionata in alto a sinistra della matrice e traslata di una quantità pari a $\Delta x/2$, $\Delta y/2$ in maniera tale che il punto medio considerato cada nel baricentro del pixel, dove Δx e Δy rappresentano la dimensione del pixel, in genere identica per entrambi le coordinate.

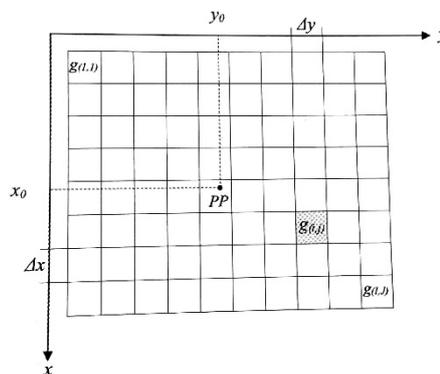


Figura 1.6 Matrice bidimensionale G

L'elemento di riferimento preso in considerazione per andare a valutare la corrispondenza dei punti immagine fra un fotogramma e il successivo nella fotogrammetria digitale diventa il pixel che ha dimensioni Δx e Δy . Dunque, anziché andare a trovare le coordinate immagine, come nella fotogrammetria tradizionale, andremo ora a ricercare le posizioni (i, j) dei pixel.

Gli algoritmi sui quali si basano i software di elaborazione dell'immagine si basano su due caratteristiche principali dell'immagine digitale ovvero la risoluzione radiometrica e la risoluzione geometrica.

La risoluzione radiometrica si lega al colore che può assumere un singolo pixel. A ogni sfumatura di colore corrisponde un valore numerico e questo, nella scala di grigi, può variare da 0 a 255. Al valore 0 corrisponde il colore nero mentre al 255 corrisponde il bianco. L'occhio umano riesce a distinguere solamente 80 sfumature di colore quindi andando a prendere un intervallo di 256 otteniamo un risultato di gran lunga più accurato rispetto una valutazione fatta dall'uomo. Inoltre, questo valore è stato scelto perché è quello che può essere contenuto in 1 *byte* di memoria. Nelle immagini a colori, invece, ogni pixel ha al suo interno le informazioni necessarie a valutare i tre colori fondamentali RGB (rosso, verde, blu). Ogni pixel occupa quindi una memoria pari a 3 *byte* dovuta alla sovrapposizione di tre matrici monocromatiche. Le possibili combinazioni di colori diventano quindi pari a 255^3 ovvero circa 16,5 milioni.

La risoluzione geometrica indica la quantità di pixel contenuti in un pollice cioè un quadrato di lati $2,54 \text{ cm} \times 2,54 \text{ cm}$ ovvero in un DPI (dots per inch). In campo fotogrammetrico è importante anche andare a considerare i GSD (ground sample distance) ovvero la porzione di suolo che viene coperta da un singolo pixel. Il GSD dipende dall'altezza di volo H , dalla larghezza del photosite l , e dalla distanza principale p .

$$GSD = H \cdot \frac{l}{p}$$

Minore è il valore di GSD migliore è la risoluzione del terreno. Se prendiamo in considerazione una determinata fotocamera, in cui i parametri l e p sono costanti, l'unico modo per aumentare la risoluzione è quello di andare a diminuire l'altezza di volo o la distanza dell'oggetto.

1.1.4 Orientamento dei fotogrammi

L'orientamento dei fotogrammi è una delle tre fasi che caratterizzano un rilievo fotogrammetrico. Infatti, per poter ricostruire metricamente l'oggetto è necessario ricostruire analiticamente l'intersezione dei raggi omologhi di almeno due fotogrammi. I raggi omologhi sono le rette che da due immagini distinte, ma rappresentanti lo stesso particolare, passano per i due punti di presa e si intersecano sul particolare oggetto. Dopo le fasi di presa, che analizzeremo nel dettaglio nel capitolo 2, è necessario andare a riposizionare i fotogrammi nella stessa posizione/assetto che questi avevano durante il volo. Bisogna in primo luogo andare a ricostruire la geometria interna della camera (orientamento interno) e in secondo luogo trovare le posizioni e gli assetti angolari che permettono di ricostruire in scala l'oggetto ripreso (orientamento esterno) per mezzo dell'intersezione dei raggi omologhi.

1.1.4.1 Orientamento interno

L'orientamento interno consiste nel calcolare, prima, ed imporre numericamente, poi, i parametri che permettono di ricostruire la proiezione centrale della camera ovvero quei parametri che consentono di ricostruire i raggi proiettanti che passano per il centro di presa O . Questa operazione viene eseguita una sola volta in quanto si suppone sia identica per tutti i fotogrammi (se non si usano camere diverse o messe a fuoco distinte).

I parametri da andare a ricavare, e poi imporre, sono:

- La distanza principale p
- Le coordinate del punto principale x_p e y_p
- La curva di distorsione dell'obiettivo (come nel nostro caso studio nel quale si usano camere non metriche)

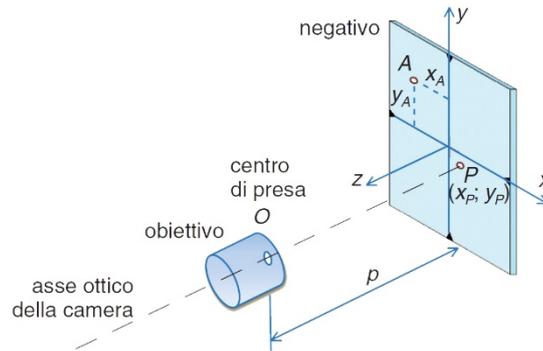


Figura 1.7 Parametri di orientamento interno

Queste caratteristiche sono note nel caso di camere metriche e vengono ricavate dai software nel caso di camere non metriche.

Le coordinate del punto principale in questo passaggio sono espresse nel sistema interno del fotogramma x_p, y_p . In questo sistema di riferimento si andranno ad individuare tutti gli altri punti rilevati (ad esempio x_A, y_A).

Teoricamente la proiezione del punto principale O , che coincide con il punto principale P , dovrebbe ricadere nel centro del fotogramma. Questo nella pratica non si verifica e il punto principale è scostato di alcuni decimi di millimetro. Lo scostamento deve essere ricavato con precisione nel caso di camere non metriche e deve essere fornito dal costruttore nel certificato di calibrazione nel caso di camere metriche. Questi due valori sono infatti due delle tre coordinate del punto principale, la terza è la distanza principale, molto prossima alla distanza focale.

I soli parametri di distanza principale e coordinate del punto principale sarebbero sufficienti se il sistema fosse privo di aberrazioni e se il funzionamento reale della camera coincidesse perfettamente con la geometria della proiezione centrale. Le aberrazioni nelle camere metriche sono note e fornite dal costruttore, anche se in generale trascurabili, mentre nelle camere non metriche devono essere calcolate con una procedura detta "calibrazione della camera" e descritta in seguito. Tale procedura può essere anche eseguita assieme alle fasi di orientamento esterno di cui si parlerà più avanti.

1.1.4.2 Orientamento esterno

Dopo aver ricostruito la geometria interna della camera si può passare alle operazioni di orientamento esterno in cui si ricavano posizione e assetto dei fotogrammi al momento della presa. I parametri che definiscono la loro posizione sono tre traslazioni e tre rotazioni per ogni fotogramma ovvero:

- Le coordinate del centro di presa O (X_0, Y_0, Z_0)
- Gli angoli di assetto della camera (ω, φ, κ) che rappresentano rispettivamente le rotazioni attorno agli assi x, y, z del sistema fotogramma.

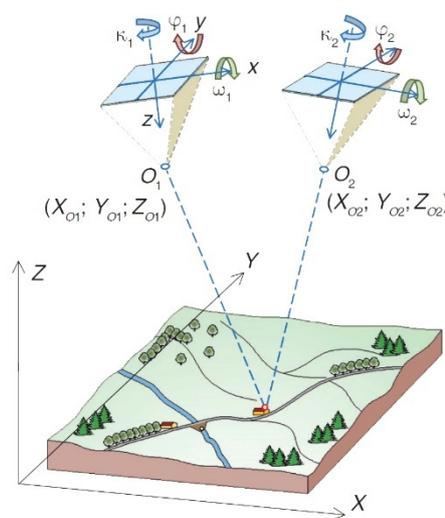


Figura 1.8 Parametri di orientamento esterno

L'immagine mostra che con soli due fotogrammi, noti posizione e assetto, è possibile ricostruire metricamente l'oggetto almeno sulla zona di comune ripresa. Ciò può avvenire anche se si avvicinano senza rotazioni i due fotogrammi o se rigidamente si rototraslano in una posizione qualsiasi dello spazio. Il modello che si ricostruirà dall'intersezione dei raggi omologhi non sarà il terreno o l'oggetto ripreso ma "un suo modello". È dunque possibile costruire un modello metrico del terreno a meno di una rototraslazione con variazione di scala del "blocco" costituito dai due fotogrammi. L'operazione di costruzione del modello si chiama "orientamento relativo".

È evidente che è possibile eseguire un orientamento relativo con un minimo di due fotogrammi, ma anche con tutti i fotogrammi che sono stati ripresi. Appare evidente anche che per eseguire tale orientamento non è necessario conoscere le coordinate

di punti sull'oggetto, ma è sufficiente posizionare i due (o più) fotogrammi nella loro posizione (e scala) relativa che avevano al momento della presa.

In tal modo si può ricostruire metricamente un modello di grosse dimensioni con l'uso di tutti i fotogrammi. In seguito, conoscendo le coordinate modello di alcuni punti dei quali sono note le coordinate terreno, è possibile rototraslare e scalare il blocco dei modelli per far sì che assumano la loro posizione corretta sul terreno. Questa operazione è detta orientamento assoluto.

Per ogni coppia di fotogrammi sono incognite in origine 6 traslazioni e 6 rotazioni.

L'orientamento relativo consiste nel determinare i 5 parametri incogniti che permettono di definire la posizione relativa assunta tra ogni coppia di fotogrammi.

L'orientamento assoluto consiste nel determinare i mancanti 7 parametri che servono a ricavare l'effettiva posizione dell'oggetto rilevato nel sistema di riferimento assoluto.

Durante le fasi di orientamento relativo non si conoscono le posizioni dei due fotogrammi rispetto al sistema di riferimenti assoluto XYZ del terreno, si va quindi a determinare la distanza relativa che tra i centri di presa O_1 e O_2 che permette di generare il modello a una scala generica. Si adotta in questo caso un sistema di riferimento arbitrario $X'Y'Z'$ che ha origine nel centro di presa del primo fotogramma in maniera tale da annullare 5 dei 12 parametri incogniti.

Possiamo procedere in due diversi modi:

- Orientamento asimmetrico: Il primo fotogramma viene considerato fermo, il sistema di riferimento ha origine in O_1 e il piano $X'Y'$ è parallelo al piano del fotogramma. I parametri da andare a determinare sono le componenti B_y e B_z della base di presa B (la componente B_x è ipotizzata e fornisce la scala del modello), che forniscono la posizione del centro di presa O_2 , e le rotazioni del secondo fotogramma $\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$.

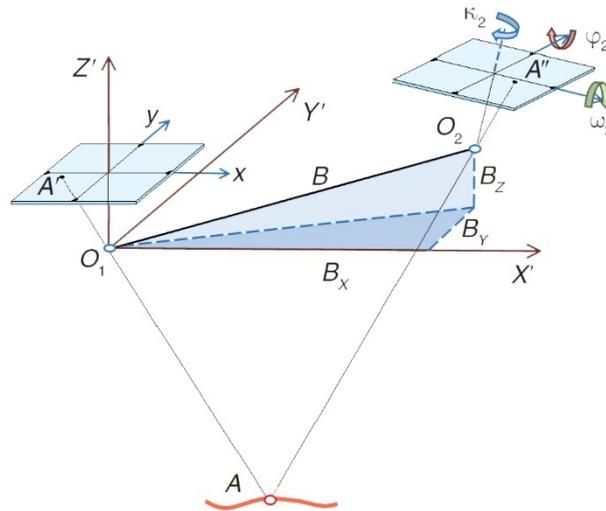


Figura 1.9 Orientamento asimmetrico

- Orientamento simmetrico: entrambi i fotogrammi possono muoversi per ottenere il corretto posizionamento relativo. L'origine del sistema di riferimento arbitrario è sempre posizionata in corrispondenza di O_1 ma questa volta l'asse X' è diretto nella direzione O_1O_2 . I parametri in questo caso dovrebbero essere 6 ovvero i valori angolari $\omega_1, \varphi_1, \kappa_1$ e $\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$ ma visto il sistema di riferimento utilizzato sono ridotti a cinque poiché l'asse X' è complanare all'asse z e questo fa sì che $\omega_1 = 0$. Questo è il metodo utilizzato dal software che abbiamo utilizzato (Agisoft Metashape Professional)

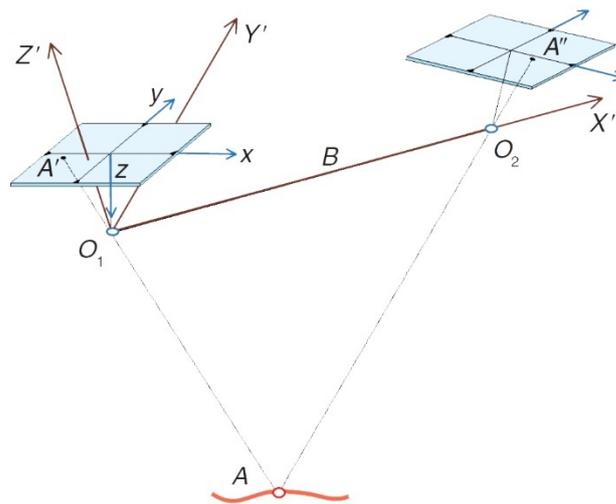


Figura 1.10 Orientamento simmetrico

Dopo le operazioni di orientamento relativo i due fotogrammi saranno posizionati nel sistema di riferimento temporaneo $X'Y'Z'$ e si avrà, per ogni punto collimato,

una intersezione dei raggi proiettanti omologhi che permette di ricostruire un modello in una posizione generica e a una scala arbitraria. Poiché la scala non è quella corretta non è possibile, in questa fase, andare a fare delle misure corrette sul modello.

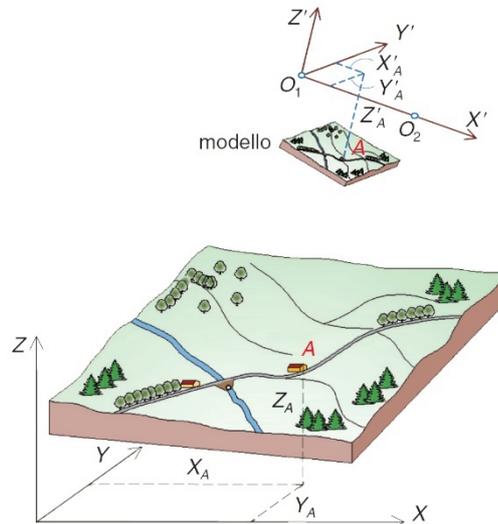


Figura 1.11 Riproduzione del modello in scala arbitraria

Per andare a determinare i parametri di orientamento relativo è necessario risolvere le equazioni delle rette omologhe che, per tale motivo, vengono dette equazioni di collinearità.

Per risolvere tali equazioni sono necessari quindi 5 coppie di raggi proiettanti relativi ai punti omologhi all'interno della zona di sovrapposizione dei due fotogrammi. Nella pratica se ne usano un numero maggiore in maniera da rendere la soluzione più stabile. Perché il risultato sia stabile tali punti devono essere posizionati secondo la distribuzione teorizzata da Otto Von Gruber per la quale devono essere disposti nella zona perimetrale della porzione in comune tra i due fotogrammi. I punti 1 e 2 corrispondono alle proiezioni dei punti principali dei due fotogrammi mentre gli altri quattro punti vengono posti nella parte bassa e nella parte alta della zona di ricoprimento.

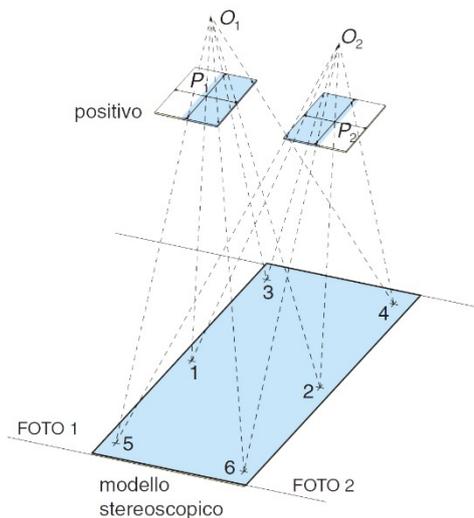


Figura 1.12 Distribuzione di Otto Von Gruber

Un numero maggiore di punti omologhi, rispetto ai teorici, in questa fase non comporta nessun costo aggiuntivo né in termini economici né in termini di tempo di elaborazione dell'immagine ma può essere utilissimo per eliminare automaticamente errori grossolani e per ridurre gli errori accidentali.

Bisogna ora passare dal sistema di coordinate arbitrario $X'Y'Z'$ al sistema di riferimento legato all'oggetto rilevato XYZ . Questa operazione viene detta orientamento assoluto e consente di riprodurre l'oggetto nella scala desiderata.

I parametri incogniti rimanenti sono 7 ovvero il fattore di scala m , le coordinate del centro di presa X_0 , Y_0 e Z_0 e gli angoli di rotazione ω , φ e κ del modello formato dall'insieme di due o più fotogrammi.

Per questa operazione sono necessari un certo numero di punti di appoggio a terra di coordinate note rilevati con tecniche topografiche tradizionali o con un rilievo GPS. Questi punti possono essere elementi preesistenti ben identificabili nelle fasi di restituzione o appositi elementi posizionati sul terreno al momento della presa e facilmente individuabili dall'operatore (marker).

In questo caso si devono andare a risolvere le equazioni di rototraslazione spaziale che presentano 7 incognite. I punti di appoggio a terra necessari per risolvere tali equazioni devono essere almeno 3 e possono essere così individuati minimalmente: 2 punti di cui si conoscono tutte e tre le coordinate X , Y e Z ed un punto altimetrico. I punti non devono essere allineati.

Normalmente i punti di coordinate note sull'oggetto sono almeno 5 e sono posti nella zona di sovrapposizione dei due fotogrammi in maniera tale da poter eseguire una compensazione ai minimi quadrati. Questo comporta tuttavia dei costi aggiuntivi in fase di rilievo che dipendono dalla complessità e dalle modalità con le quali si raggiungono a terra i punti a loro volta visibili sui fotogrammi.

1.1.5 Le equazioni di collinearità

Abbiamo visto che, per mezzo dell'orientamento relativo, risolvendo le equazioni di complanarità è possibile ricavare, per ogni coppia di fotogrammi, cinque incognite e così costruire un modello tridimensionale dell'oggetto. Questo modello viene posizionato sul terreno con l'orientamento assoluto che permette di ricavare 7 parametri di rototraslazione con variazione di scala.

È tuttavia possibile eseguire assieme queste due procedure con un'unica operazione detta orientamento esterno che ricava, per ogni fotogramma, i tre valori di traslazione e i tre valori degli angoli di assetto ciò si risolve con le equazioni di collinearità.

Un generico punto A posizionato sul terreno è ripreso in almeno due fotogrammi sui quali si vengono a formare i punti omologhi A_1 e A_2 rispettivamente sul primo e sul secondo fotogramma. Se si conoscono le posizioni di questi due punti nel sistema di coordinate immagine e si conosce la posizione dei due punti di presa O_1 e O_2 è possibile tracciare i due raggi omologhi r_1 e r_2 . Il calcolo dell'intersezione tra questi due raggi fornisce la posizione del punto A , questo calcolo viene fatto con le equazioni di collinearità.

Le equazioni di collinearità si ricavano dalle equazioni delle rette che congiungono i punti A_1 , O_1 e A e i punti A_2 , O_2 e A e risolvendo il sistema di equazioni si ricavano le tre coordinate del punto collimato. In realtà occorre tener conto che le coordinate fotogramma sono nel sistema di riferimento interno, mentre occorre portare le equazioni delle due rette omologhe nel sistema di riferimento del terreno X, Y, Z .

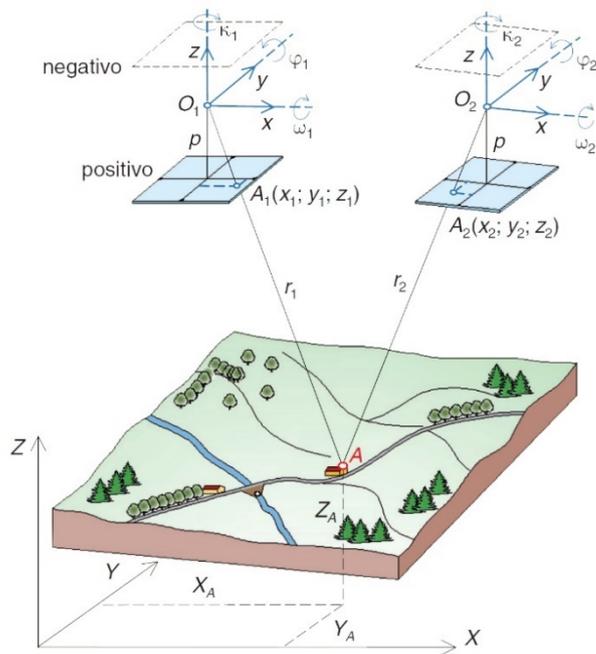


Figura 1.13 Schematizzazione della geometria di presa

Vediamo quali sono i parametri che entrano all'interno delle equazioni. Chiamiamo:

- X_A, Y_A, Z_A : coordinate del punto a terra nel sistema di riferimento terreno XYZ
- $X_{O_1}, Y_{O_1}, Z_{O_1}$: coordinate del centro di presa O nel sistema di riferimento terreno XYZ
- x_1, y_1, p : coordinate del punto immagine A_1 nel sistema di riferimento immagine xyz
- $X_{A_1}, Y_{A_1}, Z_{A_1}$: coordinate del punto immagine A_1 nel sistema di riferimento assoluto XYZ

Per prima cosa consideriamo il raggio omologo r_1 e scomponiamolo nelle sue proiezioni r_1^{XZ} e r_1^{YZ}

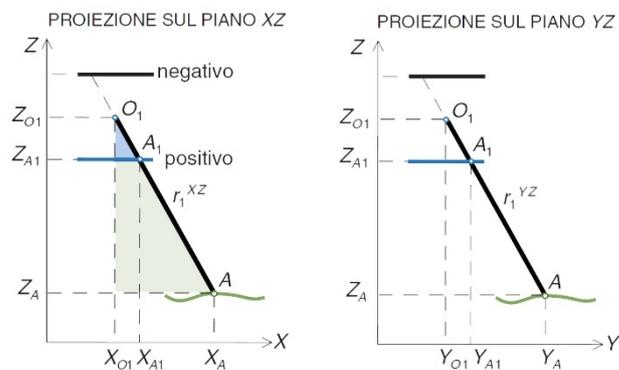


Figura 1.14 Proiezione del raggio omologo sui piani XZ e YZ

Ragionando sulla similitudine dei triangoli rettangoli possiamo dire che:

$$\frac{X_A - X_{O1}}{Z_{O1} - Z_A} = \frac{X_{A1} - X_{O1}}{X_{O1} - Z_{A1}}$$

$$\frac{Y_A - Y_{O1}}{Z_{O1} - Z_A} = \frac{Y_{A1} - Y_{O1}}{X_{O1} - Z_{A1}}$$

Allo stesso modo per il raggio omologo r_2 possiamo scrivere:

$$\frac{X_A - X_{O2}}{Z_{O2} - Z_A} = \frac{X_{A2} - X_{O2}}{X_{O2} - Z_{A2}}$$

$$\frac{Y_A - Y_{O2}}{Z_{O2} - Z_A} = \frac{Y_{A2} - Y_{O2}}{X_{O2} - Z_{A2}}$$

Le incognite delle nostre equazioni sono X_{A1} , Y_{A1} e Z_{A1} per il primo raggio omologo e X_{A2} , Y_{A2} e Z_{A2} per il secondo. Queste sono incognite nel sistema di riferimento assoluto ma sono note nel sistema di riferimento immagine. Attraverso la rototraslazione nello spazio passiamo quindi dalle coordinate immagine alle coordinate terreno.

Bisogna in primo luogo andare a calcolare la matrice di rotazione in funzione degli angoli di assetto della camera. Le rotazioni devono essere eseguite secondo un certo ordine:

- Rotazione primaria: si applica una rotazione ω attorno all'asse X

$$\{X\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_\omega \\ y_\omega \\ z_\omega \end{pmatrix} = [R_\omega] \cdot \{x_\omega\}$$

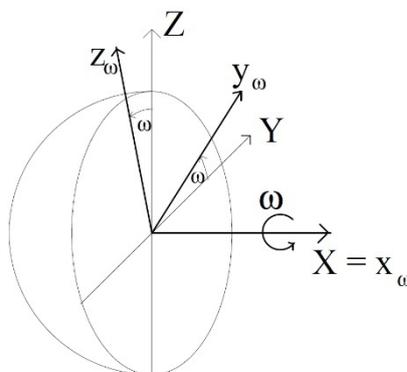


Figura 1.15 Rotazione primaria

- Rotazione secondaria: si applica una rotazione di un angolo φ non attorno a Y ma al nuovo asse y_ω

$$\{x_\omega\} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{\omega\varphi} \\ y_{\omega\varphi} \\ z_{\omega\varphi} \end{pmatrix} = [R_\varphi] \cdot \{x_{\omega\varphi}\}$$

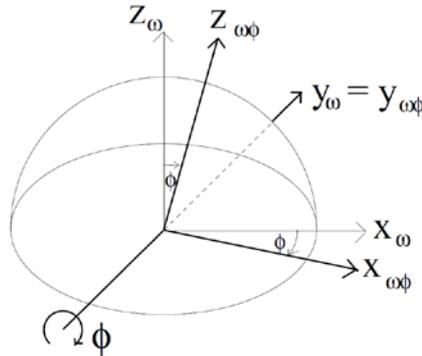


Figura 1.16 Rotazione secondaria

- Rotazione terziaria: si applica una rotazione di angolo κ attorno all'asse $z_{\omega\varphi}$

$$\{x_{\omega\varphi}\} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{\omega\varphi\kappa} \\ y_{\omega\varphi\kappa} \\ z_{\omega\varphi\kappa} \end{pmatrix} = [R_\kappa] \cdot \{x_{\omega\varphi\kappa}\}$$

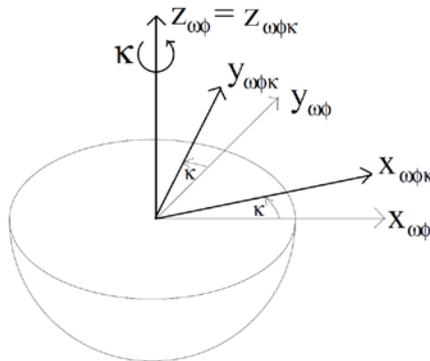


Figura 1.17 Rotazione terziaria

La matrice di rotazione globale viene così ricavata in funzione degli angoli ω , φ e κ

$$[R] = [R_\omega] \cdot [R_\varphi] \cdot [R_\kappa] =$$

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

Questa matrice scritta in forma compatta per il primo fotogramma, ovvero per ω_1 , φ_1 e κ_1 , diventa:

$$[R_1] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Mentre per il secondo fotogramma (per ω_2 , φ_2 e κ_2) diventa:

$$[R_2] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{bmatrix}$$

I termini incogniti in funzione delle coordinate del fotogramma diventano:

$$\begin{cases} X_{A1} = X_{O1} + a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot y_1 + a_{13} \cdot p \\ Y_{A1} = Y_{O1} + a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot y_1 + a_{23} \cdot p \\ Z_{A1} = Z_{O1} + a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot y_1 + a_{33} \cdot p \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{A2} = X_{O2} + b_{11} \cdot x_2 + b_{12} \cdot y_2 + b_{13} \cdot p \\ Y_{A2} = Y_{O2} + b_{21} \cdot x_2 + b_{22} \cdot y_2 + b_{23} \cdot p \\ Z_{A2} = Z_{O2} + b_{31} \cdot x_2 + b_{32} \cdot y_2 + b_{33} \cdot p \end{cases}$$

Sostituendo nelle equazioni iniziali otteniamo per il primo fotogramma

$$\begin{cases} X_A = X_{O1} + (Z_A - Z_{O1}) \cdot \frac{a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot y_1 + a_{13} \cdot p}{a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot y_1 + a_{33} \cdot p} \\ Y_A = Y_{O1} + (Z_A - Z_{O1}) \cdot \frac{a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot y_1 + a_{23} \cdot p}{a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot y_1 + a_{33} \cdot p} \end{cases}$$

Per il secondo fotogramma

$$\begin{cases} X_A = X_{O2} + (Z_A - Z_{O2}) \cdot \frac{b_{11} \cdot x_2 + b_{12} \cdot y_2 + b_{13} \cdot p}{b_{31} \cdot x_2 + b_{32} \cdot y_2 + b_{33} \cdot p} \\ Y_A = Y_{O2} + (Z_A - Z_{O2}) \cdot \frac{b_{21} \cdot x_2 + b_{22} \cdot y_2 + b_{23} \cdot p}{b_{31} \cdot x_2 + b_{32} \cdot y_2 + b_{33} \cdot p} \end{cases}$$

Queste sono le equazioni di collinearità che passano dalle coordinate immagine alle coordinate terreno.

Per risolvere queste equazioni devono essere noti la distanza principale p (che coincide con z_1 e z_2), le coordinate dei punti di presa, l'assetto angolare della camera e le coordinate dei punti immagine.

Queste equazioni possono essere utilizzate nella fase di orientamento esterno dei fotogrammi in cui per ogni coppia i parametri incogniti dell'equazione sono 12 ($X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2$ e κ_2) mentre è nota la posizione del punto di appoggio a terra X_A, Y_A, Z_A .

Per ogni punto a terra abbiamo 4 equazioni quindi conoscendo la posizione di 3 punti a terra, visibili in entrambi i fotogrammi, e risolvendo il sistema di equazioni si possono ricavare le incognite del problema.

Queste stesse equazioni possono essere scritte per passare dalle coordinate terreno alle coordinate immagine. Per il primo fotogramma abbiamo:

$$\begin{cases} x_1 = -p \cdot \frac{a_{11} \cdot (X_A - X_{01}) + a_{21} \cdot (Y_A - Y_{01}) + a_{31} \cdot (Z_A - Z_{01})}{a_{13} \cdot (X_A - X_{01}) + a_{23} \cdot (Y_A - Y_{01}) + a_{33} \cdot (Z_A - Z_{01})} \\ y_1 = -p \cdot \frac{a_{12} \cdot (X_A - X_{01}) + a_{22} \cdot (Y_A - Y_{01}) + a_{32} \cdot (Z_A - Z_{01})}{a_{13} \cdot (X_A - X_{01}) + a_{23} \cdot (Y_A - Y_{01}) + a_{33} \cdot (Z_A - Z_{01})} \end{cases}$$

Per il secondo fotogramma invece si ha:

$$\begin{cases} x_2 = -p \cdot \frac{a_{11} \cdot (X_A - X_{02}) + a_{21} \cdot (Y_A - Y_{02}) + a_{31} \cdot (Z_A - Z_{02})}{a_{13} \cdot (X_A - X_{02}) + a_{23} \cdot (Y_A - Y_{02}) + a_{33} \cdot (Z_A - Z_{02})} \\ y_2 = -p \cdot \frac{a_{12} \cdot (X_A - X_{02}) + a_{22} \cdot (Y_A - Y_{02}) + a_{32} \cdot (Z_A - Z_{02})}{a_{13} \cdot (X_A - X_{02}) + a_{23} \cdot (Y_A - Y_{02}) + a_{33} \cdot (Z_A - Z_{02})} \end{cases}$$

L'uso di queste equazioni permette di inserire, oltre ai sei parametri incogniti per ogni fotogramma, anche le eventuali incognite di orientamento interno x_0, y_0, p ; non solo è possibile inserire tra le incognite anche i parametri di un modello polinomiale che modelli le distorsioni radiali, longitudinali ed altre distorsioni e che quindi consenta l'uso anche di camere non metriche. Di ciò si parlerà fra poco.

1.2 Camere non metriche e loro calibrazione

1.2.1 Premessa

La scarsa capacità di carico dei droni non permette l'utilizzo di camere metriche che risultano troppo pesanti.

Le camere digitali presenti ad oggi sul mercato (reflex, compatte, mirrorless, action cameras) hanno dei buoni obiettivi e dei sensori abbastanza sofisticati da permettere, dopo la calibrazione delle distorsioni, un rilievo di tipo metrico. Questo, unito al fatto che i software moderni permettono di valutare i parametri di orientamento interno della camera, ha permesso un uso sempre crescente di questo tipo di camere per la fotogrammetria.

È tuttavia indispensabile valutare quelli che sono i parametri di orientamento interno della camera e le sue distorsioni per poter eseguire un corretto rilievo dell'elemento. Questi parametri sono noti nelle camere metriche attraverso il certificato di calibrazione della camera ma devono essere ricavati attraverso procedure analitiche nelle camere non metriche.

La calibrazione della camera può essere effettuata in diversi modi

- Pre-calibrazione: viene eseguita andando a fotografare oggetti di dimensioni note o check boards bi-tridimensionali. In questo modo si possono valutare parametri e distorsioni. Questo tipo di calibrazione viene effettuata prima del lavoro in campagna.
- Calibrazione in loco: viene eseguita contestualmente alle fasi di rilievo dell'oggetto. Vicino alla zona da rilevare vengono inserite degli oggetti di dimensioni note che, come nel caso della pre-calibrazione, permettono di valutare le distorsioni della camera.
- Auto calibrazione: i parametri da andare a valutare si estrapolano direttamente dall'oggetto rilevato senza l'ausilio di oggetti dalla geometria nota.

1.2.2 Procedure di calibrazione

Durante la fase di calibrazione della camera si andranno a stimare la distanza principale e la posizione planimetrica del punto principale nel sistema interno della camera e infine le distorsioni dell'obiettivo. Il tipo di calibrazione che è stato utilizzato nel nostro caso studio è l'auto calibrazione ed è stata eseguita con il software Metashape Professional. L'auto calibrazione consiste nel ricavare i parametri di cui sopra congiuntamente all'uso delle equazioni di collinearità.

Nel modello ideale della prospettiva centrale il punto immagine, il centro di presa e il punto oggetto sono allineati, su questo principio di basano le equazioni di collinearità. Il modello fisico reale presenta degli errori sistematici, dovuti alle distorsioni della camera, che fanno sì che il punto immagine non sia allineato alla retta che congiunge punto immagine e centro di presa. Si vanno quindi a modificare le equazioni di collinearità aggiungendo alle incognite i parametri di distorsione.

Allo scopo si usano le equazioni di collinearità prendendo come dati noti le coordinate oggetto per ottenere le coordinate immagine teoriche e valutare il loro scostamento rispetto a quelle effettive.

La procedura migliore da seguire, nel caso in cui si utilizzano camere non metriche digitali, è quella dell'auto calibrazione con bundle-adjustment, detta anche "triangolazione aerea a stelle proiettive". Tale procedura calcola "in blocco" per tutti i fotogrammi sia i parametri di orientamento esterno, sia le coordinate dei punti visibili in più di due fotogrammi (detti punti di legame), sia i parametri di orientamento interno maggiorati dai parametri di distorsione della camera. Questi ultimi saranno:

- Lunghezza focale f
- Coordinate del punto principale c_x e c_y
- Coefficienti di distorsione radiale k_1, k_2, k_3 e k_4
- Coefficiente di skew (incertezza sulla forma del pixel) b_1 e b_2
- Coefficienti di distorsione tangenziale p_1, p_2

Tutti i parametri considerati sono dovuti a imperfezioni costruttive della macchina da presa.

1.2.3 Le distorsioni delle camere non metriche

L'obiettivo di una camera è realizzato andando a posizionare in sequenza un sistema di lenti, con diversa forma, lungo un unico asse ottico. A questo sistema di lenti corrisponde un'unica lente risultante.

La rifrazione che si ha sulla lente risultante è applicata su due piani distinti, ortogonali all'asse ottico, chiamati piani principali. I punti nodali N_1 e N_2 sono quei punti che derivano dall'intersezione tra i piani principali e l'asse ottico. Teoricamente il raggio proiettante che arriva su N_1 con un certo angolo α viene rifratto su N_2 e parte da questo punto con la stessa inclinazione α . Essendo i due punti molto vicini tra loro possiamo dire che $N_1 = N_2 = O$ ovvero che i due punti coincidono con il centro di presa della camera.

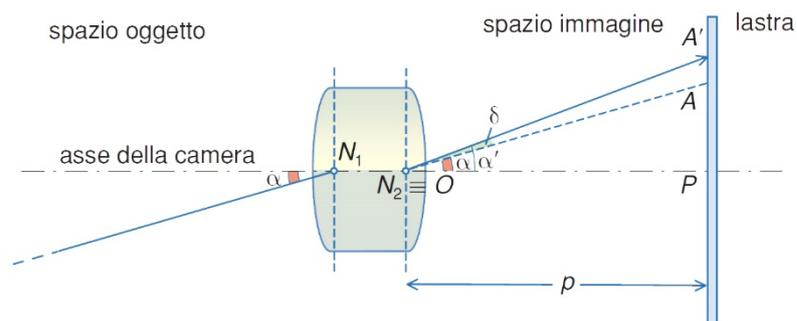


Figura 1.18 Distorsione radiale

Il funzionamento dell'obiettivo reale però non è esattamente uguale a quello teorico in quanto sono sempre presenti delle deformazioni dell'immagine. La distorsione è quella che ha un effetto più marcato. Questa deformazione è dovuta al fatto che il raggio uscente dal punto nodale N_2 ha una inclinazione α' diversa da quella entrante in N_1 con una differenza di inclinazione $\delta = \alpha' - \alpha$. Di conseguenza il punto immagine, che sarebbe dovuto essere proiettato nel punto A , si trova impresso nel punto A' . La distanza $d = AA'$ ci fornisce una indicazione sulla misura della distorsione.

A seconda dell'inclinazione α , con cui il raggio luminoso entra all'interno della lente, varia il valore della deformazione d che quindi non è costante su tutto il fotogramma. Si hanno valori costanti di deformazione a una certa distanza radiale rispetto al centro del fotogramma.

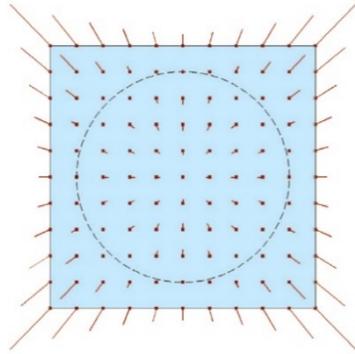


Figura 1.19 Andamento della distorsione

Il fenomeno della distorsione può essere suddiviso in due componenti: la distorsione radiale k e la distorsione tangenziale p . La più significativa è la prima delle due in quanto incide per circo il 95% della distorsione totale.

La distorsione radiale può essere a barilotto o a cuscinetto

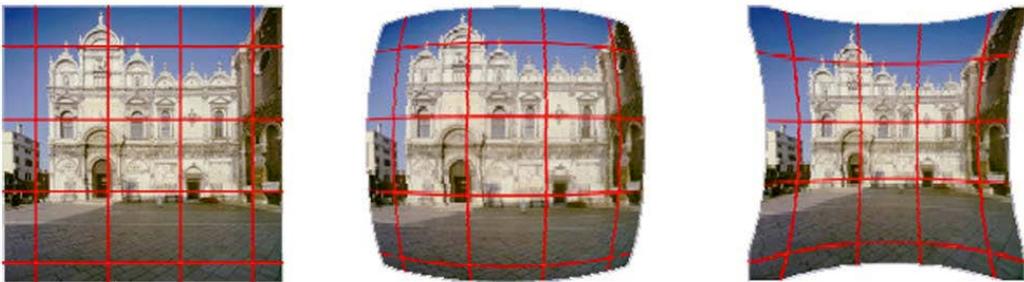


Figura 1.20 Immagine corretta, distorsione a barilotto, distorsione a cuscinetto

A seconda del diverso tipo di distorsione radiale si hanno dei diagrammi, detti curva di distorsione, che mostrano l'andamento della distorsione all'allontanarsi dal centro del fotogramma.

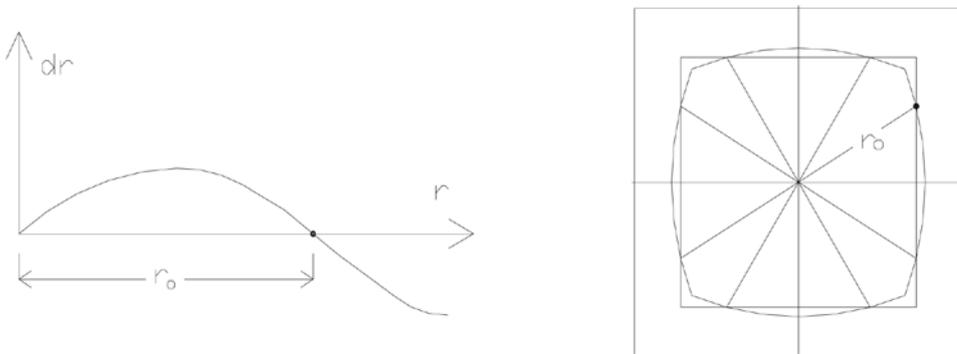


Figura 1.21 Curva di distorsione a barilotto

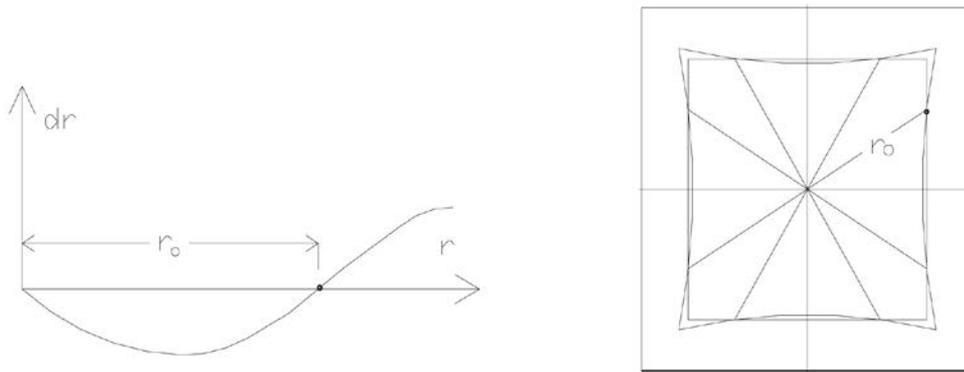


Figura 1.22 Curva di distorsione a cuscinetto

1.2.4 Caso studio

Come abbiamo precedentemente detto il software Metashape Professional permette, attraverso l'opzione *Optimize Cameras*, di valutare gli errori sistematici della camera.

Vediamo ora i parametri di orientamento interno e le distorsioni ricavate nel modello in cui sono stati considerati come punti di coordinate note (con le loro precisioni) sia le posizioni dei centri di presa del fotogramma (per mezzo della fotogrammetria diretta) che i punti di appoggio a terra (Ground Control Point).

Le tre coordinate del punto principale sono qui indicate con (c_x, c_y, f) e non con (x_0, y_0, p) come in precedenza.

	Valore (μm)	sqm (μm)
f	8757.480	0.113
c_x	-8.277	0.046
c_y	16.434	0.038
b_1	-0.656	0.038
b_2	1.394	0.038

	Valore (μm)	sqm (μm)
k_1	-0.653	5.40E-05
k_2	0.295	1.65E-04
k_3	-0.128	2.01E-04
k_4	0.029	8.33E-05
p_1	-0.002	1.56E-06
p_2	-0.001	1.58E-06

Tabella 1.1 Parametri di calibrazione caso 1

Confrontiamo questi valori con quelli ottenuti nel caso in cui si sono considerati noti tutti i centri di presa dei fotogrammi e un solo punto di appoggio a terra.

	Valore (μm)	sqm (μm)		Valore (μm)	sqm (μm)
f	8742.528	0.312	k_1	-0.651	6.82E-05
c_x	-8.532	0.046	k_2	0.293	1.67E-04
c_y	16.309	0.038	k_3	-0.127	1.99E-04
b_1	-0.665	0.046	k_4	0.029	8.16E-05
b_2	1.597	0.046	p_1	-0.002	1.56E-06
			p_2	-0.001	1.58E-06

Tabella 1.2 Parametri di calibrazione caso 2

Possiamo notare che gli scarti quadratici medi ottenuti sono minori nel primo modello. L'utilizzo di più punti, rispetto a quelli strettamente necessari alla determinazione delle incognite, permette infatti una compensazione ai minimi quadrati che fornisce risultati più precisi.

Riportiamo di seguito l'andamento della distorsione lungo il fotogramma.

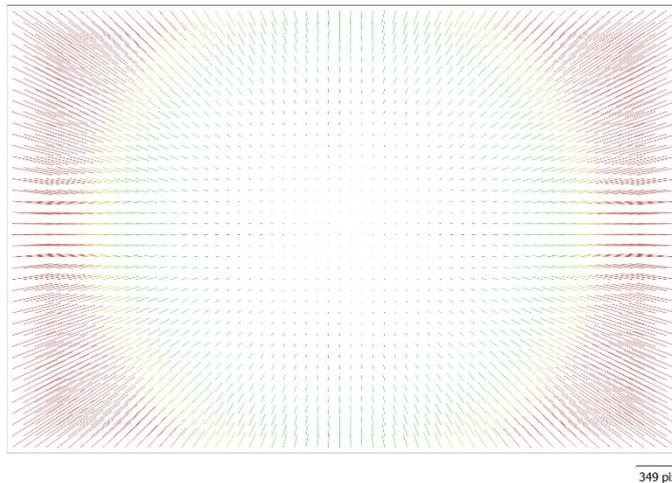


Figura 1.23 Andamento della distorsione

Riportiamo anche la curva di distorsione radiale che evidenzia che il tipo di distorsione è del tipo a barilotto.

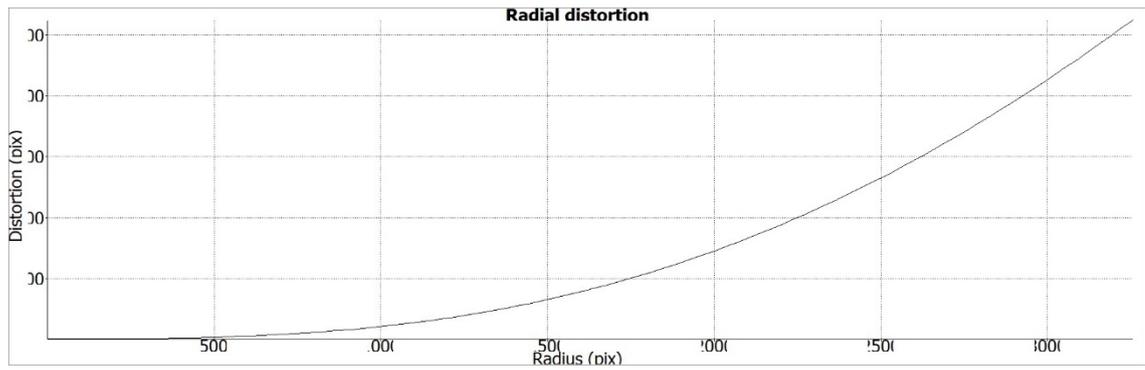


Figura 1.24 curva di distorsione

Le unità di misura riportate nelle immagini sono in pixel. Per passare da pixel a micron è necessario moltiplicare per 2.4 ovvero per la dimensione del pixel.

2 La Fotogrammetria diretta

2.1 La fotogrammetria diretta con piccoli droni (UAV)

Per fotogrammetria diretta si intende un rilievo eseguito senza l'ausilio di punti di appoggio a terra. In questo caso il veicolo utilizzato deve essere dotato di almeno un ricevitore GNSS e possibilmente di un'unità di misura inerziale (IMU) ovvero di giroscopi e accelerometri che consentono il monitoraggio dell'assetto della camera da presa.

Parliamo in questa tesi non di velivoli tradizionali ma di piccoli velivoli in quanto il rilievo della frana oggetto di studio è stato effettuato con un drone di peso inferiore a 1,5 *kg* che consente di eseguire rilievi aerei a bassa quota.

Con il termine generale drone si indicano quei velivoli che sono pilotati da remoto, ovvero non hanno un pilota a bordo.

I droni usati in fotogrammetria sono equipaggiati con camere digitali ad elevata risoluzione sulle quali vengono effettuate le procedure di calibrazione in maniera tale da poter acquisire immagini metriche utili, ad esempio, alla costruzione di un DTM o un modello 3D. Le procedure su cui si basa la ricostruzione delle immagini sono quelle della fotogrammetria classica con l'ausilio di software Structure for Motion che permettono di automatizzare i processi di orientamento interno ed esterno dei fotogrammi.

Per poter ottenere dei risultati con valenza metrica con questi tipi di software è necessario in questo caso andare a predisporre un ricoprimento dei fotogrammi di circa l'80% (maggiore del 60% utilizzato nella fotogrammetria classica) ed è sempre consigliabile utilizzare un numero di punti di coordinate note a terra, detti Ground Control Point (GCP), maggiore di 5 per poter anche valutare la bontà del rilievo. Questi pochi accorgimenti permettono di ottenere buoni risultati con un processo semiautomatico.

Nel caso di fotogrammetria diretta i GCP possono anche essere assenti, ma è ancora oggetto di studio l'andamento degli errori sistematici ed accidentali in funzione delle caratteristiche del blocco fotogrammetrico.

Le strumentazioni GNSS e IMU presenti all'interno dei droni permettono di effettuare sia un volo autonomo, senza la guida manuale dell'operatore, sia un volo manuale.

Andiamo a valutare ora le potenzialità, i campi di applicazione e le precisioni di un rilievo fotogrammetrico diretto con piccoli droni

2.1.1 Potenzialità e campi di applicazione

I droni, volando a distanze dall'oggetto molto minori rispetto agli aerei, possono essere utilizzati per rilievi fotogrammetrici in campo architettonico, ambientale e archeologico. In tal caso è possibile:

- Ottenere numerose immagini metriche dell'oggetto in poco tempo che permettono di calcolare misure di volumi, aree e distanze anche quando non si è più sul luogo del rilievo;
- Raggiungere posti difficilmente accessibili come ad esempio frane o tetti;
- Ottenere una risoluzione migliore delle immagini rispetto alla fotogrammetria aerea classica;
- Mantenere bassi i costi del rilievo.

Anche i droni possono essere equipaggiati con sensori diversi dalle camere digitali come ad esempio sensori multispettrali, termocamere e laser scanner.

I prodotti che si possono ottenere da un rilievo fotogrammetrico sono:

- Nuvola di punti: il software con le opzioni "dense matching" è in grado di determinare le coordinate di milioni di punti sull'oggetto generando ciò che viene chiamata "nuvola di punti". Solitamente viene prima generata una nuvola di punti a bassa densità, che permette di fare delle valutazioni sulla bontà del rilievo, e poi una nuvola di punti densa che è la base per la realizzazione degli altri elaborati.



Figura 2.1 Nuvola di punti sparsa e nuvola di punti densa

- Mesh: partendo dalla nuvola di punti densa per ogni punto è possibile andare a collegare i punti adiacenti andando a creare una mesh poligonale. Questa non è altro che un insieme di facce, spigoli e vertici che vanno a definire la dimensione e la forma dell'oggetto. Con questo prodotto si possono andare ad effettuare misure di volumi, aree e distanze sull'oggetto. Per una migliore visualizzazione della mesh è possibile andare ad affiancare a questa una "texture", letteralmente una "tessitura", che permette di colorare con i colori delle immagini ogni faccia dei poligoni della mesh.

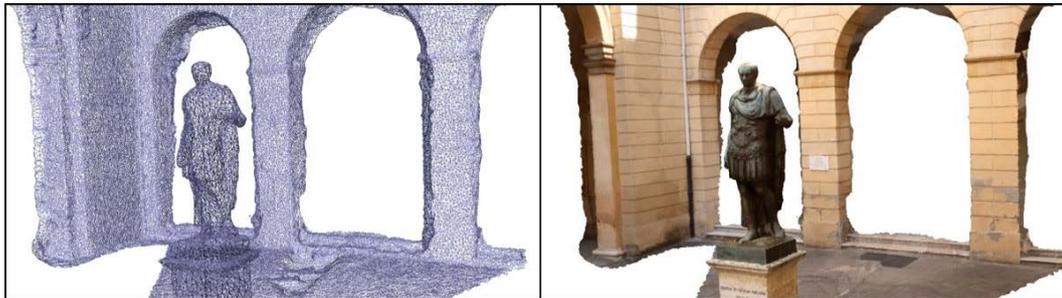


Figura 2.2 Mesh e texture

- DTM/DSM: il Modello Digitale del Terreno (DTM) è la riproduzione dell'andamento della sola superficie del terreno senza andare a considerare gli elementi antropici e la vegetazione. Il Modello Digitale della Superficie (DSM) è la rappresentazione non solo della superficie del suolo ma anche degli oggetti che sono posizionati sopra ad essa come ad esempio edifici e alberi.

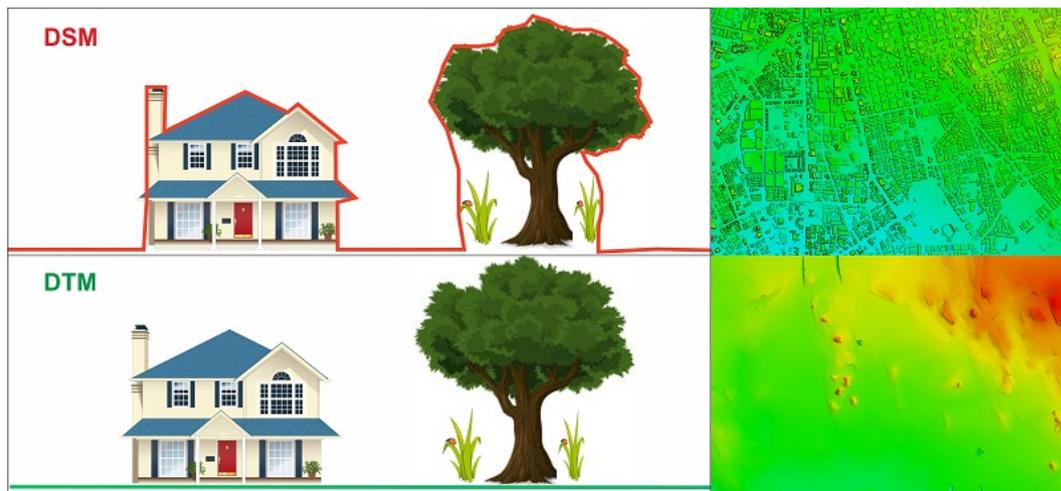


Figura 2.3 DSM e DTM

- Ortofoto: i software permettono di rimuovere le deformazioni prospettiche all'interno dei fotogrammi in maniera tale da ottenere delle ortofoto bidimensionali con valenza metrica. Unendo le diverse ortofoto si realizza un ortomosaico di un estesa area sul quale è possibile effettuare delle misure. In pratica si tratta di passare da numerose prospettive centrali, come idealmente possono ritenersi i fotogrammi, a una proiezione del terreno e delle opere sovrastanti sul piano cartografico.



Figura 2.4 Differenza tra foto e ortofoto

- Sezioni: da uno qualsiasi dei modelli tridimensionali visti in precedenza è possibile andare a estrapolare delle sezioni nei punti di interesse.

La fotogrammetria speditiva permette inoltre di ripetere il rilievo ogni qual volta se ne abbia bisogno, in questo modo è possibile monitorare sistematicamente l'evoluzione dell'oggetto rilevato. I cambiamenti riscontrati tra un rilievo e il

successivo possono servire sia ad avere dati sempre aggiornati sull'oggetto ma anche per individuare eventuali deformazioni, spostamenti e criticità in genere.

I possibili campi di applicazione in cui è possibile andare ad utilizzare la fotogrammetria con piccoli droni sono:

- Rilievo di cave e stima dei volumi di riporto e sterro;
- Monitoraggio dei movimenti del terreno nelle zone a rischio frana;
- Valutazione di eventuali variazioni morfologiche di piccole porzioni di fiumi;
- Controllo dei volumi di materiale presenti all'interno delle discariche;
- Osservazione di siti di interesse storico;
- Mappatura di immobili e verifiche sull'abusivismo edilizio;
- Rilievo di zone non accessibili o pericolose;
- Monitoraggio della crescita delle coltivazioni.

2.2.2 Livelli di precisione attesa

Per valutare la precisione di un rilievo fotogrammetrico si fa riferimento alla precisione altimetrica che è in genere quella soggetta ad errori più elevati. La precisione della fotogrammetria può essere espressa con lo scarto quadratico medio dei valori in quota:

$$\sigma_z = \frac{H^2}{p \cdot B} \cdot \sigma_{p\xi}$$

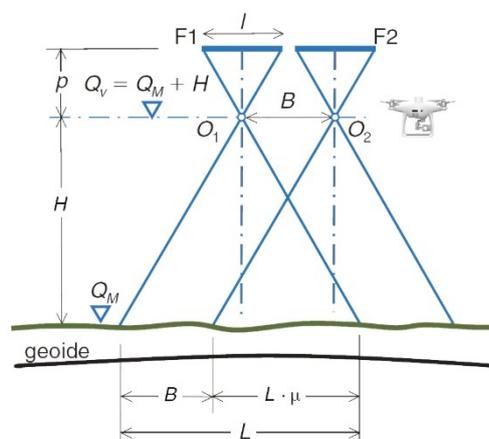


Figura 2.5 Parametri per la definizione della precisione fotogrammetrica

Ess risulta essere proporzionale al quadrato della distanza dall'oggetto H (ovvero la quota massima di volo) e inversamente proporzionale alla distanza principale e alla base di presa.

Un parametro utile per andare a stimare la precisione è la risoluzione spaziale che viene espressa in funzione del Ground Sampling Distance (GSD). Questa misura fornisce la risoluzione del pixel a terra ovvero la distanza tra i centri di due pixel consecutivi misurati sul terreno. In pratica il GSD ti dà un'informazione sulla porzione di terreno che è presente all'interno di un pixel.

Maggiore è il valore dell'immagine GSD, minore è la risoluzione spaziale dell'immagine e i dettagli sono meno visibili.

Il GSD, espresso in mm/pix , è funzione delle caratteristiche del sensore fotografico, della lunghezza focale e dell'altezza del volo.

Nel nostro caso studio possiamo determinare il GSD nel seguente modo:

Sensore fotografico	
Larghezza l (mm)	Altezza j (mm)
13.2	8.8

Immagine		
Larghezza L (pixel)	Altezza J (pixel)	Dimensione pixel D (mm/pixel)
5472	3648	0.0024

Lunghezza focale p (mm)
8.8

Altezza massima del volo H (m)
100

Ground Sampling Distance GSD (mm/pixel)
27,4

Tabella 2.1 Valutazione del Ground Sampling distance

La dimensione del pixel è stata calcolata come:

$$D = \frac{l \text{ (mm)}}{L \text{ (pixel)}}$$

Mentre il Ground Sampling Distance è pari a:

$$GSD = \frac{H \cdot 1000 \cdot D}{p}$$

Gli altri dati sono noti.

Avere una GSD di 2,74 *cm* non corrisponde tuttavia ad avere una precisione di 2,74 *cm*.

Facciamo a questo punto una distinzione tra precisione relativa e precisione assoluta di un rilievo fotogrammetrico. La prima ci fornisce un'informazione sulla distanza relativa tra due punti a terra. La seconda invece fa riferimento alla differenza tra le coordinate dei punti ricavate nel modello e la loro reale posizione sul terreno. Nel nostro caso siamo interessati alla precisione assoluta ma per esempio in un rilievo architettonico si potrebbe fare riferimento alla precisione relativa.

La qualità della precisione assoluta dipende dalle modalità di acquisizione dei punti di presa dei fotogrammi, nel caso di fotogrammetria diretta, o dei punti di appoggio a terra, che prendono il nome di Ground Control Point. Nel nostro caso studio abbiamo eseguito un rilievo con un drone equipaggiato con un sistema GPS RTK che ha la precisione di 3 cm in planimetria e 5 cm in altimetria. Sono stati rilevati anche 13 punti di appoggio a terra con la precisione di 1 cm in planimetria e 3 cm in altimetria. I punti di appoggio a terra sono stati utilizzati, a seconda del caso di studio, come Ground Control Points (GCP), ovvero punti utilizzati nelle fasi di orientamento assoluto dei fotogrammi, o come Check Point (CKP) per la stima della qualità del rilievo. La precisione assoluta non può risultare maggiore della precisione con cui sono stati rilevati i GCP.

Altri fattori che possono incidere sulla qualità di un rilievo fotogrammetrico sono le condizioni atmosferiche, l'illuminazione, la velocità di crociera e la copertura GPS.

In generale si può dire che l'accuratezza relativa varia da uno a tre volte il valore di GSD. L'accuratezza assoluta ha dei valori che variano da uno a due volte il GSD per la planimetria e da uno a tre volte il GSD per l'altimetria.

Cautelativamente possiamo ipotizzare la precisione del nostro caso studio circa quattro volte il GSD ottenuto ovvero circa 11 *cm*.

2.2 Esempi e drone utilizzato

2.2.1 Tipologie di drone

A seconda del tipo di drone utilizzato possiamo distinguere:

- SAPR (sistema aeromobile a pilotaggio remoto): è un aeromobile a pilotaggio remoto utilizzato per scopi diversi da quelli sportivi o ricreativi. Il termine comprende la stazione di controllo.
- APR (aeromobile a pilotaggio remoto): è un aeromobile a pilotaggio remoto non utilizzato per scopi sportivi o ricreativi. Non comprende il sistema di comando del drone, quindi indica il drone in sé per sé.
- UAV (Unmanned Aerial Vehicle): è il termine inglese che indica tutti quei velivoli che non hanno a bordo un pilota. Il termine è utilizzato per indicare sia i droni a uso ricreativo che quelli a uso professionale.
- UAS (Unmanned Aircraft Systems): si riferisce ai droni a uso militare o per la difesa.

I droni possono essere classificati a seconda del tipo di ala o eliche con sui sono equipaggiati:

- Multirotori
- Ala fissa
- Droni ibridi

I droni multirotori sono i più diffusi grazie al fatto che ne esistono di diverse fasce di prezzo, sono di dimensioni ridotte e sono più semplici da pilotare. Questi droni sono dotati di bracci (il cui numero può variare da 3 a 8), disposti a raggiera, sui quali sono montati i rotori. Il maggior vantaggio di questo tipo di velivolo è il fatto che può

stazionare in un determinato punto e al contempo può ruotare sul proprio asse o variare l'angolo di presa. A questo si aggiunge che il decollo è di tipo verticale e che si possono fare rilievi (ad esempio di un edificio multipiano) semplicemente facendo traslare verticalmente il drone. La capacità di carico (payload) può arrivare a 10 kg e quindi può essere equipaggiato con diversi tipi di strumentazione. Lo svantaggio di questo tipo di drone è che ha una scarsa autonomia di volo che varia dai 10 ai 30 minuti.



Figura 2.6 Esempi di modelli multirotore

I droni ad ala fissa sono simili a piccoli aeroplani e sono dotati di un'unica elica posizionata nella parte posteriore. Questi velivoli hanno una forma più aerodinamica rispetto ai multimotori e questo garantisce loro una autonomia di volo notevolmente maggiore (oltre un'ora). Con un solo volo si possono andare rilevare ampie porzioni di territorio anche grazie al fatto che i droni ad ala fissa viaggiano a una velocità media di circa 40 km/h . Andare ad eseguire le operazioni di presa in tempi ridotti è una caratteristica importante in campo fotogrammetrico in quanto garantisce che le condizioni di illuminazione siano costanti durante tutto il rilievo permettendo una migliore correlazione tra i fotogrammi. La loro aerodinamicità inoltre permette a questi droni di volare anche con venti con una velocità di 60 km/h . Gli svantaggi sono la scarsa capacità di carico, la necessità di un decollo orizzontale e l'incapacità di stazionare su un punto.



Figura 2.7 Esempi di modelli ad ala fissa

I droni ibridi includono entrambe le caratteristiche dei due modelli visti in precedenza. I motori sono posizionati orizzontalmente in fase di decollo e ruotano, posizionandosi verticalmente, durante il volo.



Figura 2.8 Droni ibridi

Vediamo ora la componentistica con la quale sono costruiti di droni.

- Il telaio è solitamente realizzato in fibra di carbonio che garantisce una buona leggerezza e resistenza. Il telaio dei droni più piccoli può essere realizzato con materiale plastico. Una buona progettazione di questo elemento garantisce il bilanciamento nelle fasi di volo. Quando parliamo di multirotori possiamo distinguere delle classi di telaio in funzione del loro diametro.
 - Classi da 250 a 650: hanno diametri che arrivano a 65 cm e sono dotati di una capacità di carico limitata. Sono solitamente i droni ad uso ludico;
 - Classi superiore a 800: sono i droni professionali con diametri anche superiori al 1 metro con capacità di carico superiore a 10 kg.
- I motori fanno parte del sistema propulsivo e sono composti dalle eliche e dagli ESC (elettronico speed control). I multirotori hanno solitamente 3, 4, 6 o 8 motori e questo numero determina la capacità di carico del drone. Inoltre, un numero sovrabbondante di motori permette, in caso di avaria di uno di questi, di mantenere il drone in volo. La rotazione delle eliche vicine è invertita in modo tale da evitare l'effetto della coppia opposta, infatti se i motori ruotassero tutti nella

stessa direzione otterrebbero come effetto una rotazione del telaio nella direzione opposta.

- Il flight controller è l'apparecchio che permette di gestire automaticamente, grazie all'INS (sistema di misura inerziale), i parametri di volo. L'INS è composta da:
 - Accelerometro
 - Giroscopio
 - Magnetometro
 - Barometro digitale
 - GNSS

Il flight controller permette di:

- Realizzare voli programmati senza l'ausilio dell'operatore
 - Verificare che il segnale tra radiocomando e drone sia di buona qualità
 - Controllare il livello di carica delle batterie
 - Controllare che il ricevitore GNSS del drone abbia agganciato i satelliti
 - Fornire i dati di assetto del drone, la quota di volo, e la sua velocità
 - Indicare la distanza dalla posizione dell'operatore
- Le batterie utilizzate dai droni professionali sono del tipo Li-Po, ovvero accumulatori in polimeri di litio, che in passato erano utilizzati per scopi militari e che sono state adattate per usi civili. Queste batterie sono caratterizzate da una notevole durata e da un peso minore rispetto alle vecchie batterie Ni-Cd (nichel-cadmio) e alle batterie Ni-MH (nichel-metallo idruro). L'aspetto negativo di questo tipo di batterie è che sono facilmente incendiabili se non utilizzate in maniera corretta. I caricabatterie che le ricaricano devono essere in grado di bilanciare la carica sulle diverse celle che compongono la batteria. I cicli di carica che possono sopportare tali batterie si aggirano attorno a 500.
 - Il radiocomando è un dispositivo che, oltre a permettere di impartire i comandi al veicolo, fornisce al pilota i dati sulla qualità del segnale, modalità di guida, lo stato delle batterie. I radiocomandi più sofisticati permettono anche di impostare modifiche sulla fotocamera, sul gimbal e sull'eventuale paracadute. La modalità di volo solitamente utilizzata in fotogrammetria è quella automatica in cui assetto,

quota e posizione del drone sono preimpostate in funzione del progetto del volo eseguito con l'ausilio di un DTM.

- Il gimbal (giunto cardanico) è uno strumento, frapposto tra il telaio e la fotocamera, che ha il compito di riequilibrare le vibrazioni e i movimenti del drone in maniera tale da rendere le immagini meno mosse. Un'altra importante funzione di questo strumento è quella di ruotare la fotocamera in maniera tale da effettuare riprese che non siano solo nadirali.
- La stazione di controllo a terra è uno strumento dotato di un software che permette di controllare il drone durante il volo. Questo strumento può essere uno smartphone, un tablet o un computer. Se il drone vola in modalità automatica si può programmare sulla stazione di controllo a terra il percorso che deve seguire imponendo alcuni waypoint dal quale deve passare. I parametri di volo e le immagini che la fotocamera sta riprendendo possono essere visualizzati con un semplice smartphone.

2.2.2 DJI Phantom 4 RTK

Phantom 4 RTK è un UAV progettato per eseguire mappature, rilievi e ispezioni estremamente accurate.



Figura 2.9 Phantom 4 RTK

Il modulo RTK, inserito nel drone, permette di rilevare i dati di posizionamento con una precisione centimetrica e in tempo reale e, teoricamente, non occorre rilevare punti di appoggio a terra (Ground Control Point) (fotogrammetria diretta).

Un blocco fotogrammetrico senza la fotogrammetria diretta ha bisogno di circa 40 punti di controllo a terra (GCP) per ogni chilometro quadrato rilevato per scale cartografiche 1:200; il rilievo di questi punti richiede diverse ore di lavoro in campo.

Il drone è equipaggiato di una camera con sensore CMOS 1" da 20 MP. L'otturatore meccanico in dotazione permette di andare ad eseguire il rilievo in continuo movimento senza che le immagini siano soggette all'effetto di trascinamento. Grazie all'elevata risoluzione della fotocamera è possibile raggiungere un GSD pari a 2,74 cm per una quota di volo di 100 m.

Nelle zone con scarsa copertura RTK il Phantom4 RTK può valersi del Post Processed Kinematics (PPK). Il drone immagazzina i dati GNSS e le effemeridi e salva le informazioni in un file PPKRAW.bin. Successivamente il drone converte i dati nel formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format). La sincronizzazione tra l'antenna GNSS e la fotocamera permette di registrare nel file Timestamp.MRK sia gli istanti di scatto che il lever arm ovvero la distanza nelle direzioni Nord Est e Quota tra antenna GNSS e centro di presa della fotocamera.

La trasmissione tra radiocomando e il drone è garantita fino a una distanza di 7 km e questo permette di rilevare siti particolarmente ampi. L'autonomia di volo è di circa 30 minuti e consente di completare il volo senza dover cambiare la batteria. Se la durata del rilievo risulta superiore a 30 minuti la funzione Operation Resumption permette di ricominciare le operazioni dalla posizione in cui il drone si trovava prima dell'interruzione.

Di seguito vengono riportati alcuni dati tecnici del drone:

Aeromobile	
Peso al decollo (con batteria)	1391 g
Massima velocità ascensionale	6 m/s (volo automatico)
Velocità massima di discesa	3 m/s
Velocità massima	58 km/h
Autonomia di volo	Circa 30 minuti
Intervallo di temperatura operativa	da 0 °C a 40 °C
Accuratezza del volo stazionario	RTK attivato e correttamente funzionante:

(In post processing - PPK – si ottengono accuratteeze che possono essere di un ordine di grandezza migliori)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verticale: $\pm 0,1$ m; ▪ orizzontale: $\pm 0,1$ m RTK disattivato <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verticale: $\pm 0,5$ m ▪ Orizzontale: $\pm 1,5$ m
--	--

GNSS	
Frequenza singola, modulo GNSS ad alta sensibilità	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GPS + BeiDou + Galileo; ▪ GPS + GLONASS + Galileo
GNSS RTK	Frequenza utilizzata: <ul style="list-style-type: none"> ▪ GPS: L1/L2; ▪ GLONASS: L1/L2; ▪ BeiDou: B1/B2; ▪ Galileo: E1/E5a Tempo di posizionamento iniziale: < 50 s Accuratezza di posizionamento: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verticale 1,5 cm + 1 ppm (RMS); ▪ Orizzontale 1 cm + 1 ppm (RMS) 1 ppm indica un aumento di errore di 1 mm per ogni chilometro di spostamento dell'aeromobile.

Fotocamera	
Sensore	1" CMOS; 13.2·8.8 mm; Pixel effettivi: 20 M
Ottica	Campo visivo (FOV) 84°; 8,8mm/24mm (formato 35mm equivalente) f/2.8 - f/11 messa a fuoco automatica 1 m - ∞
Velocità dell'otturatore meccanico	8 - 1/2000 s
Dimensione massima dell'immagine	4864×3648 (4:3) 5472×3648 (3:2)
Formato foto	JPEG

Batteria di volo (PH4-5870mAh-15,2V)	
Capacità	5870 mAh
Tensione	15,2 V
Tipo di batteria	LiPo 4S
Peso netto	468 g

Sospensione cardanica (gimbal)	
Stabilizzazione	3 assi (inclinazione, rollio, imbardata)
Beccheggio	tra -90° e +30°
Massima velocità angolare controllabile	90°/s
Intervallo di vibrazione angolare	±0,02°

Tabella 2.2 Caratteristiche del Phantom 4 RTK

2.3 Dal progetto al rilievo con piccoli droni

2.3.1 Parametri di volo

Prima di andare ad eseguire il rilievo del terreno o di un fabbricato è necessario andare a studiare i parametri di volo che garantiscono un corretto funzionamento delle operazioni fotogrammetriche.

Nel caso di rilievo del terreno il drone che andrà a sorvolare la zona interessata seguirà dei percorsi rettilinei affiancati che seguono l'andamento in figura.

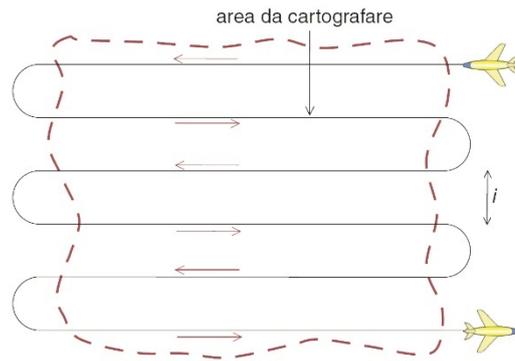


Figura 2.10 Schema di volo

I fotogrammi che fanno parte dello stesso percorso rettilineo prendono il nome di strisciata, più strisciate costituiscono il blocco di strisciate.

Affinché si possa avere un corretto modello stereoscopico il ricoprimento minimo teorico longitudinale μ deve essere almeno del 50%. Questo valore teorico è incrementato al 60% per terreni pianeggianti e all'80% per terreni montuosi, questo permette anche un concatenamento tra i diversi fotogrammi. Oltre al ricoprimento longitudinale si deve tener conto anche di un ricoprimento trasversale ε fra due strisciate adiacenti che, in terreni pianeggianti, deve essere compreso tra il 10% e il 20%. Nel caso della fotogrammetria densa, cioè se si desidera ottenere nuvole dense di punti ed in seguito i prodotti descritti in precedenza, si suole aumentare il ricoprimento longitudinale all'80%, quello trasversale al 60%.

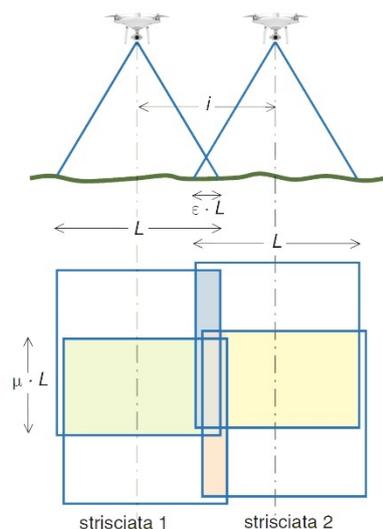


Figura 2.11 Ricoprimento trasversale e laterale

Il calcolo dei parametri di orientamento esterno, e normalmente anche di orientamento interno, per tutto il blocco di strisciate prende il nome di triangolazione aerea (TA). I ricoprimenti elevati migliorano anche le precisioni ottenute in TA, come pure altri miglioramenti sono dovuti all'aggiunta di strisciate trasversali in testa e in coda al blocco e/o all'aggiunta di prese inclinate.

Vediamo ora la relazione che c'è tra quota del volo, scala media dei fotogrammi e la scala della carta che vogliamo realizzare.

La scala media dei fotogrammi $1/N$ può essere definita come il rapporto tra la dimensione del fotogramma l (il sensore) e la dimensione della porzione di territorio effettivamente ripresa L (abbracciamento):

$$\frac{1}{N} = \frac{l}{L}$$

Se si ipotizza il terreno pianeggiante e la presa nadirale possiamo esprimere l/L come il rapporto tra la distanza principale p e l'altezza media del volo H . Quindi otteniamo che:

$$\frac{1}{N} = \frac{p}{H}$$

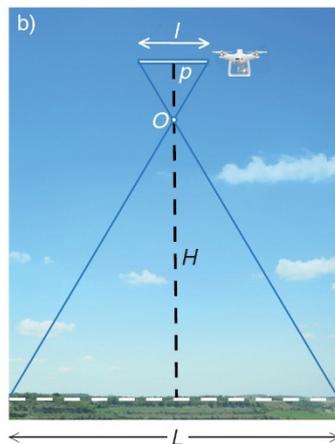


Figura 2.12 Scala media del fotogramma

Poiché il valore della distanza principale è sempre lo stesso possiamo dire che per andare a variare la scala dei fotogrammi bisogna andare a variare l'altezza di volo.

Per definire questi parametri bisogna prima identificare quale deve essere la scala della carta che vogliamo realizzare. All'aumentare del valore della scala della carta

$1/N_{carta}$, aumenteranno i dettagli che bisogna rappresentare e di conseguenza diminuisce la quota di volo. La relazione che lega scala della carta con scala del fotogramma è la seguente:

$$N = k \cdot \sqrt{N_{carta}}$$

Dove il coefficiente k assume i seguenti valori:

$k = 35$ per scale della carta $1/N_{dis}$ superiori a 1: 2000

Si possono prendere come riferimento anche i seguenti valori tabellati:

Focale 8,8 mm	Scala della carta $1/N_{carta}$	Scala fotogramma $1/N$	Altezza massima del volo (m)
$70\sqrt{N}$	1:500	1:1500	132
	1:200	1:1000	88
	1:100	1:700	62
	1:50	1:500	44

Tabella 2.3 Rapporto scala dei fotogrammi, scala della carta

Partendo dalla scala della carta è possibile ricavare la scala media del fotogramma e quindi la quota media del volo come:

$$H = p \cdot N$$

In alternativa la quota del drone può essere impostata in funzione della precisione che si vuole ottenere. Questa dipende dal GSD relativo alla specifica fotocamera che stiamo utilizzando e alla quota del volo.

$$H = \frac{GSD \cdot p}{1000 \cdot D}$$

Il suo valore è legato alla dimensione del sensore l , all'altezza di volo H e alla distanza principale p . L'abbracciamento sarà pari a:

$$L = \frac{l \cdot H}{p}$$

La larghezza di sovrapposizione tra un fotogramma e il successivo, ovvero la larghezza del modello stereoscopico, sarà pari a $\mu \cdot L$.

La distanza che il velivolo percorre tra uno scatto e il successivo, ovvero la distanza tra i centri di presa, prende il nome di base di presa. Questo valore si lega alla percentuale di ricoprimento longitudinale che vogliamo ottenere per il nostro modello. Dalla figura sotto riportata possiamo vedere che

$$B = L - \mu \cdot L = L \cdot (1 - \mu)$$

Sostituendo a L il valore ricavato in precedenza possiamo dire che:

$$B = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \mu)$$

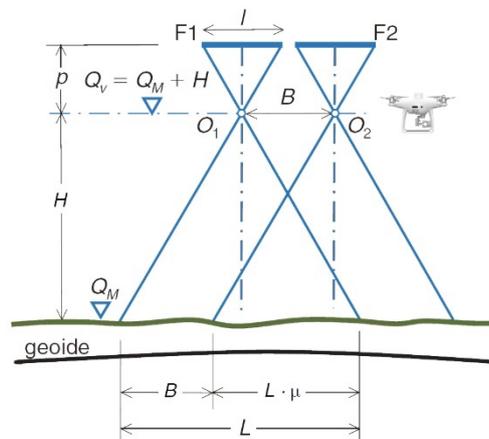


Figura 2.13 Base di presa

Una volta valutata la base di presa bisogna individuare l'intervallo di tempo Δt con cui si andranno a scattare i fotogrammi. Ipotizzando la velocità del velivolo costante e sapendo quindi che $B = v \cdot \Delta t$, possiamo stimare l'intervallo di apertura dell'otturatore come

$$\Delta t = \frac{l \cdot H}{v \cdot p} \cdot (1 - \mu)$$

L'interasse i tra le strisciate adiacenti è scelto in funzione del ricoprimento trasversale ε programmato e dell'abbracciamento L

$$i = \frac{L}{2} + \frac{L}{2} - \varepsilon \cdot L = L \cdot (1 - \varepsilon)$$

Come prima sostituiamo ad L il valore ricavato in precedenza

$$i = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \varepsilon)$$

Per poter valutare i costi del rilievo è necessario infine andare a stimare il numero n_f dei fotogrammi che compongono una singola strisciata e il numero n_s delle strisciate. Il prodotto di questi due valori ci fornisce il numero complessivo di fotogrammi n_{tot} che permettono un corretto ricoprimento stereografico del territorio. Per andare a valutare queste quantità è necessario andare a definire l'area che si vuole andare a rilevare. Semplificando è sempre possibile racchiudere il perimetro in un rettangolo ideale di lati d_1 e d_2 .

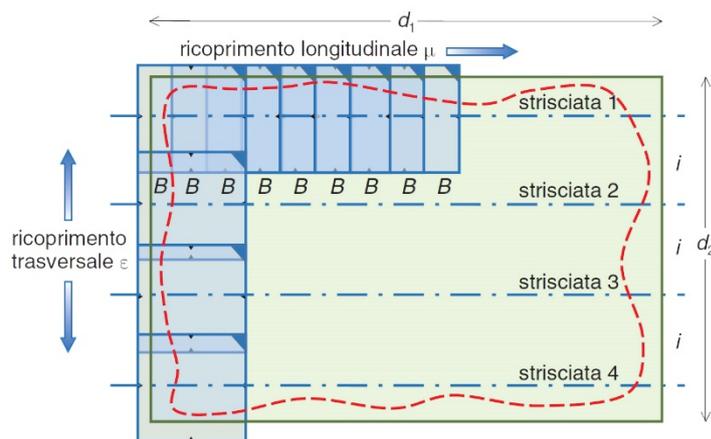


Figura 2.14 Area della zona rilevata

La direzione verso la quale si muoverà il drone sarà quella maggiore tra d_1 e d_2 . Il numero di strisciate sarà pari a:

$$n_s = \text{int} \left[\frac{d_2}{L \cdot (1 - \epsilon)} \right] + 1$$

Il numero di fotogrammi per strisciata sarà pari a:

$$n_f = \text{int} \left[\frac{d_1}{L \cdot (1 - \mu)} + 1 \right] + 1$$

Come già detto il numero totale di fotogrammi risulterà pari a:

$$n_{tot} = n_s \cdot n_f$$

È possibile anche stimare la distanza percorsa dal drone come:

$$d = (d_1 \cdot n_s) + d_2 + DWP_i + DWP_f$$

Dove DWP_i e DWP_f sono rispettivamente le distanze tra il punto di decollo e il punto e il primo waypoint e la distanza tra l'ultimo waypoint e il punto di atterraggio.

I waypoint sono dei punti di riferimento per il drone che permettono di seguire la giusta traiettoria in modo tale da non deviare dalla rotta prestabilita.

Il tempo di volo necessario affinché il drone termini le operazioni di rilievo è pari a:

$$t = \frac{2h + (d_1 \cdot n_s) + d_2 + DWP_i + DWP_f}{v}$$

2.3.2 Possibili problemi nelle fasi di volo

Il tempo di volo stimato nei parametri di volo può subire delle variazioni a causa delle azioni del vento che possono modificare la velocità del drone. Questo problema deve essere preso in considerazione qualora il volo abbia una durata paragonabile alla durata delle batterie.

La variazione della velocità di crociera a causa del vento influisce anche sull'intervallo dei tempi di scatto Δt . Infatti, al variare della velocità del drone avremo una diminuzione o un aumento della base di presa fra due fotogrammi con una conseguente variazione del ricoprimento longitudinale. Il problema si pone qualora la velocità di crociera aumenti poiché questo comporta un minore sovrapposizione dei fotogrammi.

Le perturbazioni alle quali è soggetto, durante il volo, il drone possono provocare una variazione del suo assetto. Il drone segue la rotta indicata ma con una rotazione dell'asse k . Questo effetto è chiamato deriva e provoca la formazione di fotogrammi ruotati rispetto alla direzione del moto del drone. Il problema è risolto dal gimbal (giunto cardanico) montato sul drone che permette di avere angoli di rotazione ω , φ e κ pari a 0. Tuttavia, questa correzione non è perfetta in quanto il sensore inerziale IMU non è montato sulla fotocamera ma nella scatola avionica del drone.

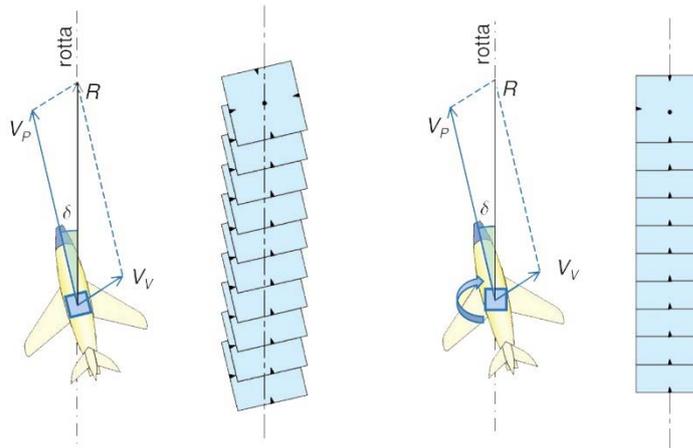


Figura 2.15 Effetto deriva

Un altro problema riguarda i dati GNSS registrati dall'antenna montata sul drone. Quest'ultima è posizionata sempre nella scatola avionica e quindi i valori registrati non sono riferiti direttamente al centro di presa del fotogramma. Le distanze tra antenna, IMU e fotocamera sono comunque note con massima precisione ed è possibile passare dal sistema di riferimento dell'antenna a quello della fotocamera. Il file Timestamp.MRK di output del drone riporta per ogni fotogramma ripreso la distanza nelle direzioni E , N e Q tra antenna e fotocamera in maniera tale da riferire la posizione GNSS direttamente al centro di presa.

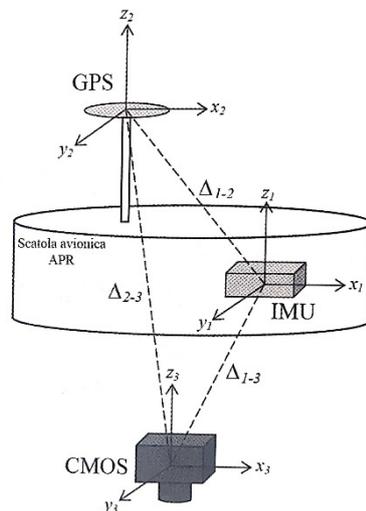


Figura 2.16 Posizione dell'antenna GPS, dell'IMU e della fotocamera

Un altro possibile problema può essere l'effetto di trascinamento T_r , dovuto al fatto che il drone scatta le fotografie mentre è in movimento, questo disturbo diventa più significativo se il sensore CMOS incorporato nella fotocamera è di piccole dimensioni. Questo effetto è direttamente proporzionale all'intervallo di scatto Δt ,

alla velocità di crociera v e alla distanza focale p ed è inversamente proporzionale alla quota di volo H .

$$T_r = \frac{\Delta t \cdot v \cdot p}{H}$$

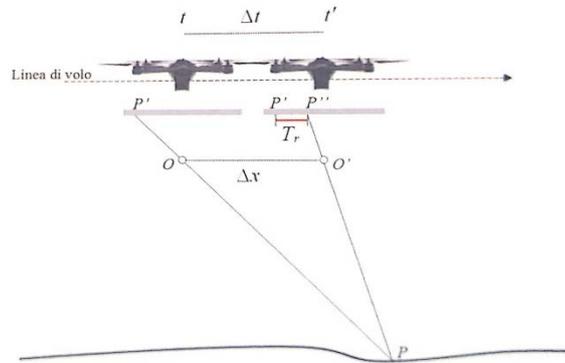


Figura 2.17 Effetto trascinamento

Nell'intervallo di tempo in cui l'otturatore si apre il centro di presa O , che è in movimento, si sposta di un tratto Δx . Questo fa sì che il punto a terra P non è immagazzinato in un solo pixel del sensore CMOS ma è distribuito in più pixel. Questo problema può essere significativo nei rilievi con drone in quanto dotati di sensori di piccole dimensioni ed eseguiti a bassa quota.

2.3.3 parametri di volo del caso studio

I parametri e la programmazione del volo automatico del drone sono stati studiati mediante l'applicazione DJI Pilot, fornita dalla stessa casa madre del Phantom 4 RTK, che garantisce una perfetta compatibilità con il drone utilizzato.

L'applicazione permette di progettare il percorso del drone andando a tracciare sulla mappa l'area che deve essere rilevata. Questa è la prima operazione da andare ad effettuare.

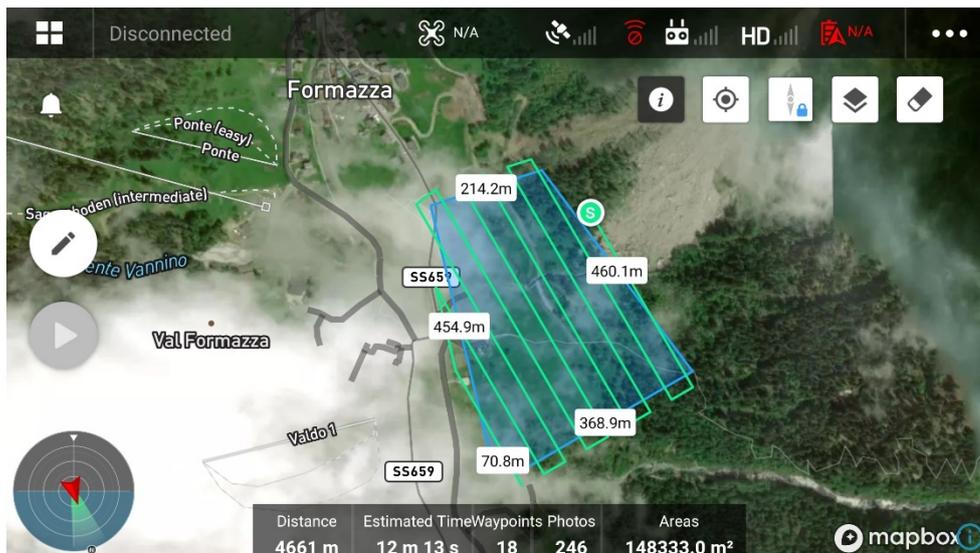


Figura 2.18 Perimetro del rilievo fotogrammetrico

I parametri preliminari da inserire sono:

Nome del drone	Phantom 4 RTK
Modalità di scatto dei fotogrammi	a intervalli di tempo
Quota relativa di volo massima	100 m
Velocità di decollo	10 m/s
Velocità di crociera	7 m/s
Ricoprimento longitudinale	80%
Ricoprimento trasversale	70%
Angolo di rotta ¹	330°
Margine del poligono ²	25 m

Tabella 2.4 Dati di input DJI Pilot

I dati di output forniti dall'applicazione sono:

Distanza percorsa dal drone	4661 m
Tempo di volo stimato	12 m 13 s
Waypoints	18
Numero di foto	246
Area del poligono	148333 m ²

Tabella 2.5 Dati di output DJI Pilot

¹ Calcolato dal software in funzione del poligono disegnato

² Quantità di territorio che deve essere ripresa al di fuori a quella tracciata

La quota di volo è stata scelta in funzione della precisione che volevamo ottenere. Il GSD è stato calcolato nel paragrafo 2.1.2 ed è pari a 2,74 *cm* che corrisponde a una precisione di circa 11 *cm*.

I parametri di volo non forniti dall'applicazione possono essere facilmente ricavati

▪ Abbracciamento:

$$L = \frac{l_1 \cdot H}{p} = \frac{0,0132 \cdot 100}{0,0088} = 150 \text{ m}$$

▪ Base di presa:

$$B = \frac{l_1 \cdot H}{p} \cdot (1 - \mu) = \frac{0,0132 \cdot 100}{0,0088} \cdot (1 - 0,8) = 30 \text{ m}$$

▪ Intervallo di scatto:

$$\Delta t = \frac{l_1 \cdot H}{v \cdot p} \cdot (1 - \mu) = \frac{0,0132 \cdot 100}{7 \cdot 0,0088} \cdot (1 - 0,8) = 4,3 \text{ s}$$

▪ Interasse fra le strisciate:

$$i = \frac{l_2 \cdot H}{p} \cdot (1 - \varepsilon) = \frac{0,0088 \cdot 100}{0,0088} \cdot (1 - 0,7) = 30 \text{ m}$$

3 Il caso di studio

3.1 Caratteristiche del luogo e della frana

La frana oggetto del nostro caso studio è avvenuta nella frazione di Ponte Val Formazza appartenente al comune di Formazza in provincia di Verbano-Cusio-Ossola.



Figura 3.1 Luogo della frana

La colata torrentizia è stata causata dalle piogge, brevi ed intense, della giornata dell'11/06/2019 avvenute fra l'01:00 e le 02:00 di notte. Il canale del Rio Enni era stato precedentemente interessato, nel 2009, da una frana di crollo con la conseguente formazione di un accumulo di detriti. A causa della saturazione idrica questi detriti hanno perso coesione e sono scivolati verso valle inglobando altro materiale e formando una colata detritica che ha oltrepassato il vallo paramassi, costruito dopo la frana del 2009.



Figura 3.2 Vista frontale della colata detritica

La colata detritica si è distribuita a destra e a sinistra del vallo paramassi distruggendo un pontile in legno e raggiungendo alcune abitazioni.

Un'analisi geomorfologica della frana è stata condotta dall'Arpa Piemonte nella zona del fondovalle due giorni dopo l'evento. Per la porzione di fondovalle interessata dai detriti è stata eseguita una valutazione sulla composizione del materiale fine e del materiale grossolano, è stata inoltre condotto uno studio sulla porzione di frana al di sopra del vallo. La classificazione utilizzata in Piemonte si basa sul Clay Weathering Index (CWI) che distingue:

- Excellent Clay Maker: rocce metamorfiche fittamente foliate e ricche in minerali fillosilicatici;
- Good Clay Maker: rocce carbonatiche massicce;
- Bad Clay Maker: rocce ignee o metamorfiche massicce.

La distinzione tra le diverse classi è in funzione della capacità di produrre, qualora ci siano alterazioni meccaniche o chimiche, porzioni di materiali argillosi nella frazione fine del detrito. La quantità di materiale argilloso determina la quantità di acqua

necessaria affinché si inneschi la frana per colata. Il canale del rio Enni appartiene alle Good Clay Maker (GCM).

La zona di distacco della frana si trova alla base della parete di faglia subverticale diretta NE-SO, immergente verso Nord Ovest, dove in passato si erano depositati i detriti della frana di crollo del 2009 su un tratto di asta ad elevata pendenza.



Figura 3.3 Zona di innesco della colata

Facendo un confronto con immagini scattate nel 2014 è stato possibile determinare il volume di materiale della vecchia frana che ha ceduto e si è individuato un nuovo crollo dovuto probabilmente all'urto con i grandi massi in movimento.

La zona di distacco interessata dalla colata presenta, a differenza della foto scattata nel 2014, la messa a nudo del substrato roccioso e un ampliamento della sezione di deflusso.



Figura 3.4 Foto confronto del 2014

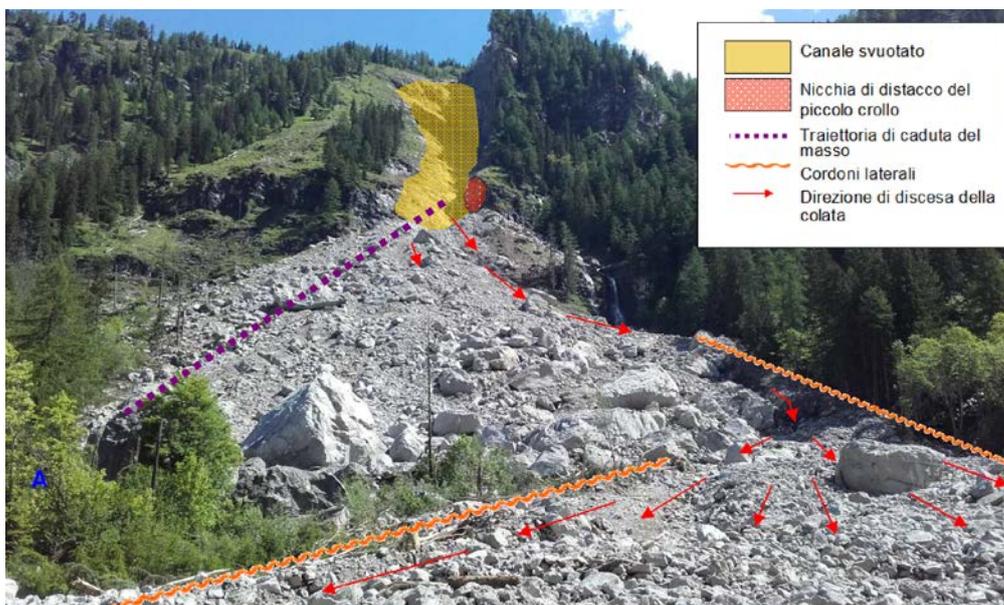


Figura 3.5 Individuazione area interessata

I massi e la matrice sabbio limosa depositatisi al di sopra del vallo paramassi sono tipici del fenomeno di colata detritica torrentizia per la quale si ha una miscela solida in sospensione.



Figura 3.6 Lobo della colata che ha raggiunto la sommità del vallo

Nella zona sud-est della valle, a destra del vallo, la frazione di materiale a granulometria più grossa (ciottoli e massi) si è arrestata in corrispondenza di un'area con debole pendenza mentre la parte più fluida ha proseguito il suo percorso raggiungendo la strada e le abitazioni di fondovalle. I massi e i ciottoli si sono disposti in cordoli simmetrici e appiattiti con l'asse maggiore posizionato perpendicolarmente alla direzione del moto, questo stile di deposizione indica un arresto istantaneo del materiale grossolano e un dilavamento della sezione fine.



Figura 3.7 Cordolo simmetrico e appiattito tipico delle colate detritiche di tipo GCM

Nella zona nord-est della valle, a sinistra del vallo, la colata detritica si è depositata formando un rialzamento della superficie del terreno di circa 3,3 metri. La fase

terminale dell'evento, caratterizzata da una porzione più fluida, ha dilavato il materiale più grossolano lasciando nell'alveo ciottoli decimetrici.



Figura 3.8 Lobo laterale arrestatosi alla sinistra idrografica del rio Rich

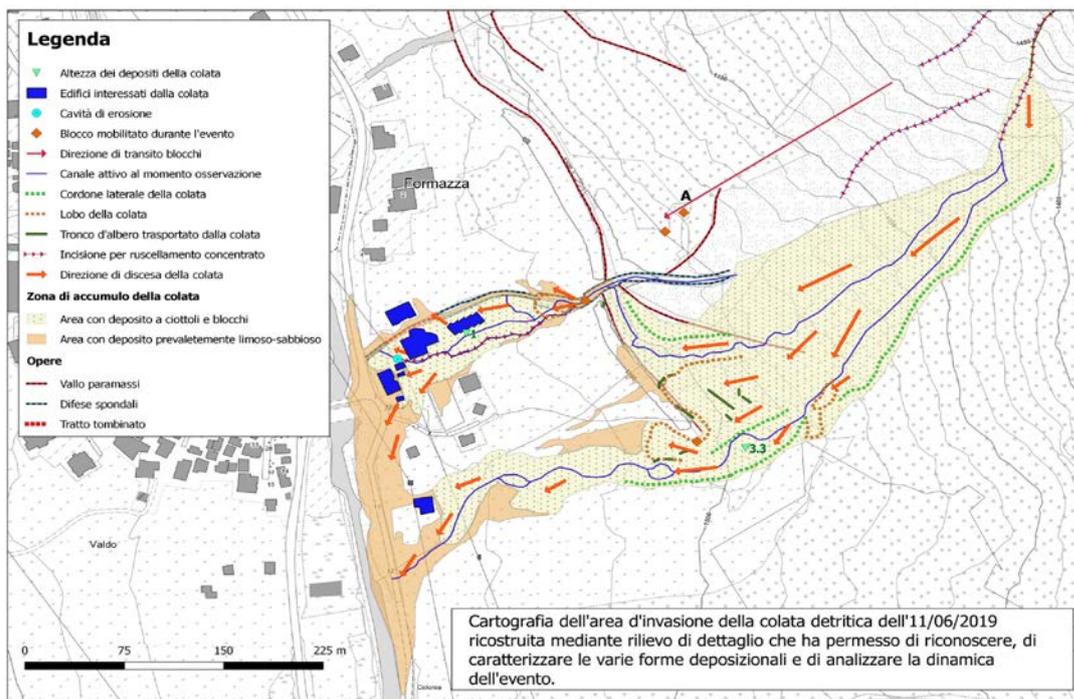


Figura 3.9 Cartografia dell'area d'invasione della colata detritica

3.2 Caratteristiche degli strumenti usati

Per poter eseguire un corretto rilievo fotogrammetrico è necessario calcolare le coordinate dei punti di appoggio se si esegue in modo tradizionale e le coordinate dei punti di presa se si vuole utilizzare la fotogrammetria diretta. Oggi giorno in entrambi i casi queste coordinate sono determinate con rilievi GNSS, in genere di tipo cinematico ricavate in modalità RTK (Real Time Kinematic) o PPK (Post Processing Kinematic). In entrambi i casi il trattamento alle differenze doppie precede l'uso di un ricevitore "master" di coordinate note e l'uso di un ricevitore rover posizionato sui punti di misura a terra e/o sul velivolo. I due ricevitori usati per l'appoggio a terra sono il Leica GS14 e il Trimble SP80. Il primo è stato in seguito utilizzato come ricevitore master per il ricevitore rover sul drone.

3.2.1 Leica Viva GS14 – Smart antenna GNSS

Il ricevitore Leica GS14 è uno strumento leggero e compatto, utilizzabile sia come master che come rover per il posizionamento RTK, dotata di un modem UHF per la ricezione e l'invio di dati.

Il ricevitore e l'antenna formano un corpo solo che può essere usato sia come master per il posizionamento PPK sia del drone che dei GCP. L'antenna è stata mantenuta in una posizione fissa per una durata di 1 ora e 50 minuti in corrispondenza di un marker che era stato posizionato in un precedente rilievo della frana.



Figura 3.10 Leica Viva GS14

Di seguito riportiamo alcune caratteristiche tecniche del ricevitore GNSS:

Tecnologia GNSS	Tracciamento avanzato di quattro costellazioni
Tracciamento del segnale	<ul style="list-style-type: none"> • GPS: L1, L2, L2C • GLONASS: L1, L2 • Galileo • BeiDou • SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS, QZSS
Precisione (rms) in Real-Time (RTK) - Singola Base (<30 km)	<p>Orizzontale: 8 mm + 1 ppm (rms)</p> <p>Verticale: 15 mm + 1 ppm (rms)</p>
Precisione (rms) in Real-Time (RTK) - Rete RTK	<p>Orizzontale: 8 mm + 0.5 ppm (rms)</p> <p>Verticale: 15 mm + 0.5 ppm (rms)</p>
Precisione (rms) in Post Elaborazione - Statico (fase), lunghe osservazioni	<p>Orizzontale: 3 mm + 0.1 ppm (rms)</p> <p>Verticale: 3.5 mm + 0.4 ppm (rms)</p>
Precisione (rms) in Post Elaborazione - Statico e Statico rapido (fase)	<p>Orizzontale: 3 mm + 0.5 ppm (rms)</p> <p>Verticale: 5 mm + 0.5 ppm (rms)</p>
Precisione (rms) in Post Elaborazione - Cinematico (fase)	<p>Orizzontale: 8 mm + 1 ppm (rms)</p> <p>Verticale: 15 mm + 1 ppm (rms)</p>
Peso (GS14)	0.93 kg
Dimensioni (GS14) (diametro x alt.)	190 mm x 90 mm
Durata delle batterie	<ul style="list-style-type: none"> • 10.00 h di osservazioni in statico • 7.00 h in ricezione RTK con radio interna UHF

Tabella 3.1 Caratteristiche Leica Viva GS14

3.2.2 Trimble Spectra Precision SP80

Congiuntamente al ricevitore Leica GS14 è stato utilizzato anche il ricevitore Spectra Precision SP80. Tale ricevitore GNSS è in grado di individuare tutte e sei le costellazioni GNSS. Anche in questo caso antenna, ricevitore, batteria e sistema di trasmissione radio fanno parte di uno stesso corpo che può essere comodamente allocato su una palina in fibra di carbonio.

Il ricevitore è stato utilizzato come rover per il posizionamento Real Time Kinematic dei marker a terra sostando su ciascun punto per almeno 15 secondi.



Figura 3.11 Trimble Spectra Precision SP80

Di seguito sono riportate alcune caratteristiche dell'antenna:

Segnali tracciati	<ul style="list-style-type: none">• GPS L1C/A, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L5• GLONASS L1C/A, L2C/A• BeiDou B1 (phase 2), B2• Galileo E1, E5a, E5b• QZSS L1C/A, L2C, L1SAIF, L5• SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN) L1C/A
Precisione Real-Time (RMS) - SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN)	Orizzontale: < 50 cm Verticale: < 85 cm

Precisione Real-Time (RMS) - Posizione Real-Time DGPS	Orizzontale: 8 mm + 0.5 ppm (rms) Verticale: 15 mm + 0.5 ppm (rms)
Precisione Real-Time (RMS) - Posizione Real-Time Kinematic (RTK)	Orizzontale: 8 mm + 1 ppm Verticale: 15 mm + 1 ppm
Precisione di Post-Processing - Statico & Static Rapido	Orizzontale: 3 mm + 0.5 ppm Verticale: 5 mm + 0.5 ppm
Precisione di Post-Processing - Statico di precisione	Orizzontale: 3 mm + 0.1 ppm Verticale: 3.5 mm + 0.4 ppm
Peso	1.17 kg
Dimensioni	22.2 x 19.4 x 7.5 cm
Durata delle batterie	10 ore (GNSS On, e GSM o UHF Rx On)

Tabella 3.2 Caratteristiche Trimble Spectra Precision SP80

3.3 Il calcolo cinematico PPK della posizione GNSS dell'antenna del drone

3.3.1 Planning satellitare

Una volta individuato il luogo in cui verrà effettuato il rilievo bisogna valutare la qualità del segnale GNSS che si avrà durante le operazioni. Il software online Trimble planning permette di andare ad individuare la posizione e l'elevazione dei satelliti visibili in un certo arco di tempo e in una data località e di calcolare gli indici DOP (Dilution Of Precision) che forniscono una indicazione sulla precisione del posizionamento. In questo modo si sceglie l'arco di tempo migliore durante il quale andare ad effettuare il rilievo satellitare.

I dati di input da andare ad inserire nel software sono la posizione delle zone di misura, il giorno e le ore nelle quali avverrà. Si inseriscono anche gli ostacoli presenti nella zona del rilievo che possono ostacolare la visibilità dei satelliti sia per la stazione master a terra che per il drone.

Latitudine	N 46° 22' 26.9617"
Longitudine	E 8° 25' 47.2604"
Altezza ellissoidica	1350 m
Cutoff	30°
Giorno	04/07/2019
Ora di inizio	8:00
Periodo (ore)	6
Fuso orario	UTC+01:00 Roma

Tabella 3.3 Dati input Trimble planning

Il cutoff, ovvero l'angolo limite di elevazione (rispetto all'orizzonte) al di sotto del quale i satelliti non vengono tracciati, è stato impostato a 30° per evitare di considerare satelliti che potrebbero essere oscurati da edifici, alberi o lo stesso terreno montuoso e per evitare che il segnale GNSS attraversi strati troppo spessi di atmosfera, riducendo così gli errori sistematici dovuti alla ionosfera e alla troposfera.

Il software permette di scegliere le costellazioni da andare a considerare. Nel nostro caso abbiamo scelto GPS, GLONASS e Galileo in quanto sono le costellazioni tracciate sia dal ricevitore master che dal ricevitore posto sul drone.

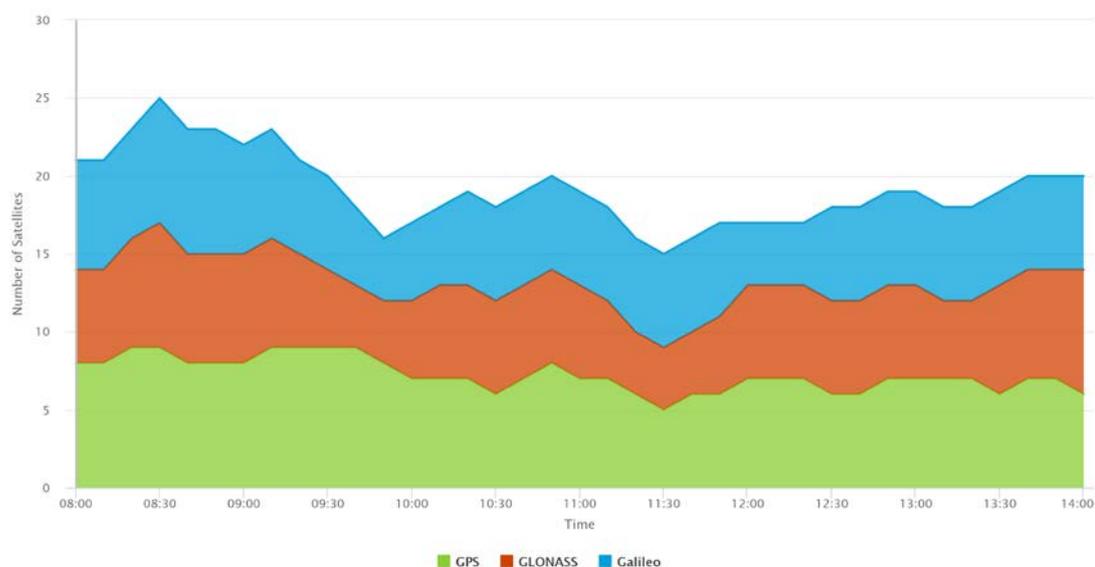


Tabella 3.4 Numero di satelliti visibili

Per tutte e 6 le ore considerate il numero di satelliti visibili è superiore a 4 ovvero al numero minimo per poter effettuare il rilievo, ma ciò non è sufficiente a valutare la precisione, per tale scopo occorre valutare l'andamento dei DOPs (Dilution Of precision). Un valore elevato di DOP fornisce una scarsa precisione. Il valore a cui spesso ci si riferisce è quello di GDOP (Geometric Dilution Of Precision) che tiene conto di errori di altimetria, planimetria e dell'errore di orologio dei ricevitori:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}$$

Per ottenere una buona precisione nel posizionamento questo valore deve essere inferiore a 3.

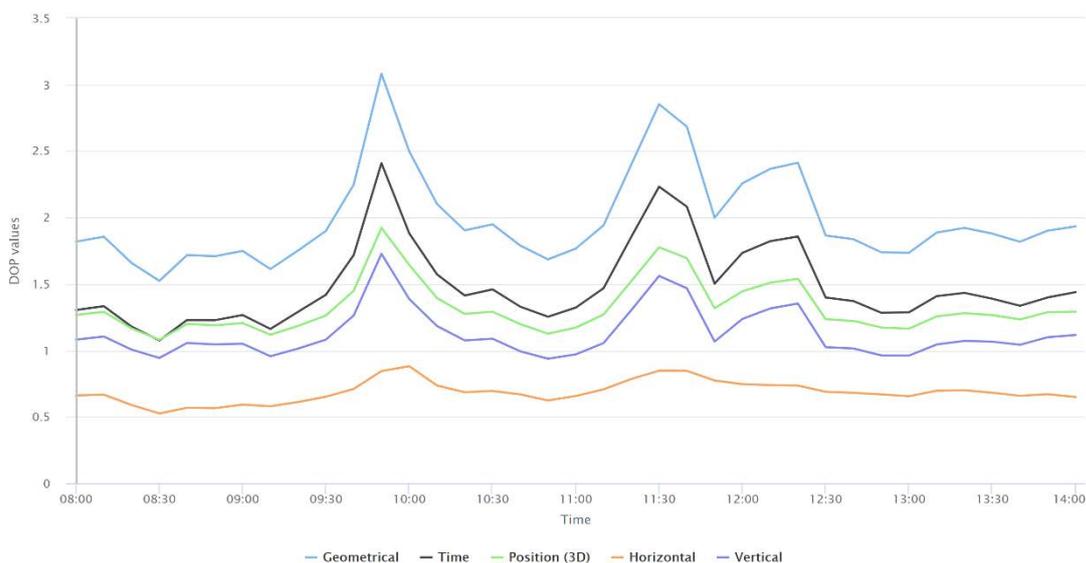


Figura 3.12 Andamento dei valori DOP nel periodo previsto per il volo RTK

Tenendo conto di tutti questi aspetti si è deciso di eseguire il volo del drone giorno 04/07/2019 dalle 10:30 alle 10:50. In questo intervallo di tempo sono visibili almeno 18 satelliti e il valore più alto di GDOP è pari 1,95. Il ricevitore Leica Viva GS14, usato come master, invece è stato in acquisizione tra le 10:00 e le 12:00 dello stesso giorno, per poterne calcolare le coordinate con l'uso della stazione permanente di Domodossola che si trova a circa 25 km di distanza.

3.2.1 Il posizionamento differenziale GNSS

Il posizionamento di precisione GNSS è quasi sempre ottenuto in modo differenziale perché in tal modo è semplice eliminare errori sistematici comuni ad una coppia di ricevitori. Il ricevitore di coordinate note si chiama “master” e quello di coordinate incognite “rover”, anche se il secondo fosse stabile e non in movimento. In tal modo anche il rover assumerà alla fine del trattamento dei dati una posizione nota.

Più è alta la distanza tra master e rover, più è necessario stazionare su entrambi i punti. Ad esempio, per “vettori base” di 20 km è bene acquisire dati almeno per 20 minuti ad una frequenza di una misura al secondo (detta *sempling rate*). Nel nostro caso, per poter trattare i dati GNSS del ricevitore rover posto sul drone, avevamo bisogno di avere un ricevitore master sufficientemente vicino di coordinate note. Entrambi i ricevitori master (Leica GS14) e rover (ublox9) acquisivano a una “rate” di 1 secondo.

Per conoscere le coordinate del ricevitore master era però necessario eseguire un trattamento differenziale considerando come stazione master una stazione permanente della rete SPIN3, le cui coordinate sono note con accuratezza millimetrica sul sistema di riferimento europeo ETRF 2000. In tal caso il ricevitore rover, anche se non in movimento è il Leica GS14. Determinate le sue coordinate quest’ultimo assumerà le funzioni di ricevitore master per il posizionamento del drone.

Nel caso del calcolo della posizione del ricevitore GS14 il posizionamento è di tipo statico in *post processing*, in quanto il ricevitore non cambia posizione. Nel caso del calcolo della posizione del drone il posizionamento è cinematico in *post processing* (*Post Processing Kinematic PPK*).

Entrambi i calcoli sono stati eseguiti con la libreria open source RTKLIB e in particolare con il programma RTKPOST.

La prima operazione riguarda il posizionamento del ricevitore GS14. In questo caso nella schermata iniziale di RTKPOST sono stati inseriti i seguenti dati

RINEX OBS: Rover	stat1850.19o
RINEX OBS: Base Station	doms1850.19d
RINEX NAV/CLK	brdm1850.19p

Tabella 3.5 File input RTKPOST

- Il primo file è il file rinex relativo al ricevitore GS14.
- Il secondo file è sempre un file RINEX relativo alla stazione permanente più vicina, ovvero quella di Domodossola, scaricato dal sito www.spingnss.it.
- Il terzo file è quello relativo alle effemeridi trasmesse ovvero la posizione dei satelliti fornite in tempo reale.

Il programma permette di visualizzare il numero di satelliti che sono stati effettivamente agganciati durante il rilievo (in verde in figura) e il valore reale di GSOP (in giallo in figura).

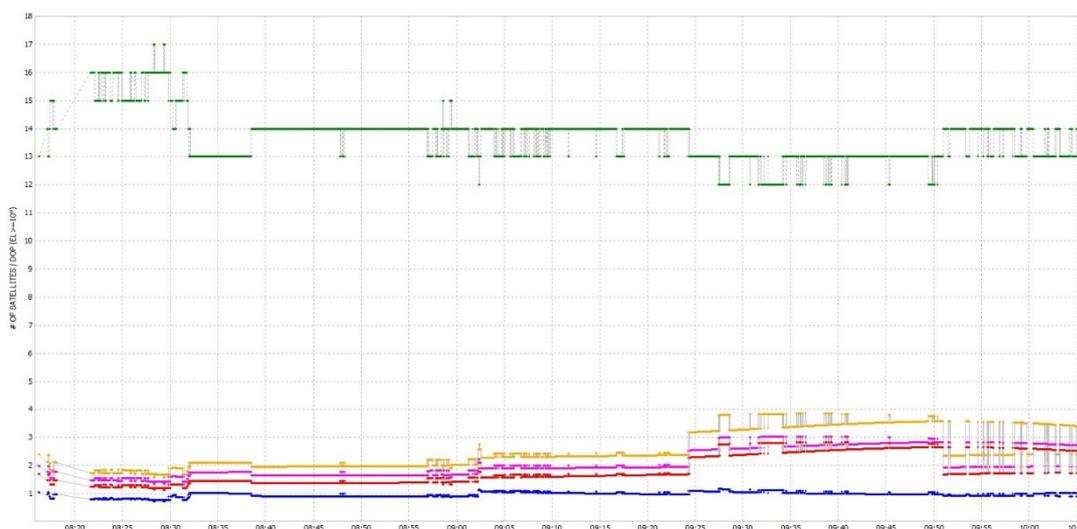


Figura 3.13 DOPs reale ricevitore GS14

Tutti i satelliti sono visibili anche dalla stazione permanente di Domodossola, ad eccezione dei quelli della costellazione Galileo. Il numero di satelliti osservati è sufficiente in quanto superiore a 4.

Le opzioni presenti nel programma permettono di impostare alcune peculiarità del rilievo effettuato:

Positioning Mode	Static: Posizionamento statico
Frequencies	L1+ L2: doppia frequenza
Filter type	Combined: soluzione combinata di filtraggio e lisciamento
Elevation Mask	15°: cut off
Rec Dynamics	OFF: modello dinamico del ricevitore non considerato
Ionosphere Correction	Broadcast: letta dal file caricato
Troposphere Correction	Saastamoinen model: modello "idrostatico"
Satellite Ephemeris	Broadcast: letti dal file caricato
RAIM FDE	√: monitoraggio dell'integrità autonoma del ricevitore/ rilevazione errori grossolani
Navigation System	GPS GLONAS

Tabella 3.6 Setting 1

Integer ambiguity resolution	Fix and Hold: L'ambiguità è fissata a un numero intero e mantiene tali valori
Minimum ratio to fix ambiguity	5: Imposta la soglia di convalida dell'ambiguità intera per "ratio-test", che utilizza il rapporto tra i residui al quadrato del miglior vettore intero e il secondo miglior vettore di amplificazione di fase
Min Fix / Elevation to Hold Ambiguity	20/0: numero minimo di correzioni e l'angolo di elevazione minimo (gradi) per mantenere l'ambiguità
Outage to Reset Ambiguity / Slip Thres	20/0.05: Imposta il conteggio delle interruzioni per ripristinare il calcolo delle ambiguità
Max Age of Differential	30: Imposta il valore massimo dell'età dello sfasamento tra il rover e la stazione base.
Number of iteration	1: Imposta il numero di iterazioni nell'aggiornamento della misurazione del filtro di stima

Tabella 3.7 Setting 2 RTKPOST

Solution format	Latitudine/Longitudine/Altezza
Time format	ww sss GPST: Giorno GPS e tempo della settimana
Latitudine/Longitudine format	dddd.dddddd: gradi
Datum/Height	GG84/ellissoidica

Tabella 3.8 Output RTKPOST

Rover	
Antenna type	LEIGS14
Delta-E/N/U	0/0/ 1.4590
Base station	
Antenna type	LEIAR25.R3
Delta-E/N/U	0/0/0.0083

Tabella 3.9 Position RTKLIB

Una volta lanciato il programma il risultato che otteniamo è:

Latitudine	46.374156234°
Longitudine	8.429794821°
Altezza ellissoidica	1342.6667 m
Qualità	1
Numero di satelliti considerati	9
σ_{nord}	0.0005 m
σ_{est}	0.0002 m
σ_h	0.0003 m

Tabella 3.10 Posizione antenna Viva GS14

La qualità pari a 1 indica che le ambiguità sono state fissate ad intero. Lo scarto quadratico medio della soluzione nelle tre dimensioni è molto piccolo ovvero nell'ordine del decimo di millimetro.

Una volta individuata la posizione corretta del ricevitore Leica Viva GS14 andremo ad utilizzare quest'ultimo come stazione master mentre il rover diventerà il ricevitore GNSS posto sul Phantom 4 RTK (un ricevitore ublox9)

RINEX OBS: Rover	stat1850.19o
RINEX OBS: Base Station	doms1850.19d
RINEX NAV/CLK	brdm1850.19p

Tabella 3.11 File input RTKPOST

I satelliti visualizzati dall'antenna del drone e l'indice GDOP sono i seguenti:

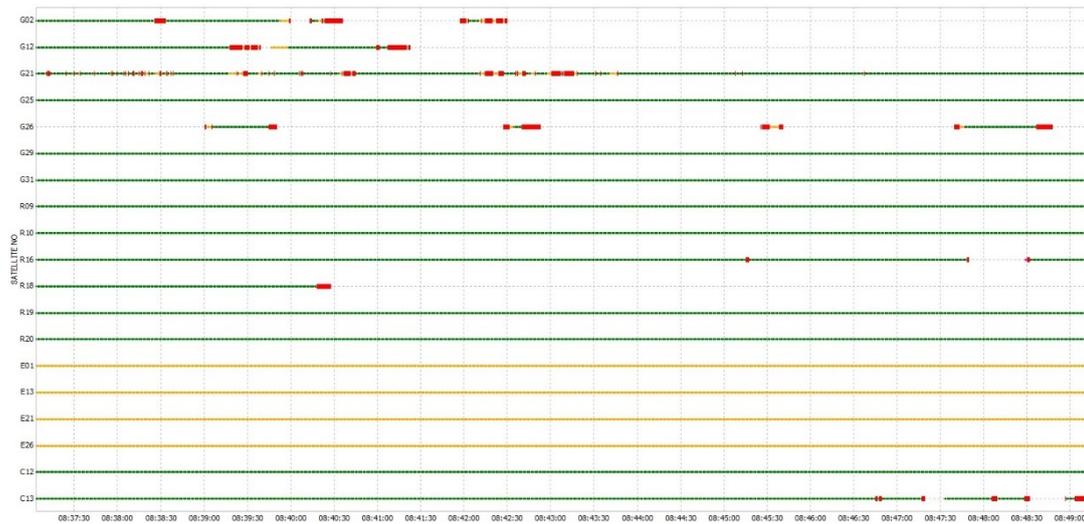


Figura 3.14 Visibilità reale satelliti drone

I satelliti preceduti dalla lettera G sono GPS, quelli preceduti dalla lettera R sono Glonass, quelli preceduti dalla lettera E sono Galileo mentre quelli preceduti dalla lettera C sono Beidou.

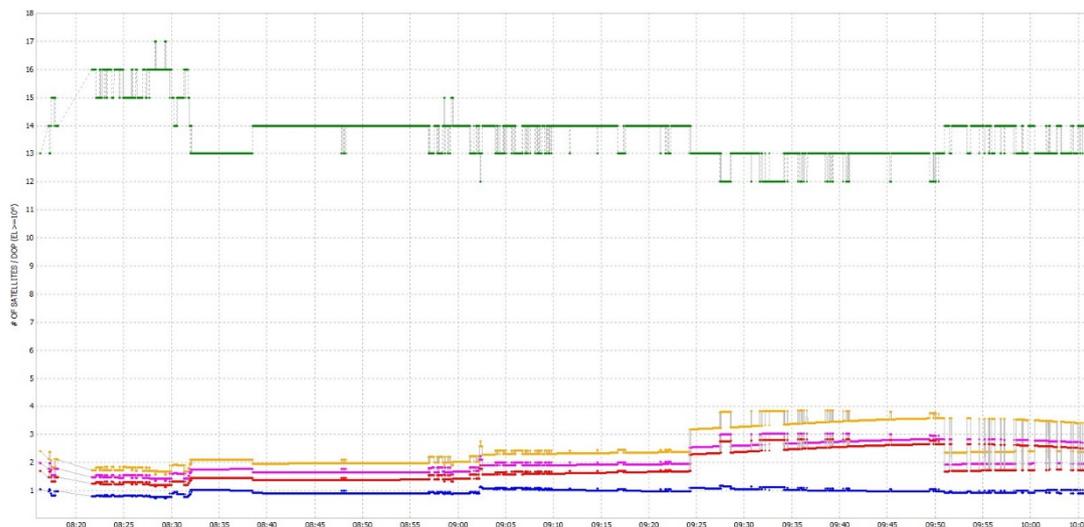


Figura 3.15 DOPs reale del ricevitore posto sul drone

Il numero di satelliti osservati risulta più piccolo rispetto a quello della stazione master in quanto il periodo di tempo di osservazione è minore. Il valore di GDOP (in giallo nell'immagine 3.17) risulta essere sempre inferiore a 2.

Le opzioni utilizzate per andare a processare i dati sono le stesse che sono state applicate in precedenza ad eccezione del fatto che questa volta il rilievo è di tipo cinematico e quindi nel campo *Positioning Mode* andremo a spuntare l'opzione *Kinematic*. In questo modo non otterremo più un'unica tripletta di coordinate, come nel caso precedente, ma una posizione tridimensionale (espressa in latitudine, longitudine e altezza ellissoidica) valutata con un intervallo temporale di due decimi di secondo.

Per inserire le coordinate note della stazione Leica GS14, nella schermata Position, abbiamo inserito i seguenti dati.

Rover		
Antenna type	* (letta dal file)	
Delta-E/N/U	0/0/0	
Base station		
Latitudine	Longitudine	Altezza ellissoidica
46.374156234	8.429794821	1342.6667
Antenna type	LEIGS14	
Delta-E/N/U	0/0/1.4590	

Tabella 3.12 Position RTKLIB

In questo modo, al variare del tempo, il software calcola ogni secondo la posizione cinematica del rover.

La distanza tra la posizione dell'antenna e quella della fotocamera è stata posta uguale a zero non perché questa sia effettivamente nulla ma perché verrà considerata in seguito in quanto le tre componenti (N, E, h) di questo vettore non sono costanti nel tempo.

Lanciato il programma otteniamo 3654 coordinate tridimensionali (una ogni due decimi di secondo) di cui solo una non ha ambiguità fissata; questa è stata scartata nei calcoli successivi. I satelliti osservati risultano essere sempre pari a 12. Anche in

questo caso lo scarto quadratico medio della soluzione risulta essere piccolo, nell'ordine del millimetro.

GPSW	GPST	Lat.	Long.	h ellis.	Qualità	Num. Sat.	σ_{nord}	σ_{est}	σ_h
2060	376695.8	46.373	8.429	1446.36	1	12	0.007	0.004	0.006
2060	376696.0	46.373	8.429	1446.36	1	12	0.007	0.004	0.006
2060	376696.2	46.373	8.429	1446.35	1	12	0.007	0.004	0.006

Tabella 3.13 Stralcio output RTKLIB per la posizione del centro di fase dell'antenna del drone

3.4 Dall'antenna ai punti di presa

Una volta ricavata la posizione del centro di fase dell'antenna sul drone per tutta la durata del rilievo, per poter procedere alle operazioni di fotogrammetria diretta, bisogna valutare la posizione della camera nell'attimo in cui sono stati scattati i fotogrammi.

Il problema è che la posizione tridimensionale del drone è stata valutata in un determinato istante, espressa nel tempo GPS, che non coincide con quello in cui è stata scatto il fotogramma. Bisogna quindi eseguire un'interpolazione lineare delle posizioni ricavate in maniera tale da individuare la posizione dell'antenna prima e poi della fotocamera al momento dello scatto. A titolo esemplificativo riportiamo il tempo relativo al primo fotogramma scattato

Nome file	GPS Time
100_0001_0001.JPG	376631.539041

Tabella 3.14 GPST primo fotogramma

I dati con cui si eseguirà l'interpolazione sono quelli relativi al tempo precedente e al tempo successivo più vicini allo scatto del fotogramma. Nell'esempio di cui sopra sono:

GPST inf.	Latitudine inf. (deg)	Longitudine inf. (deg)	Altezza ell. Inf. (m)
376631.4	46.37099194	8.429789022	1447.1898
GPST sup.	Latitudine sup. (deg)	Longitudine sup. (deg)	Altezza ell. sup. (m)
376631.6	46.37099117	8.42979022	1447.1869

Tabella 3.15 Posizione e tempo GPS utilizzati per l'interpolazione dell'esempio precedente

Applicando le formule di interpolazione si ottiene il seguente risultato

$$Lat = \frac{Lat_{sup} - Lat_{inf}}{GPST_{sup} - GPST_{inf}} \cdot (GPST - GPST_{inf}) + Lat_{inf}$$

$$Lon = \frac{Lon_{sup} - Lon_{inf}}{GPST_{sup} - GPST_{inf}} \cdot (GPST - GPST_{inf}) + Lon_{inf}$$

$$H = \frac{H_{sup} - H_{inf}}{GPST_{sup} - GPST_{inf}} \cdot (GPST - GPST_{inf}) + H_{inf}$$

GPST	Latitudine (deg)	Longitudine (deg)	Altezza ell. (m)
376631.539041	46.37099140	8.42978985	1447.188

Tabella 3.16 Posizione e tempo GPS primo fotogramma (coordinate geografiche)

Vista la ridotta velocità del drone (circa 7 m/s) l'interpolazione lineare è più che sufficiente.

Ottenute le coordinate di tutti e 246 fotogrammi procediamo con una trasformazione dalle coordinate geografiche a quelle cartografiche con l'uso della proiezione UTM riferita alla zona 32N. La posizione non sarà più espressa in gradi ma in metri. Per fare questa operazione è stato utilizzato il software ConveRgo. Il dato di output, sempre riferito al primo fotogramma, è il seguente:

Nome file	Est (m)	Nord (m)	Altezza ell. (m)
100_0001_0001.JPG	456143.361	5135426.488	1447.188

Tabella 3.17 Posizione cartografica dell'antenna primo fotogramma (coordinate piane)

A questo punto dal file Timestamp.MRK estrapoliamo la distanza tra l'antenna e la fotocamera (lever arm) e la sommiamo alle quantità precedentemente trovate. In questo modo è possibile trovare le coordinate del centro di presa della camera necessarie per andare a risolvere le equazioni di collinearità.

Nome file	Est (m)	Nord (m)	Altezza (m)
100_0001_0001.JPG	0.032	-0.024	0.19

Tabella 3.18 Lever arm

Nome file	Est (m)	Nord (m)	Altezza ell. (m)
100_0001_0001.JPG	456143.393	5135426.464	1447.378

Tabella 3.19 Posizione centro di presa primo fotogramma

Per trovare la posizione corretta del centro di presa abbiamo deciso di sommare il lever arm ma in realtà all'epoca della misura non sapevamo se questo fosse stato già considerato nei calcoli del flight controller, se dovesse essere sottratto o sommato. Vedremo nei paragrafi successivi come siamo giunti alla conclusione di sommare questa quantità.

3.5 L'appoggio a terra eseguito

Come abbiamo visto nel paragrafo sull'orientamento dei fotogrammi, i punti di appoggio a terra che solitamente vengono utilizzati per eseguire l'orientamento esterno sono almeno cinque per ogni modello stereoscopico. Se si tiene conto che il numero di fotogrammi che si eseguono sono elevati (ad esempio per il nostro caso studio sono 126) sarebbero necessari un elevato numero di GCP e questo comporterebbe lunghi tempi di esecuzione di rilievo e costi elevati.

Si può pensare di ridurre il numero di punti di appoggio a terra andandoli a posizionare in modo opportuno, in maniera tale che il singolo punto non venga utilizzato in uno solo modello stereoscopico ma in più modelli. Sappiamo che due fotogrammi successivi hanno un ricoprimento longitudinale di almeno il 60% quindi se consideriamo un terzo fotogramma questo si sovrapporrà con il primo di un 10%. Possiamo andare a collocare i punti di appoggio nella zona di sovrapposizione tra tre fotogrammi in maniera tale da ridurre il loro numero in quanto sono utilizzati in due modelli stereoscopici consecutivi.

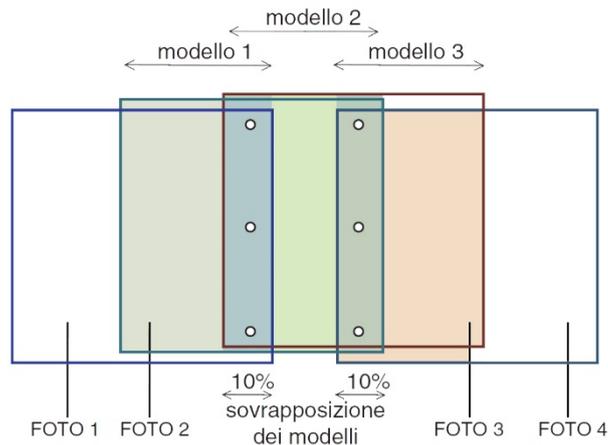


Figura 3.16 Disposizione punti di appoggio a terra

Come accennato in precedenza la sovrapposizione dei modelli che nei voli da drone è ben superiore al 60% permette di agganciare tra di loro tutti i modelli (e tutti i fotogrammi) in un unico grande modello orientato relativamente. Non si considera più la coppia di fotogrammi ma si crea un unico modello in maniera tale da utilizzare i pochi punti di appoggio a terra per tutto il progetto riducendoli di circa l'80% in quanto il numero minimo di punti di appoggio è ora al servizio di tutto il blocco e non per un singolo modello. Questa operazione si chiama triangolazione aerea.

In primo luogo, viene effettuato l'orientamento relativo sull'intero blocco di fotogrammi, questa operazione non richiede punti di coordinate note. I modelli stereoscopici generati vengono collegati fra loro attraverso dei punti di legame che si trovano nella parte in comune fra più fotogrammi. In questo modo si genera un unico grande modello stereoscopico in cui, teoricamente, per andare ad effettuare l'orientamento assoluto, sarebbero necessari solo tre punti di appoggio a terra. Per evitare la propagazione degli errori però si sceglie di utilizzare un numero di punti di coordinate note sovrabbondante che viene distribuito uniformemente su tutto il blocco di fotogrammi e in particolar modo sui bordi del blocco. Al termine dei calcoli i modelli ottenuti sono tutti orientati correttamente e in ciascuno di essi è possibile andare a determinare le coordinate terreno dei punti di legame. Queste coordinate permettono di andare poi a orientare separatamente ogni coppia di fotogramma. Questa tecnica è nota come triangolazione aerea con la specifica aggettivante "a modelli indipendenti".

La tecnica di triangolazione aerea impiegata dal software utilizzato per il nostro caso è simile ma è invece indicata come triangolazione aerea a stelle proiettive e si basa sul principio che tutti i punti immagine di ciascun fotogramma definiscono una stella di raggi nello spazio, comune nei punti di legame ad almeno tre fotogrammi. Metashape Professional sceglie i punti di legame in maniera tale che, ove possibile, questi intersechino nel miglior modo possibile anche i punti di appoggio. La valutazione dei parametri di orientamento esterno viene fatta per l'intero blocco di fotogrammi in un'unica soluzione utilizzando la tecnica dei minimi quadrati per minimizzare la norma quadratica degli errori.

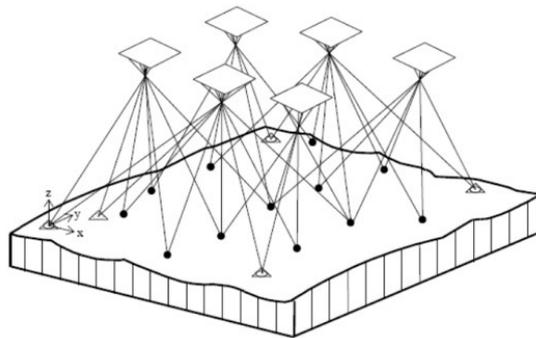


Figura 3.17 Stelle dei raggi proiettivi

Di seguito viene riportata la distribuzione planimetrica dei punti di appoggio (ground control point). Si è cercato di distribuire i punti in maniera uniforme lungo tutta l'area del rilievo tenendo conto che, in fase di elaborazione delle immagini, l'area effettiva sarà ridotta in maniera tale da ridurre i tempi di processamento. Non è stato possibile posizionare i GCP in corrispondenza della zona di deposito della frana (conoide) per questioni di sicurezza. Questi motivi di sicurezza sono spesso quelli che impongono l'uso della fotogrammetria diretta.

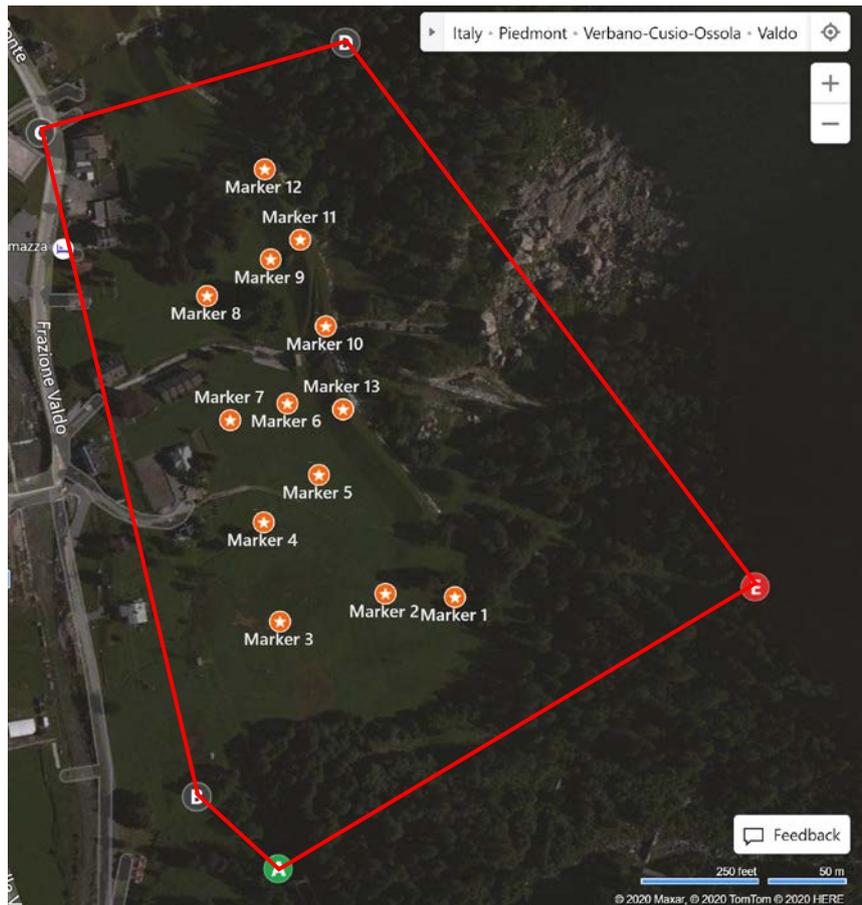


Figura 3.18 Distribuzione dei punti di appoggio a terra

3.6 Agisoft Metashape Professional

Agisoft Metashape Professional è un software “Structure for Motion” che permette di realizzare oggetti tridimensionali partendo da almeno due fotogrammi. Questi possono essere scattati da qualsiasi posizione a patto che l’oggetto da ricostruire sia ripreso in almeno due di essi. L’orientamento delle immagini, che il software chiama allineamento, e la costruzione del modello tridimensionale sono interamente automatizzati.

3.6.1 Inserimento delle immagini

La prima operazione effettuata è stata quella di valutare quali fotogrammi sono effettivamente utili per il nostro progetto. Nella zona ovest sono stati scartati i fotogrammi che non inquadrano né la frana né i marker mentre nella parte est sono

stati scartati quelli che riprendono la fitta vegetazione che non fornisce nessuna informazione utile per il rilievo del terreno. Abbiamo in questo modo quasi dimezzato il numero di fotogrammi passando da 246 a 126. Questo ci permette di avere tempi di elaborazione delle immagini molto più veloci e file di output più leggeri.

Dal menù a tendina (*Workflow – Add Photos*) è possibile quindi caricare le immagini sul software. Una volta inseriti i fotogrammi viene aggiunta la posizione dei punti di presa della fotocamera ricavate nel paragrafo 3.4. Le coordinate sono espresse nel sistema cartografico UTM zona 32N. Si è dato un peso alle misure effettuate impostando un'accuratezza pari a 0.03 m in planimetria e 0.05 m in altimetria.

Prima di andare ad "allineare" le immagini si va a valutare la loro qualità in maniera tale da scartare quelle non fotograficamente adeguate. Dal pannello *Photos* si seleziona col tasto destro un'immagine e si sceglie l'opzione *Estimate Image Quality*. Il software assegna un valore che va da 0 (qualità pessima) a 1 (qualità ottimale) in funzione della stabilità dell'immagine (più o meno mossa), della nitidezza e della condizione di illuminazione. Immagini con un indice inferiore a 0,7 sono da scartare. Tutte i fotogrammi scattati dal drone Phantom 4 RTK hanno una qualità superiore a 0,84 e quindi vengono tutte considerate.

3.6.2 Allineamento delle immagini (orientamento relativo di tutto il blocco di fotogrammi)

Questa operazione coincide con le fasi di orientamento interno e orientamento relativo di ogni fotogramma. Dal menù a tendina si sceglie l'opzione *Workflow – Align Photos*. L'accuratezza scelta per il nostro progetto è *High* che consiste nel considerare l'immagine alla sua risoluzione reale ovvero senza andare ad eseguire un sottocampionamento. L'opzione *Generic Preselection* è stata spuntata in maniera tale da andare a velocizzare le operazioni in quanto permette di fare una preselezione delle coppie da confrontare utilizzando una risoluzione minore delle immagini. L'opzione *Reference preselection* permette di tener conto delle coordinate dei centri di presa del fotogramma, se sono note, o delle coordinate dei GCP inseriti

in maniera tale da andare a creare un modello georeferenziato e scalato correttamente. A seconda del modello generato le coordinate prese in considerazione per orientare i fotogrammi sono state fatte variare in modo tale da valutare il valore degli scarti che si ottengono andando a considerare noti solo i GCP, solo le coordinate del centro di presa dei fotogrammi o, infine, entrambi.

Lanciando il processo di orientamento, il programma individua prima in modo automatico i punti di legame per ogni immagine e li ricerca nelle immagini successive. Quando i punti vengono individuati in modo omologo il software registra la posizione tridimensionale e il colore calcolando così le coordinate dei punti omologhi che compongono la nuvola di punti sparsa.

I centri di presa vengono posizionati nella loro posizione relativa o assoluta corretta (a seconda che sia stata spuntata o meno l'opzione *Reference preselection*) e i fotogrammi sono ruotati in modo tale da avere la stessa posizione che avevano durante la presa.

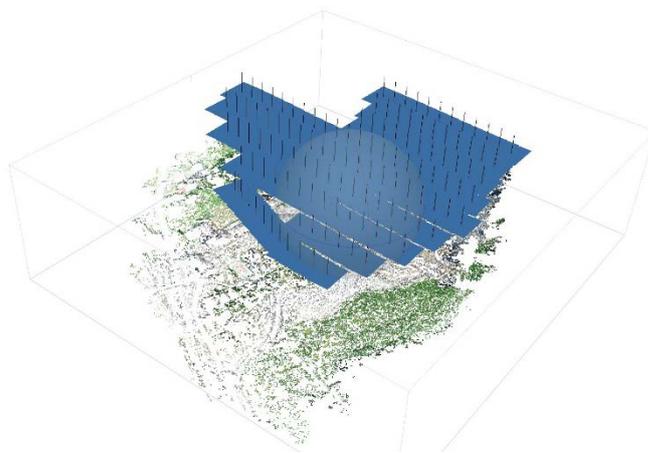


Figura 3.19 Nuvola di punti sparsa

I parametri di orientamento interno sono stati calcolati ma verranno successivamente rielaborati tenendo conto dei GCP.

3.6.3 Inserimento delle coordinate dei marker (GCP) e loro utilizzo

Per andare ad effettuare un rilievo fotogrammetrico con la fotogrammetria diretta basterebbero le coordinate dei punti di presa dei fotogrammi. Tuttavia, durante le

fasi di rilievo sono stati posizionati dei marker, utilizzati poi come GCP, che possono servire per migliorare la precisione del modello ed eliminare gli errori sistematici.

L'inserimento delle coordinate dei marker è effettuato dopo la generazione della nuvola di punti sparsa in maniera tale da rendere l'operazione il più automatica possibile. Avendo creato una correlazione tra le immagini, infatti, quando si ricerca il marker in una foto questo verrà approssimativamente posizionato anche negli altri fotogrammi in cui è presente.

Per prima cosa dal menù *Reference* occorre inserire manualmente le coordinate dei 13 marker che abbiamo individuato in campagna. Le coordinate sono espresse nel sistema cartografico UTM zona 32N concordemente a quelle dei fotogrammi. Si è dato inoltre un peso alle misure effettuate impostando una precisione strumentale pari a 0.01 m in planimetria e 0.03 m in altimetria.

Dal menù *Photos* si selezionano poi le singole immagini in cui sono presenti i marker, ovvero i GCP, e basta eseguire un click con il tasto destro in corrispondenza della congiunzione dei triangoli neri.



Figura 3.20 Marker

Una volta individuato il primo punto su un qualsiasi fotogramma il programma, selezionando l'opzione *Fliter Photos by Marker*, andrà a selezionare tutte le foto in cui è presente quel marker e ci fornirà una posizione approssimata. A seconda della qualità della foto in corrispondenza di quel punto si andrà a ricolimare con precisione posizionando manualmente la bandierina nella posizione corretta. Solo i punti confermati saranno utilizzati per le operazioni successive.

3.6.4 Ottimizzazione dell'allineamento

Il passo successivo consiste nell'andare ad ottimizzare i parametri di orientamento interno ed esterno tenendo conto delle coordinate dei marker e cioè dei GCP inseriti. A seconda del caso studio, per ottimizzare l'allineamento, sono stati considerati solo le coordinate dei punti principali dei fotogrammi, solo quelle dei marker o entrambe. Prima di eseguire questa operazione si esegue nuovamente il comando *Align Photos* spuntando gli elementi che vogliamo prendere in considerazione come appena accennato.

Cliccando il tasto *Optimize Cameras* è possibile scegliere quali parametri andare a calcolare nell'orientamento interno. Come visto nel paragrafo 1.3.2 i parametri che andremo a selezionare per il calcolo sono:

- Lunghezza focale f (indispensabile)
- Coordinate del punto principale c_x e c_y (indispensabile)
- Coefficienti di distorsione radiale k_1, k_2, k_3 e k_4
- Coefficiente di skew (incertezza sulla forma del pixel) b_1 e b_2
- Coefficienti di distorsione tangenziale p_1, p_2, p_3 e p_4

Con questo calcolo si minimizzano gli scarti sui punti di appoggio e contemporaneamente si stimano i parametri della triangolazione aerea e la metricità della camera da presa.

4 La fotogrammetria diretta per il controllo della frana

4.1 Precisioni riscontrate con il solo appoggio a terra

Per la realizzazione del primo modello nel calcolo di triangolazione aerea del blocco fotogrammetrico si è scelto di non usare le coordinate dei centri di presa delle fotocamere. La nuvola di punti sparsa è stata generata con il software Metashape non spuntando l'opzione *Reference preselection*. In questo modo si è creato un modello non in scala poiché, non disponendo di punti di coordinate note, il programma ha potuto eseguire solo l'orientamento relativo di tutto il blocco. La distanza relativa tra i fotogrammi e la loro rototraslazione relativa è quindi corretta ma la loro distanza e il loro assetto è arbitrario.

Per andare ad ottimizzare i parametri di orientamento interno e orientamento assoluto sono stati utilizzati quindi le coordinate dei marker misurati a terra. Nelle fasi di inserimento dei marker all'interno del software, oltre alle coordinate cartografiche, è stato inserito anche la precisione con cui queste sono state rilevate ovvero uno scarto quadratico medio pari a 1 cm in planimetria e 3 cm in quota. I punti di coordinate note non vengono però utilizzati tutti allo stesso modo. Si fa una distinzione tra:

- a) Ground Control Point (GCP): sono quei punti di coordinate note utilizzati dal programma per andare a risolvere le equazioni di collinearità e ricavare i parametri di orientamento interno ed esterno.
- b) Check Point (CKP): sono quei punti di coordinate note sui quali viene fatta una valutazione statistica per valutare la precisione delle operazioni.

In questa prova sono stati utilizzati 9 GCP (Marker 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 12 e 13) e 4 CKP (Marker 1, 5, 9, 11).

Una volta lanciato il comando *Optimize Cameras* sono stati ricavati i seguenti scarti sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso):

Markers	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
2	-0.018	-0.005	0.019	-0.010	0.310
3	0.000	0.006	0.007	-0.018	0.319
4	0.000	0.002	0.002	0.004	0.234
6	-0.003	0.003	0.005	-0.044	0.197
7	0.004	-0.013	0.014	-0.012	0.241
8	-0.011	-0.021	0.025	0.001	0.321
10	0.000	0.012	0.012	-0.004	0.265
12	0.005	0.013	0.015	-0.009	0.386
13	0.022	0.007	0.023	0.079	0.210
1	0.025	0.056	0.061	-0.049	0.280
5	-0.021	-0.015	0.026	-0.054	0.353
9	-0.022	-0.020	0.030	-0.013	0.385
11	-0.010	-0.001	0.010	-0.034	0.257

Tabella 4.1 scarti sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra

	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
Media GCP	0.000	0.000	0.013	-0.001	0.276
Minimo GCP	-0.018	-0.021	0.002	-0.044	0.197
Massimo GCP	0.022	0.013	0.025	0.079	0.386
sqm GCP	0.011	0.011	0.007	0.033	0.062
Media CKP	-0.007	0.005	0.031	-0.038	0.319
Minimo CKP	-0.022	-0.020	0.010	-0.054	0.257
Massimo CKP	0.025	0.056	0.061	-0.013	0.385
sqm CKP	0.022	0.035	0.021	0.018	0.060

Tabella 4.2 Scarti statistici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra

I dati in tabella sono stati riportati in forma grafica in maniera tale da rendere più semplice la loro valutazione.

Gli scarti planimetrici in tabella sono suddivisi dal software in un errore nella direzione est e uno nella direzione nord. Per avere un unico risultato si è deciso di sommarli vettorialmente e di riportare un grafico in cui è possibile visualizzare modulo, direzione e verso dello scarto. Nel grafico è riportato anche il perimetro del rilievo fotogrammetrico (in grigio) in maniera tale da individuare dove sono posizionati i marker. Al solito in rosso sono disegnati i vettori scarti in planimetria dei CKP.

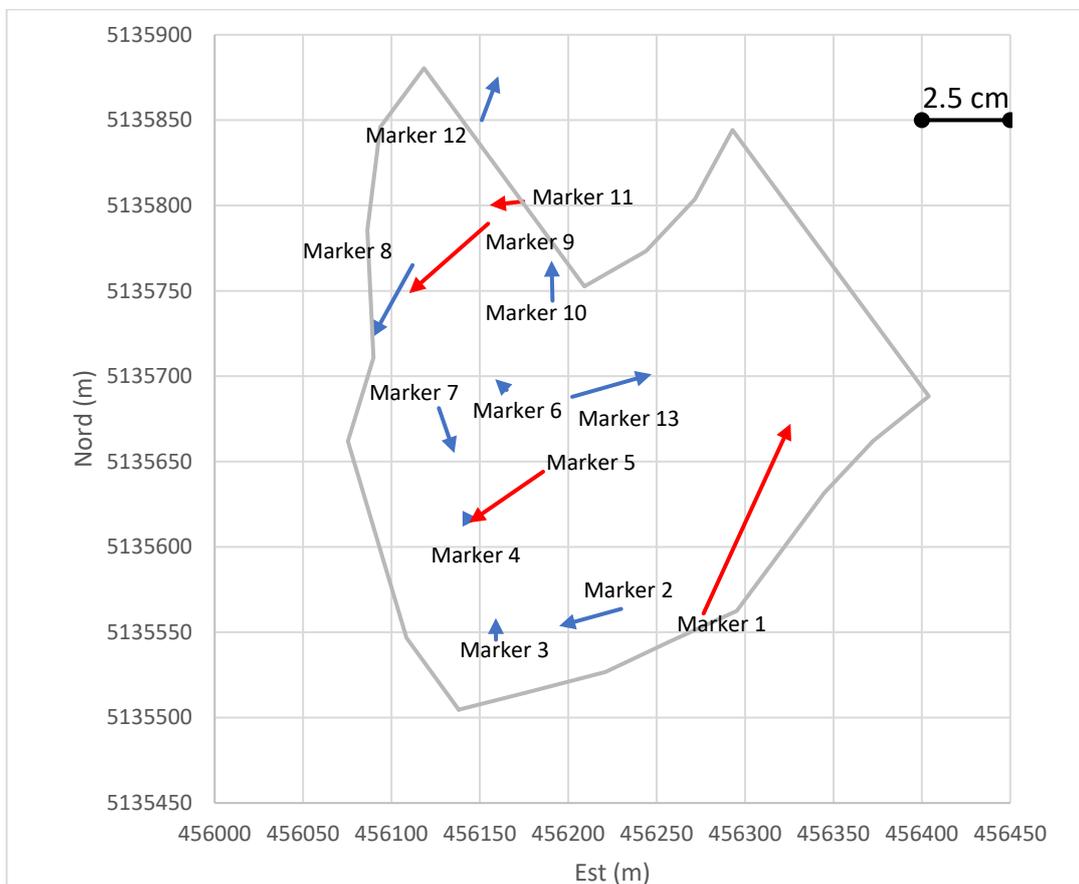


Figura 4.1 Scarti planimetrici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra

Dal grafico possiamo vedere che gli scarti all'interno del perimetro hanno modulo direzione e verso che non dipendono dalla loro posizione quindi non si riscontrano errori sistematici.

Dal grafico seguente, che riporta solo il modulo degli errori planimetrici, possiamo vedere che i CKP presentano in media errori più elevati, ad eccezion fatta per il

marker 11. Questo risultato è concorde al fatto che questi punti non sono stati utilizzati per l'ottimizzazione dei parametri ma come controllo della bontà del progetto. Se i marker fossero stati utilizzati come GCP avrebbero avuto tutti scarti fra loro comparabili. Gli scarti planimetrici sui CKP variano da un valore minimo di 1 cm a un valore massimo di 6,1 cm.

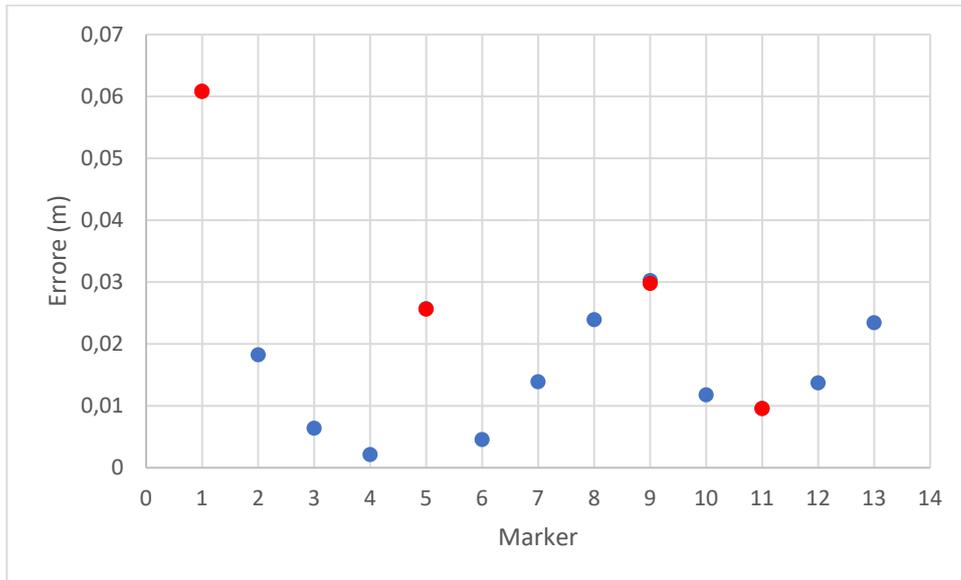


Figura 4.2 Scarti planimetrici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra

Gli scarti altimetrici sono in genere maggiori di quelli planimetrici. Riportiamo per questi scarti un grafico simile al precedente.

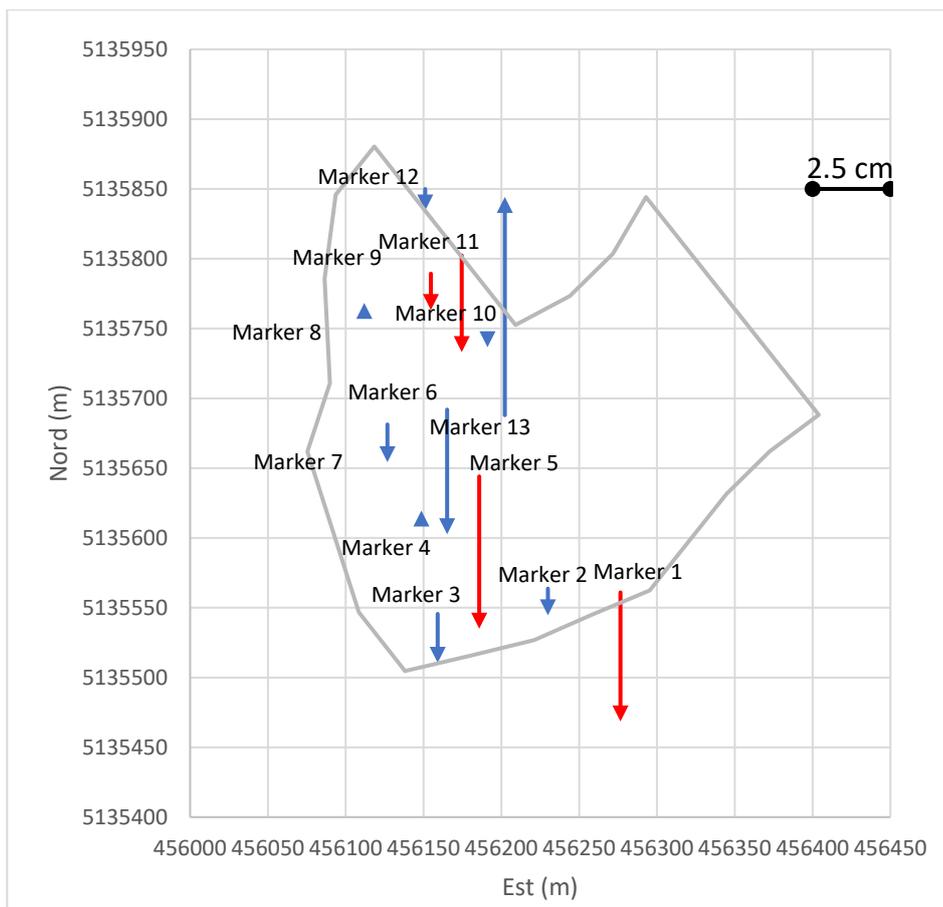


Figura 4.3 Scarti altimetrici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra

Possiamo notare che quasi tutti i punti hanno uno scarto altimetrico negativo, esiste quindi un errore sistematico in altimetria su cui si indagherà più avanti.

4.2 Il calcolo del blocco fotogrammetrico con la fotogrammetria diretta

Prima di procedere alla valutazione della precisione della nuvola di punti sparsa con la sola fotogrammetria diretta è stato necessario valutare se il lever arm (LA) dovesse o meno essere considerato e con che segno. Si sono quindi realizzati tre differenti calcoli di triangolazione aerea.

Il lever arm è costituito dalle tre componenti spaziali della distanza tra il centro di fase dell'antenna e il centro di presa della camera.

L'allineamento delle immagini è stato eseguito spuntando l'opzione *Reference preselection* in maniera tale da tener conto delle coordinate dei centri di presa dei fotogrammi. L'ottimizzazione dei parametri di orientamento interno ed esterno è stata eseguita in funzione delle sole coordinate dei fotogrammi considerando tutti i marker come CKP. Per valutare quale fosse l'adattamento migliore si è fatta una valutazione sugli errori altimetrici nei diversi casi. Dai dati ottenuti sono stati ricavati alcuni valori statistici sugli errori delle coordinate dei check point ovvero la media, il valore minimo, il valore massimo e lo scarto quadratico medio.

	Scarto altimetrico senza LA (m)	Scarto altimetrico con LA sottratto (m)	Scarto altimetrico con LA sommato (m)
media check points	-0.135	-0.329	0.059
minimo check points	-0.297	-0.488	-0.105
massimo check points	0.036	-0.157	0.231
sqm check points	0.101	0.101	0.101

Tabella 4.3 Valori statistici, fotogrammetria diretta con diverse applicazioni di lever arm

Lo scarto quadratico medio non ci fornisce alcuna informazione utile per la scelta del modello in quanto, come vediamo in figura 4.4, l'andamento degli scarti è lo stesso in tutti i casi. Se guardiamo l'errore medio possiamo notare che il valore più piccolo risulta essere quello del modello con LA sommato. Possiamo vedere anche graficamente che gli errori altimetrici relativi ai marker sono tutti negativi sia per il caso in cui non è stato considerato il lever arm sia per il caso in cui è stato sottratto. Il modello con lever arm sommato invece presenta sia valori positivi che negativi tutti vicini allo zero.

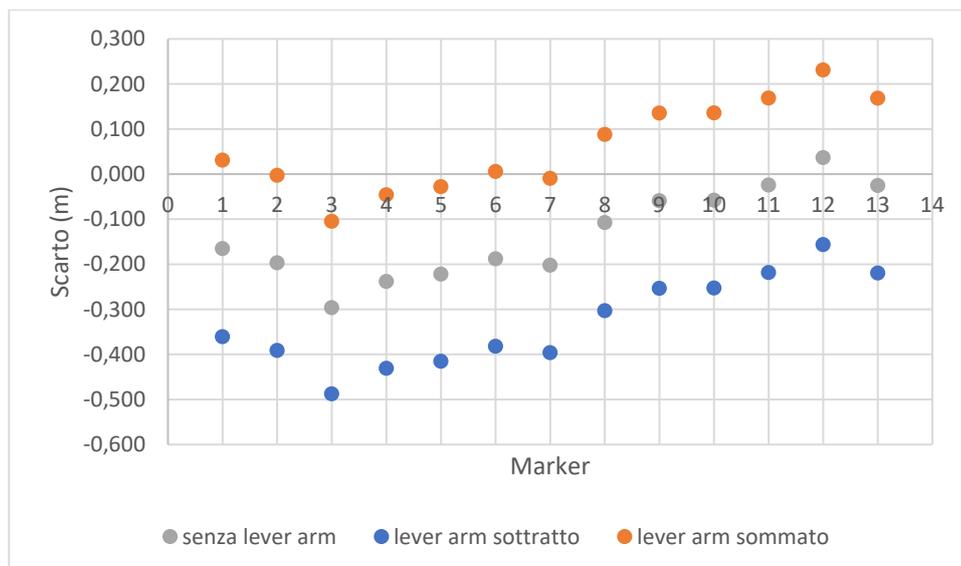


Figura 4.4 Errori altimetrici, fotogrammetria diretta con diversi lever arm

Scelto il valore da utilizzare passiamo alla valutazione degli errori sui marker a terra utilizzati tutti come CKP.

Markers	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
1	0.037	0.065	0.075	0.030	0.280
2	0.004	0.016	0.017	-0.003	0.287
3	0.021	0.045	0.051	-0.105	0.325
4	0.029	0.038	0.049	-0.046	0.240
5	0.009	0.007	0.012	-0.028	0.335
6	0.028	0.018	0.034	0.006	0.188
7	0.038	0.017	0.042	-0.010	0.244
8	0.032	0.004	0.034	0.088	0.326
9	0.025	-0.010	0.028	0.135	0.342
10	0.028	0.004	0.029	0.135	0.263
11	0.027	-0.019	0.034	0.168	0.315
12	0.046	-0.009	0.048	0.231	0.330
13	0.043	0.005	0.044	0.168	0.223

Tabella 4.4 Scarti su tutti i marker a terra usati con CKP fotogrammetria diretta

	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
Media CKP	0.028	0.014	0.038	0.059	0.284
Minimo CKP	0.004	-0.019	0.012	-0.105	0.188
Massimo CKP	0.046	0.065	0.075	0.231	0.342
sqm CKP	0.012	0.024	0.016	0.101	0.049

Tabella 4.5 Valori statistici, fotogrammetria diretta con lever arm sommato

I dati in tabella sono stati riportati anche in forma grafica in maniera tale da rendere più facile la loro valutazione.

Anche in questo caso si fa una distinzione tra scarti planimetri e scarti altimetrici. Per quanto riguarda lo scarto planimetrico si è riportato un grafico dato dalla somma vettoriale delle componenti est e nord.

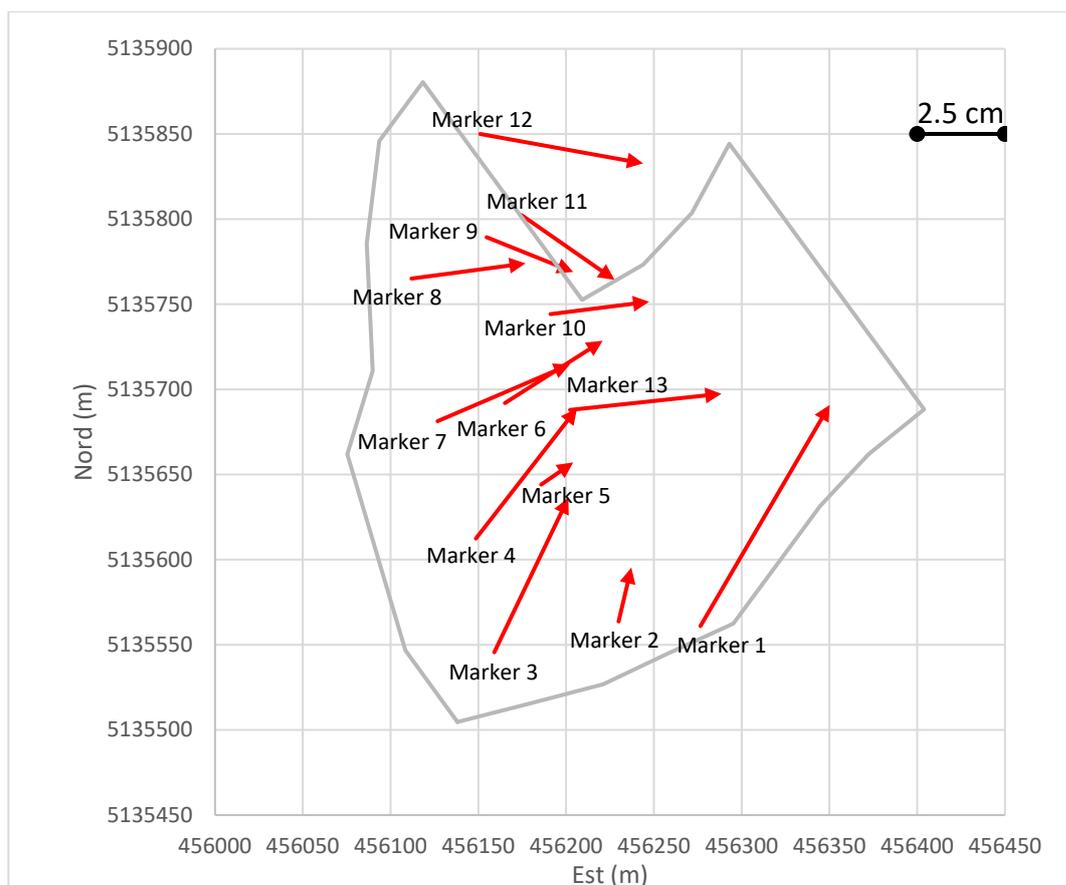


Figura 4.5 Errore planimetrico vettoriale, fotogrammetria diretta

Dal grafico possiamo vedere che gli scarti sono diretti prevalentemente in direzione nord-est quindi le misure ricavate dall'antenna del drone, a differenza dell'appoggio a terra, presentano un errore planimetrico sistematico in media di 3 cm che non è stato corretto con l'applicazione del lever arm.

Se analizziamo i moduli degli errori planimetrici dei check point possiamo vedere che questi variano da un valore minimo di 1.1 cm a un valore massimo di 7,5 cm e una media di 3.4 cm.

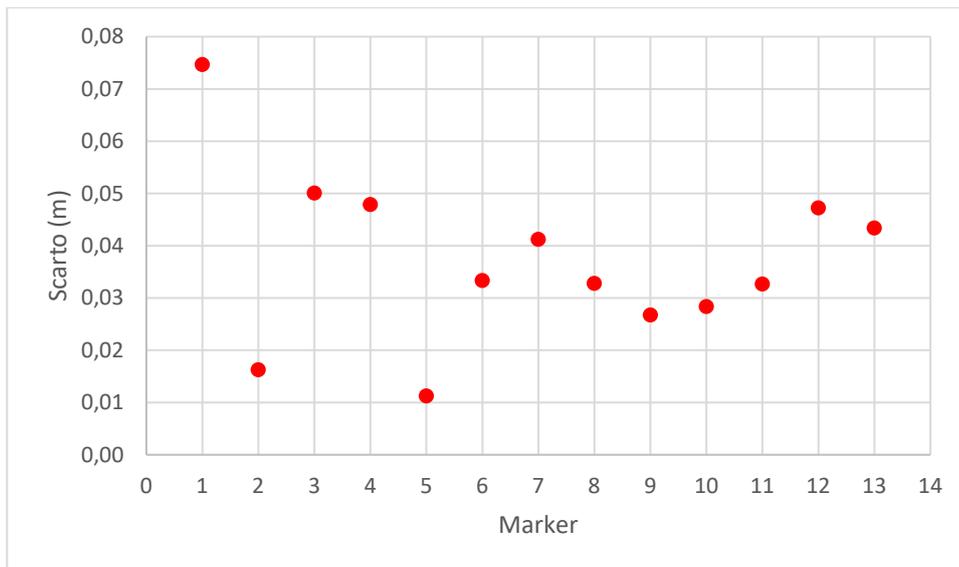


Figura 4.6 Scarti planimetrici sui marker a terra con la fotogrammetria diretta

Come visto in precedenza gli errori altimetrici non presentano errori sistematici e variano tra 0,3 cm a 23 cm con una media di 3,8 cm.

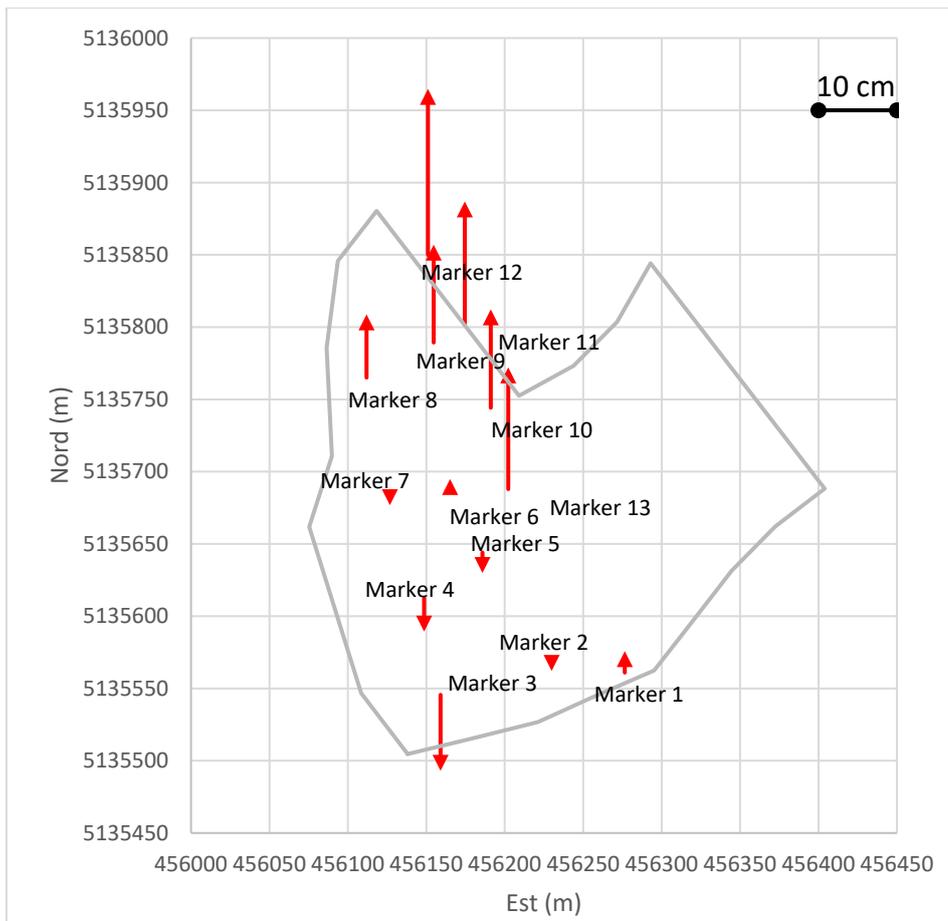


Figura 4.7 Scarti altimetrico sui marker a terra con la fotogrammetria diretta

Con l'utilizzo della sola fotogrammetria diretta gli errori in planimetria sono elevati e presentano inoltre un difetto sistematico.

Per cercare di migliorare i risultati planimetrici ed altimetrici del rilievo, già abbastanza buoni, proveremo ad utilizzare, assieme alle coordinate dei punti di presa, il minor numero possibile di GCP. Anche se non parleremo più di fotogrammetria diretta pura cerchiamo di minimizzare l'appoggio a terra economicamente gravoso, o in certi casi quasi impossibile, ed ottenere al contempo buoni risultati.

4.3 L'appoggio minimale

Il terzo modello è stato generato andando ad ottimizzare i parametri di orientamento interno ed esterno prendendo in considerazione tutti i fotogrammi e

un singolo GCP, a rotazione tra i tredici marker, in maniera tale da individuare quale di questi renda minimi gli scarti nel caso se ne dovesse usare uno solo.

I risultati variano a seconda del marker utilizzato come Ground Control Point. Tra i tredici calcoli realizzati mettiamo in evidenza i due che hanno fornito il peggiore e il miglior risultato. Il criterio di scelta del risultato migliore si basa sulla media degli scarti planimetrici e altimetrici dei rimanenti dodici CKP.

Il modello per il quale l'andamento degli scarti risulta peggiore è quello in cui è stato imposto come GCP il marker 5 per il quale si ha uno scarto planimetrico medio di $0.037m$ e uno scarto altimetrico medio di $0.068 m$, mentre il migliore è quello in cui è stato usato il marker 13 per il quale si ha uno scarto planimetrico medio di $0.019 m$, altimetrico di $0.028 m$ e uno sqm di $0,104 m$ quasi uguali in entrambi i casi.

Imponendo come GCP il marker 5 otteniamo i seguenti risultati:

Markers	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
5	0.006	0.005	0.008	-0.026	0.335
1	0.034	0.064	0.073	0.031	0.279
2	0.000	0.015	0.015	-0.001	0.289
3	0.018	0.045	0.048	-0.101	0.326
4	0.026	0.037	0.045	-0.042	0.239
6	0.025	0.017	0.030	0.008	0.189
7	0.035	0.015	0.038	-0.007	0.244
8	0.030	0.002	0.030	0.089	0.326
9	0.022	-0.012	0.026	0.135	0.342
10	0.026	0.002	0.026	0.136	0.262
11	0.025	-0.021	0.032	0.168	0.316
12	0.045	-0.011	0.046	0.230	0.330
13	0.041	0.003	0.041	0.170	0.222

Tabella 4.6 Scarti Marker con appoggio minimale GCP 5

	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
Media CKP	0.027	0.013	0.037	0.068	0.280
Minimo CKP	0.000	-0.021	0.015	-0.101	0.189
Massimo CKP	0.045	0.064	0.073	0.230	0.342
sqm CKP	0.011	0.025	0.015	0.101	0.049

Tabella 4.7 Valori statistici con appoggio minimale GCP 5

Il control point e i check point presentano una direzione prevalente degli scarti verso nord est e sono affetti dallo stesso errore sistematico che si era riscontrato nel modello con sola fotogrammetria diretta.

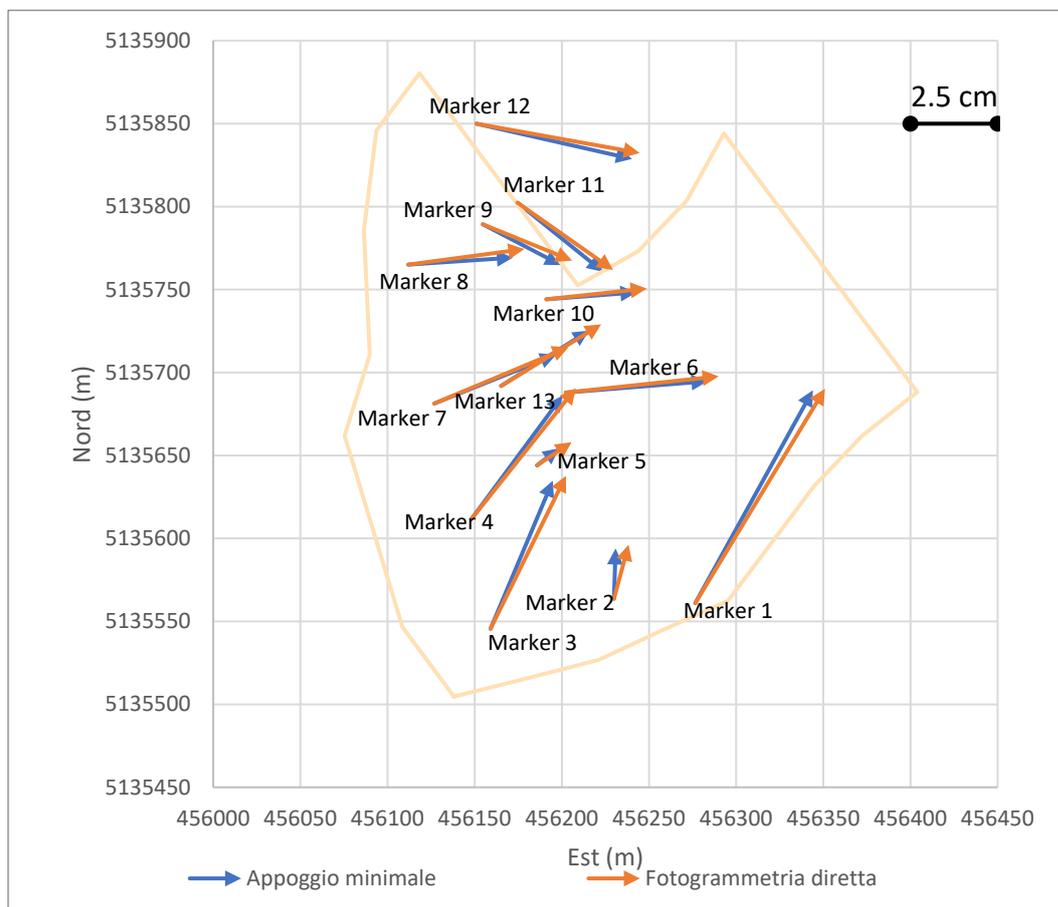


Figura 4.8 Scarto planimetrico vettoriale con appoggio minimale GCP 5

I moduli degli scarti planimetrici presentano un lieve miglioramento. Il valore medio, rispetto alla fotogrammetria diretta, passa da 0.038 m a 0.035 m mentre lo sqm rimane invariato a 0.016 m.

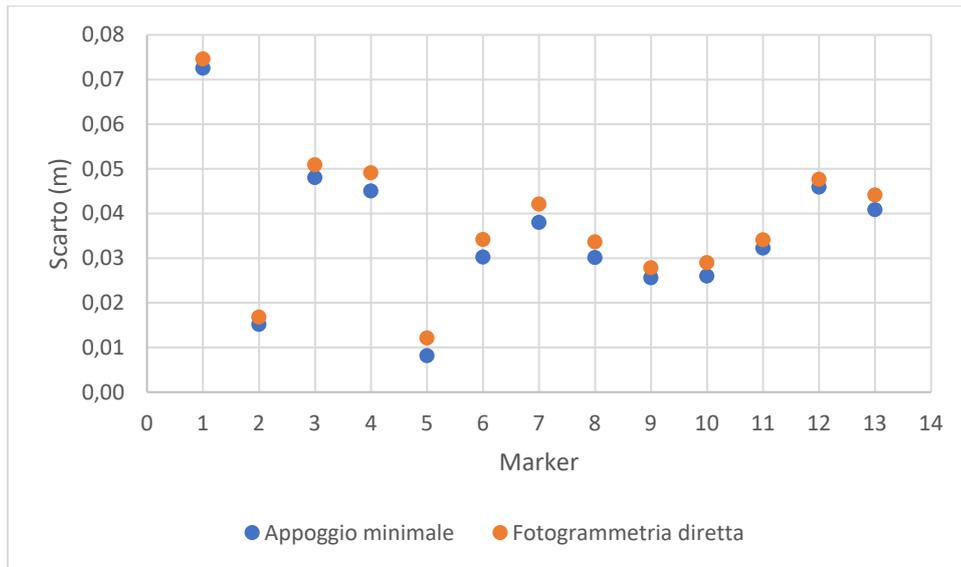


Figura 4.9 Scarto planimetrico con appoggio minimale GCP 5

L'andamento degli scarti altimetrici invece risulta essere praticamente identico a quello ottenuto con la sola fotogrammetria diretta.

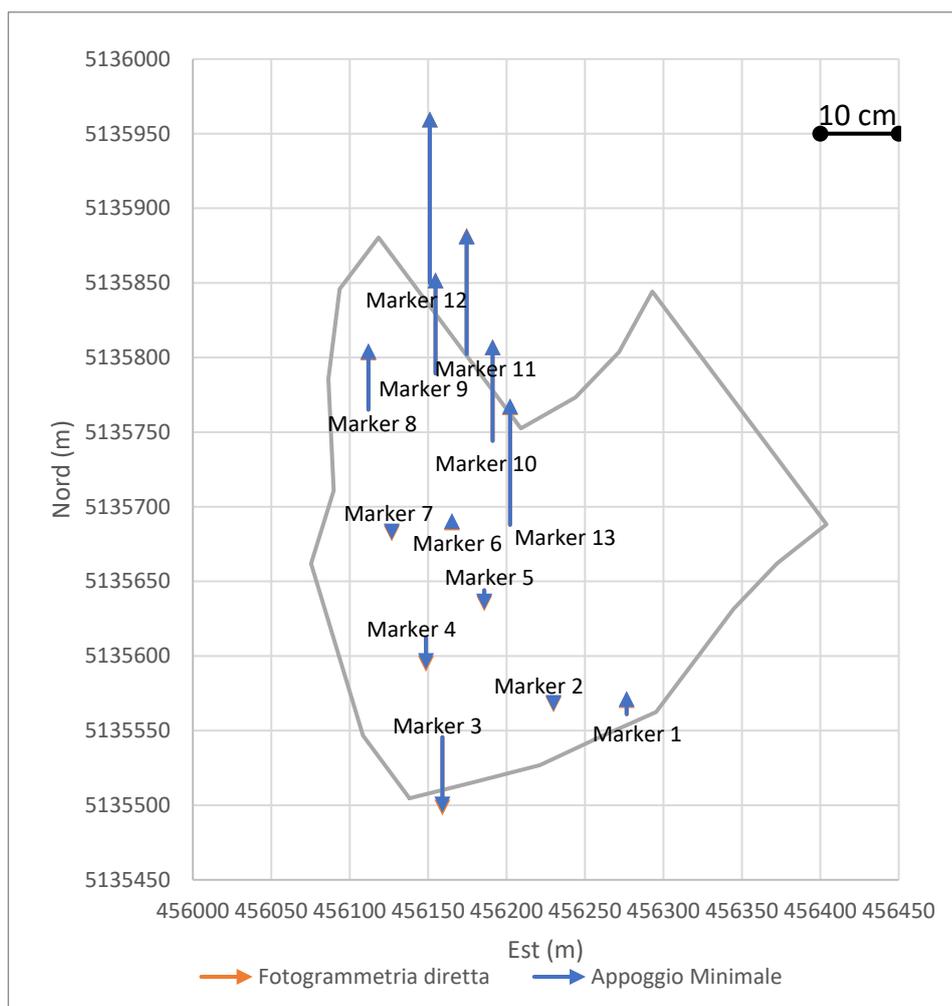


Figura 4.10 Scarto altimetrico con appoggio minimale GCP 5

Nel peggiore dei casi quindi aggiungere un GCP per l'ottimizzazione dei parametri non comporta alcun sostanziale miglioramento al modello in altimetria.

Il Ground Control Point per il quale si ha l'andamento degli errori più piccolo è quello relativo al marker 13 per il quale si ha uno scarto planimetrico medio di 0.019 m e uno scarto altimetrico medio di 0.028 m.

Markers	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
13	0.031	0.003	0.031	0.136	0.221
1	0.041	0.042	0.058	0.011	0.278
2	-0.002	-0.008	0.008	-0.026	0.288
3	0.001	0.017	0.017	-0.119	0.325
4	0.005	0.022	0.022	-0.072	0.240
5	-0.007	-0.003	0.007	-0.061	0.336
6	0.008	0.017	0.019	-0.025	0.188
7	0.010	0.013	0.016	-0.034	0.245
8	0.000	0.016	0.016	0.070	0.326
9	0.001	0.005	0.005	0.113	0.341
10	0.013	0.011	0.017	0.106	0.260
11	0.008	-0.004	0.009	0.149	0.325
12	0.024	0.012	0.027	0.226	0.336

Tabella 4.8 Scarti GCP (in blu) e CKP (in rosso) con appoggio minimale GCP 13

	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
Media CKP	0.009	0.012	0.019	0.028	0.291
Minimo CKP	-0.007	-0.008	0.005	-0.119	0.188
Massimo CKP	0.041	0.042	0.058	0.226	0.341
sqm CKP	0.013	0.013	0.014	0.104	0.049

Tabella 4.9 Valori statistici con appoggio minimale GCP 13

Gli scarti planimetrici sui CKP anche in questo caso hanno una direzione prevalente nord-est. L'errore sistematico, quindi, non è stato corretto.

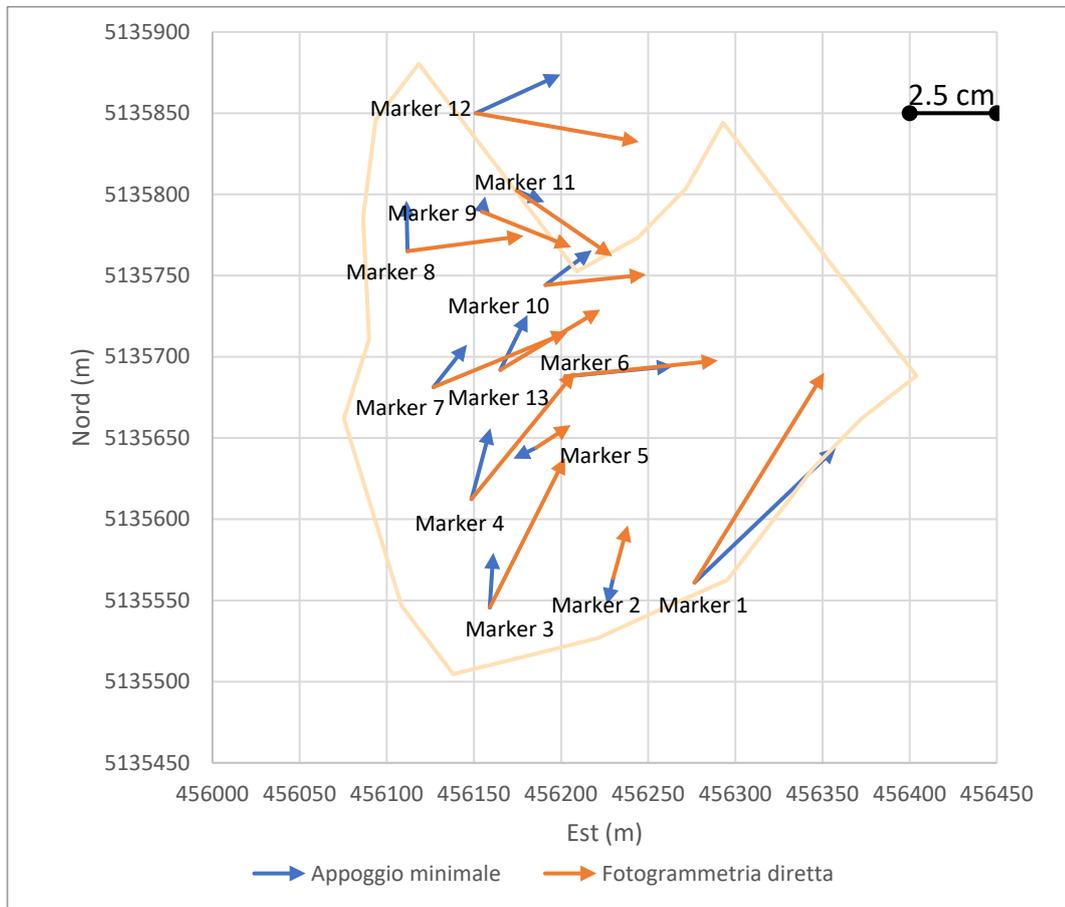


Figura 4.11 Scarti planimetrici con appoggio minimale GCP 13

I moduli degli scarti planimetrici presentano tuttavia una considerevole riduzione rispetto alla sola fotogrammetria diretta passando da una media di 0.38 m a 0.16 m.

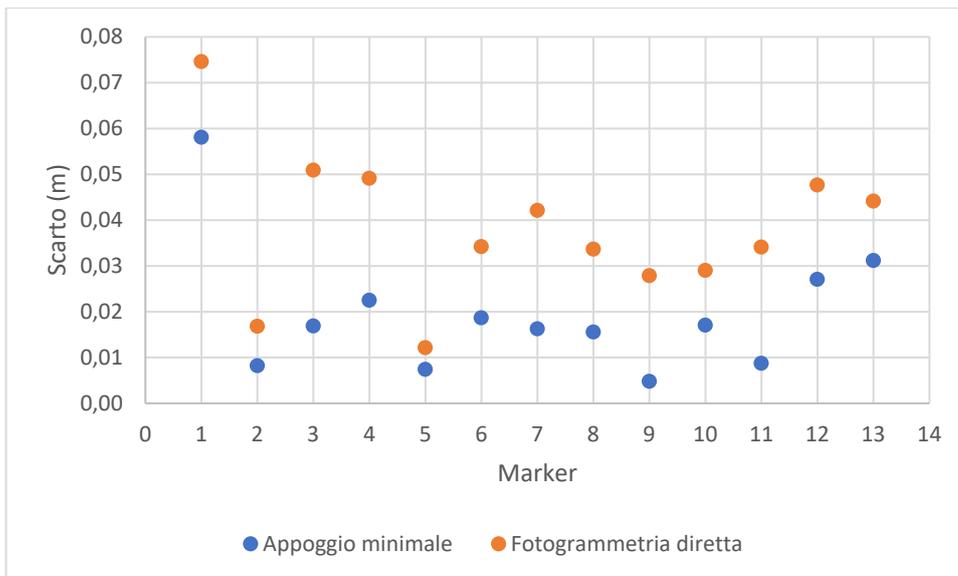


Figura 4.12 Scarto planimetrico con appoggio minimale GCP 13

Per quanto riguarda gli scarti altimetrici questi presentano un andamento identico a quello della sola fotogrammetria diretta con l'unica differenza che gli errori sono traslati verso il basso. La correzione è meno marcata rispetto a quella ottenuta in planimetria.

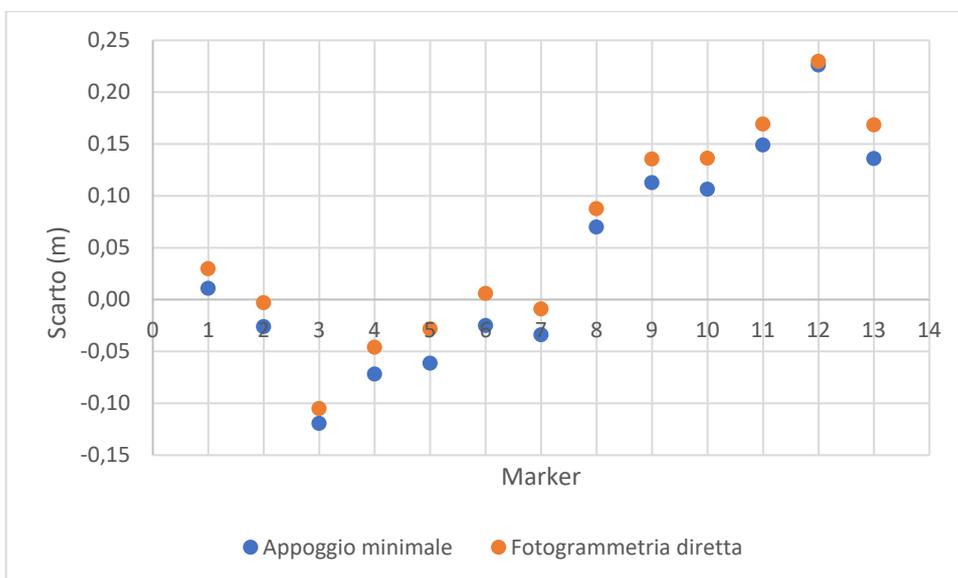


Figura 4.13 Scarto altimetrico con appoggio minimale GCP 13

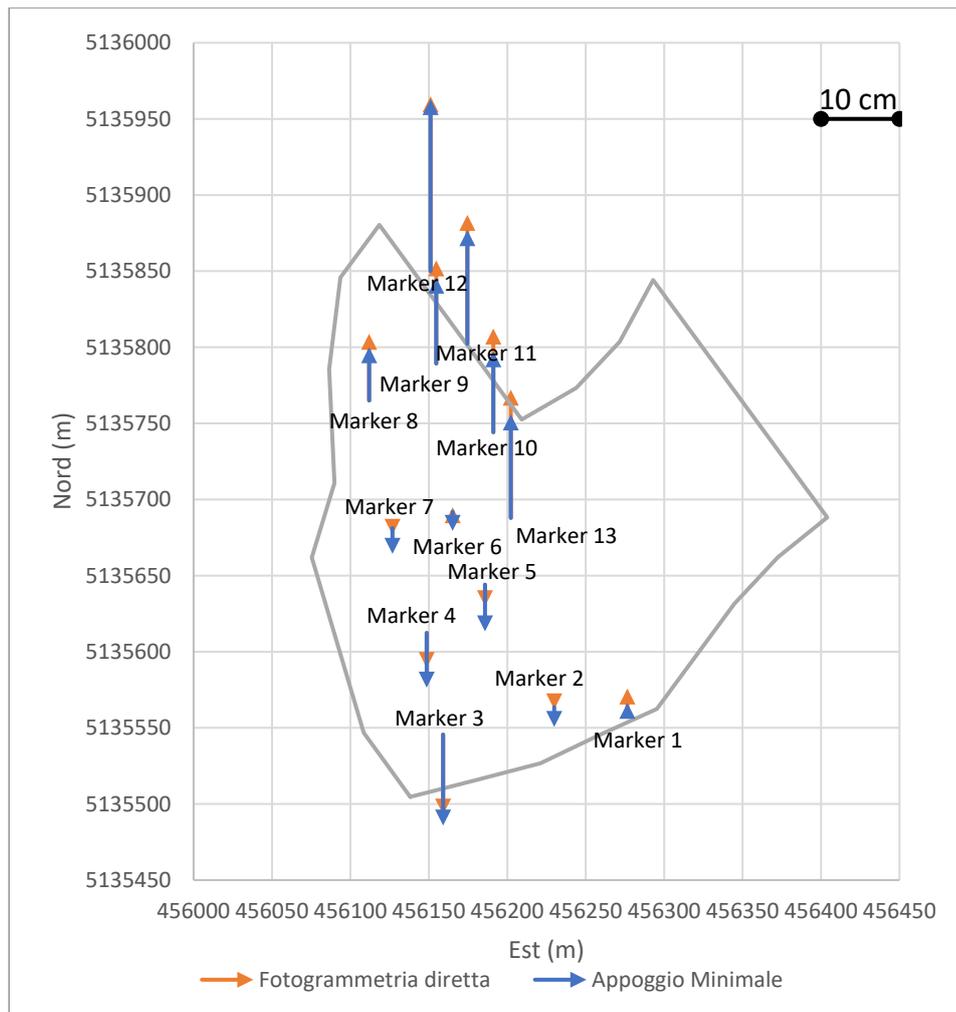


Figura 4.14 Scarto altimetrico con appoggio minimale GCP 13

Possiamo affermare, in generale, che utilizzare un singolo GCP non comporta un sostanziale miglioramento del modello. Gli errori sistematici in planimetria, che fanno sì che gli scarti siano diretti in prevalenza in direzione nord-est, non vengono corretti con nessuno dei marker presi in considerazione.

Per cercare di migliorare la precisione della triangolazione aerea e limitare il sistematismo degli scarti decidiamo quindi di aumentare il numero di GCP a tre. In questo caso vengono scelti due Ground Control Point nel confine sud del modello (marker 1 e 3) e uno nel confine nord (marker 12).

Gli scarti relativi ai marker estratti dopo l'ottimizzazione dei parametri di orientamento interno sono i seguenti:

Markers	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
1	0.027	0.028	0.039	0.035	0.275
3	-0.001	0.009	0.009	-0.081	0.323
12	0.022	-0.011	0.025	0.194	0.326
2	0.007	0.006	0.022	-0.041	0.244
4	-0.009	-0.021	0.009	-0.038	0.337
5	0.008	-0.004	0.023	-0.010	0.190
6	0.014	-0.009	0.009	-0.016	0.245
7	0.004	-0.014	0.016	0.069	0.328
8	0.001	-0.022	0.014	0.106	0.344
9	0.012	-0.011	0.022	0.108	0.270
10	0.006	-0.027	0.016	0.137	0.317
11	0.007	0.006	0.028	-0.041	0.244
13	0.029	-0.015	0.033	0.149	0.219

Tabella 4.10 Scarto Marker con appoggio minimale con 3 GCP

	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
Media CKP	0.006	-0.014	0.019	0.047	0.278
Minimo CKP	-0.011	-0.027	0.009	-0.041	0.190
Massimo CKP	0.029	0.006	0.033	0.149	0.344
sqm CKP	0.011	0.010	0.008	0.075	0.053

Tabella 4.11 Valori statistici con appoggio minimale con 3 GCP

Il grafico vettoriale degli scarti mostra che è avvenuta una correzione dell'errore sistematico in quando gli errori planimetrici non sono più tutti rivolti in direzione Nord-est.

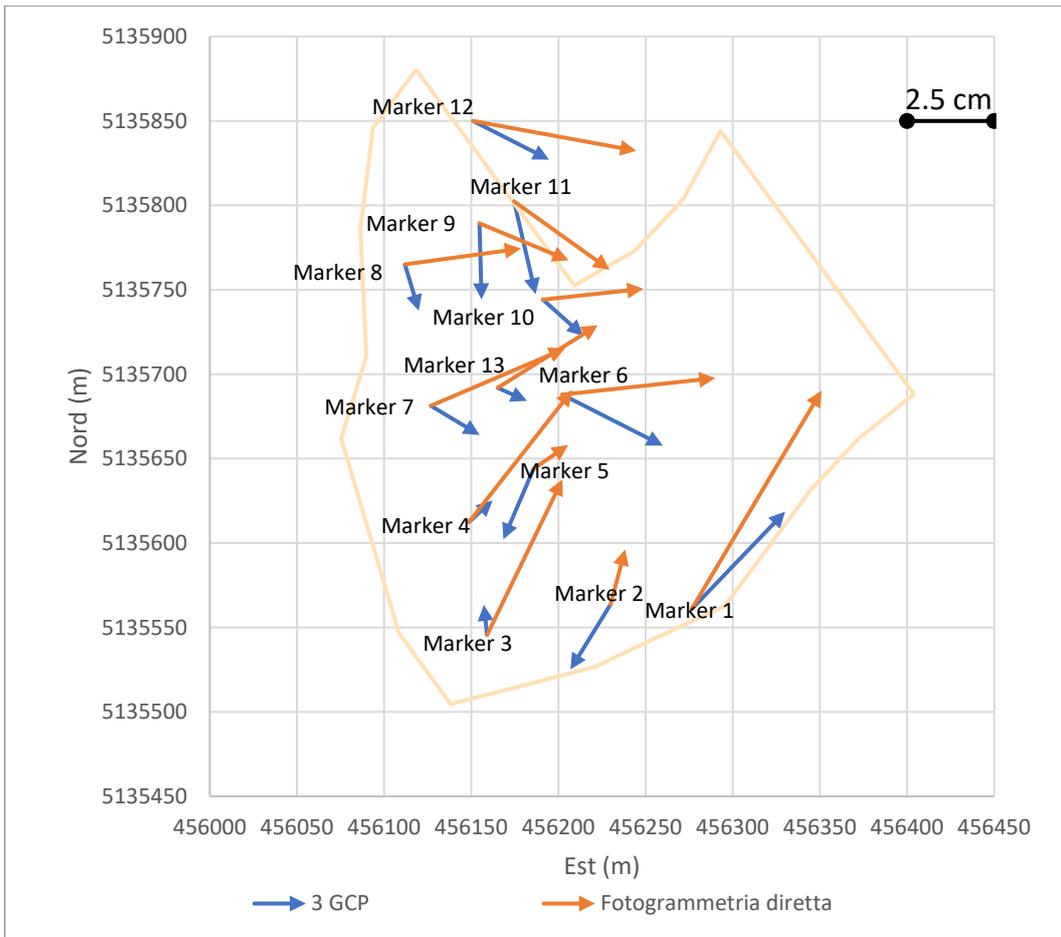


Figura 4.15 Errore planimetrico vettoriale, appoggio con 3 GCP

Inoltre, il valore in modulo degli scarti si è notevolmente ridotto passando da una media di 0.038 m a una di 0.02 m con un sqm di 0.009 m.

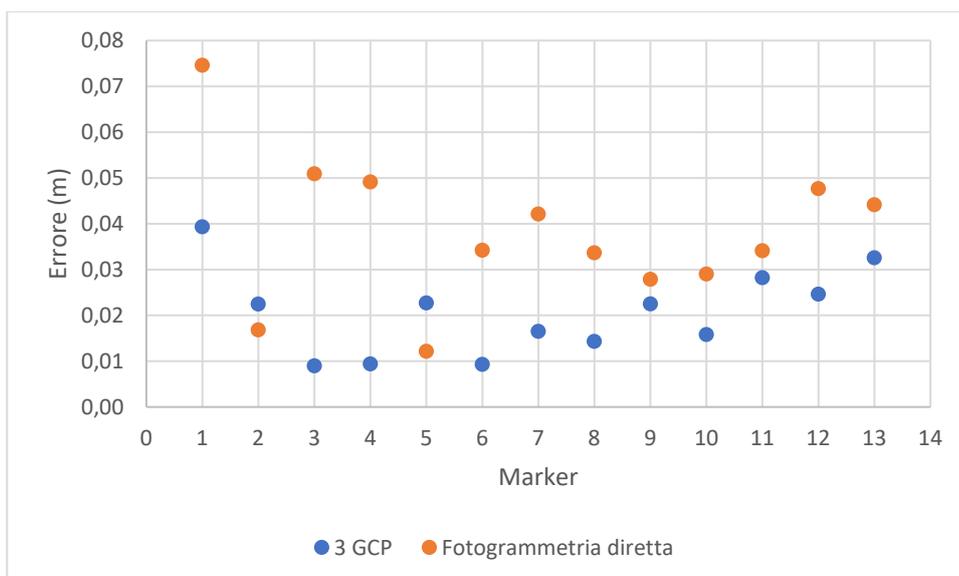


Figura 4.16 Scarti planimetrici con appoggio con 3 GCP

Anche lo sqm degli scarti altimetrici, seppur in minor quantità, si è ridotto passando da uno scarto quadratico medio di 0.101 m a uno di 0.075 m.

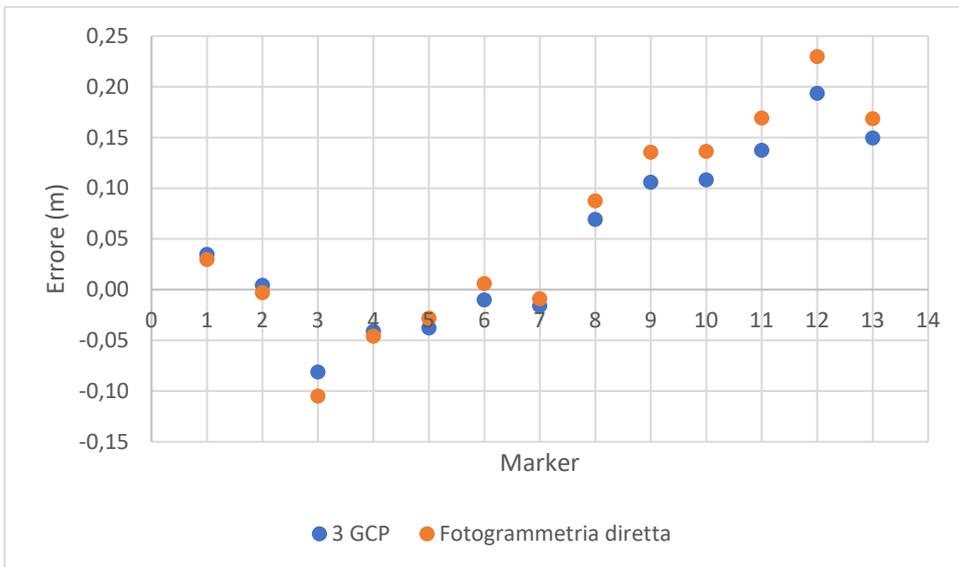


Figura 4.17 Scarto altimetrico con appoggio con 3 GCP

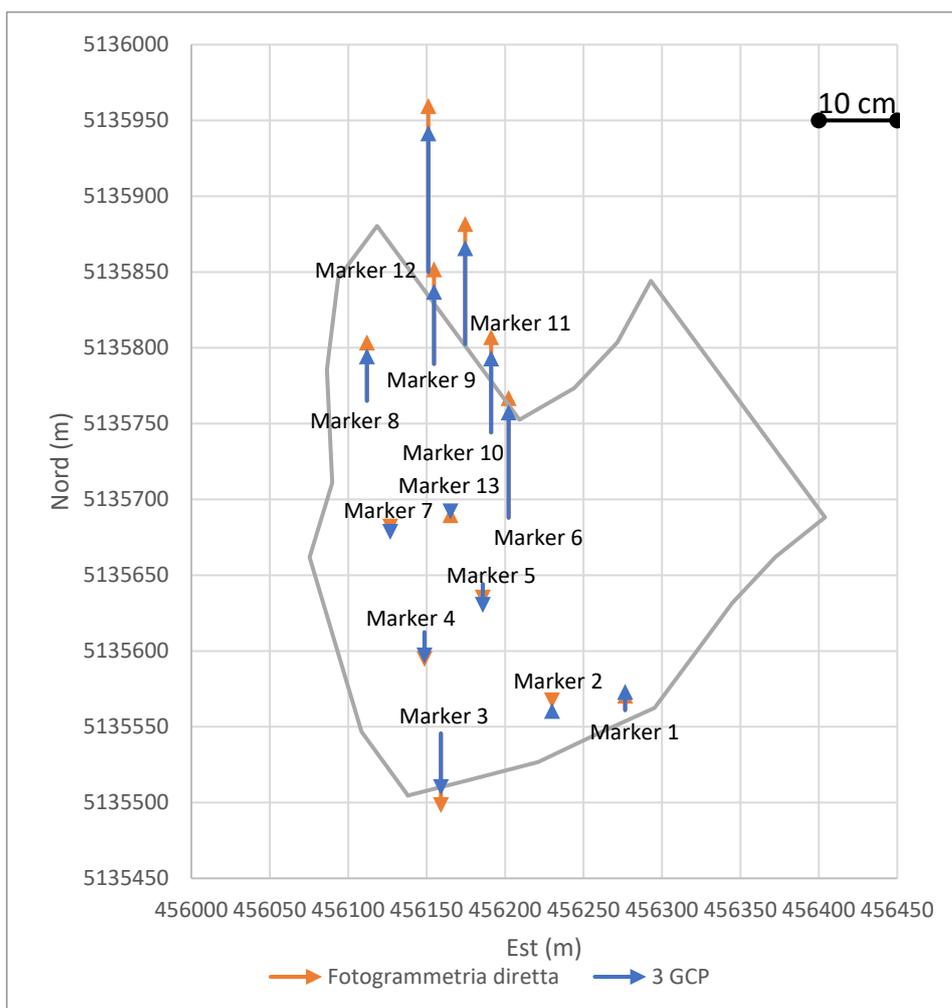


Figura 4.18 Scarto altimetrico con appoggio con 3 GCP

4.4 Uso di tutte le misure di appoggio

Il modello realizzato nel precedente paragrafo, in cui per l'ottimizzazione dei parametri sono stati utilizzate le coordinate di tutti i punti di presa e 3 GCP, verrà utilizzato per la creazione della nuvola di punti da utilizzare per valutare il volume di materiale che ha interessato la frana. Per valutare la correttezza di questo modello possiamo crearne uno nuovo in cui vengono utilizzati tutti i marker come Ground Control Point, oltre alle coordinate dei punti di presa, in maniera tale da rendere la compensazione ai minimi quadrati più solida. In questo modo non avremo un effettivo controllo sulla qualità del risultato, in quanto non sono presenti Control Point, ma il risultato risulta essere il più accurato possibile nel calcolo dei volumi ed anche nel calcolo dei parametri di orientamento interno ed esterno.

Una volta lanciato il comando *Optimize Cameras* sono stati ricavati i seguenti risultati:

Markers	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (pix)
1	0.027	0.031	0.041	0.003	0.275
2	-0.012	-0.017	0.021	-0.029	0.294
3	-0.005	0.009	0.010	-0.114	0.340
4	0.002	0.008	0.008	-0.073	0.247
5	-0.012	-0.017	0.021	-0.070	0.350
6	0.004	0.001	0.004	-0.042	0.192
7	0.008	-0.005	0.009	-0.046	0.247
8	-0.005	-0.006	0.008	0.035	0.330
9	-0.005	-0.014	0.015	0.070	0.350
10	0.008	-0.004	0.009	0.078	0.262
11	0.002	-0.018	0.018	0.104	0.323
12	0.016	-0.001	0.016	0.167	0.327
13	0.026	-0.010	0.027	0.120	0.216

Tabella 4.12 Scarti marker con appoggio completo

	Scarto Est (m)	Scarto Nord (m)	Scarto Planimetrico (m)	Scarto Altezza (m)	Scarto medio (m)	Scarto medio (pix)
Media GKP	0.004	-0.003	0.016	0.016	0.016	0.289
Minimo GKP	-0.012	-0.018	0.004	-0.114	0.004	0.192
Massimo GKP	0.027	0.031	0.041	0.167	0.041	0.350
sqm GKP	0.013	0.014	0.010	0.087	0.010	0.053

Tabella 4.13 Valori statistici con appoggio completo

Anche in questo caso gli errori planimetrici non presentano un errore sistematico in quanto non hanno una direzione e verso prevalente.

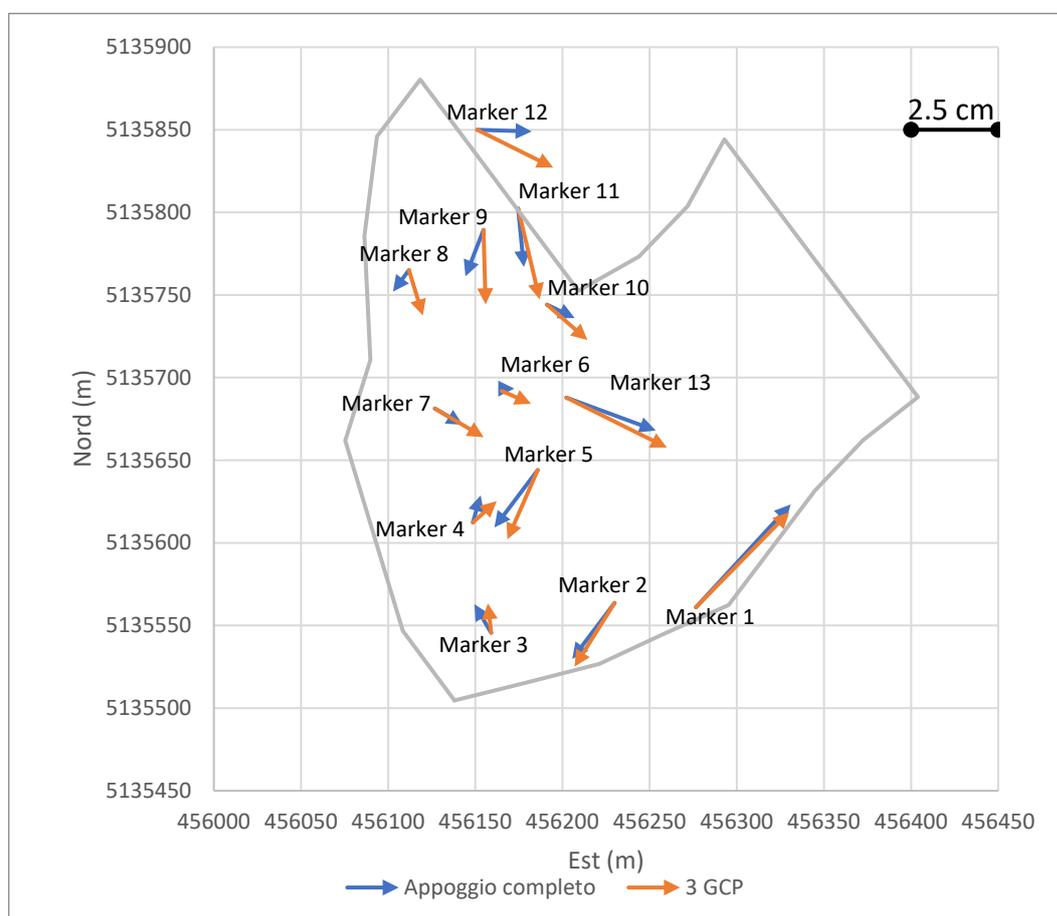


Figura 4.19 Scarto planimetrico vettoriale, appoggio completo

I moduli relativi agli errori planimetrici sono più piccoli rispetto al modello con 3 GCP e presentano valori che variano tra 4,1 cm e 0,4 cm con un errore medio di 1,5 cm.

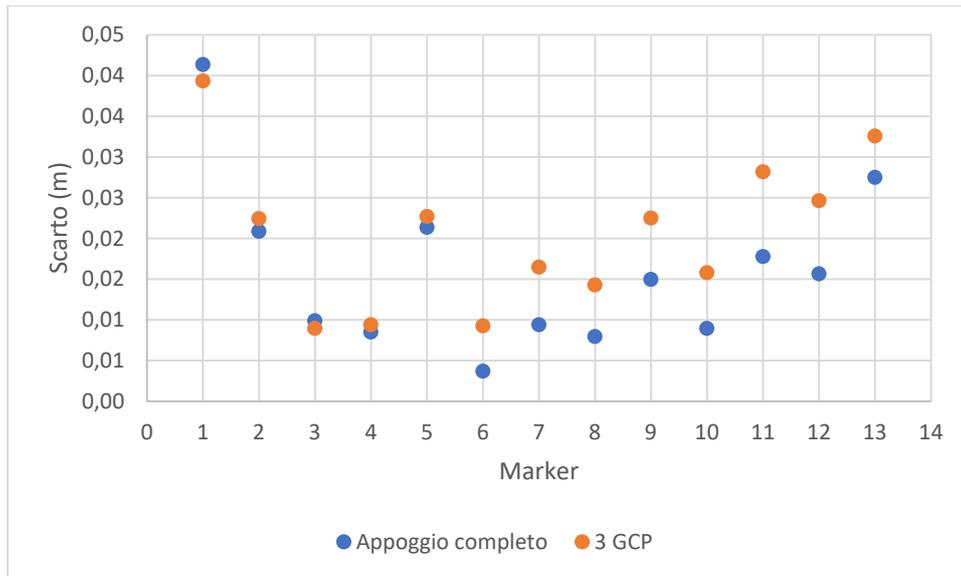


Figura 4.20 Scarto planimetrico, appoggio completo

Anche in questo caso gli scarti altimetrici non presentano un sistematismi. Si ha inoltre un miglioramento del valore medio degli scarti che risulta essere più vicina allo zero passando da 0.020 m a 0.016 m.

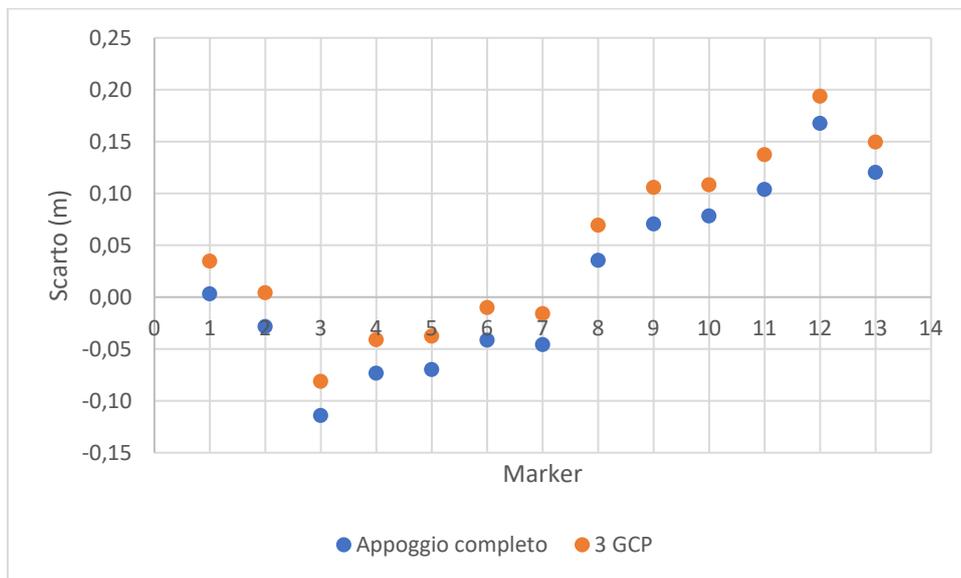


Figura 4.21 Scarto altimetrico, appoggio completo

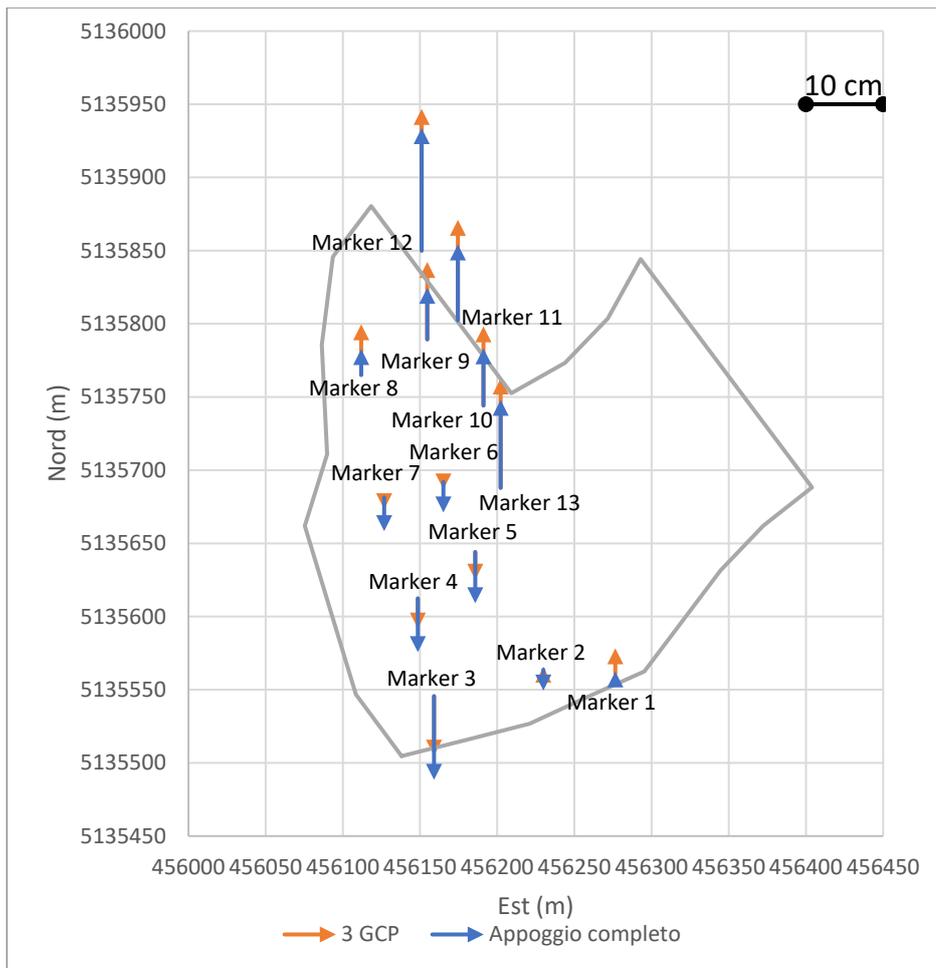


Figura 4.22 Scarto altimetrico, appoggio completo

Anche l'andamento degli scarti altimetrici presenta un leggero miglioramento. La media degli scarti, infatti, passa da 0.047 m, nel caso di appoggio con 3 GCP, a 0.016 m.

4.5 Il confronto dei terreni digitali

Per andare a valutare la differenza di volume occupato dalla nuvola di punti generata dall'appoggio con 3 GCP e quella generata dall'appoggio completo è stato utilizzato il software opensource CloudCompare.

Prima di esportare i punti dei due diversi modelli è stata effettuata un'operazione di pulizia delle nuvole in maniera tale da considerare solo gli elementi necessari per il confronto, ovvero il terreno. I punti della nuvola relativi ad alberi, edifici e vetture sono stati eliminati anche per evitare errori grossolani durante la fase di calcolo dei

volumi, infatti in corrispondenza di questi elementi si hanno variazioni repentine di quota che non sono ben rappresentate a causa del fatto che la camera ha scattato fotogrammi con prese nadirali.

Una volta inserite le nuvole di punti nel programma è possibile notare che queste si sovrappongono quasi perfettamente in planimetria mentre in altimetria abbiamo alcune zone in cui i punti della nuvola con appoggio con 3 GCP (in rosso) sono più in alto rispetto a quelli dell'appoggio completo (in blu) e altre zone in cui avviene il contrario. La maggior parte dei punti relativi alla nuvola con 3GCP risulta però essere più in alto rispetto a quella con appoggio completo.

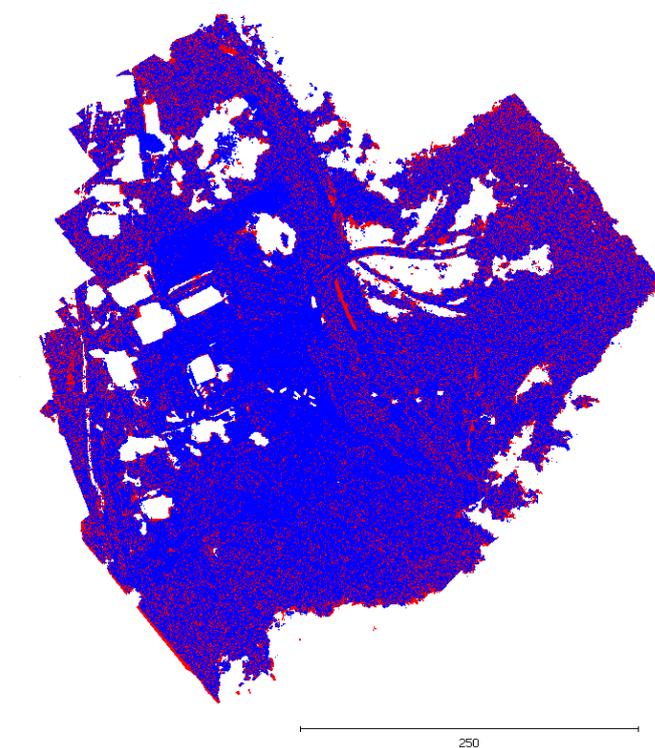


Figura 4.23 Sovrapposizione nuvola di punti appoggio con 3GCP (blu) e appoggio completo (rosso)

Lanciato il comando per il calcolo della differenza di volume tra le due diverse nuvole i risultati ottenuti sono i seguenti:

Differenza di volume	3112.329m ³
Superficie	114226.617 m ²
Corrispondenza nuvola di punti	95.3 %

Tabella 4.14 Confronto volume appoggio minimale - appoggio completo

Se dividiamo il volume per la superficie individuata otteniamo una differenza media di quota fra le due nuvole di circa 2,7 cm.

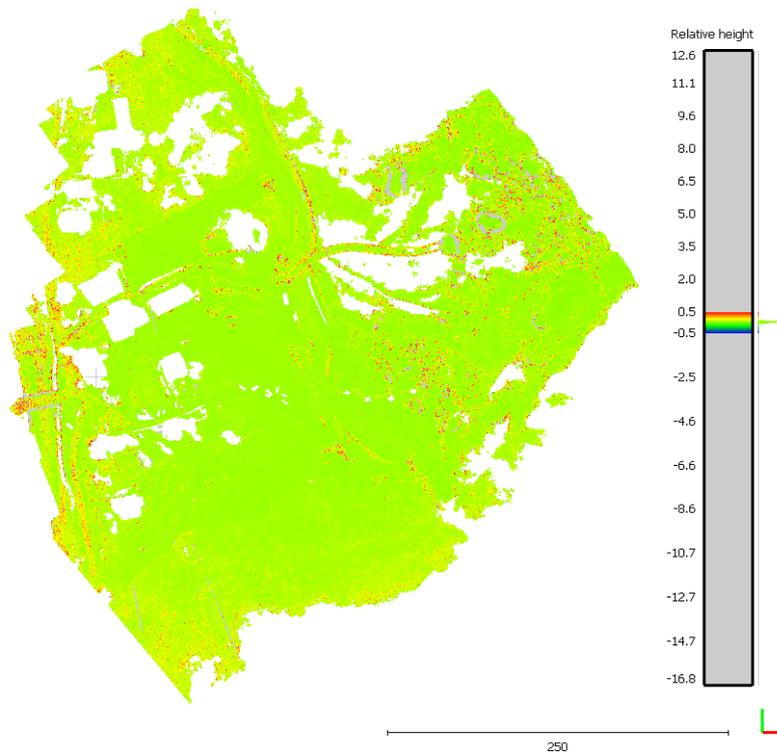


Figura 4.24 Distanza relativa tra appoggio minimale e appoggio completo

La nuvola di punti corrispondente all'appoggio con 3GCP risulta essere quindi in media più traslata verso l'alto rispetto a quella in cui si sono utilizzate tutte le misure di appoggio.

5 Conclusioni

A seguito della frana avvenuta nella località di Ponte Val Formazza in data 11/06/2019, l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI CNR) ha richiesto al Politecnico di Torino di effettuare in rilievo fotogrammetrico per valutare il volume di terreno da rimuovere per mettere in sicurezza il centro abitato e ripristinare il vallo paramassi.

Lo scopo della tesi è quello di valutare se è possibile ottenere risultati corretti utilizzando la sola fotogrammetria diretta. Questa tecnica permette di effettuare rilievi più rapidi in quanto non c'è la necessità di posizionare e rilevare i marker da utilizzare come GCP. Le equazioni di collinearità saranno in questo caso risolte utilizzando solo delle coordinate dei centri di presa dei fotogrammi.

Con la sola fotogrammetria diretta, a causa della presenza di errori sistematici in planimetria, si evidenzia un sistematismo di traslazione dell'intero blocco in direzione Nord-Est. L'ipotesi di utilizzare la sola fotogrammetria diretta è stata quindi scartata.

Si è scelto di procedere andando a utilizzare il minor numero possibile di GCP che permetta di eliminare gli errori sistematici e, in aggiunta, ridurre il valore medio degli scarti sia planimetrici che altimetrici.

Per valutare la bontà del modello generato con l'appoggio minimale rispetto a un modello ottenuto da un classico rilievo fotogrammetrico, in cui si utilizza un gran numero di punti di appoggio a terra, è stato creato un'ulteriore nuvola di punti in cui si sono utilizzati tutti i Ground Control Point e tutti i centri di presa dei fotogrammi. La differenza di volume ottenuta dal confronto tra i due modelli ci fornisce un valore pari a $3112.329 m^3$ distribuito su una superficie di $114226.617 m^2$. La differenza di quota media, ottenuta dividendo il volume per la superficie, è pari a $0,027 m$.

Per valutare il volume da rimuovere per la messa in sicurezza e il ripristino del vallo paramassi si esegue un confronto volumetrico tra la nuvola di punti generata dai fotogrammi scattati dopo la frana in data 04/07/2019 (sia con appoggio con 3 GCP

che con appoggio completo) e la nuvola di punti ottenuta da un rilievo effettuato in data 18/07/2018, prima che avvenisse la frana. In entrambi i casi sono state rimosse le abitazioni, gli alberi e i veicoli in maniera tale da considerare solo il terreno.

La porzione di territorio rilevata durante le due campagne di acquisizione, tuttavia, non è identica quindi per le parti mancanti nel rilievo del 18/07/2018 si è fatto un altro tipo di valutazione.

La differenza di volume di terreno è stata effettuata sia per il modello con appoggio minimale che per quello con appoggio completo. Sul programma CloudCompare è stata selezionata la nuvola di punti relativa al 2018 e si è generato un file raster interpolando in maniera tale da riempire i vuoti all'interno della nuvola. Questa operazione è necessaria in quanto sono presenti numerosi vuoti dovuti alla presenza di alberi che coprono il terreno e che sono stati successivamente sradicati durante la frana. L'interpolazione tiene conto delle caratteristiche geometriche del terreno adiacente ai vuoti presenti e cerca di ricostruire nel miglior modo possibile la geometria del territorio mancante.



Figura 5.1 Nuvola di punti 2018 prima e dopo l'interpolazione

Per la nuvola di punti relativa al 2019 invece non è stata eseguita nessuna interpolazione in quanto, anche in questo caso, i vuoti sono relativi a porzioni di territorio in cui sono presenti alberi che non devono essere considerati per il calcolo del volume di terreno.



Figura 5.2 Nuvole di punti relative all'appoggio completo (sinistra) e all'appoggio con 3 GCP (destra)

Quando il programma esegue il confronto per il calcolo del volume prende in considerazione solo le porzioni della nuvola di punti che sono in comune tra i due modelli, vediamo infatti in figura 5.3 che le aree relative agli alberi e alle vetture sono in bianco.

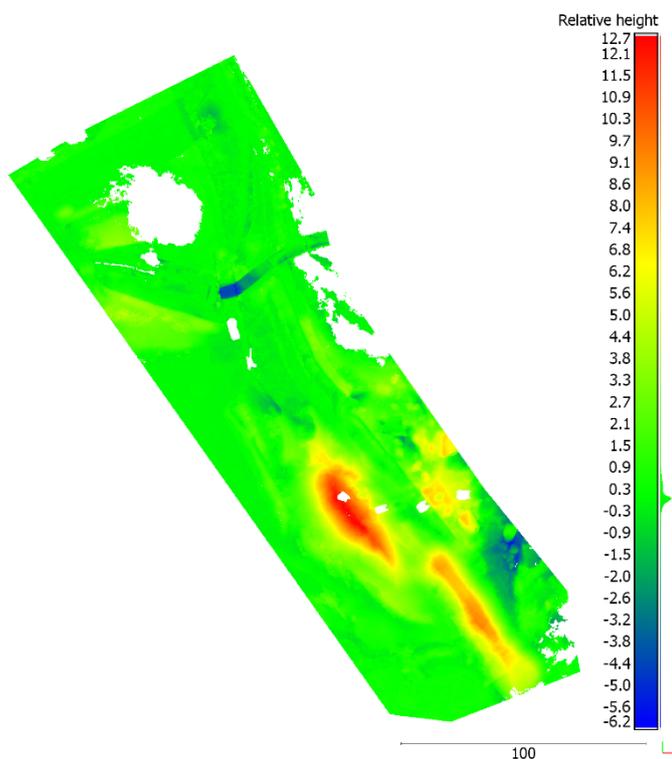


Figura 5.3 Differenza di quota relativa tra le nuvole di punti del 2018 e 2019 con appoggio completo

I volumi di terreno ottenuti dal confronto tra i modelli sono i seguenti:

	Appoggio completo 2019 - 2018	Appoggio con 3 GCP 2019 - 2018
Volume (m^3)	30188.799	30909.148
Area (m^2)	23666.749	23489.009
Differenza di quota media (m)	1.280	1.311

Tabella 5.1 Valori ottenuti dal confronto di volumi tra il 2018 e il 2019

La differenza di area presa in considerazione nei due diversi calcoli è dovuta al fatto che durante la pulizia della nuvola di punti alcuni elementi sono stati riconosciuti automaticamente dal software Metashape come alberi nel modello con appoggio con 3 GCP e come terreno nel modello con appoggio completo. Per valutare la differenza di quota media si è utilizzata la media tra le due aree considerate.

Sottraendo la differenza di quota media dei due modelli si ottiene un valore pari a $0.031 m$. Questo valore è simile a quello ottenuto dal confronto dei terreni digitali nel paragrafo 4.5 ovvero di $0.027 m$. Possiamo quindi affermare la differenza di quota fra le due nuvole di punti si mantiene pressoché costante in tutto il modello indipendentemente dall'area considerata.

La differenza di volume tra i due modelli è pari a $720.5 m^3$ ovvero al 2.4 %.

Per la porzione di terreno non in comune tra la nuvola di punti del 2018 e quella del 2019 si è deciso di procedere in un modo meno rigoroso. Dalla nuvola sono state ritagliate le zone dove si nota un accumulo di materiale e si sono generate due nuvole separate, una contenete i cumuli, l'altra contenente il terreno originario. La seconda nuvola è stata interpolata, riempiendo i vuoti dovuti all'eliminazione dei cumuli, in maniera tale da cercare di ricostruire l'andamento del terreno prima che avvenisse la frana. È stata quindi effettuata un confronto tra le due nuvole in maniera tale da individuare il volume dei cumuli. Il risultato ottenuto è di $155.231 m^3$.

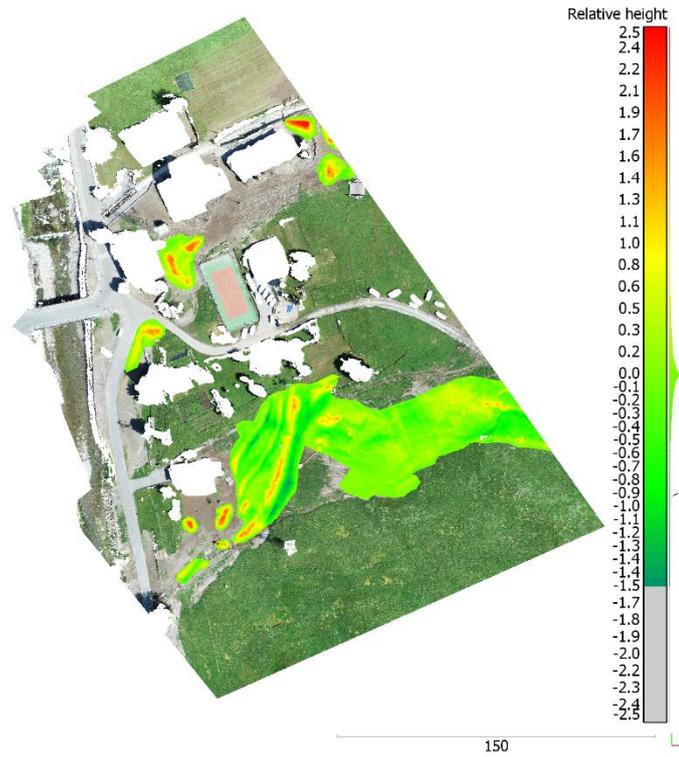


Figura 5.4 Differenza di quota tra la ricostruzione del terreno prima della frana e zone in cui si è accumulato il materiale

Il volume totale di terreno da andare a rimuovere per mettere in sicurezza l'abitato e ripristinare il vallo paramassi è di 30344 m^3 .

Indice delle figure

Figura 1.1 Geometria della presa fotografica	3
Figura 1.2 Presa con un solo fotogramma	3
Figura 1.3 Presa con due fotogrammi	4
Figura 1.4 Scala del modello al variare del valore della base di presa	4
Figura 1.5 Schema della macchina da presa	6
Figura 1.6 Matrice bidimensionale G.....	8
Figura 1.7 Parametri di orientamento interno	11
Figura 1.8 Parametri di orientamento esterno.....	12
Figura 1.9 Orientamento asimmetrico	14
Figura 1.10 Orientamento simmetrico	14
Figura 1.11 Riproduzione del modello in scala arbitraria	15
Figura 1.12 Distribuzione di Otto Von Gruber	16
Figura 1.13 Schematizzazione della geometria di presa	18
Figura 1.14 Proiezione del raggio omologo sui piani XZ e YZ.....	18
Figura 1.15 Rotazione primaria	19
Figura 1.16 Rotazione secondaria	20
Figura 1.17 Rotazione terziaria.....	20
Figura 1.18 Distorsione radiale.....	25
Figura 1.19 Andamento della distorsione.....	26
Figura 1.20 Immagine corretta, distorsione a barilotto, distorsione a cuscinetto ..	26
Figura 1.21 Curva di distorsione a barilotto	26
Figura 1.22 Curva di distorsione a cuscinetto.....	27
Figura 1.23 Andamento della distorsione.....	28
Figura 1.24 curva di distorsione	29
Figura 2.1 Nuvola di punti sparsa e nuvola di punti densa	33
Figura 2.2 Mesh e texture	33
Figura 2.3 DSM e DTM.....	34
Figura 2.4 Differenza tra foto e ortofoto	34
Figura 2.5 Parametri per la definizione della precisione fotogrammetrica.....	35
Figura 2.6 Esempi di modelli multirottore	39

Figura 2.7 Esempi di modelli ad ala fissa.....	40
Figura 2.8 Droni ibridi	40
Figura 2.9 Phantom 4 RTK.....	42
Figura 2.10 Schema di volo	46
Figura 2.11 Ricoprimento trasversale e laterale	46
Figura 2.12 Scala media del fotogramma.....	47
Figura 2.13 Base di presa	49
Figura 2.14 Area della zona rilevata.....	50
Figura 2.15 Effetto deriva	52
Figura 2.16 Posizione dell'antenna GPS, dell'IMU e della fotocamera.....	52
Figura 2.17 Effetto trascinamento	53
Figura 2.18 Perimetro del rilievo fotogrammetrico	54
Figura 3.1 Luogo della frana.....	57
Figura 3.2 Vista frontale della colata detritica	58
Figura 3.3 Zona di innesco della colata	59
Figura 3.4 Foto confronto del 2014	60
Figura 3.5 Individuazione area interessata	60
Figura 3.6 Lobo della colata che ha raggiunto la sommità del vallo.....	61
Figura 3.7 Cordolo simmetrico e appiattito tipico delle colate detritiche di tipo GCM	61
Figura 3.8 Lobo laterale arrestatosi alla sinistra idrografica del rio Rich.....	62
Figura 3.9 Cartografica dell'area d'invasione della colata detritica	62
Figura 3.10 Leica Viva GS14	63
Figura 3.11 Trimble Spectra Precision SP80	65
Figura 3.12 Andamento dei valori DOP nel periodo previsto per il volo RTK	68
Figura 3.13 DOPs reale ricevitore GS14	70
Figura 3.14 Visibilità reale satelliti drone.....	73
Figura 3.15 DOPs reale del ricevitore posto sul drone.....	73
Figura 3.16 Disposizione punti di appoggio a terra.....	78
Figura 3.17 Stelle dei raggi proiettivi	79
Figura 3.18 Distribuzione dei punti di appoggio a terra	80
Figura 3.19 Nuvola di punti sparsa.....	82

Figura 3.20 Marker	83
Figura 4.1 Scarti planimetrici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra	87
Figura 4.2 Scarti planimetrici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra	88
Figura 4.3 Scarti altimetrici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra	89
Figura 4.4 Errori altimetrici, fotogrammetria diretta con diversi lever arm	91
Figura 4.5 Errore planimetrico vettoriale, fotogrammetria diretta	92
Figura 4.6 Scarti planimetrici sui marker a terra con la fotogrammetria diretta	93
Figura 4.7 Scarti altimetrico sui marker a terra con la fotogrammetria diretta	94
Figura 4.8 Scarto planimetrico vettoriale con appoggio minimale GCP 5	96
Figura 4.9 Scarto planimetrico con appoggio minimale GCP 5	97
Figura 4.10 Scarto altimetrico con appoggio minimale GCP 5	97
Figura 4.11 Scarti planimetrici con appoggio minimale GCP 13	99
Figura 4.12 Scarto planimetrico con appoggio minimale GCP 13	100
Figura 4.13 Scarto altimetrico con appoggio minimale GCP 13	100
Figura 4.14 Scarto altimetrico con appoggio minimale GCP 13	101
Figura 4.15 Errore planimetrico vettoriale, appoggio con 3 GCP	103
Figura 4.16 Scarti planimetrici con appoggio con 3 GCP	103
Figura 4.17 Scarto altimetrico con appoggio con 3 GCP	104
Figura 4.18 Scarto altimetrico con appoggio con 3 GCP	104
Figura 4.19 Scarto planimetrico vettoriale, appoggio completo	106
Figura 4.20 Scarto planimetrico, appoggio completo	107
Figura 4.21 Scarto altimetrico, appoggio completo	107
Figura 4.22 Scarto altimetrico, appoggio completo	108
Figura 4.23 Sovrapposizione nuvola di punti appoggio con 3GCP (blu) e appoggio completo (rosso)	109
Figura 4.24 Distanza relativa tra appoggio minimale e appoggio completo	110
Figura 5.1 Nuvola di punti 2018 prima e dopo l'interpolazione	112
Figura 5.2 Nuvole di punti relative all'appoggio completo (sinistra) e all'appoggio con 3 GCP (destra)	113

Figura 5.3 Differenza di quota relativa tra le nuvole di punti del 2018 e 2019 con appoggio completo	113
Figura 5.4 Differenza di quota tra la ricostruzione del terreno prima della frana e zone in cui si è accumulato il materiale	115

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 Parametri di calibrazione caso 1	27
Tabella 1.2 Parametri di calibrazione caso 2	28
Tabella 2.1 Valutazione del Ground Sampling distance.....	36
Tabella 2.2 Caratteristiche del Phantom 4 RTK	45
Tabella 2.3 Rapporto scala dei fotogrammi, scala della carta	48
Tabella 2.4 Dati di input DJI Pilot.....	54
Tabella 2.5 Dati di output DJI Pilot	54
Tabella 3.1 Caratteristiche Leica Viva GS14.....	64
Tabella 3.2 Caratteristiche Trimble Spectra Precision SP80	66
Tabella 3.3 Dati input Trimble planning	67
Tabella 3.4 Numero di satelliti visibili.....	67
Tabella 3.5 File input RTKPOST	70
Tabella 3.6 Setting 1	71
Tabella 3.7 Setting 2 RTKPOST.....	71
Tabella 3.8 Output RTKPOST	72
Tabella 3.9 Position RTKLIB	72
Tabella 3.10 Posizione antenna Viva GS14	72
Tabella 3.11 File input RTKPOST	73
Tabella 3.12 Position RTKLIB	74
Tabella 3.13 Stralcio output RTKLIB per la posizione del centro di fase dell'antenna del drone.....	75
Tabella 3.14 GPST primo fotogramma.....	75
Tabella 3.15 Posizione e tempo GPS utilizzati per l'interpolazione dell'esempio precedente.....	76
Tabella 3.16 Posizione e tempo GPS primo fotogramma (coordinate geografiche).....	76
Tabella 3.17 Posizione cartografica dell'antenna primo fotogramma (coordinate piane).....	76
Tabella 3.18 Lever arm	77
Tabella 3.19 Posizione centro di presa primo fotogramma	77

Tabella 4.1 scarti sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra.....	86
Tabella 4.2 Scarti statistici sui GCP (in blu) e sui CKP (in rosso) del blocco con solo appoggio a terra	86
Tabella 4.3 Valori statistici, fotogrammetria diretta con diverse applicazioni di lever arm	90
Tabella 4.4 Scarti su tutti i marker a terra usati con CKP fotogrammetria diretta ..	91
Tabella 4.5 Valori statistici, fotogrammetria diretta con lever arm sommato	92
Tabella 4.6 Scarti Marker con appoggio minimale GCP 5.....	95
Tabella 4.7 Valori statistici con appoggio minimale GCP 5.....	96
Tabella 4.8 Scarti GCP (in blu) e CKP (in rosso) con appoggio minimale GCP 13	98
Tabella 4.9 Valori statistici con appoggio minimale GCP 13.....	98
Tabella 4.10 Scarto Marker con appoggio minimale con 3 GCP	102
Tabella 4.11 Valori statistici con appoggio minimale con 3 GCP	102
Tabella 4.12 Scarti marker con appoggio completo	105
Tabella 4.13 Valori statistici con appoggio completo.....	106
Tabella 4.14 Confronto volume appoggio minimale - appoggio completo	109
Tabella 5.1 Valori ottenuti dal confronto di volumi tra il 2018 e il 2019	114

Bibliografia

Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, Fotogrammetria, estensione online del corso "Misure, rilievo, progetto", Zanichelli, 2012

Manzino A., Lezioni di Topografia - Parte IV - Cenni di fotogrammetria: il sistema GPS. E-book, Otto, 2011

Massimo Micieli, Aerofotogrammetria con i droni. Mappatura e modellazione 3D del territorio con tecniche aerofotogrammetriche da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), Dario Flaccovio Editore, 2019

Lo Brutto M., Elementi di fotogrammetria digitale, Geomatica e modellazione digitale del terreno, Master universitario di II livello in Sistemi Informativi Territoriali, dispensa del corso, 2005

Valentina Boccanegra, Rilievo fotogrammetrico dinamico di ammassi granulari - indagine sperimentale, tesi di laurea, 2012

S. D'Amelio, M. Lo Brutto, Valutazione delle procedure di calibrazione di camere digitali non metriche per il rilievo di beni architettonici

Filiberto Chiabrando, Andrea Lingua e Marco Piras, Fotogrammetria diretta con RPAS Prime considerazioni e possibili sviluppi futuri, 2015

V. Casella, M. Franzini, G. Forlani, R. Galetto, A. Manzino, F. Radicioni, G. Sona, B. Villa, Initial results of the italian project on direct georeferencing in aerial photogrammetry

Arpa piemonte, Rapporto evento 11/06/2019 Colata detritica nel comune di Formazza

RTKLIB ver. 2.4.2, Manuale

A. Manzino, Corso di Geomatica, Principi di posizionamento GPS

Siti web consultati

www.3dmetrica.it

www.geomaticaeconservazione.it

www.nonsolotecnicafotografica.it

www.aprflytech.it

www.4mydrone.com

www.gizio.it

www.lastampa.it

www.navigationservices.agi.com/GNSSWeb/

www.gnssplanning.com