

**POLITECNICO DI TORINO**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



**Politecnico  
di Torino**

# **Droni e fotogrammetria per la ricostruzione batimetrica**

Torrente Orco, Comune di Montanaro (TO)

Relatore:  
Professore Andrea Maria Lingua

Candidato:  
Giulio Lissari

Correlatore:  
Alessandra Spadaro

*Anno Accademico 2023 - 2024*

# Riassunto

Fiumi e torrenti svolgono un ruolo di fondamentale importanza nei processi idraulici, geologici ed ecologici che modellano il territorio. Essi trasportano acqua, sedimenti e sostanze chimiche, alterando in maniera continuativa gli ambienti attraversati. La gestione dei corpi idrici superficiali, tanto quanto la progettazione di nuove opere, è sempre basata su rilievi geometrici che possono essere svolti in maniera tradizionale o mediante pratiche e tecnologie innovative, che semplificano notevolmente l'attività in campo, pur mantenendo accuratissime molto elevate. Una delle tecnologie maggiormente utilizzate ad oggi è quella della fotogrammetria da aereo o da aeromobile a pilotaggio remoto (APR), tali strumenti permettono acquisizioni di aree estese in tempi ridotti.

La fotogrammetria è una tecnica che, sfruttando la visione stereoscopica, permette la ricostruzione di modelli tridimensionali di oggetti e territori partendo da singoli fotogrammi. Questa pratica trova però degli ostacoli quando vi è la necessità di ricostruire superfici batimetriche di mari, torrenti e laghi a causa dell'effetto di rifrazione provocato dall'interfaccia tra aria e acqua.

Il lavoro svolto prevede l'applicazione di algoritmi per la determinazione della batimetria a partire da rilievi fotogrammetrici effettuati lungo un'asta fluviale. L'area di indagine si concentra su un tratto del Torrente Orco nei pressi del Comune di Montanaro (TO) per una lunghezza complessiva di 130 metri. Il lavoro ha previsto l'acquisizione di numerosi fotogrammi mediante aeromobile a pilotaggio remoto (APR) e la successiva elaborazione dei dati. Nello specifico, i singoli fotogrammi sono stati elaborati mediante tecniche di Structure from Motion (SfM) che hanno permesso il passaggio da modelli bidimensionali a modelli 3D, nuvola di punti densa, Mesh e Texture, Tiled model, modello di elevazione del terreno e della superficie (DTM e DSM) e ortomosaico.

Tuttavia, la principale problematica da risolvere era quella di determinare la mappatura batimetrica dell'alveo, per tale motivo sono state acquisite diverse sezioni batimetriche mediante l'ausilio di un ricevitore GPS/GNSS da usare successivamente con sezioni di controllo, oltre a numerosi punti di battigia e qualche punto di pelo libero. In generale, la fotogrammetria, a causa del fenomeno della rifrazione che si presenta nell'interfaccia aria-acqua, tende a sottostimare la reale profondità dell'acqua. A tal fine è stato applicato un algoritmo che permette la correzione del dato e consente così di determinare una mappatura del fondale il più verosimile possibile.

Infine, è stato dedicato un capitolo all'analisi di approcci alternativi, prettamente basati su tecniche machine learning, finalizzati alla correzione dei dati batimetrici.

Parole chiave: APR; Structure-from-Motion (SfM); correzione batimetrica.

# Abstract

Rivers and streams play a fundamental role in hydraulic, geological, and ecological processes that shape the landscape. They transport water, sediments, and chemicals, continuously altering the environments they pass through. The management of surface water bodies, as well as the design of new structures, is always based on geometric surveys that can be conducted in traditional ways or through innovative practices and technologies, which greatly simplify field activities while maintaining very high accuracies. One of the most used technologies today is aerial or unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, which allows for rapid acquisition of large areas. Photogrammetry is a technique that, by exploiting stereoscopic vision, allows for the reconstruction of three-dimensional models of objects and territories from individual photographs. However, this practice encounters obstacles when there is a need to reconstruct bathymetric surfaces of seas, streams, and lakes due to the refraction effect caused by the interface between air and water.

The work involves the application of algorithms for bathymetric determination based on photogrammetric surveys conducted along a river reach. The study area focuses on a section of the Orco Torrent near the city of Montanaro (TO) for a total length of 120 meters. The work involved the acquisition of numerous photographs using unmanned aerial vehicle (UAV) and subsequent data processing. Specifically, individual photographs were processed using Structure from Motion (SfM) techniques, which allowed the transition from two-dimensional models to 3D models, dense point clouds, Mesh and Texture, Tiled model, terrain and surface elevation model (DTM and DSM), and orthomosaic.

However, the main challenge was to determine the bathymetric mapping of the riverbed; for this reason, several bathymetric sections were acquired using a GNSS receiver to be used later with control sections, in addition to numerous shoreline points and some free water points. In general, photogrammetry tends to underestimate the actual water depth due to the refraction phenomenon at the air-water interface. To address this, an algorithm was applied to correct the data and thus determine a seabed mapping as accurate as possible.

Finally, a chapter was dedicated to the analysis of alternative approaches, mainly based on machine learning techniques, aimed at correcting bathymetric data.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); Structure-from-Motion (SfM); bathymetric correction.

# Sommario

Riassunto .....	2
Abstract .....	4
Elenco degli acronimi .....	7
1 Introduzione .....	9
1.1 Descrizione e finalità dell'attività .....	10
1.2 Inquadramento territoriale del sito .....	12
1.3 Flusso di lavoro utilizzato .....	14
2. Analisi delle tecniche per il rilievo batimetrico .....	16
2.1 Ricevitore GNSS .....	16
2.2 LiDAR aereo.....	19
2.2.1 LiDAR Batimetrico.....	22
2.3 Fotogrammetria e aerofotogrammetria .....	23
2.4 Ecoscandaglio SBEAM .....	26
2.5 Ecoscandaglio MBEAM.....	29
3. Rilievo fluviale con drone .....	32
3.1 Fotogrammetria e obiettivi .....	32
3.2 Analisi del fenomeno della rifrazione .....	33
3.3 Strumentazione.....	35
3.4 Pianificazione del volo .....	41
3.5 Materializzazione GCP e CP con ricevitore GPS/GNSS.....	46
3.6 Esecuzione volo pianificato.....	50
3.7 Rilievo di punti con ricevitore GPS/GNSS.....	52
3.7.1 Punti di battigia.....	53
3.7.2 Punti di sezione.....	55
3.7.3 Punti di pelo libero. ....	57
4 Elaborazione dei dati, analisi ed esportazione .....	59
4.1 Processo SfM con software Metashape.....	59

4.1.1	Analisi preliminare del dato acquisito .....	60
4.1.2	Allineamento .....	62
4.1.3	Inserimento GCP e CP .....	65
4.1.4	Generazione dense cloud .....	66
4.1.5	Generazione DSM e DTM .....	70
4.1.6	Generazione ortomosaico .....	72
4.2	Generazione risultati finali.....	74
5	Rilievo batimetrico con fotogrammetria multi-immagine .....	76
5.1	Principi del metodo.....	77
5.2	Preparazione dei dati di input.....	81
5.2.1	Importazione dei file e delimitazione area di interesse sul software open source QGis	82
5.2.2	Interpolazione superficie di pelo libero.....	84
5.2.3	Sottrazione tra raster IDW e DTM ed estrazione dei punti sommersi.....	86
5.2.4	Da raster a Shapefile puntuale .....	89
5.3	Workflow algoritmo .....	90
5.4	Analisi dei risultati.....	95
5.5	Review algoritmi di machine learning per la batimetria e conclusioni finali .....	100
5.5.1	Shallow water bathymetry mapping from UAV imagery based on machine learning.	101
6	Conclusioni finali .....	106
	Bibliografia .....	108
	Indice delle figure.....	110
	Indice delle tabelle .....	113
	Ringraziamenti.....	114

## Elenco degli acronimi

APR	Aeromobile a Pilotaggio Remoto
SAPR	Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
SfM	Structure from Motion
DTM	Digital Terrain Model
DSM	Digital Surface Model
RTK	Real Time Kinematic
PP	Post Processing
LiDAR	Light Detection And Ranging
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GSD	Ground Sampling Distance
NRTK	Network Real Time Kinematic
GCP	Ground Control Points
CP	Check Points
IDW	Inverse Distance Weighting
RMSE	Root Mean Squared Error
SVR	Support Vector Regression
FOV	Field Of View
EPSG	European Petroleum Survey Group



# 1 Introduzione

I droni, noti anche come aeromobili a pilotaggio remoto (APR), complici i costi in notevole calo, sono diventati strumenti sempre più utilizzati nei rilievi topografici e in molte altre applicazioni legate all'ingegneria civile e ambientale. Tale crescita è apprezzabile nel grafico in Figura 1.1, che rappresenta la dimensione del mercato globale legata al mondo dei droni commerciali.

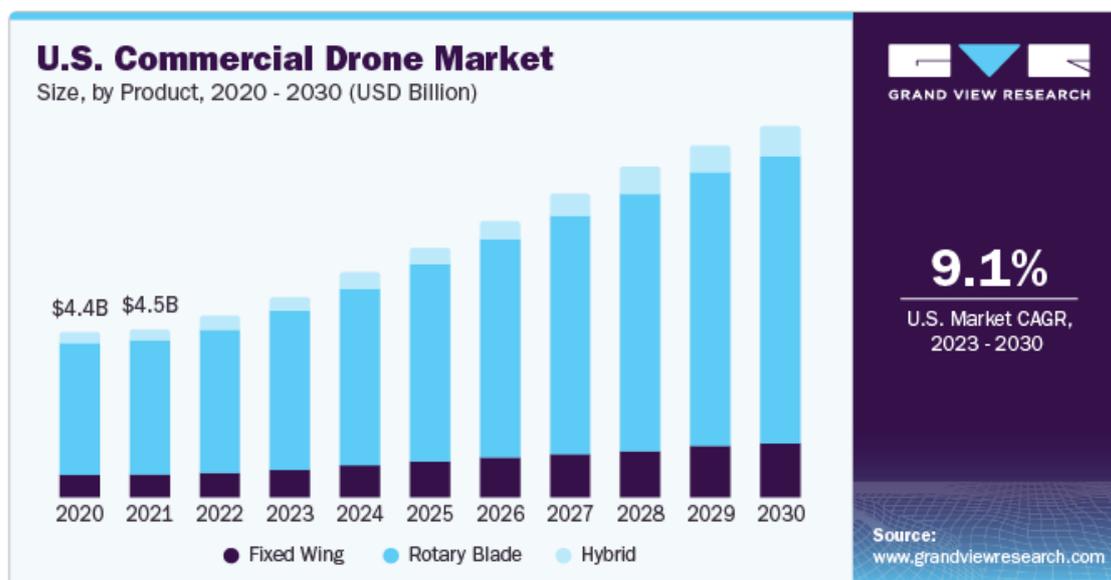


Figura 1.1: andamento dimensione mercato globale dei droni

Questi dispositivi permettono di rilevare aree anche molto estese mantenendo un'elevata accuratezza del dato. Di seguito sono riportati alcuni dei principali usi dei droni nei rilievi:

- I. Topografici: Gli APR possono essere utilizzati per generare modelli digitali del terreno (DTM) ad alta risoluzione. Grazie ai processi fotogrammetrici possono, mediante l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione, generare cartografie di elevato dettaglio.
- II. Monitoraggio di grandi aree: Gli APR possono coprire rapidamente grandi estensioni di terreno, il che li rende ideali per il monitoraggio di progetti di costruzione, sviluppo urbano, siti industriali, agricoltura e foreste.
- III. Ispezioni edili: L'uso degli APR per ispezionare edifici, ponti, torri e altre infrastrutture può ridurre il rischio per gli operatori umani e consentire l'accesso a zone difficilmente raggiungibili oltre alla possibilità di effettuare studi approfonditi riguardo all'analisi del degrado.

- IV. Rilevamento di cambiamenti ambientali: Gli APR possono essere utilizzati per monitorare cambiamenti ambientali, come erosione costiera, deforestazione, inondazioni e incendi anche mediante l'ausilio di algoritmi di change detection.
- V. Supporto alla pianificazione urbana: Gli APR possono essere utilizzati per raccogliere dati sulle aree urbane, compresi i dettagli sulle infrastrutture esistenti, la topografia e l'uso del suolo, per supportare la pianificazione urbana e la progettazione di nuovi interventi.
- VI. Sorvolo di siti archeologici: Gli APR possono essere utilizzati per catturare immagini aeree di siti archeologici e rilevare strutture semisepolte o altre caratteristiche storiche senza disturbare il terreno.
- VII. Agricoltura di precisione: Gli APR, in taluni casi equipaggiati da camere multispettrali, possono raccogliere dati sulle aree agricole, come la mappatura dell'umidità del suolo, l'ispezione delle colture e la distribuzione di fertilizzanti o pesticidi.
- VIII. Calamità naturali: Gli APR trovano ampio utilizzo per la ricognizione di aree colpite da fenomeni sismici, incendi o alluvioni. In tale occasione vengono utilizzati per individuare le criticità e determinare le priorità di intervento.

Se l'APR non è utilizzato per il solo scopo di ricognizione, è di fondamentale importanza l'utilizzo di software atti all'elaborazione Structure from Motion (SfM) dei dati acquisiti. A tal proposito, tra i più diffusi possiamo trovare Agisoft Metashape, 3DF Zephyr e Pix4D. Questi software richiedono tuttavia di essere utilizzati su work station con prestazioni medio elevate pena tempi di elaborazione molto prolungati.

L'uso degli APR nei rilievi offre una maggiore efficienza, precisione e sicurezza rispetto a molti metodi tradizionali, ma in taluni contesti, come quello da me analizzato, si riscontrano limiti importanti dovuti alla difficoltà di ricostruire superfici sommerse da battenti idrici.

### 1.1 Descrizione e finalità dell'attività

L'obiettivo principale del progetto è stato quello di determinare l'andamento batimetrico di un torrente, a partire da sole immagini aeree acquisite da APR.

L'attività svolta ha previsto l'individuazione di un sito ove fosse presente un copro idrico superficiale che fosse idoneo all'applicazione di un algoritmo per la correzione del dato batimetrico derivante da fotogrammetria. A tal proposito, l'attività di rilievo in campo è stata effettuata dal sottoscritto con l'ausilio di un amico e collega ingegnere. Per quanto riguarda

l'attività di elaborazione, è anch'essa stata svolta con l'ausilio di alcuni colleghi e con il supporto tecnologico dell'azienda ospitante Corintea Soc. Coop.

La prima fase ha previsto la realizzazione di un rilievo fotogrammetrico da APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto), equipaggiato di camera RGB, di un tratto di corpo idrico superficiale. Successivamente a questa prima fase di acquisizione, l'intero dataset è stato scrupolosamente analizzato ed elaborato mediante tecnica SfM con i criteri più elevati del software Agisoft Metashape. Infine, i dati di output del processo sono stati preparati e modificati mediante diversi software al fine di poter essere compatibili con quelli di *input* dell'algoritmo utilizzato. L'implementazione nell'algoritmo finale ha prodotto le correzioni necessarie per poter determinare le quote reali dei punti appartenenti al fondo dell'alveo.

La finalità è stata quindi quella di testare un flusso di lavoro che potesse permettere la determinazione della batimetria di un torrente, sotto alcune specifiche condizioni, mediante fotogrammetria da APR e senza l'utilizzo di altre tecnologie più complesse e dispendiose sia in termini di costi che di tempi.

## 1.2 Inquadramento territoriale del sito

Il sito oggetto di test è stato scelto in funzione di differenti parametri, alcuni dei quali dettati dalle norme che regolano il volo con APR, altri dettati da esigenze tecnico-logistiche ed altri ancora dai prerequisiti delle tecniche di correzione dei dati batimetrici generati da fotogrammetria.

In breve, l'area oggetto di studio doveva rispettare i criteri di seguito riportati:

- un corpo idrico facilmente raggiungibile con l'attrezzatura necessaria all'esecuzione del rilievo (APR, Ricevitore GPS/GNSS, palina, target, computer);
- un corpo idrico con un tirante che non superasse i ~ 100 cm in modo tale da potervi accedere agevolmente per la materializzazione delle sezioni con ricevitore GPS/GNSS;
- un corpo idrico con acqua poco increspata e abbastanza trasparente da poter vedere il fondale;
- non essere soggetta a norme di restrizione al volo con APR tali da compromettere la missione.

Al fine di soddisfare le suddette esigenze è stato scelto il torrente Orco. L'Orco è un torrente del Piemonte affluente a nord-ovest del Po, che scorre per circa 90 km prima nella valle omonima e poi nel Canavese occidentale.

Nasce da piccole sorgenti, tra la Punta Leynir e la Punta Rosset, viene alimentato dalle acque del lago Rosset (2703 m s.l.m.) e del lago Leytà (2699 m s.l.m.), dalle nevi del versante piemontese del massiccio del Gran Paradiso (Denti del Nivolet-Costa di Mentà), dai rii della costiera della Basei (ghiacciaio omonimo) e da quelli del settore che va dalla Cima d'Oin alla Punta di Galisia. Viene quasi subito sbarrato da dighe formando i bacini idroelettrici Agnel e Serrù. Giunge a Ceresole Reale dove, sbarrato da un'imponente diga della allora municipalizzata torinese A.E.M. Torino, forma il Lago di Ceresole.

Subito a valle dello sbarramento si incassa raggiungendo in breve il centro di Noasca e incrementando progressivamente la sua portata grazie a vari contributi di affluenti provenienti per gran parte dalla sinistra idrografica. Proseguendo, il torrente bagna i centri di Locana e Sparone sino a giungere a Pont Canavese dove riceve il Soana, suo principale affluente di sinistra. Accresciuto nella portata dall'affluente raggiunge in breve la cittadina di Cuorgnè dove si allarga notevolmente in ampi ghiaioni ricevendo, ancora da sinistra, l'apporto idrico del Piova. Poco più a valle, ormai entrato nella pianura canavesana, raccoglie in destra

idrografica le acque provenienti dal Monte Soglio e dalla Val Gallenca. Viene quindi scavalcato dalla ex S.S. 565 di Castellamonte nei pressi di Rivarolo Canavese; superata la confluenza con il torrente Malesina prosegue con un ampio letto ciottoloso che in breve viene sovrappassato da due autostrade, la A5 e la A4. Sfocia infine nel Po presso Chivasso a quota 177 m s.l.m. In Figura 1.2 è rappresentato l'andamento planimetrico del torrente Orco a differente scala di rappresentazione. Nello specifico, il rilievo è stato realizzato circa 5 chilometri a monte della confluenza con il fiume Po, proprio nel tratto compreso tra i due attraversamenti autostradali, di seguito vengono riportate le coordinate baricentriche all'area di rilievo:

EST: 403487,18 [m] NORD: 5006868,71 [m] (EPSG: 32632)



Figura 1.2, inquadramento territoriale torrente Orco.

## 1.3 Flusso di lavoro utilizzato

L'elaborato realizzato segue il più fedelmente possibile il reale andamento cronologico delle attività in campo e in ufficio, che sono state seguite per l'ottenimento del risultato finale.

Il primo capitolo è dedicato ad una breve introduzione sugli approcci utilizzati e sulle motivazioni che hanno portato alla scelta del sito pilota, ove sono stati realizzati i rilievi.

Il secondo capitolo è prettamente incentrato sulle differenti metodologie che vengono implementate per effettuare i rilievi batimetrici. Qui vengono analizzati i pro e i contro di ogni tecnica cercando di evidenziare quale sia il contesto ideale per ciascuna tecnologia indagata. Verranno inoltre definite le estensioni massime e minime ideali per ogni tecnica. La fotogrammetria da drone verrà poi ripresa e integrate nel capitolo successivo.

Il terzo capitolo è integralmente dedicato alla fotogrammetria da APR, qui vengono esplicitate le basi teoriche tramite le quali è possibile passare da singoli fotogrammi bidimensionali, scattati con le regole di presa fotogrammetrica, fino a modelli tridimensionali complessi. Verranno analizzati in dettaglio i problemi generati dal fenomeno della rifrazione che si verifica all'interfaccia aria-acqua e le principali problematiche che vengono riscontrate nella mappatura del terreno sotto il pelo libero. Inoltre, una parte del capitolo, è dedicata alla descrizione passo-passo dell'attività di rilievo in campo, partendo dal posizionamento sul terreno dei target di *ground control point* (GCP) e di *check point* (CP) e della loro georeferenziazione mediante ricevitore GPS/GNSS. Successivamente verranno descritte le attività di rilievo fotogrammetrico da APR mediante volo pianificato e le accortezze utilizzate al fine di ottenere fotogrammi conformi alle esigenze.

Il quarto capitolo è integralmente dedicato all'elaborazione SfM dei dati mediante il software Agisoft Metashape tramite cui è possibile passare dai singoli fotogrammi alla nuvola di punti sparsa, alla nuvola di punti densa, alla generazione del DTM e del DSM ed infine all'ortomosaico. L'ultima parte del capitolo tratterà la generazione e l'esportazione dei file di output dal software Agisoft Metashape.

Nel quinto capitolo viene analizzato in dettaglio l'algoritmo di correzione batimetrica impiegato, partendo dai principi del metodo, definendo i file in *input* necessari ed analizzando i risultati generati come *output*. L'ultimo paragrafo è invece dedicato ad un'analisi degli articoli scientifici che trattano metodologie di correzione batimetrica di dati fotogrammetrici mediante tecniche di *machine learning*.

Il sesto e ultimo capitolo è integralmente dedicato alle conclusioni finali dell'intero elaborato.

## 2. Analisi delle tecniche per il rilievo batimetrico

La batimetria è una branca della cartografia che si occupa della misura delle profondità, della rappresentazione grafica e dello studio morfologico dei fondali marini, fluviali e lacustri. È alla base della produzione di carte batimetriche nelle quali i fondali marini vengono rappresentati, in genere anche grazie al tracciamento delle isobate.

Il rilievo batimetrico è possibile realizzarlo mediante diversi strumenti e metodologie che si differenziano per il numero di punti rilevati, per l'accuratezza con cui gli stessi vengono acquisiti e infine per la tecnica utilizzata. Questa tipologia di rilievi è effettuata in differenti contesti, tra cui gli oceani, i laghi, i fiumi e i torrenti. Una delle principali problematiche riscontrate è quella di definire una mappatura batimetrica a partire da sensori posti a quota maggiore rispetto a quella di pelo libero ciò a causa della presenza dell'interfaccia aria-acqua. Di seguito verranno descritte alcune tra le metodologie di rilievo prevalentemente impiegate per la realizzazione della mappatura batimetrica.

### 2.1 Ricevitore GNSS

Il ricevitore GPS/GNSS (Figura 2.1) è uno strumento in grado definire, con elevata precisione, le coordinate di uno specifico punto mediante la ricezione di segnali provenienti da satelliti artificiali. Con l'acronimo GNSS si fa riferimento al *Global Navigation Satellite System*, ovvero ad un sistema che, integrando informazioni sia satellitari che terrestri, offre un servizio di posizionamento spaziale su scala globale.



Figura 2.1, esempio ricevitore GPS/GNSS

Nel caso specifico di rilievi batimetrici, l'utilizzo del ricevitore GNSS è strettamente condizionato al tirante idrico presente e all'accessibilità dell'area. Questo strumento può essere utilizzato in condizioni di acque calme, fondali con capacità portante sufficiente ad evitare lo sprofondamento dell'operatore e tiranti idrici inferiori al metro.

Di seguito vengono riportati i principali sistemi di posizionamento GNSS utilizzati (Figura 2.2):

I. NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System*)

Sistema creato dal Dipartimento della difesa degli Stati Uniti nel 1973, inizialmente utilizzato per soli scopi militari e successivamente utilizzato in molteplici altri campi. Ad oggi il sistema conta una costellazione di 24 satelliti orbitanti ad una quota di circa 20.000 km, con periodo orbitale di 12 ore.

II. GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*)

Sistema creato dall'agenzia spaziale federale Russa nel 1966. Ad oggi il sistema è composto di 31 satelliti Uragan di cui 24 operativi e i rimanenti di scorta.

III. GALILEO

Sistema di posizionamento e navigazione satellitare sviluppato in Europa come alternativa al NAVSTAR GPS entrato in servizio nel dicembre del 2016. Ad oggi il sistema è costituito da 30 satelliti artificiali, di cui 27 operativi e 3 di scorta, orbitanti ad una quota di circa 23.000 km.

IV. BEIDOU

Sistema di posizionamento satellitare sviluppato dalla Repubblica Popolare Cinese composto da tre costellazioni separate la prima delle quali entrata in operatività dal 2000

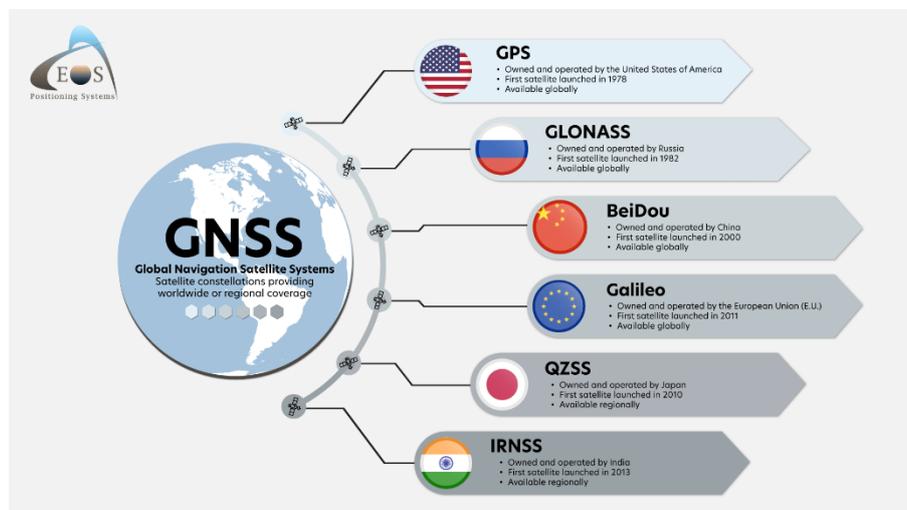


Figura 2.2, Schema costellazioni GNSS

Il sistema GNSS nel suo complesso è composto da tre differenti segmenti:

- segmento di controllo: identificato da basi a terra che ricevono segnali da satelliti e inviano dati e comandi;
- segmento spaziale: identificato dalle costellazioni artificiali orbitanti;
- segmento utente: identificato dai dispositivi che ricevono comunicazioni dai satelliti.

Il funzionamento dell'insieme dei tre segmenti si basa sullo scambio di pacchetti di dati tra i segmenti spaziali, ovvero quelli in orbita attorno alla terra, e i segmenti utente, ovvero quelli dotati di ricevitore. Il satellite invia un segnale contenente la propria posizione e l'ora di trasmissione del pacchetto di dati, mentre il ricevitore confronta il tempo del dato trasmesso con quello misurato dal proprio orologio interno, calcolando così il tempo impiegato dal segnale per arrivare dal satellite. Una volta nota la posizione dei satelliti ogni segmento utente calcola la propria posizione tramite un procedimento matematico di triangolazione che richiede, per essere affidabile, che il ricevitore rilevi almeno quattro satelliti. Satelliti differenti possono effettuare numerose misure contemporaneamente e questo permette al sistema di ricavare il posizionamento in tempo reale dell'oggetto in movimento dotato di ricevitore.

Al fine di effettuare un rilievo topografico o batimetrico è possibile utilizzare differenti metodi di posizionamento tra cui:

- Posizionamento assoluto, si esegue con un solo ricevitore basandosi soltanto sui segnali inviati dai satelliti.
- Posizionamento relativo, si esegue con più ricevitori ed è in grado di determinare la posizione relativa, cioè la differenza tra le coordinate dei ricevitori stessi.
- Posizionamento differenziale, si esegue con un ricevitore mobile e sfrutta sia i segnali dei satelliti che i dati di correzione dalle basi a terra, ciò incrementa il livello di precisione del posizionamento.
- Posizionamento statico, sfrutta reti GNSS statiche, formate da punti materializzati sul terreno utilizzando la tecnica del *Real Time Kinematic* (RTK) per registrare le osservazioni e quella del *Post-Processing* (PP) per calcolare la posizione.
- Posizionamento cinematico, sfrutta reti GNSS dinamiche, ovvero stazioni permanenti che funzionano 24 ore su 24 mediante la tecnica RTK *network* o *Network Real Time Kinematic* (NRTK). In questo caso l'operatore invia la sua posizione alla stazione GNSS permanente e gli viene restituito un messaggio di correzione. Si tratta di un posizionamento molto preciso che ha bisogno solo di un modem e di un ricevitore a doppia frequenza.

## 2.2 LiDAR aereo

Il termine LiDAR deriva dall'acronimo inglese *'Light Detection and Ranging'*, tale strumento permette di determinare la distanza di un'oggetto o di una superficie mediante il calcolo dei tempi impiegati dai raggi laser emessi a colpire la superficie e tornare allo strumento.

Il principio di funzionamento del sistema LiDAR è basato sull'emissione di un impulso laser che ha una lunghezza d'onda funzionale all'attività da svolgere e una frequenza temporale modulabile. Il tempo di ritorno degli impulsi laser emessi dal trasmettitore è misurato dal sensore ricevente e consente di stimare la distanza tra il sensore stesso e l'oggetto<sup>1</sup>. Nei sistemi ad impulsi tale distanza può essere ottenuta con la seguente equazione (2.1).

$$D = c \left( \frac{t}{2} \right)$$

Dove:

D = distanza tra sensore e oggetto (m);

c = velocità della luce nel vuoto  $\approx 300.000$  km/s;

t = tempo di emissione e ricezione di un impulso (ns).

Il sistema LiDAR è considerato un metodo diretto per l'acquisizione dei dati e viene definito un sensore 'attivo'<sup>2</sup> perché è dotato di una vera propria fonte d'energia luminosa, "il laser", che emette onde elettromagnetiche corte (1-10  $\mu\text{m}$ ) ed è sensibile alle perturbazioni atmosferiche.

Per analizzare le differenti tipologie di sensori, è bene introdurre i principali parametri responsabili dei diversi livelli di precisione ed accuratezza. Le caratteristiche fondamentali sono:

- precisione angolare:  
l'accuratezza di questa misura è strettamente legata ai sistemi meccanici utilizzati per la deviazione del raggio laser, tra i principali possiamo trovare i sistemi oscillatori o a specchi meccanici;

---

<sup>1</sup> Baltsavias, 1999b, Wagner et al., 2004

<sup>2</sup> Brivio et al., 2006

- accuratezza della misura delle distanze:  
l'accuratezza della misura della distanza è legata principalmente a due fattori, il primo funzione della precisione del dispositivo di misura dei tempi, l'altro proporzionale alla distanza stessa in modo lineare, con valori che dipendono dalla tipologia di scanner;
- risoluzione:  
questo parametro indica la capacità dello strumento di rilevare oggetti di dimensioni minime ed è legato alla densità della nuvola di punti prodotta;
- portata massima di misura:  
la portata massima dello strumento dipende strettamente dalle caratteristiche del segnale emesso e quindi dal principio di funzionamento dello strumento. In linea generale all'aumentare della distanza di acquisizione la risoluzione e l'accuratezza risultano inferiori;
- frequenza di acquisizione:  
la frequenza del segnale dipende dalla tipologia di emettitore di segnale installato a bordo del laser scanner ed è funzionale alle differenti esigenze di rilievo.
- ampiezza del campo visivo (FOV):  
il campo visivo '*Field Of View*' (FOV) rappresenta il campo di acquisizione dello scanner; esistono scanner con limitato campo visivo, chiamati 'Camera scanner', altri hanno campo visivo quasi sferico e sono denominati 'Panorama Scanner'.

In Tabella 1 sono rappresentati i principali parametri caratteristici dei laser scanner.

Laser Scanner	Laser type	FOV (°)	Range (m)	Data rate (kHz)	Range precision	Range accuracy
<b>SICK LMS 291</b>	TOF	180(H) x 90(V)	80	40	10 mm @ 20 m	± 35 mm
<b>MDL LMS511</b>	TOF	190	40	36	//	± 10 @ 50 m
<b>RIEGL VQ-450</b>	TOF	360	800	550	5 mm @ 50 m	± 8 mm
<b>Optech Lynx SG1</b>	TOF	360	250	150-1200	5 mm @ 50 m	50 mm
<b>Z +F PROFILE 9012</b>	PS	360	119	1000	1 mm @ 50 m	1 mm
<b>Faro Focus x330</b>	PS	360(H) x 300(V)	330	976	1 mm @ 50 m	± 2 mm
<b>Velodyne HD64</b>	TOF	360(H) x 26,8(V)	120	1333	//	50 mm

Tabella 1, Principali parametri caratteristici dei laser scanner.

Il sistema, come anticipato, è strutturato in modo tale da essere in grado di emettere una serie di impulsi laser e di ricevere uno o più echi di ritorno. Nella sua versione più moderna, il LiDAR è caratterizzato dalla capacità di analizzare tutta la forma d'onda dell'eco di ritorno (*full waveform*). Questa capacità è di fondamentale importanza in quanto consente la classificazione del segnale di ritorno. In base alle caratteristiche dell'eco, è infatti possibile identificare la tipologia di oggetto che lo ha generato. In questo modo, per esempio, è possibile distinguere il dato legato alla risposta della vegetazione da quello legato all'acqua o al terreno.

Nel campo dello studio dei corsi d'acqua, il dato relativo all'eco emesso dal terreno è certamente il più importante in quanto permette la ricostruzione dei profili piano altimetrici dei fondali. Questo dato si dimostra essere solitamente molto importante in quanto consente di analizzare la morfologia della superficie topografica anche in aree coperte da vegetazione.

Il sistema LiDAR aereo (Figura 2.3) è composto non solo dal sensore (Figura 2.4) ma anche da una serie di altri elementi che competono alla generazione della nuvola di punti. Tra questi c'è il ricevitore GNSS, il sistema inerziale, e l'unità di controllo. Tramite questi strumenti, il sistema è in grado di determinare la traiettoria e quindi di georiferire in maniera corretta la nuvola di punti. In taluni casi il sistema può anche essere dotato di un apparato fotografico in grado di acquisire immagini sia in RGB che in altre bande dello spettro, in modo tale da associare ad ogni singolo punto anche un dato colorimetrico. L'apparato, in funzione dell'estensione dell'area oggetto di rilievo, verrà implementato su differenti tipologie di velivoli, tra cui aerei, elicotteri o APR.

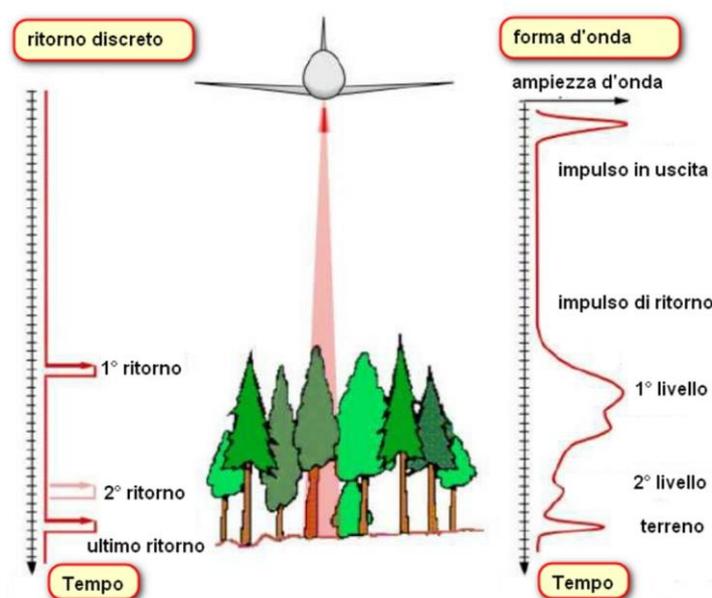


Figura 2.3, schema rappresentativo del funzionamento del LiDAR aereo.



Figura 2.4, sensore LiDAR aereo.

### 2.2.1 LiDAR Batimetrico

La tecnologia LiDAR batimetrica, anche detta *green LiDAR*, è utilizzata per l'acquisizione di dati relativi alla morfologia del fondo dei mari, dei laghi e dei corpi idrici in generale. A differenza del LiDAR aereo, che utilizza in genere una lunghezza d'onda infrarossa di 1064 nm, i sistemi LiDAR batimetrici utilizzano una lunghezza d'onda di 532 nm che si colloca nello spettro elettromagnetico del verde, da qui *green LiDAR*. Tale lunghezza d'onda è capace di penetrare l'acqua, consentendo così da effettuare misure di corpi idrici, in genere non oltre le tre volte la profondità di scomparsa del disco di Secchi.

Questa tipologia di LiDAR è ormai implementato su differenti APR tra cui il RIEGL BathyCopter riportato in Figura 2.5



Figura 2.5, Green LiDAR BathyCopter RIEGL

### 2.3 Fotogrammetria e aerofotogrammetria

La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni geometriche di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotografiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici.<sup>3</sup>

Si parla di fotogrammetria terrestre e di fotogrammetria aerea (o aerofotogrammetria) a seconda del fatto che la camera fotografica sia posta in stazione sul terreno oppure sia montata su un aeromobile. La fotogrammetria, che è un metodo di misura definito 'indiretto', può far uso oltre che di immagini fotografiche, anche di immagini utilizzando altre radiazioni elettromagnetiche e può fornire informazioni significative circa l'ambiente oggetto di indagine. Questa tecnica si basa su processi prestabiliti che permettono di passare da fotogrammi scattati con particolari regole a nuvole di punti che rispettano fedelmente l'oggetto rilevato. Per poter determinare le posizioni dei punti (X, Y) di un'oggetto nella realtà, avendo a disposizione le posizioni dei punti (X', Y') nella fotografia, è necessario definire la relazione geometrica, rappresentata in Figura 2.6, che lega l'oggetto reale con quello rappresentato nel fotogramma. La fotografia è quindi una prospettiva centrale ove tutti i punti della realtà vengono convogliati attraverso le lenti della fotocamera e proiettati su uno schermo che li intercetta. I segmenti che congiungono i punti dell'oggetto fotografato e quelli proiettati nell'immagine passano tutti per un particolare punto che è detto centro di presa o centro di proiezione (O).

---

<sup>3</sup> Manual of Photogrammetry, ASPRS, 1980

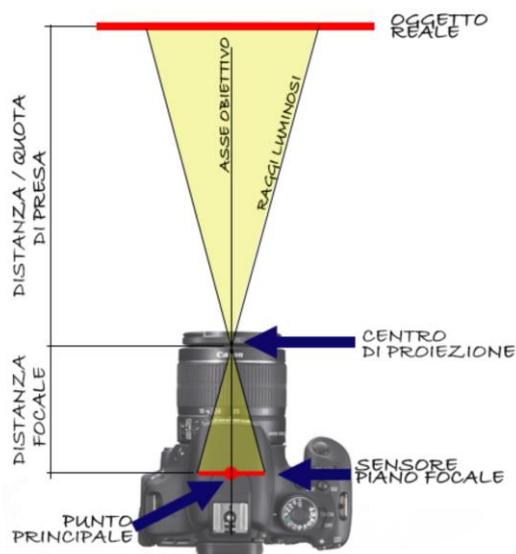


Figura 2.6, schema geometrico della generazione di un fotogramma.

Il centro di presa ( $O$ ) è un punto presente nell'obiettivo della camera, la distanza tra il centro di presa e il sensore è detta distanza focale mentre quella tra l'oggetto reale e il centro di presa è detta distanza di presa. Il centro di presa viene poi proiettato sulla lastra e su quest'ultima prende il nome di punto principale.

Nei precedenti paragrafi è stato descritto il processo di acquisizione di una singola immagine; tuttavia, ciò non è sufficiente per definire la geometria e le dimensioni corrette dell'oggetto reale. Di conseguenza, per ottenere le informazioni sufficienti a definire le caratteristiche dell'oggetto è necessario avere un minimo di due fotogrammi (Figura 2.7) che devono riprendere l'oggetto da due punti di vista differenti, che chiameremo punti di presa ( $O'$  e  $O''$ ). Avendo a disposizione due fotogrammi che riprendono il medesimo oggetto avremo anche due punti  $A'$  e  $A''$  sue due differenti immagini che rappresentano il medesimo punto reale  $A$ . A questo punto, al fine di conoscere l'orientamento delle lastre, sarà di fondamentale importanza avere le coordinate di alcuni punti dell'area di studio in modo tale da poter effettuare un orientamento assoluto.

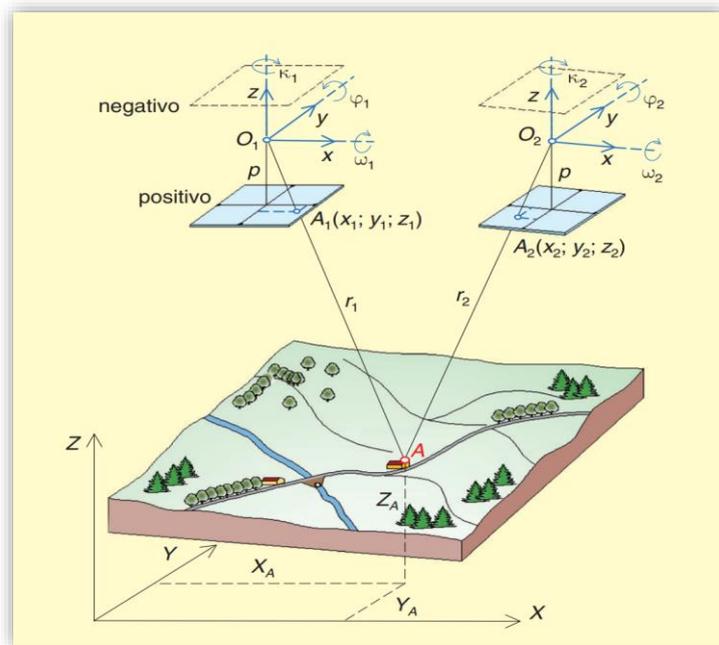


Figura 2.7, rappresentazione geometrica di un'acquisizione fotografica da un punto di vista duplice.

Oggi il problema fotogrammetrico viene risolto ottenendo le coordinate dell'intersezione nello spazio delle rette  $r_1$  e  $r_2$  con la risoluzione di un sistema di equazioni di collinearità che forniscono al metodo robustezza e validità nella qualità e affidabilità dell'*output*.

Il rilievo fotogrammetrico tradizionale consta delle seguenti fasi:

- I. pianificazione: operazioni riguardanti la pianificazione del rilievo in termini di scelta della scala di rappresentazione, scelta delle ottiche, scelta dei punti di presa e sovrapposizione dei fotogrammi, sia questa effettuata da terra o da aereo;
- II. acquisizione: operazioni riguardanti la presa delle immagini fotografiche acquisite da terra, da aereo o da APR mediante sensori come quelli rappresentati in Figura 2.8;
- III. rilievo topografico: operazioni riguardanti il rilievo mediante stazione totale o antenna GNSS di punti di appoggio a terra;
- IV. orientamento: operazioni preliminari per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa e le lastre con la stessa posizione nello spazio che avevano al momento della presa, quindi la ricostruzione della forma e delle dimensioni dell'oggetto ripreso;
- V. restituzione: operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando strumenti detti restitutori, in grado di produrre, come risultato finale, un disegno, un insieme numerico di coordinate o una immagine raddrizzata.

Questa metodologia è largamente impiegata in ambito territoriale per la mappatura di aree estensive finalizzata alla generazione di ortofoto, Digital Surface Model (DSM) e Digital Terrain Model (DTM). Applicazioni più specifiche prevedono il montaggio di sensori che possono acquisire energie riflesse anche con lunghezze d'onda fuori dal visibile, per la determinazione di particolari caratteristiche.

Nei casi in cui l'apparecchiatura fotografica sia montata a bordo di velivoli o APR è spesso associata a ricevitori GNSS in grado di effettuare una georeferenziazione di dettaglio del punto di presa, questo aiuterà nelle successive fasi di allineamento delle immagini.



*Figura 2.8, sensori fotografici montati a bordo di aerei e APR (DJI Matrice 300).*

## 2.4 Ecoscandaglio SBEAM

Con il termine ecoscandaglio si intende un dispositivo utilizzato per misurare la profondità dell'acqua (Figura 2.9), rilevare la presenza di oggetti sommersi e mappare fondali marini, lacustri o fluviali mediante onde sonore. Il principio di funzionamento di un ecoscandaglio è basato sulla propagazione del suono nell'acqua e sulla misurazione del tempo impiegato dalle onde sonore per andare e tornare dal fondale.

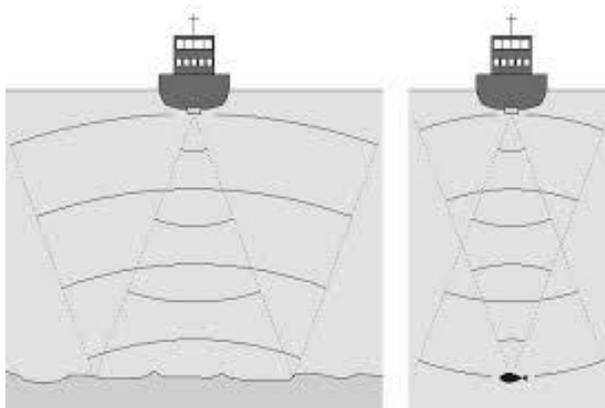


Figura 2.9, schema rappresentativo del funzionamento di un ecoscandaglio.

La formula che rappresenta questo fenomeno è la seguente:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} + k + d_r$$

Dove

$d$  = profondità;

$v$  = velocità media del suono nella colonna d'acqua (~1500 m/s);

$t$  = tempo misurato trascorso dal trasduttore al fondo e di nuovo al trasduttore;

$k$  = costante dell'indice di sistema;

$d_r$  = profondità del trasduttore.

I valori di ' $v$ ', ' $t$ ' e ' $d_r$ ' non sempre possono essere determinati esattamente durante la fase di rilievo, e ' $k$ ' deve derivare da calibrazioni periodiche della strumentazione.

Questa tipologia di rilievo può essere effettuata mediante tecnologia a 'singolo-fascio' (*single beam*) o 'multi-fascio' (*multi beam*), in questo capitolo tratteremo solo la prima tecnologia, che si differenzia dalla seconda per la minor estensione trasversale di fondale acquisita per singola passata. La tecnologia *single-beam* permette l'acquisizione di singoli transetti secondo i profili tracciati in fase di progetto. Tali transetti sono in genere perpendicolari alla direzione longitudinale del corpo idrico o alla costa, nel caso di rilievi di fondali marini.

Il sistema di acquisizione è composto da più componenti, di seguito sono riportati i principali:

- I. unità di controllo;
- II. trasduttore emettitore;
- III. trasduttore ricevitore;
- IV. ricevitore GNSS;
- V. monitor;
- VI. data-logger.

Il funzionamento del sistema avviene secondo le seguenti fasi:

- I. Generazione dell'onda sonora: l'unità di controllo genera un impulso elettrico che, mediante il traduttore, viene trasformato in impulso sonoro e successivamente inviato nella direzione desiderata verso il fondale.
- II. Propagazione dell'onda sonora: l'onda sonora si propaga attraverso il fluido in tutte le direzioni, colpendo il fondale. Quando l'onda colpisce il fondo, parte dell'energia viene riflessa indietro sotto forma di eco verso il trasduttore ricevitore.
- III. Rilevamento dell'eco: Il sensore dell'ecoscandaglio è in grado di rilevare l'eco dell'onda riflessa e misurare il tempo impiegato dall'onda sonora per raggiungere il fondale e tornare al sensore.
- IV. Calcolo della profondità: utilizzando il tempo di ritorno dell'eco e la velocità del suono nell'acqua, che è funzione della sua densità, l'ecoscandaglio calcola la profondità dell'acqua. Queste informazioni vengono quindi prima visualizzate su uno schermo e poi registrate.

Generalmente, per queste tipologie di rilievo, vengono impiegati piccoli natanti dal ridotto pescaggio o in alternativa piccole imbarcazioni senza pilota come quella rappresentata in Figura 2.10. Tuttavia, è bene sottolineare che questa tipologia di rilievo funziona con profondità minime, che variano in funzione del trasduttore, ma queste difficilmente risultano inferiori ai 60 cm.



*Figura 2.10, ecoscandaglio montato a bordo di un natante a pilotaggio remoto.*

Nel caso in cui venga utilizzato un natante a pilotaggio remoto, il rilievo si svolgerà in modalità semi-automatica seguendo le traiettorie impostate da progetto.

## 2.5 Ecoscandaglio MBEAM

Attualmente, la tecnologia *Multi Beam Eco Sounding* (M.B.E.S) è quella maggiormente impiegata per la realizzazione di rilievi batimetrici, in quanto permette di acquisire ampie aree in tempi ridotti e con livelli elevati di precisione.

Questa strumentazione si differenzia notevolmente dall' ecoscandaglio tradizionale (singolo fascio) in quanto ha la possibilità di acquisire punti, non solo lungo la verticale dello strumento, ma anche su un fascio perpendicolare alla rotta di navigazione (Figura 2.11) con angolo di apertura variabile. Tale tecnologia permette di ottenere la copertura del fondale marino o lacustre mediante la realizzazione di transetti fra loro paralleli.

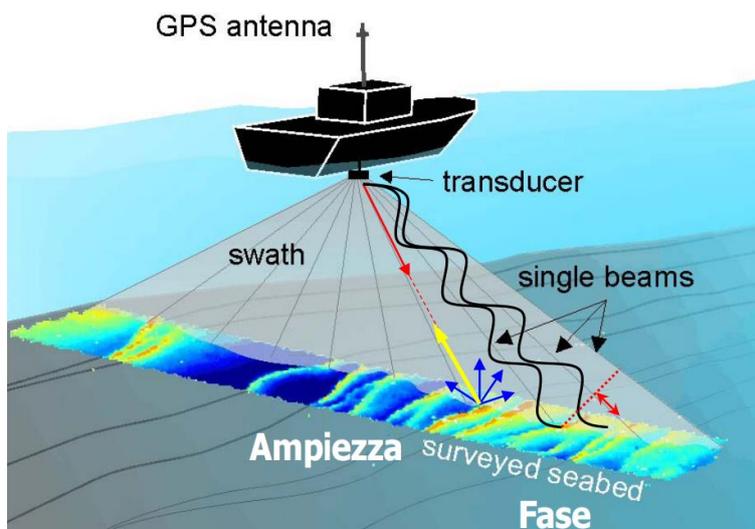


Figura 2.11, funzionamento MBEAM con acquisizione di un fascio perpendicolare alla direzione di navigazione

Anche in questo caso, la navigazione viene assistita da un ricevitore GNSS di precisione in modalità RTK in modo tale da poter georiferire l'intero rilievo. Per particolari applicazioni, il trasduttore può essere montato in modalità inclinata lateralmente così da permettere, oltre al rilievo del fondale, quello delle scarpate e di altre opere inclinate. Il rilievo Multi Beam, comportando evidenti costi maggiori, viene utilizzato dove si voglia ottenere una notevole discretizzazione (Figura 2.12) o dove sia necessaria la mappatura completa del fondale. Le frequenze impiegate dallo strumento (Figura 2.13) variano, in funzione della profondità di acquisizione, tra 10 kHz e 450 kHz e l'angolo di apertura, in genere, tra 1 e 180 gradi.

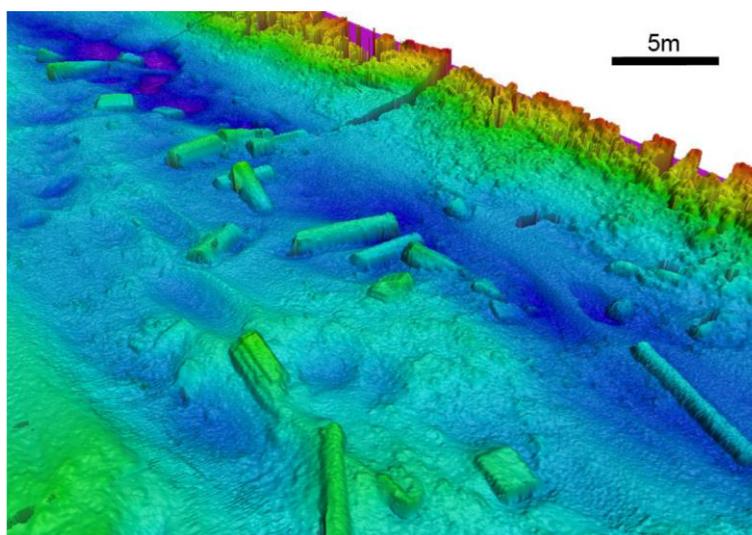


Figura 2.12, esempio di mappatura dettagliata del fondale.

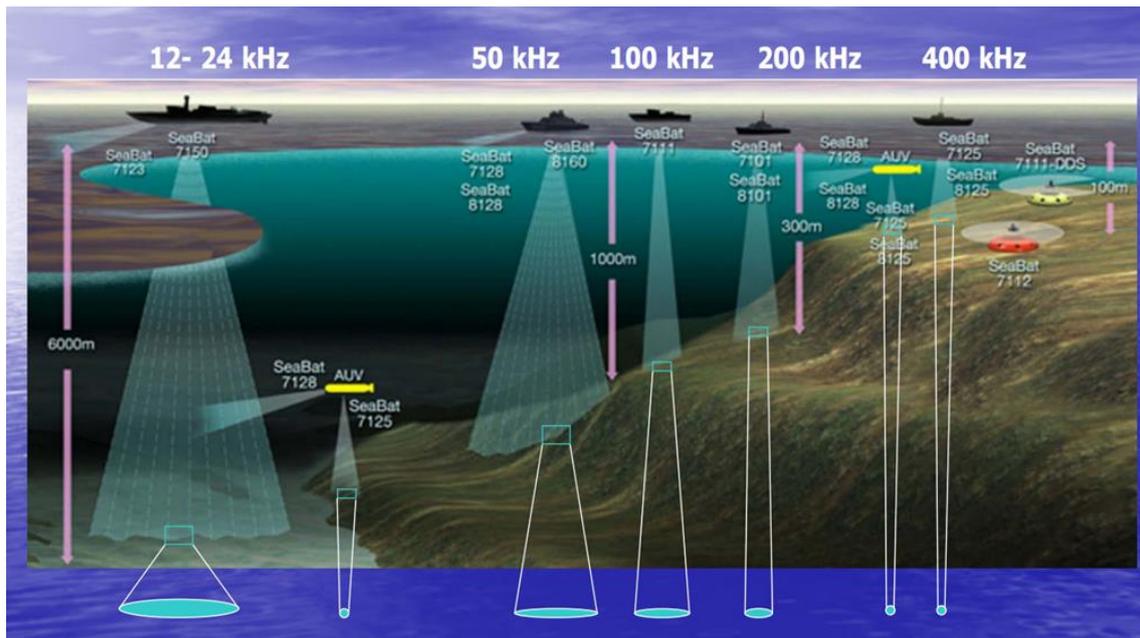


Figura 2.13, schema profondità di acquisizione in funzione della frequenza utilizzata.

## 3. Rilievo fluviale con drone

L'obiettivo dell'attività è quello di ricostruire, mediante tecniche di fotogrammetria da APR, un tratto di corpo idrico superficiale, sia per quanto riguarda la parte emersa che quella sottostante il pelo libero dell'acqua. Il principale problema da risolvere è stato quello di correggere il dato di batimetria, che viene sistematicamente sottostimato a causa del fenomeno della rifrazione, mediante algoritmi che verranno analizzati nei successivi capitoli.

### 3.1 Fotogrammetria e obiettivi

Per quanto concerne le basi teoriche della fotogrammetria si consiglia la consultazione del Capitolo 2.3. In questo capitolo verranno invece trattati i principi operativi e le scelte progettuali sulle quali è stato sviluppato l'intero lavoro. Il rilievo è stato realizzato su un tratto del Torrente Orco, su un'area di estensione complessiva pari a 3,5 ha, comprendendo sia le zone emerse che quelle sommerse (Figura 3.1).



Figura 3.1, delimitazione dell'area oggetto di rilievo.

L'obiettivo è quello di correggere, mediante un algoritmo, il dato batimetrico ottenuto dalla fotogrammetria e più precisamente il valore di quota assoluta dei punti della nuvola generata situati sotto al pelo libero. Tali valori sono soggetti ad un errore, che tende a sottostimare la profondità, dovuto principalmente al fenomeno della rifrazione all'interfaccia aria-acqua.

Le scelte tecniche e di pianificazione del rilievo sono state in parte dettate dalle esigenze dell'algoritmo di correzione del dato batimetrico, in parte dalla strumentazione utilizzata e in parte dalla scala con la quale si è voluto rappresentare il rilievo. Nello specifico, l'algoritmo richiede la presenza di acque limpide, onde superficiali minime, battenti idrici che non superino il paio di metri, assenza di nuvole o foschia, fotogrammi acquisiti da differenti punti di vista e differenti angolazioni. Note queste indicazioni è stato possibile pianificare l'attività di rilievo il più funzionale possibile agli obiettivi ed alle specifiche dell'algoritmo.

Di seguito vengono riassunte le specifiche tecniche seguite per la realizzazione del rilievo:

- Ground Sampling Distance (GSD) < 2,5 cm;
- scelta dell'area con presenza di acque trasparenti;
- scelta dell'area con tirante idrico inferiore a 2 m;
- acquisizioni mediante APR da differenti punti di vista e angolazioni;
- possibilità di poter acquisire quote in alveo con ricevitore GPS/GNSS;
- acquisizioni con la luce solare il più possibile nadirale;
- acquisizioni in una giornata priva di nebbia o foschia;

Al fine di soddisfare al meglio le condizioni sono stati effettuati tre sopralluoghi sull'area oggetto di studio per la definizione delle condizioni ideali per la realizzazione dell'attività.

## 3.2 Analisi del fenomeno della rifrazione

Le acquisizioni fotogrammetriche, finalizzate alla ricostruzione del Digital Terrain Model (DTM), permettono di ottenere ottimi risultati quando le aree indagate sono prive di vegetazione o specchi d'acqua. Il caso di studio indagato prevede di determinare l'andamento del terreno sotto al pelo libero del corso d'acqua, in questo contesto i metodi fotogrammetrici trovano notevoli difficoltà operative dovute al fenomeno della rifrazione che avviene all'interfaccia aria-acqua.

Per rifrazione si intende quel fenomeno per cui i raggi luminosi, passando da un mezzo ad un altro, subiscono una deviazione della loro traiettoria. Nel caso specifico in cui il fascio luminoso

passi dall'aria all'acqua, cioè da un mezzo a densità minore ad uno a densità maggiore, questo tenderà ad avvicinarsi alla normale alla superficie come rappresentato in Figura 3.2.

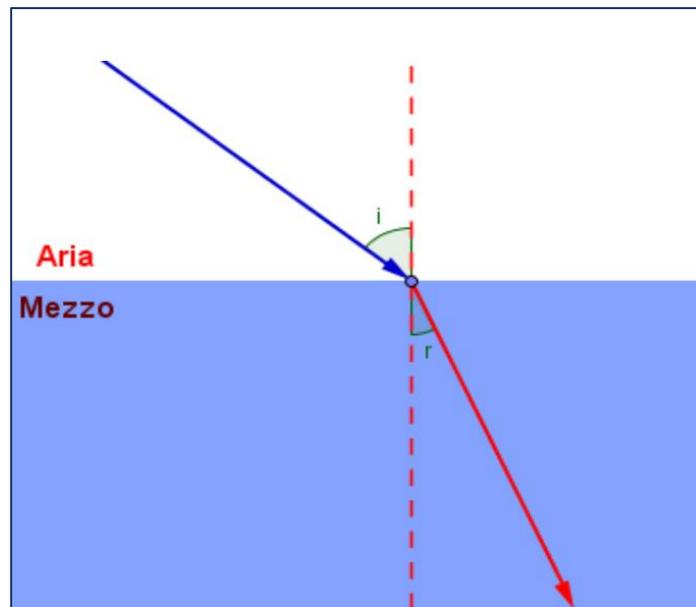


Figura 3.2, schema semplificato del fenomeno della rifrazione

Tale fenomeno è descritto dalla prima e dalla seconda legge di Snell e di seguito ne vengono riportati i rispettivi enunciati:

Prima legge di Snell: il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione dei due mezzi, nel punto di incidenza, giacciono sullo stesso piano.

Seconda legge di Snell: il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante ed è uguale al rapporto tra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e quello del primo, in formule:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Dove:

'i': angolo tra la normale e il raggio incidente;

'r': angolo tra la normale e il raggio rifratto;

'v1': velocità propagazione del raggio luminoso nel mezzo 1;

'v2': velocità propagazione del raggio luminoso nel mezzo 2;

'n1': indice di rifrazione del mezzo 1;

'n2': indice di rifrazione del mezzo 2.

L'indice di rifrazione del mezzo è il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce nel mezzo trasparente. Per ogni sostanza trasparente, come ad esempio l'acqua, è possibile definire un indice di rifrazione assoluto calcolabile con la seguente formula:

$$n_{c,v} = \frac{c}{v}$$

Dove:

'n': indice di rifrazione dell'acqua;

'c': velocità della luce nel vuoto;  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s;

'v': velocità in m/s del raggio luminoso nell'acqua.

L'indice di rifrazione 'n' è una grandezza adimensionale il cui valore, per qualsiasi mezzo materiale trasparente, è sempre maggiore di 1, per esempio per l'acqua distillata  $n = 1,33$ .

Con una rapida sostituzione dei valori si dimostra il fatto che il raggio incidente, una volta attraversata l'interfaccia aria-acqua, tende ad avvicinarsi alla normale alla superficie.

### 3.3 Strumentazione

Il rilievo in campo ha previsto l'utilizzo di differenti tipologie di strumentazione atte all'ottenimento del miglior risultato possibile per il rilievo fotogrammetrico in oggetto.

La dotazione utilizzata è elencata di seguito:

- I. aeromobile a pilotaggio remoto (APR);
- II. ricevitore GNSS con correzione RTK;
- III. target giallo-neri e rosso-neri di dimensioni 50x50 cm;
- IV. abbigliamento idoneo all'accesso in alveo (stivale a tutta coscia).

- I. L'aeromobile a pilotaggio remoto (APR) ha la funzione di acquisire fotogrammi da differenti quote, inclinazioni e punti di vista mediante la realizzazione di una specifica traiettoria di volo che può essere eseguita in modalità automatica o manuale. Nel caso oggetto di studio è stato utilizzato un drone DJI Mavic Mini due (Figura 3.3), del quale sono riportate le specifiche tecniche in Tabella 2.



*Figura 3.3, APR DJI Mavic Mini 2*

<b>AEROMOBILE DJI MAVIC MINI DUE</b>	
Peso al decollo	< 249 g
Dimensioni	Richiuso: 140×82×57 mm Aperto: 160×202×55 mm Aperto (con eliche): 245×290×55 mm
Massima velocità di salita	5 m/s (Modalità S) 3 m/s (Modalità N) 2 m/s (Modalità C)
Massima velocità di discesa	3.5 m/s (Modalità S) 3 m/s (Modalità N) 1,5 m/s (Modalità C)
Velocità massima (al livello del mare, in assenza di vento)	16 m/s (Modalità S) 10 m/s (Modalità N) 6 m/s (Modalità C)
Autonomia di volo	31 minuti (in assenza di vento)
Resistenza alla velocità del vento	8,5-10,5 m/s (scala 5)
Temperatura operativa	Tra 0 e 40 °C
Frequenza operativa	2.400-2.4835 GHz, 5.725-5.850 GHz
Global Navigation Satellite System (GNSS)	GPS+GLONASS+GALILEO
Sensore inferiore	Intervallo di stazionamento: 0,5–10 m
Dimensione del sensore (")	1/2.3 "
Larghezza del sensore (mm)	6.17 mm
Altezza del sensore (mm)	4.5 mm
Risoluzione del sensore (MP)	12 MP
Larghezza immagine (pixel)	4000 pixel
Altezza immagine (pixel)	3000 pixel
Lunghezza focale equivalente (mm)	24 mm

*Tabella 2, caratteristiche tecniche DJI Mavic Mini due*

Il DJI Mavic Mini due, a differenza dei droni studiati per scopi professionali, non è dotato di ricevitore GPS/GNSS ad elevata precisione, di conseguenza, la sua posizione è nota a meno di un errore di qualche metro. La scarsa georeferenziazione dinamica dell'APR dovrà essere corretta mediante il posizionamento di un maggior numero di target a terra. Tali target serviranno per le

successive fasi di georeferenziazione e scalatura del modello. Nonostante non sia un drone di caratura professionale, è tuttavia possibile pianificare missioni di volo fotogrammetriche mediante app rilasciate da terze parti che consentono di semplificare e ridurre il numero di acquisizioni necessarie.

Per poter definire in maniera univoca gli angoli di orientamento della camera e dell'APR viene riportato uno schema rappresentativo in Figura 3.4.

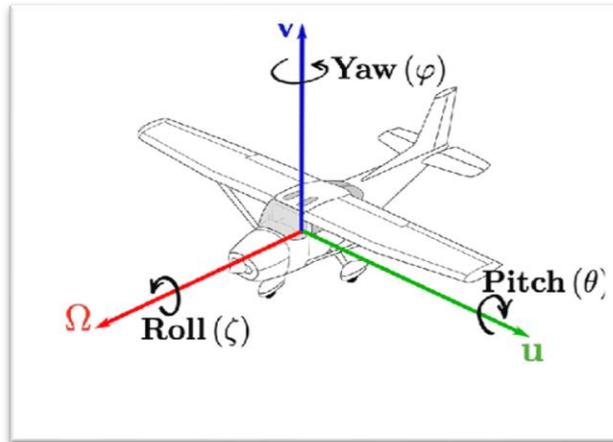


Figura 3.4, schema rappresentativo angoli APR

- II. Il ricevitore GPS/GNSS utilizzato è un Geomax Zenith 60 (Figura 3.5), questo strumento ha la funzione di materializzare i punti acquisiti con una precisione che si attesta in +/- 1,5 cm sul piano (x,y) e +/- 3 cm sull'asse delle z. Il raggiungimento di queste precisioni è dettato dalla possibilità dell'antenna di ricevere il segnale da numerosi satelliti orbitanti e dalla possibilità, mediante sistema RTK, di ricevere le correzioni differenziali. Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche dello strumento (Tabella 3).

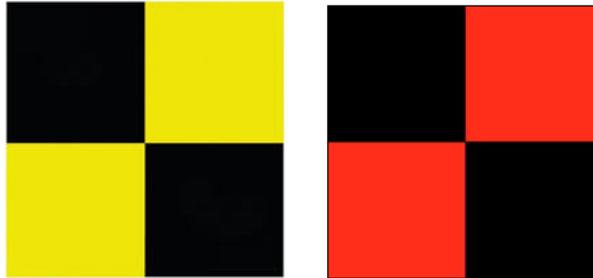


Figura 3.5, Ricevitore GPS/GNSS Geomax Zenith 60

<b>RICEVITORE GNSS GEOMAX ZENITH 60 LTE + UHF + IMU</b>	
Specifiche del ricevitore	
Sistema di misurazione	NovAtel OEM7, 555 canali, multifrequenza, multi-costellazione
Tracciamento GPS	L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5
Tracciamento GLONASS	L1 C/A, L2 C/A, L2P, L3
Tracciamento BeiDou	B1I, B1C, B2I, B2a, B2b, B3I
Tracciamento Galileo	E1, E5a, E5b, AltBOC, E6
Precise Point Positioning (PPP)	TerraStar C Pro, L-Band
Modalità di lavoro	
Modalità RTK	Selezionabile; ExtraSafe, Standard
Compensazione IMU	Esente da calibrazione, resistente alle interferenze magnetiche
Modalità di comunicazione	
Modulo 4G LTE	QUECTEL EG25-G LTE FDD, LTE TDD, UMTS, GSM
Protocolli dati RTK	RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, CMR, CMR+, RTCA, NOVATELX
Modulo radio UHF	Ricetrasmittitore SATEL TR4+, 500 mW, 1000 mW, 403–473 MHz;
Bluetooth	2.1 +EDR, V5.0 Funzionalità QR-iConnect
WLAN	Hotspot / modalità client 802.11 a/ac/b/g/n
Porta di comunicazione	USB, seriale e alimentazione
Precisione e prestazioni	
RTK	Hz 8 mm ± 1 ppm (rms) V: 15 mm ± 1 ppm (rms)
Rete RTK	Hz 8 mm ± 0,5 ppm (rms) V: 15 mm ± 0,5 ppm (rms)
Statica	Hz 3 mm ± 0,5 ppm (rms) V: 5 mm ± 0,5 ppm (rms)
Statico lungo	Hz 3 mm ± 0,1 ppm (rms) V: 3,5 mm ± 0,4 ppm (rms)
Real-time cinematico compensato con tilt	Incertezza Hz aggiuntiva 2 cm fino a 30° di inclinazione

Tabella 3, caratteristiche tecniche antenna GNSS

- III. Durante l'attività di rilievo sono stati utilizzati due differenti tipologie di target (Figura 3.6) di dimensioni 50 x 50 cm che hanno la funzione, una volta rilevati mediante il ricevitore GPS/GNSS, di scalare e georiferire il modello. Di seguito vengono riportate le figure rappresentati le tipologie di target impiegate.



*Figura 3.6, target.*

- IV. L'ultima attrezzatura impiegata riguarda il vestiario specifico che è stato necessario indossare per la materializzazione di punti mediante ricevitore GPS/GNSS in centro alveo. Questa specifica fase ha richiesto l'acquisizione di diverse sezioni perpendicolari all'asse longitudinale del corpo idrico; quindi, è stato necessario indossare calzature impermeabili fino all'altezza del bacino. In Figura 3.7 è possibile vedere lo specifico tipo di calzatura.



*Figura 3.7, calzature per l'accesso in alveo.*

## 3.4 Pianificazione del volo

La pianificazione della missione di volo dell'APR è di fondamentale importanza al fine di soddisfare i criteri della fotogrammetria ed ottenere un risultato conforme alle richieste dell'algoritmo di correzione del dato batimetrico. Il primo step prevede di definire la scala di rappresentazione del rilievo, a partire dalla quale è poi possibile definire gli altri parametri. Di seguito vengono riassunte le principali fasi seguite per la pianificazione della missione di volo.

Una fase di fondamentale importanza risulta essere quella dell'individuazione delle specifiche tecniche della camera montata a bordo dell'APR in termini di:

- dimensione del sensore (");
- larghezza del sensore (mm);
- altezza del sensore (mm);
- risoluzione del sensore (MP);
- larghezza immagine (pixel);
- altezza immagine (pixel);
- lunghezza focale equivalente a 35mm (mm);

Oltre alle caratteristiche tecniche del sistema di acquisizione dei fotogrammi sarà necessario definire:

- *Ground Sampling Distance* (GSD) (cm/pixel);
- sovrapposizione longitudinale richiesta (%);
- sovrapposizione trasversale richiesta (%);

Una volta imputati questi parametri nei differenti software di pianificazione del volo sarà possibile ottenere la traiettoria e le specifiche di volo da utilizzare per il rilievo, al fine di soddisfare le richieste dell'algoritmo. Nello specifico, in una prima fase la missione è stata calcolata mediante un foglio di calcolo creato su Excel e successivamente mediante la piattaforma web-based Dronelink. Tale piattaforma consente di caricare direttamente la missione sull'app di comando dell'APR tramite la quale verrà avviato il volo in modalità semi-automatica.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche della camera fotografica montata a bordo dell'APR DJI Mavic Mini 2 (Tabella 4) e i principali parametri di input del processo fotogrammetrico.

SENSORE FOTOGRAFICO	
Dimensione del sensore (")	1/2.3 "
Larghezza del sensore (mm)	6.17 mm
Altezza del sensore (mm)	4.5 mm
Risoluzione del sensore (MP)	12 MP
Larghezza immagine (pixel)	4000 pixel
Altezza immagine (pixel)	3000 pixel
Lunghezza focale equivalente (mm)	24 mm

Tabella 4, caratteristiche tecniche sensore fotografico

L' output generato dall'inserimento dei dati riportati in Tabella 5 permetterà di determinare i principali parametri per l'esecuzione del rilievo, tra cui l'altezza di volo, la velocità e le direzioni di avanzamento.

SPECIFICHE TECNICHE	
Ground Sampling Distance (GSD) (cm/pixel)	2,5 cm/pixel
Sovrapposizione longitudinale richiesta (%)	80%
Sovrapposizione trasversale richiesta (%)	60%
Definizione/perimetrazione area di interesse (ha)	3,5 ha

Tabella 5, dati tecnici di input nel software di pianificazione della missione di volo

Di seguito vengono riportate alcune immagini che ripercorrono la pianificazione della missione di volo tramite l'applicativo web-based Dronelink.

- I. Creazione del progetto di missione, posizionamento elemento puntuale georiferito e individuazione dell'area oggetto di rilievo (Figura 3.8).

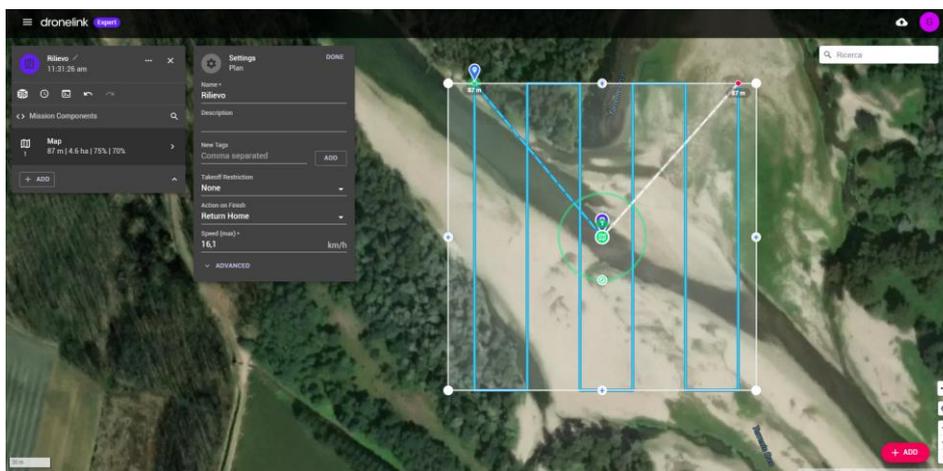


Figura 3.8, individuazione area oggetto di rilievo

- II. Definizione del perimetro dell'area oggetto di rilievo in funzione delle esigenze e degli obiettivi da raggiungere (Figura 3.9).



Figura 3.9, perimetrazione area oggetto di rilievo.

Il processo fotogrammetrico, come è stato anticipato nei precedenti capitoli, richiede che ogni singolo punto sia visto da differenti punti di presa e da differenti angolature. Al fine di soddisfare questo requisito sono state realizzate quattro differenti missioni di volo, in ognuna delle quali l'orientamento della camera (pitch) è stato mantenuto costante per l'intera durata del volo.

- III. La prima missione di volo, rappresentata in Figura 3.10 prevede un'acquisizione a maglia quadrata con camera nadirale e sovrapposizione longitudinale e trasversale rispettivamente del'80% e 60%. La velocità di avanzamento è funzionale all'altezza di volo in quanto dev'essere verificato il 'non trascinamento' dell'immagine quindi, più l'altezza sarà elevata, maggiore potrà essere la velocità di avanzamento e di conseguenza minore il tempo complessivo di acquisizione. Il tempo complessivo di questa missione si attesta in 18 minuti e 40 secondi.

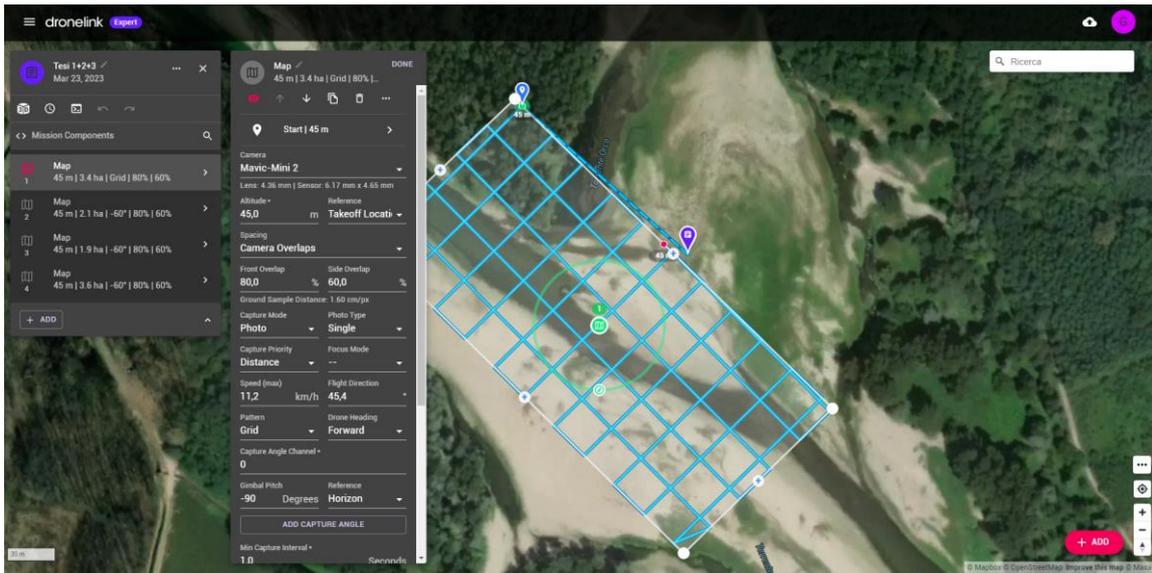


Figura 3.10, rappresentazione planimetrica della prima missione di volo

- IV. La seconda missione di volo, rappresentata in Figura 3.11, prevede un'acquisizione con traslazione dell'APR parallela all'asse del corpo idrico sulla destra idrografica e con *pitch* della camera fissato a 30° per l'intera durata dell'acquisizione. L'area oggetto di rilievo è pari a circa il 50 % rispetto a quella indicata nel rilievo 1 e il tempo di questa acquisizione si attesta in 6 minuti e 35 secondi.

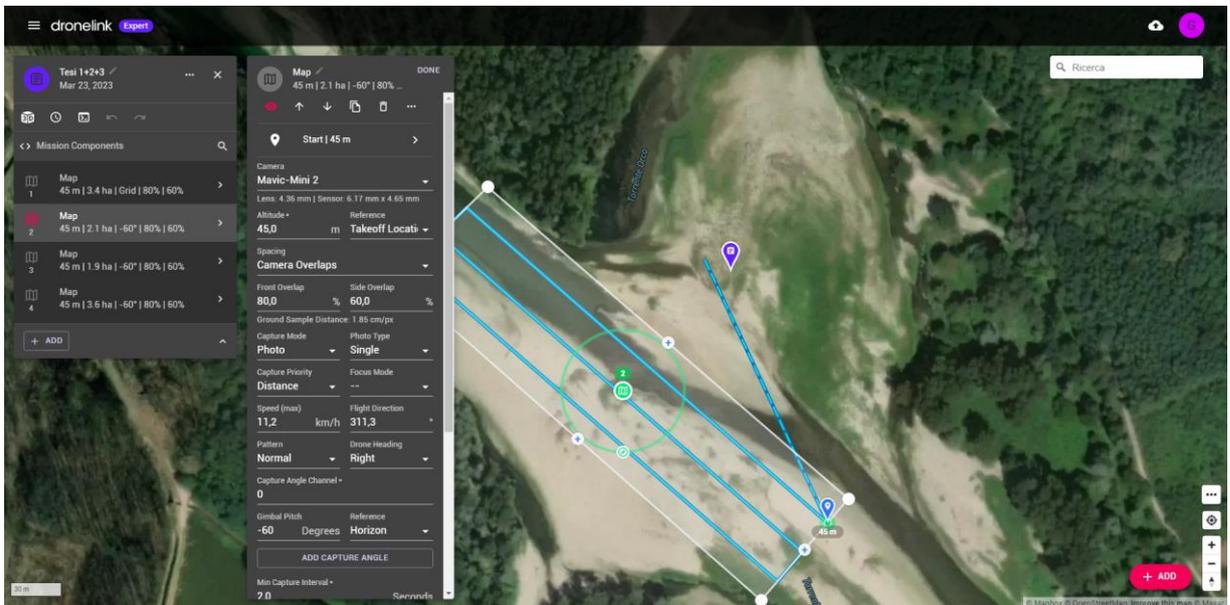


Figura 3.11, rappresentazione planimetrica della seconda missione di volo

- V. La terza missione di volo, rappresentata in Figura 3.12 prevede un'acquisizione con traslazione dell'APR parallela all'asse del corpo idrico sulla sinistra idrografica e con *pitch* della camera fissato a  $30^\circ$  per l'intera durata dell'acquisizione. L'area oggetto di rilievo è pari a circa il 50 % rispetto a quella indicata nel rilievo 1 e il tempo di questa acquisizione si attesta in 6 minuti e 15 secondi.

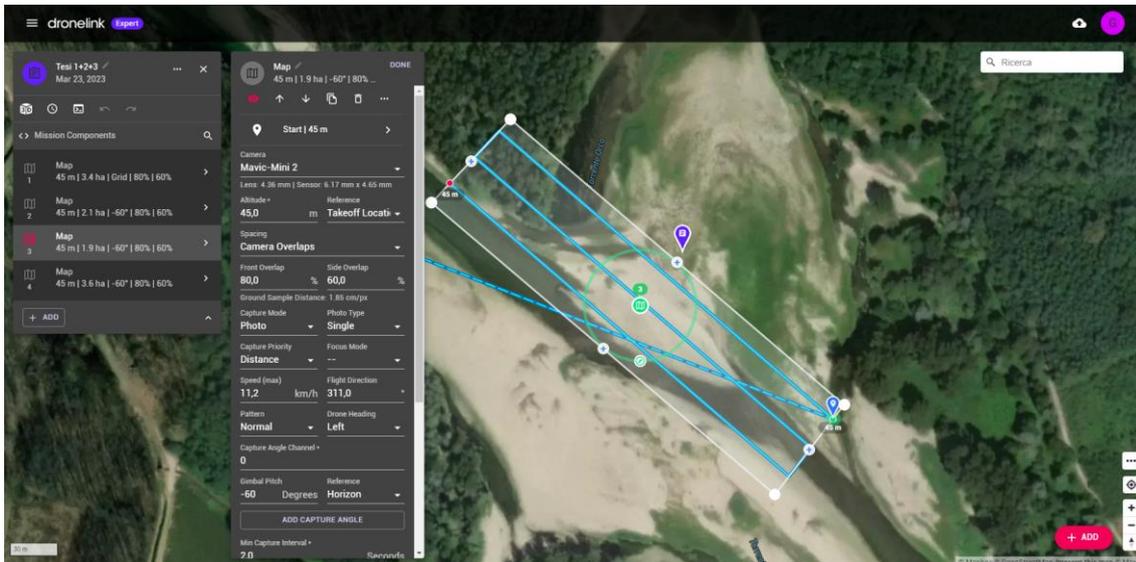


Figura 3.12, rappresentazione planimetrica della terza missione di volo

- VI. La quarta ed ultima missione di volo, rappresentata in Figura 3.13, prevede un'acquisizione con traslazione dell'APR perpendicolare alla direzione del corpo idrico e con camera con Pitch di  $30^\circ$  fissato per l'intera durata dell'acquisizione. L'area oggetto di rilievo è la medesima del rilievo 1 e il tempo complessivo dell'acquisizione si attesta in 11 minuti e 52 secondi.

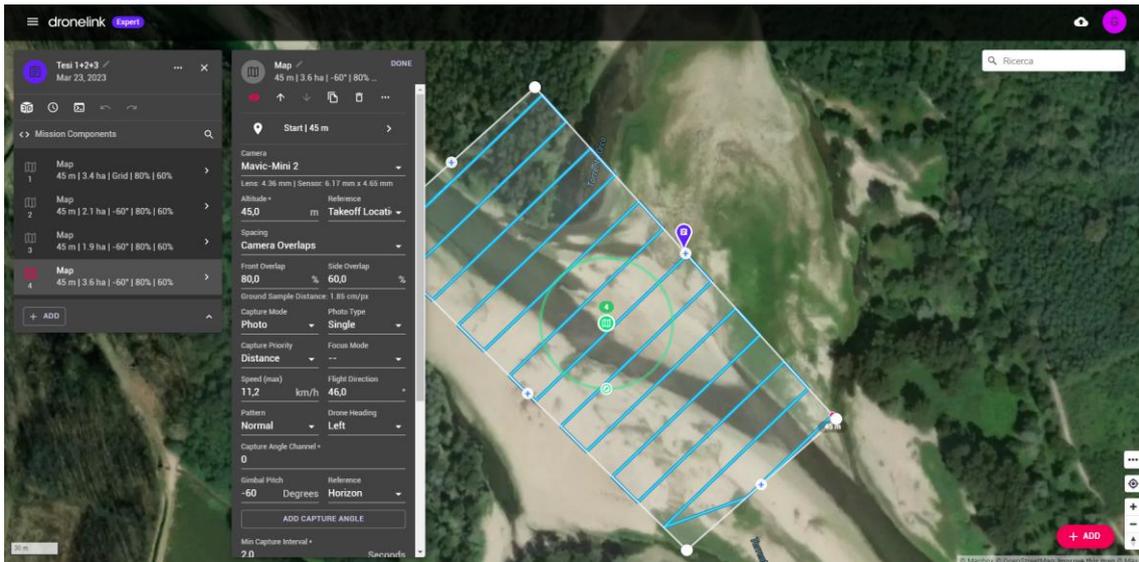


Figura 3.13, rappresentazione planimetrica della quarta missione di volo

Il volo pianificato ha avuto una durata complessiva di circa 40 minuti durante il quale L'APR è ritornato una volta in maniera autonoma al punto di partenza per livello della batteria inferiore al 15%. Una volta sostituita la batteria, la missione è ripartita dal medesimo punto dove era stata interrotta. Le immagini sono state scattate rispettivamente sia in formato '.jpg' che '.raw' in modo tale da poter eventualmente modificare i parametri di esposizione e luminosità.

Nel caso specifico, avendo effettuato la campagna di rilievi fotogrammetrici in una giornata priva di nuvolosità e nelle ore centrali del giorno, non è stato necessario modificare l'esposizione dei fotogrammi per applicare gli algoritmi di correzione batimetrica.

### 3.5 Materializzazione GCP e CP con ricevitore GPS/GNSS

La campagna di acquisizioni, finalizzata all'applicazione dell'algoritmo di correzione dei dati batimetrici, ha inoltre previsto la materializzazione di punti a terra mediante l'antenna ricevitore GPS/GNSS dotata di correzione RTK. Questi punti topografici sono necessari sia per orientare che per scalare il modello. Tali punti si differenziano in due macrocategorie, i *Grund Control Point* (GCP) ed i *Check Point* (CP). I GCP sono utilizzati per georiferire il modello su un sistema di riferimento assoluto che nel caso specifico è l'*European Petroleum Survey Group* (EPSG) 32632 e per scalare il modello secondo misure reali. I CP sono invece utilizzati per confrontare le coordinate di un punto sul modello con quelle del CP stesso e quindi definire l'errore medio

ottenuto dall'intero processo. Nel caso in cui l'APR utilizzato sia dotato di ricevitore GNSS con correzione RTK a bordo, è possibile ridurre sensibilmente il numero di GCP. Purtroppo, il DJI Mavic mini 2 utilizzato ne è sprovvisto ed è quindi stato necessario materializzare un numero pari a 12 GCP e 6 CP. Per l'identificazione dei GCP a terra sono stati utilizzati target giallo-neri, per i CP invece rosso-neri (Figura 3.14).



*Figura 3.14, Target rosso-nero in campo*

In Tabella 6 sono riportati i dati acquisiti dal ricevitore GNSS per i 12 GCP prima descritti. Nel caso specifico ogni GCP è stato rilevato mediante ricevitore GNSS con tecnica differenziale NRTK (*Network Real Time Kinematic*) facendo stazione per 3 secondi così da ottenere, per ogni GCP, le coordinate (N, E, H) mediate su 3 misurazioni (epoche). La medesima tecnica è stata utilizzata per i CP riportati in Tabella 7. La quota altimetrica è stata inizialmente acquisita come quota ellissoidica e successivamente corretta, mediante il grigliato IGM, a quota ortometrica. Nel documento vengono riportate esclusivamente le quote ortometriche in quanto sono quelle utilizzate per l'intero flusso di lavoro.

I parametri rappresentati nelle tabelle sono di seguito descritti:

- I. Nome: Numerazione progressiva del punto acquisito;
- II. Base: Codifica stazione permanente di appoggio rete SPIN 3;

- III. Base E/N/Z: Coordinate cartografiche della base di riferimento;
- IV. Base Lat./Lon./H.: Coordinate geografiche della base di riferimento;
- V. Punto E/N/Z: Coordinate cartografiche del punto;
- VI. Punto Lat/Lon/H: Coordinate geografiche del punto;
- VII. Satelliti (GPS/GLONASS): Tipologia e numero di satelliti utilizzati;
- VIII. HDOP: (*Horizontal Dilution Of Precision*) indica quanto sia buona la geometria dei satelliti utilizzati sul piano orizzontale.
- IX. VDOP: (*Vertical Dilution Of Precision*) indica quanto sia buona la geometria dei satelliti utilizzati sul piano verticale;
- X. PDOP: (*Positional Dilution of Precision*) è un indicatore di quanto buona sia la configurazione geometrica 3D dei satelliti in ricezione (valore ottimale se inferiore a 2);
- XI. GDOP: (*Geometric Dilution Of Precision*) rappresenta la precisione complessiva del sistema di posizionamento, coordinate 3D e tempo;
- XII. HRMS: (*Horizontal Root Mean Square*) rappresenta lo scarto quadratico medio in orizzontale;
- XIII. VRMS: (*Vertical Root Mean Square*) rappresenta lo scarto quadratico medio in verticale;
- XIV. Dist. Base: Distanza tra antenna e base di riferimento.

### 3. Rilievo fluviale con drone

Nome	Base	Base Est/E	Base Nord/N	Base Z/Z	Base Lat.	Base Lon.	Base H.	Punto Est/E	Punto Nord/N	Punto Z/Z	Punto Lat.	Punto Lon.
106	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408338.651	5006884.846	143,898	45 12 34.1532	7 49 57.8962
108	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408372.593	5006840.268	143,445	45 12 32.7248	7 49 59.4815
109	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408377.547	5006830.502	143,346	45 12 32.4107	7 49 59.7150
111	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408398.273	5006815.980	143,368	45 12 31.9499	7 50 00.6746
112	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408412.012	5006807.978	143,344	45 12 31.6971	7 50 01.3096
113	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408392.573	5006777.306	144,046	45 12 30.6943	7 50 00.4389
115	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408368.380	5006798.975	144,071	45 12 31.3850	7 49 59.3157
116	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408356.007	5006807.966	144,519	45 12 31.6705	7 49 58.7427
117	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408346.865	5006815.382	144,567	45 12 31.9065	7 49 58.3187
118	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408333.530	5006821.843	145,116	45 12 32.1096	7 49 57.7033
120	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408292.144	5006860.659	144,279	45 12 33.3478	7 49 55.7806
121	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408267.578	5006881.982	144,158	45 12 34.0271	7 49 54.6406

Nome	Satelliti	GPS	GLONASS	HDOP	VDOP	PDOP	GDOP	HRMS	VRMS	Soluzione	Dist.Base
106	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.025	0.040	RTK Fissato	24567.172
108	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.023	0.038	RTK Fissato	24623.168
109	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.025	0.035	RTK Fissato	21088.278
111	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.026	0.040	RTK Fissato	21090.833
112	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.026	0.037	RTK Fissato	21093.771
113	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.021	0.033	RTK Fissato	21057.859
115	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.300	1.500	2.100	0.017	0.026	RTK Fissato	21058.421
116	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.300	1.500	2.100	0.016	0.025	RTK Fissato	21057.145
117	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.300	1.500	2.000	0.018	0.027	RTK Fissato	21056.794
118	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.300	1.500	2.000	0.019	0.030	RTK Fissato	21052.992
120	GPS:8 GLS:6 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	8	6	0.800	1.300	1.500	2.000	0.019	0.033	RTK Fissato	24560.086
121	GPS:8 GLS:6 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	8	6	0.800	1.300	1.500	2.000	0.021	0.036	RTK Fissato	24528.504

Tabella 6, dati tecnici Ground Control Point (GCP)

Nome	Base	Base Est/E	Base Nord/N	Base Z/Z	Base Lat.	Base Lon.	Base H.	Punto Est/E	Punto Nord/N	Punto Z/Z	Punto Lat.	Punto Lon.
104	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408293.141	5006914.313	144,182	45 12 35.0866	7 49 55.7908
105	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408319.429	5006897.355	143,987	45 12 34.5495	7 49 57.0069
107	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408364.513	5006856.723	143,668	45 12 33.2541	7 49 59.1002
110	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408389.858	5006823.919	143,382	45 12 32.2032	7 50 00.2836
114	41	394604.568	4990861.140	261.247	45 03 48.1126	7 39 40.5995	310.828	408372.099	5006790.374	143,953	45 12 31.1081	7 49 59.4918
119	26	394139.665	5026933.156	430.629	45 23 16.4759	7 38 51.7131	483.108	408304.314	5006844.970	144,808	45 12 32.8451	7 49 56.3488

Nome	Satelliti	GPS	GLONASS	HDOP	VDOP	PDOP	GDOP	HRMS	VRMS	Soluzione	Dist.Base
104	GPS:8 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	8	5	0.800	1.500	1.700	2.200	0.025	0.040	RTK Fissato	24516.830
105	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.024	0.040	RTK Fissato	24545.856
107	GPS:9 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	4	0.800	1.400	1.600	2.200	0.022	0.034	RTK Fissato	24605.071
110	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.400	1.600	2.100	0.024	0.035	RTK Fissato	21091.338
114	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	9	5	0.800	1.300	1.500	2.100	0.018	0.027	RTK Fissato	21054.344
119	GPS:8 GLS:6 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	8	6	0.800	1.300	1.500	2.000	0.021	0.034	RTK Fissato	24579.921

Tabella 7, dati tecnici Check Point (CP)

Per i punti riportati in Tabella 6 e Tabella 7 è stato calcolato l'errore medio e lo scarto quadratico medio riferito all'errore, sia per la componente orizzontale che per quella verticale, i risultati sono riportati rispettivamente in Tabella 8 e Tabella 9.

STATISTICA SUGLI ERRORI ORIZZONTALI [m]			
n. misure	Media HRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	HRMS	-	-
18	0,022	0,026	0,016

Tabella 8, statistica errori orizzontali

STATISTICA SUGLI ERRORI VERTICALI [m]			
n. misure	Media VRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	VRMS	-	-
18	0,034	0,040	0,025

Tabella 9, statistica errori verticali

Le coordinate dei punti sopra riportati sono state utilizzate per la ricostruzione del modello fotogrammetrico mediante il software SfM Agisoft Metashape.

### 3.6 Esecuzione volo pianificato

Nel Cap. 3.4 sono state descritte le fasi necessarie alla progettazione della missione di volo pianificata in modo tale da poter effettuare il volo in modalità semi-automatica. In seconda fase, prima del volo, è stato necessario avviare le missioni in campo per effettuare una serie di controlli e verifiche al fine di riuscire a svolgere la missione in completa sicurezza. Le prime verifiche vengono effettuate visivamente sull'APR, concentrandosi maggiormente sullo stato manutentivo e funzionale del velivolo. In un secondo momento si è provveduto alla calibrazione della bussola e della piattaforma inerziale presente a bordo dello stesso. La calibrazione dei due strumenti sopra descritti viene effettuata mediante una procedura indicata dallo smartphone collegato al Remote Controller come rappresentato in Figura 3.15.

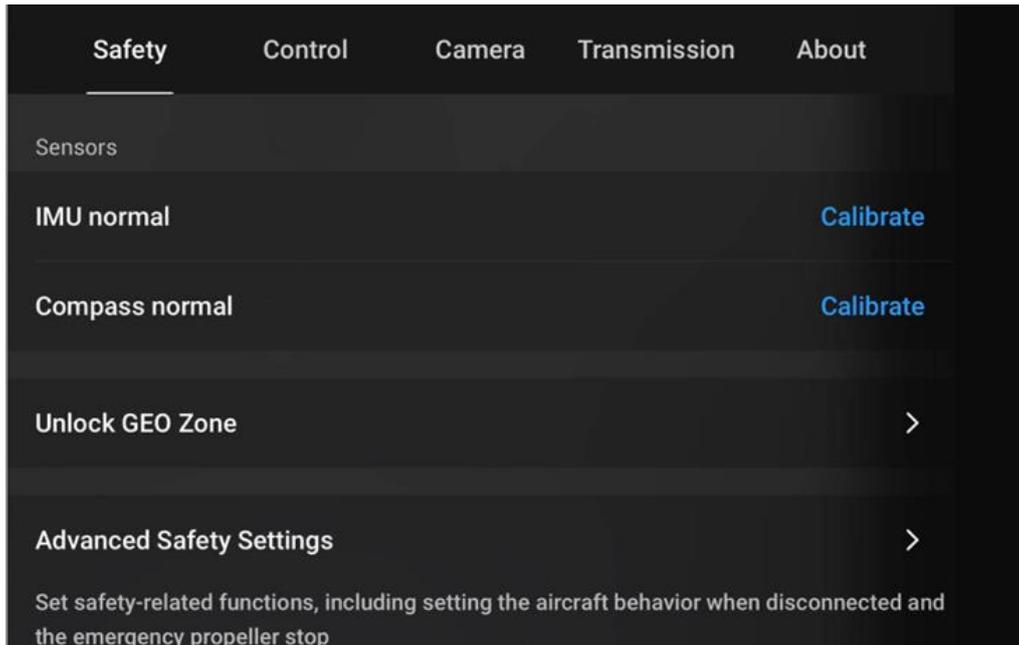


Figura 3.15, schermata di calibrazione *Dji Flight*

Inoltre, al fine della buona riuscita del rilievo, vengono effettuate ulteriori verifiche per quanto concerne alcuni parametri climatici fondamentali come ad esempio il vento. Fenomeni di forte vento, infatti, possono compromettere la sicurezza del volo dell'APR costringendo la momentanea sospensione della missione.

Valutati con attenzione i parametri sopra descritti è possibile far decollare il drone ed avviare la missione di volo, a questo punto sarà necessario concentrarsi esclusivamente sul drone e sulle possibili interferenze con esso. L'APR tornerà al punto di decollo ogni qual volta la batteria sarà sotto la percentuale di sicurezza del 15%, l'operatore potrà così provvedere alla sostituzione della batteria fino al completamento della missione. In funzione della temperatura esterna, sarà inoltre necessario prestare attenzione alla durata della batteria; temperature molto rigide, infatti, generano un rapido abbattimento dell'autonomia di volo. Terminata la missione di volo pianificata, le immagini acquisite sono state validate su computer in campo al fine di verificare che fossero conformi a quanto inizialmente deciso. In Figura 3.16 è riportata un'immagine, scattata da APR, a dimostrazione dell'attività in campo.



Figura 3.16, attività di rilievo in campo con APR.

## 3.7 Rilievo di punti con ricevitore GPS/GNSS

L'applicazione dell'algoritmo 'pyBathySfM', reperibile online sulla piattaforma GitHub<sup>4</sup> (servizio web-based per sviluppatori) e sviluppato da James T. Dietrich, Ph.D nel 2019; oltre al dato fotogrammetrico richiede in input anche altre superfici ed elementi puntuali per i quali è stato necessario materializzare dei punti mediante ricevitore GNSS.

I punti sono stati acquisiti con tecnica differenziale NRTK (Network Real Time Kinematic) facendo stazione per 3 secondi così da ottenere le coordinate (N, E, H) mediate su 3 misurazioni (epoche). Per ognuna delle tre classi verranno di seguito riportate le tabelle con i punti acquisiti correlati dai parametri precedentemente descritti nel Capitolo 3.5.

Le principali classi di punti che sono state acquisite in campo sono di seguito riportate:

---

<sup>4</sup> <https://github.com/geojames/pyBathySfM>

### 3.7.1 Punti di battigia

Con punti di battigia (Figura 3.17) si intendono tutti quei punti, sia in sinistra che in destra idrografica, che sono il confine longitudinale tra la parte di alveo bagnata e quella asciutta, nel caso specifico sono stati acquisiti in numero pari a 166 (Tab. 10). Questi punti saranno implementati nell'algoritmo, insieme a quelli di pelo libero, per la ricostruzione della superficie dell'acqua generata dall'interpolazione.

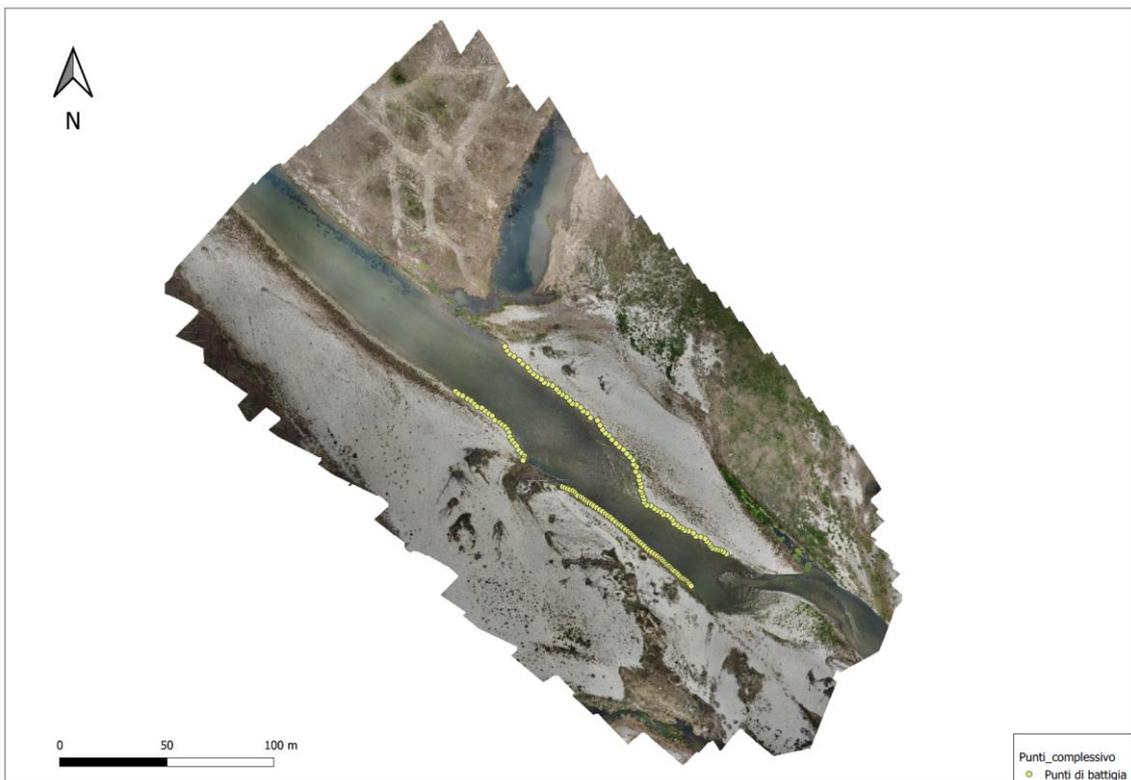


Figura 3.17, rappresentazione planimetrica dei punti di battigia

In Tabella 10 vengono riportati, in modo esemplificativo, alcuni punti di battigia completi dei principali parametri descrittivi.

### 3. Rilievo fluviale con drone

Nome	Base	Punto Nord/N	Punto Est/E	Q.Geo	Codice	Satelliti	HDOP	VDOP	PDOP	GDOP	HRMS	VRMS	Soluzione
337	25	5006804,722	408410,655	143,192	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,028	RTK Fissato
338	25	5006805,652	408409,263	143,203	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,023	0,036	RTK Fissato
339	25	5006806,453	408407,964	143,21	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,02	0,032	RTK Fissato
340	25	5006806,581	408406,735	143,223	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,017	0,028	RTK Fissato
341	25	5006806,944	408405,529	143,212	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,029	RTK Fissato
342	25	5006807,378	408404,183	143,21	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,019	0,03	RTK Fissato
343	25	5006808,574	408403,253	143,237	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,019	0,03	RTK Fissato
344	25	5006809,648	408402,562	143,225	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,019	0,031	RTK Fissato
345	25	5006810,604	408401,533	143,239	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,029	RTK Fissato
346	25	5006811,895	408400,622	143,232	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,03	RTK Fissato
347	25	5006812,705	408398,604	143,214	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,028	RTK Fissato
348	25	5006812,907	408396,429	143,22	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,017	0,028	RTK Fissato
349	25	5006814,476	408395,248	143,248	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,029	RTK Fissato
350	25	5006815,397	408393,081	143,242	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,023	0,036	RTK Fissato
351	25	5006815,753	408391,195	143,257	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,029	RTK Fissato
352	25	5006816,79	408390,012	143,238	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,017	0,028	RTK Fissato
353	25	5006817,355	408388,724	143,244	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,02	0,032	RTK Fissato
354	25	5006818,333	408387,504	143,234	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,029	RTK Fissato
355	25	5006819,081	408386,151	143,246	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,019	0,031	RTK Fissato
356	25	5006820,762	408385,53	143,248	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,024	0,038	RTK Fissato
357	41	5006821,888	408384,433	143,241	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,027	0,041	RTK Fissato
358	41	5006822,925	408383,048	143,23	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,028	0,043	RTK Fissato
359	41	5006823,21	408381,149	143,242	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,03	0,046	RTK Fissato
360	41	5006824,486	408380,076	143,259	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,027	0,042	RTK Fissato
361	41	5006825,127	408378,375	143,243	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,031	0,048	RTK Fissato
362	41	5006826,045	408377,052	143,247	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,029	0,045	RTK Fissato
363	41	5006827,296	408375,502	143,226	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,029	0,045	RTK Fissato
364	41	5006827,604	408373,52	143,246	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,028	0,045	RTK Fissato
365	41	5006829,055	408372,236	143,245	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,028	0,044	RTK Fissato
366	41	5006830,445	408372,201	143,272	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,029	0,046	RTK Fissato
367	41	5006832,11	408371,6	143,329	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,026	0,041	RTK Fissato
368	41	5006833,556	408370,989	143,305	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,024	0,038	RTK Fissato
369	41	5006834,646	408370,493	143,331	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,023	0,035	RTK Fissato
370	41	5006836,427	408370,931	143,377	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,022	0,035	RTK Fissato
371	41	5006837,957	408370,471	143,388	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,022	0,035	RTK Fissato
372	41	5006839,527	408369,888	143,407	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,021	0,034	RTK Fissato
373	41	5006841,326	408369,846	143,433	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,018	0,029	RTK Fissato
374	41	5006843,395	408368,351	143,439	Battigia	GPS:7 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1	1,6	1,9	2,6	0,021	0,032	RTK Fissato
'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''

Tabella 10, esempio dati punti di battigia

In Tabella 11 viene effettuata una valutazione statistica riferita all'errore di posizionamento in orizzontale e in Tabella 12 in verticale.

STATISTICA SUGLI ERRORI ORIZZONTALI [m]			
n. misure	Media HRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	HRMS	-	-
166	0,020	0,029	0,016

Tabella 11, statistica errori orizzontali

STATISTICA SUGLI ERRORI VERTICALI [m]			
n. misure	Media VRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	VRMS	-	-
166	0,037	0,050	0,027

Tabella 12, statistica errori verticali

### 3.7.2 Punti di sezione

Per questa classe di punti sono state realizzate n.6 sezioni perpendicolari alla direzione di deflusso del Torrente Orco per un totale di 212 punti battuti (Figura 3.18). Questi punti saranno di fondamentale importanza per valutare l'errore della superficie batimetrica generata dall'algoritmo 'pyBathySfM'.

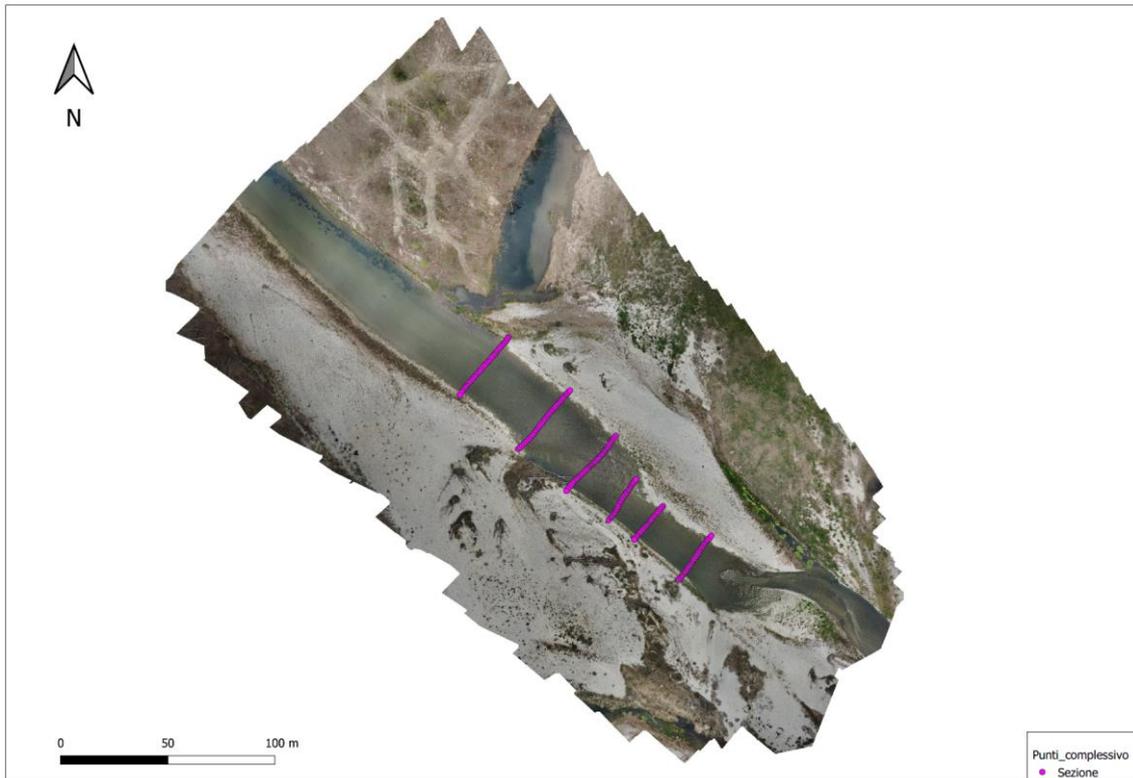


Figura 3.18, planimetria punti di sezione

Di seguito, in Tabella 13, vengono riportati alcuni punti di sezioni completi dei principali parametri descrittivi.

### 3. Rilievo fluviale con drone

Nome	Base	Punto Nord/N	Punto Est/E	Q.Geo	Codice	Satelliti	HDOP	VDOP	PDOP	GDOP	HRMS	VRMS	Soluzione
125	25	5006903.854	408307.286	143,787	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.800	1.200	1.500	2.400	0.021	0.027	RTK Fissato
126	25	5006905.516	408308.286	144,146	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.022	0.029	RTK Fissato
127	25	5006904.860	408307.877	144,024	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.027	RTK Fissato
128	25	5006903.882	408307.291	143,793	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.022	0.029	RTK Fissato
129	25	5006903.115	408306.772	143,705	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.021	0.027	RTK Fissato
130	25	5006902.426	408305.990	143,649	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
131	25	5006901.727	408305.342	143,614	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.021	0.028	RTK Fissato
132	25	5006900.988	408304.700	143,594	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
133	25	5006900.185	408304.085	143,525	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
134	25	5006899.219	408303.301	143,492	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.021	0.028	RTK Fissato
135	25	5006898.467	408302.615	143,44	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
136	25	5006897.673	408302.029	143,428	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
137	25	5006897.137	408301.606	143,434	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.024	RTK Fissato
138	25	5006896.513	408300.993	143,373	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
139	25	5006895.681	408300.296	143,387	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.022	0.030	RTK Fissato
140	25	5006894.767	408299.531	143,357	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
141	25	5006894.013	408298.780	143,383	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.022	0.031	RTK Fissato
142	25	5006893.197	408298.054	143,351	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.026	RTK Fissato
143	25	5006892.507	408297.430	143,447	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
144	25	5006891.821	408296.796	143,366	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
145	25	5006890.702	408295.867	143,444	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
146	25	5006889.921	408295.162	143,374	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.027	RTK Fissato
147	25	5006889.101	408294.516	143,393	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
148	25	5006888.278	408293.672	143,379	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
149	25	5006887.559	408293.011	143,371	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.021	0.027	RTK Fissato
150	25	5006886.881	408292.548	143,484	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.025	RTK Fissato
151	25	5006886.215	408291.911	143,425	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.023	0.031	RTK Fissato
152	25	5006885.427	408291.237	143,452	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
153	25	5006884.576	408290.472	143,491	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.021	0.028	RTK Fissato
154	25	5006883.788	408289.794	143,538	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.022	0.029	RTK Fissato
155	25	5006882.902	408289.023	143,526	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
156	25	5006882.298	408288.485	143,539	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
157	25	5006881.678	408288.017	143,586	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.023	0.031	RTK Fissato
158	25	5006880.886	408287.404	143,594	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.021	0.028	RTK Fissato
159	25	5006880.164	408286.885	143,646	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.027	RTK Fissato
160	25	5006879.448	408286.405	143,684	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.020	0.026	RTK Fissato
161	25	5006878.346	408285.672	143,8	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.025	RTK Fissato
162	25	5006852.925	408312.879	143,666	Sezione	GPS:9 GLS:5 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	0.900	1.200	1.500	2.000	0.019	0.026	RTK Fissato
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabella 13, esempio dati punti di sezione.

In Tabella 14 viene effettuata una valutazione statistica riferita all'errore di posizionamento in orizzontale e in Tabella 15 in verticale.

STATISTICA SUGLI ERRORI ORIZZONTALI [m]			
n. misure	Media HRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	HRMS	-	-
212	0,021	0,022	0,020

Tabella 14, statistica sugli errori orizzontali

STATISTICA SUGLI ERRORI VERTICALI [m]			
n. misure	Media VRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	VRMS	-	-
212	0,027	0,029	0,026

Tabella 15, statistica sugli errori verticali

### 3.7.3 Punti di pelo libero.

Questi punti, battuti a centro alveo e alla quota corrispondente a quella dell'acqua, serviranno insieme a quelli di battigia, per la realizzazione della superficie di pelo libero. Sono stati acquisiti complessivamente 15 punti di pelo libero (Figura 3.19).

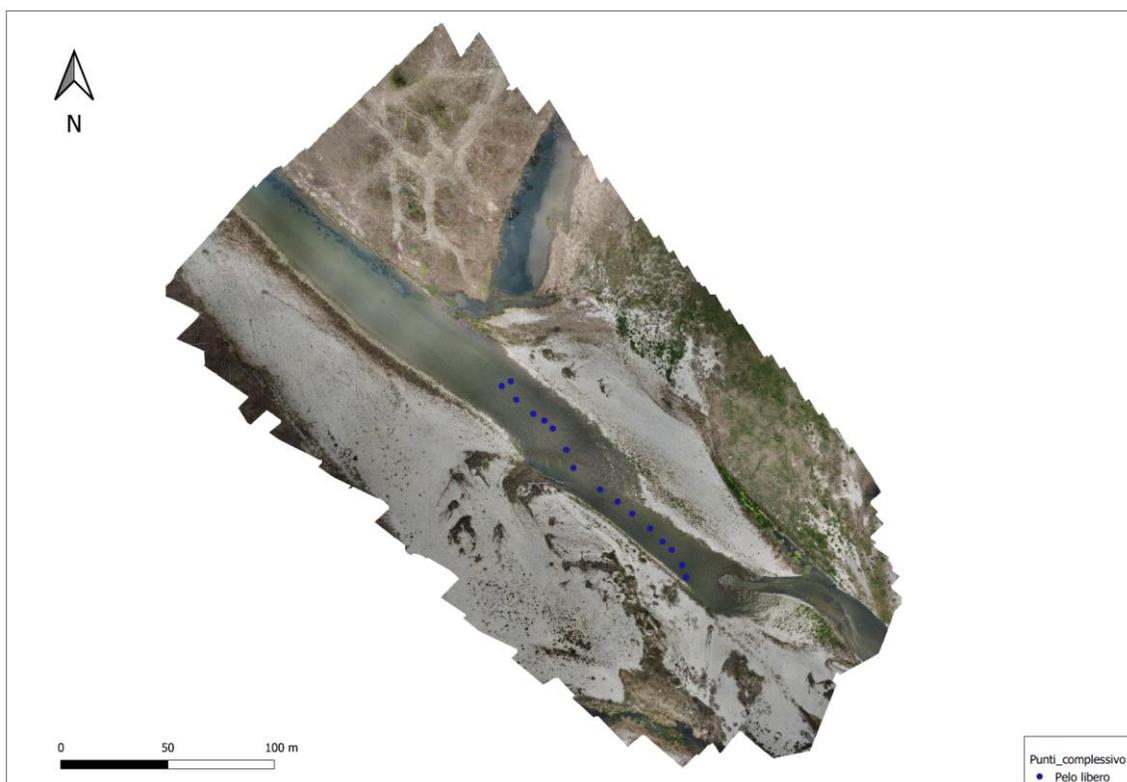


Figura 3.19, planimetria punti di pelo libero.

Di seguito, in Tabella 16, vengono riportati alcuni punti di sezioni completi dei principali parametri descrittivi.

Nome	Base	Punto Nord/N	Punto Est/E	Q.Geo	Codice	Satelliti	HDOP	VDOP	PDOP	GDOP	HRMS	VRMS	Soluzione
503	25	5006794.888	408391.848	143,271	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.900	0.017	0.034	RTK Fissato
504	25	5006800.612	408390.134	143,241	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.900	0.020	0.038	RTK Fissato
506	25	5006807.730	408385.159	143,243	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.900	0.018	0.038	RTK Fissato
507	25	5006811.672	408380.862	143,259	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.018	0.038	RTK Fissato
508	25	5006817.839	408375.096	143,213	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.025	0.045	RTK Fissato
509	25	5006824.820	408366.735	143,27	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.019	0.038	RTK Fissato
510	25	5006830.541	408359.897	143,284	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.017	0.037	RTK Fissato
511	25	5006836.196	408351.596	143,35	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.018	0.038	RTK Fissato
512	25	5006846.355	408339.179	143,456	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.017	0.036	RTK Fissato
513	25	5006854.879	408335.881	143,563	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.020	0.040	RTK Fissato
514	25	5006864.956	408329.528	143,659	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.017	0.036	RTK Fissato
515	25	5006868.704	408325.558	143,671	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.017	0.037	RTK Fissato
516	25	5006871.809	408320.405	143,722	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.022	0.042	RTK Fissato
517	25	5006878.526	408312.432	143,71	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.017	0.037	RTK Fissato
518	25	5006884.947	408305.597	143,687	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.020	0.039	RTK Fissato
519	25	5006887.242	408309.872	143,725	Pelo libero	GPS:8 GLS:4 GAL:0 BDU:0 SBAS:0	1.100	1.700	2.000	2.800	0.019	0.039	RTK Fissato

Tabella 16, dati punti di pelo libero

In Tabella 17 viene effettuata una valutazione statistica riferita all'errore di posizionamento in orizzontale e in Tabella 18 in verticale.

STATISTICA SUGLI ERRORI ORIZZONTALI [m]			
n. misure	Media HRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	HRMS	-	-
15	0,019	0,025	0,017

Tabella 17, statistica sugli errori orizzontali

STATISTICA SUGLI ERRORI VERTICALI [m]			
n. misure	Media VRMS	Errore massimo	Errore minimo
-	VRMS	-	-
15	0,038	0,045	0,034

Tabella 18, statistica sugli errori verticali

## 4 Elaborazione dei dati, analisi ed esportazione

Il Capitolo 4 è integralmente dedicato alla descrizione delle principali fasi operative che hanno permesso la trasformazione dei singoli fotogrammi, scattati seguendo le regole fotogrammetriche, in un modello tridimensionale. Per la generazione del modello tridimensionale è stato necessario passare per la generazione della nuvola di punti, del Digital Terrain Model (DTM), del Digital Surface Model (DSM) e dell'ortomosaico. Questi prodotti intermedi sono stati utilizzati come input nell'applicazione dell'algoritmo 'pyBathySfM', spesso integrati con i punti acquisiti mediante ricevitore GNSS. Per quanto riguarda i tempi di elaborazione è bene precisare che l'intero processo è stato sviluppato mediante una work station dotata delle seguenti caratteristiche *hardware*:

- processore: Intel® Core™ i9 24 Core 13900HX (5.4 GHz Turbo);
- memoria Ram: DDR5 SODIMM Corsair 4800 MHz 64 GB;
- scheda grafica: NVIDIA® GeForce® RTX 4070 - 8.0GB GDDR6 Video RAM - DirectX® 12.1;
- SSD: CORSAIR FORCE MP600 2 TB NVMe PCIe (fino a 4950 MB/R, 4000 MB/W).

### 4.1 Processo SfM con software Metashape

Il processo di *Structure From Motion* (SfM) permette di creare la nuvola di punti, l'ortofoto, i modelli digitali del terreno e le *mesh* a partire da un dataset di immagini bidimensionali. Agisoft Metashape è un *software* che sfrutta la tecnica SfM per generare modelli da fotogrammi. Nel contesto di Metashape, la fotogrammetria coinvolge l'analisi delle immagini per identificare punti omologhi e calcolare la loro posizione nello spazio tridimensionale. L' SfM è il processo utilizzato per stimare i punti di presa e la geometria dell'oggetto fotografato, analizzando ed elaborando i fotogrammi che inquadrano l'oggetto da differenti punti di vista.

Il *software* esegue quindi diverse operazioni:

- Corrispondenze delle caratteristiche: identifica le caratteristiche comuni tra le immagini, come punti chiave, linee o forme.
- Allineamento delle immagini: stima la posizione relativa delle fotocamere utilizzando le caratteristiche comuni trovate permettendo così la creazione della nuvola di punti sparsa (*sparse point cloud*).

- Generazione della nuvola di punti: utilizza le informazioni sulla posizione della fotocamera e la nuvola di punti sparsa per la generazione della nuvola di punti densa (*dense point cloud*).

Questa tecnica è ampiamente usata in settori come la cartografia, l'architettura e l'ingegneria per creare modelli tridimensionali accurati da foto. Nel caso specifico è stato utilizzato il *software* Agisoft Metashape; tuttavia, esistono altri software analoghi, tra cui Pix4D, RealityCapture e 3DF Zephyr.

#### 4.1.1 Analisi preliminare del dato acquisito

Una volta terminata l'acquisizione da APR, mediante volo pianificato, verrà effettuata una prima analisi speditiva dei contenuti acquisiti in termini di numero di foto e presenza del dato. Un'analisi più accurata e approfondita verrà invece effettuata prima dell'importazione dei fotogrammi nel software Agisoft Metashape. L'analisi prevederà il passaggio di ogni fotogramma per la verifica della corretta esposizione oltre che della corretta messa a fuoco; infatti, nel caso di fotogrammi troppo sottoesposti o viceversa, troppo sovraesposti, sarà possibile modificare il file grezzo '.raw'. L'importazione di un dataset di immagini, che sia il più possibile omogeneo e di qualità, è la base per l'ottenimento di un buon risultato finale.

Una volta analizzato il dataset, lo step successivo prevede l'importazione nel software Agisoft Metashape come rappresentato in Figura 4.1.

## 4. Elaborazione dei dati, analisi ed esportazione

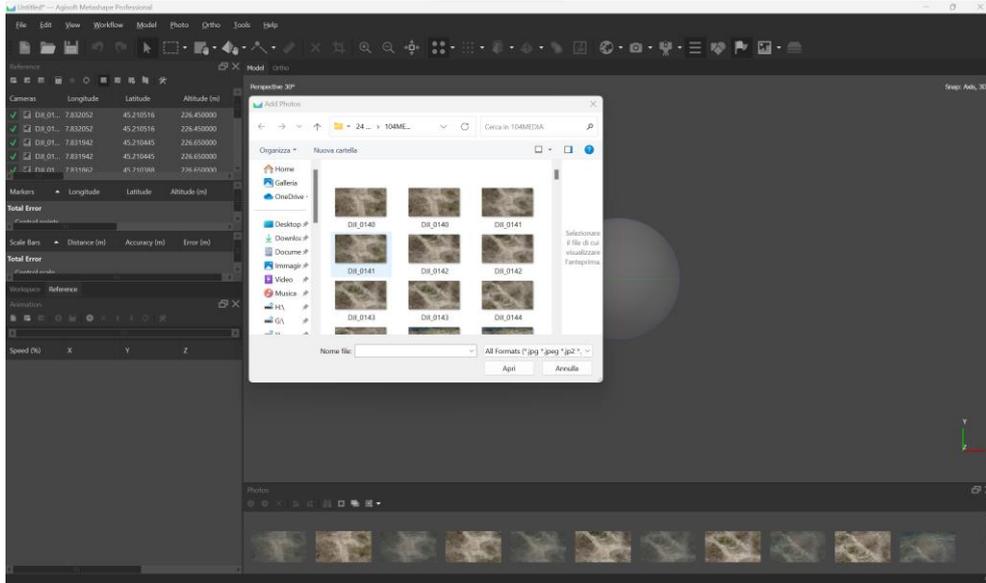


Figura 4.1, Importazione dataset immagini nel software Agisoft Metashape.

Una volta importato l'intero dataset è possibile visualizzare i fotogrammi disposti in funzione della posizione con la quale sono stati acquisiti (Figura 4.2) in modo tale da poter eventualmente correggere le foto che hanno posizione sensibilmente errata.

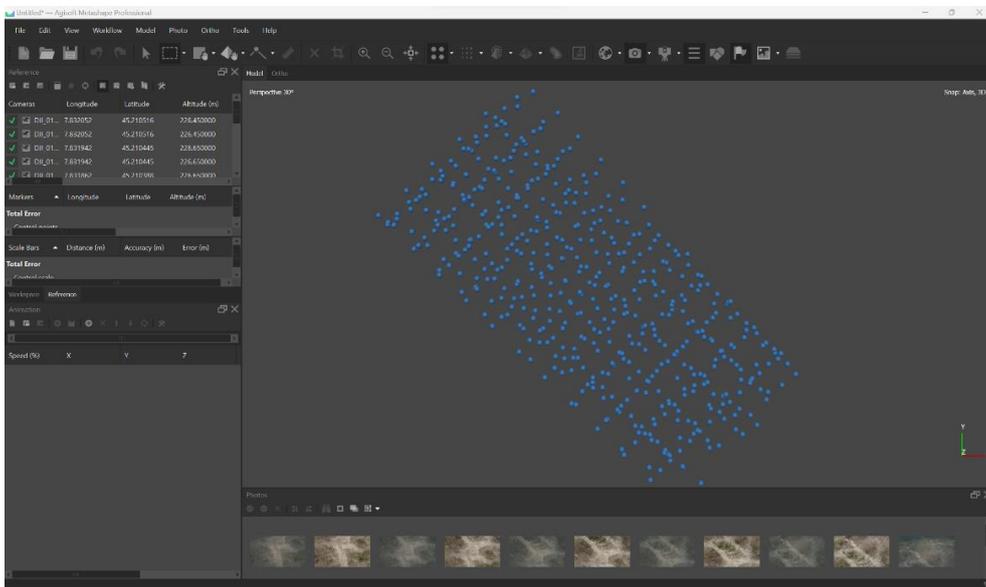


Figura 4.2, visualizzazione planimetrica centri di presa.

### 4.1.2 Allineamento

Successivamente allo step di analisi e caricamento del dataset fotografico è stato necessario procedere alla fase di allineamento dei singoli fotogrammi. L'allineamento serve a posizionare correttamente le immagini le une rispetto alle altre o, se già geolocalizzate, a ottimizzarne la posizione nello spazio reale.

Su ogni immagine lavora un algoritmo di *features detection* che permette di identificare punti notevoli e caratteristici. Un punto notevole, per essere tale, deve essere stabile, rimanere identificabile e distinguibile al variare della scala di acquisizione, direzione di presa e condizioni di illuminazione. Gli algoritmi di *features detection* sono la chiave del SfM e permettono di identificare in modo automatico migliaia di descrittori per ogni immagine, svincolandosi dal rigore delle geometrie di presa. Per ogni immagine c'è un database contenente tutti i descrittori trovati. Ogni descrittore è univoco poiché caratterizzato dal comportamento radiometrico dell'immagine nel suo intorno. A questo punto, i descrittori delle varie immagini sono confrontati tra loro e gli omologhi costituiscono un legame tra le immagini e ne permettono il posizionamento reciproco. Questa fase è definita di '*matching*', cioè di ricerca e definizione di punti di legame tra le immagini costituenti il *dataset*.

Una volta determinati i punti di legame si possono impostare e risolvere le equazioni di collinearità; tali equazioni servono per il passaggio dallo spazio immagine (bidimensionale) allo spazio reale (3D), mettendo in relazione:

- posizione nello spazio immagine del punto di legame;
- parametri di calibrazione della fotocamera;
- parametri esterni della fotocamera (punto di presa e orientamento);
- coordinate nello spazio reale del punto di legame.

I principi base della fotogrammetria tradizionale ricordano che, un generico punto 'P', deve essere ritratto in almeno 2 immagini per poter essere ricostruito in 3D. Nella tecnica SfM questo sistema esplose in migliaia di equazioni in quanto, uno stesso punto di legame 'P', è visto in tante immagini. In ogni immagine sono identificati migliaia di punti di legame e tutti i parametri interni ed esterni della fotocamera sono incogniti. Il sistema di equazioni è risolto all'interno di uno step chiamato '*bundle adjustment*', dove le soluzioni ottenute sono ottimizzate e gli *output* sono di seguito riportati:

- posizione e orientamento delle fotocamere;

- parametri di calibrazione e distorsione della fotocamera;
- nuvola sparsa, ossia le coordinate 3D dei punti di legame.

Gli output sono restituiti nel sistema di riferimento scelto in fase di inizializzazione del progetto, altrimenti in un sistema di riferimento arbitrario e locale scelto dal software.

Dal punto di vista operativo, il software prevede la possibilità di scegliere il parametro di 'accuracy' con cui effettuare la fase di allineamento (Figura 4.3); nel caso specifico è stato scelto il livello 'highest' che permette di aumentare la dimensione dell'immagine di un fattore 4x. La generazione della nuvola sparsa (Figura 4.4 - Figura 4.5) ha richiesto un tempo pari a circa 8 minuti.

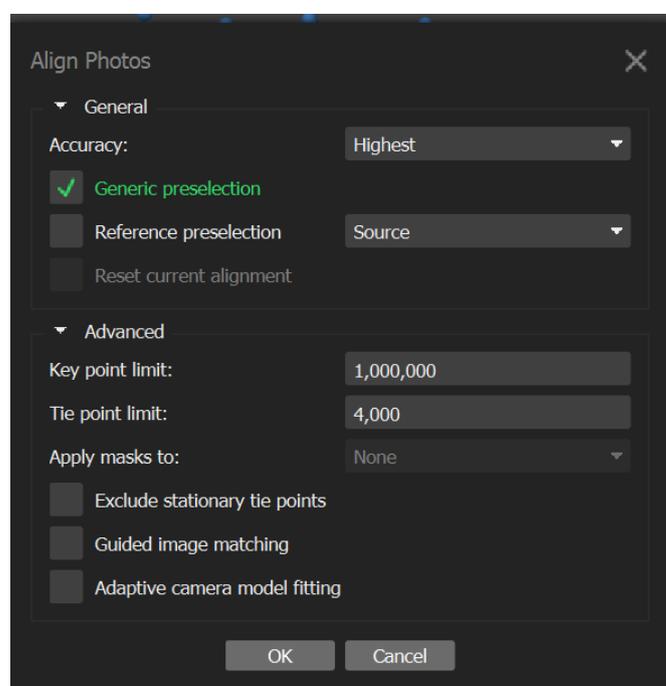


Figura 4.3, parametri di input per la generazione della nuvola sparsa



Figura 4.4, nuvola sparsa

Property	Value
Points	264,593 of 317,811
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
RMS reprojection error	0.320023 (0.580138 pix)
Max reprojection error	3.34265 (33.3144 pix)
Mean key point size	1.81259 pix
Average tie point multiplicity	7.26595
<b>Alignment parameters</b>	
Accuracy	Highest
Generic preselection	Yes
Reference preselection	No
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	5 minutes 34 seconds
Matching memory usage	756.65 MB
Alignment time	1 minutes 46 seconds
Alignment memory usage	414.44 MB
<b>Optimization parameters</b>	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	Yes
Optimization time	5 seconds
Date created	2023:04:23 10:41:17
Software version	2.0.1.16069
File size	42.27 MB

Figura 4.5, dati tecnici della nuvola sparsa

### 4.1.3 Inserimento GCP e CP

L'inserimento dei *Ground Control Point* (GCP) e dei *Check Point* (CP) è di fondamentale importanza per effettuare la scalatura e le rototraslazioni della nuvola al fine di generare un modello conforme alle tolleranze richieste dalla scala di rappresentazione. I punti acquisiti in campo, mediante ricevitore GNSS con correzione RTK, sono quelli già riportati in tabella nel Capitolo 3.5. L'importazione del file contenente le coordinate, già corrette con le quote ortometriche, è effettuato a partire dal pannello *'reference'* mediante lo strumento *'Open'*. Il file, in formato *'csv'* contiene i seguenti campi: *ID, Easting, Northing, Altitude, Easting Accuracy, Northing Accuracy e Altitude Accuracy*. Una volta selezionato il sistema di riferimento (SR: WGS 84 /UTM zone 32 N, EPSG:32632) sono state analizzate tutte le fotografie per contrassegnare i target mediante bandierine e correlarli alle specifiche coordinate acquisite in campo. I colori delle bandiere possono essere: grigie 🚩 (possibile posizione di un target), verdi 🟢 (target localizzato manualmente) e blu 🚩 (target localizzato in modo automatico). I marker identificati con il colore verde e blu sono usati nei processi di ottimizzazione e valutazione delle accuratèzze del processo. I target grigi non vengono usati per la ricostruzione. I target utilizzati come GCP, cioè di georeferenziazione del modello, verranno flaggati con spunta verde mentre quelli senza spunta verranno utilizzati come target di *check* per la valutazione del processo di georeferenziazione (Figura 4.6)

Markers	Easting (m)	Northing (n)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
🚩 "104"	408293.095000	5006914.31...	144.182000	0.005000	0.011532	38	0.564
🚩 "105"	408319.383000	5006897.35...	143.987000	0.005000	0.032927	45	0.706
🟢 🚩 "106"	408338.605000	5006884.84...	143.898000	0.005000	0.011889	39	0.568
🚩 "107"	408364.467000	5006856.72...	143.668000	0.005000	0.027005	49	1.858
🚩 "108"	408372.547000	5006840.27...	143.445000	0.005000	0.017506	49	0.631
🟢 🚩 "109"	408377.501000	5006830.50...	143.346000	0.005000	0.028207	46	0.590
🟢 🚩 "110"	408389.812000	5006823.92...	143.382000	0.005000	0.012547	44	0.395
🟢 🚩 "111"	408398.227000	5006815.98...	143.368000	0.005000	0.013269	46	0.645
🟢 🚩 "112"	408411.965000	5006807.98...	143.344000	0.005000	0.013149	47	0.592
🟢 🚩 "113"	408392.527000	5006777.30...	144.046000	0.005000	0.016175	43	0.552
🟢 🚩 "114"	408372.052000	5006790.37...	143.953000	0.005000	0.030621	30	0.562
🟢 🚩 "115"	408368.333000	5006798.97...	144.071000	0.005000	0.012241	42	0.377
🟢 🚩 "116"	408355.961000	5006807.96...	144.519000	0.005000	0.032543	28	0.570
🟢 🚩 "117"	408346.818000	5006815.38...	144.567000	0.005000	0.020272	37	0.718
🟢 🚩 "118"	408333.484000	5006821.84...	145.116000	0.005000	0.018276	34	1.072
🚩 "119"	408304.267000	5006844.97...	144.808000	0.005000	0.038289	30	3.114
🟢 🚩 "120"	408292.097000	5006860.66...	144.279000	0.005000	0.016142	25	0.551
🟢 🚩 "121"	408267.532000	5006881.98...	144.158000	0.005000	0.021396	32	0.955
<b>Total Error</b>							
Control points					0.020220		0.643
Check points					0.027273		1.561

Figura 4.6, rappresentazione finestra di Metashape con target

Una volta che il modello è stato georiferito a partire dai Ground Control Point (GCP), il *software* impiegato estrae dal modello le coordinate dei Check Point (CP) e le confronta con quelle acquisite in campo. Il confronto di queste coppie di coordinate determina la bontà del processo di georeferenziazione che, nello specifico caso, si attesta in un errore medio di 2,72 cm.

#### 4.1.4 Generazione dense cloud

Questa fase prevede la creazione della *'dense cloud'* a partire dalla densificazione della nuvola di punti sparsa generata nella fase di allineamento. Gli algoritmi di *'image matching'* permettono di cercare le corrispondenze pixel to pixel all'interno di una coppia di immagini, mediante la costituzione di corrispondenze ed il calcolo delle coordinate 3D. Il prodotto è una mappa di profondità (*depth map*) che assegna ad ogni pixel dell'immagine un valore relativo di profondità permettendo la creazione di una nuvola di punti mediante un approccio definito Stereo o Multi-Stereo (due o più immagini). Dal punto di vista operativo, nel software Agisoft Metashape è possibile scegliere la qualità dell'elaborazione (Figura 4.7). Nello specifico caso è stato scelto il parametro *'Ultra high'* che permette di aumentare di quattro volte la qualità originale del dato fotografico; scendendo con *High, Medium, Low, Lowest* la qualità delle immagini viene via progressivamente degradata fino a 16 volte. Il parametro *'depth filtering'* permette di lavorare sugli *outliers* generati in fase di ricostruzione densa dovuti alla presenza di eventuale rumore nelle immagini, in questo caso è stato scelto il livello *'Mild'*. L'output principale di questa fase è la nuvola di punti densa (Figura 4.8) costituita da 245'790'988 punti e colorata con colori reali; il peso complessivo si attesta in 3.51 GB. Complessivamente questa fase ha richiesto un tempo di elaborazione pari a 2 ore e 17 minuti come indicato nel report in Figura 4.9.

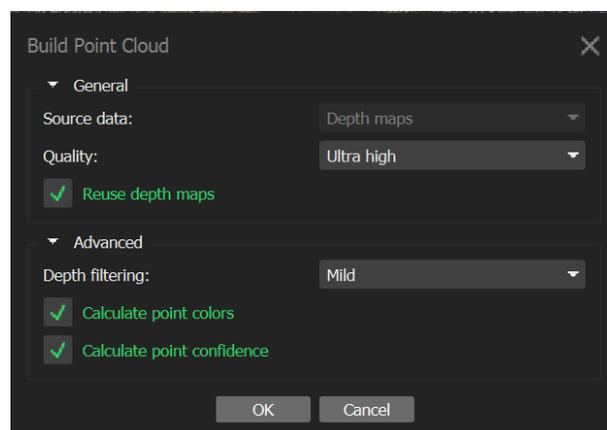


Figura 4.7, finestra Metashape per l'impostazione dei parametri di input.



Figura 4.8, nuvola di punti densa

Property	Value
Points	245,790,988
<b>Point attributes</b>	
Position	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	
<b>Point classes</b>	
Created (never classified)	217,143,916
Water	28,647,072
<b>Depth maps generation parameters</b>	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	40 minutes 33 seconds
Memory usage	10.59 GB
<b>Point cloud generation parameters</b>	
Processing time	1 hours 36 minutes
Memory usage	22.83 GB
Date created	2023:06:15 18:14:16
Software version	2.0.1.16069
File size	3.51 GB

Figura 4.9, report nuvola di punti densa.

Mediante il software Agisoft Metashape è inoltre possibile effettuare un'analisi riguardante la confidenza con la quale sono stati posizionati in punti nella nuvola. L'analisi è espressa mediante

la colorazione della nuvola stessa in funzione della confidenza, con valori da 0 a 100, come rappresentato in Figura 4.10. La scala dei valori, compresi nel range tra 0 e 100, è correlata al numero di mappe di profondità utilizzate per la generazione del singolo punto. Il caso analizzato ha tuttavia riscontrato esito molto positivo, infatti i punti oggetto di analisi risultano avere confidenza prossima al 100%.

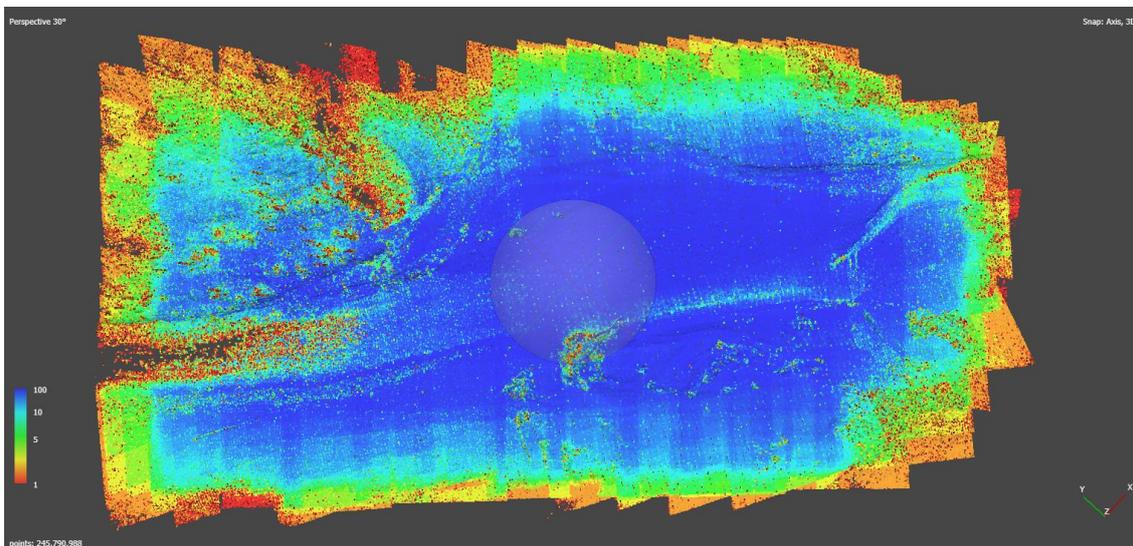


Figura 4.10, nuvola di punti colorata in funzione della confidenza.

I punti della nuvola generata dal processo SfM sono stati successivamente classificati, sia mediante tecniche automatiche che manuali, in tre macrocategorie, la prima riguardante la vegetazione (viola), la seconda il terreno (bianco) e la terza l'acqua (azzurro). La Figura 4.11 rappresenta la nuvola di punti colorati in funzione delle tre macro-classi.

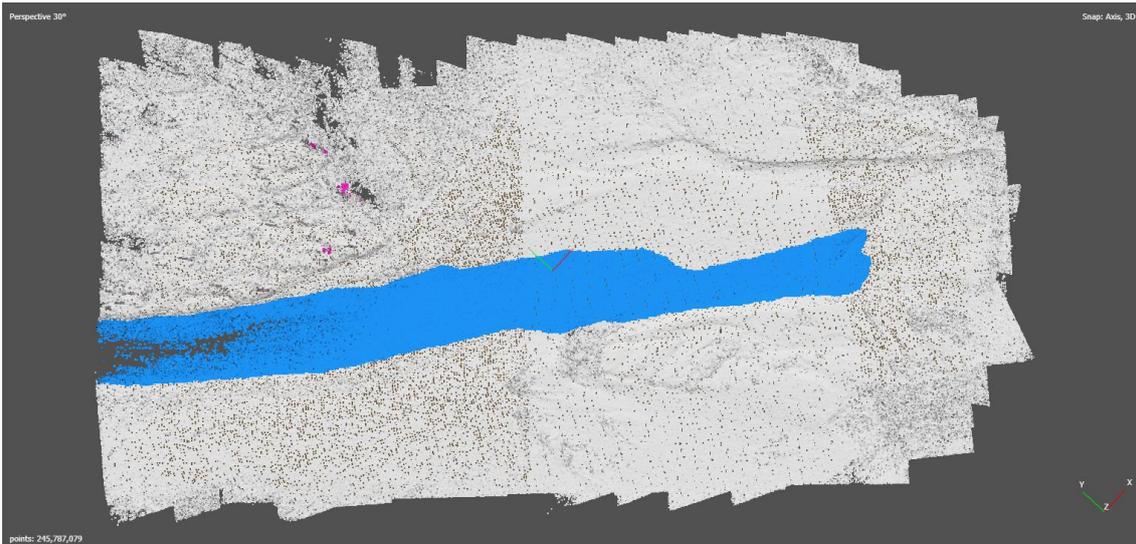


Figura 4.11, nuvola di punti colorata in funzione delle macrocategorie.

In Figura 4.12, è rappresentata un'ulteriore classificazione della nuvola di punti in funzione della quota dei singoli. La scala colorimetrica parte dai punti a quota più depressa in blu (circa 122 m s.l.m.) a quelli a quota più elevata in rosso (circa 172 m. s.l.m.).

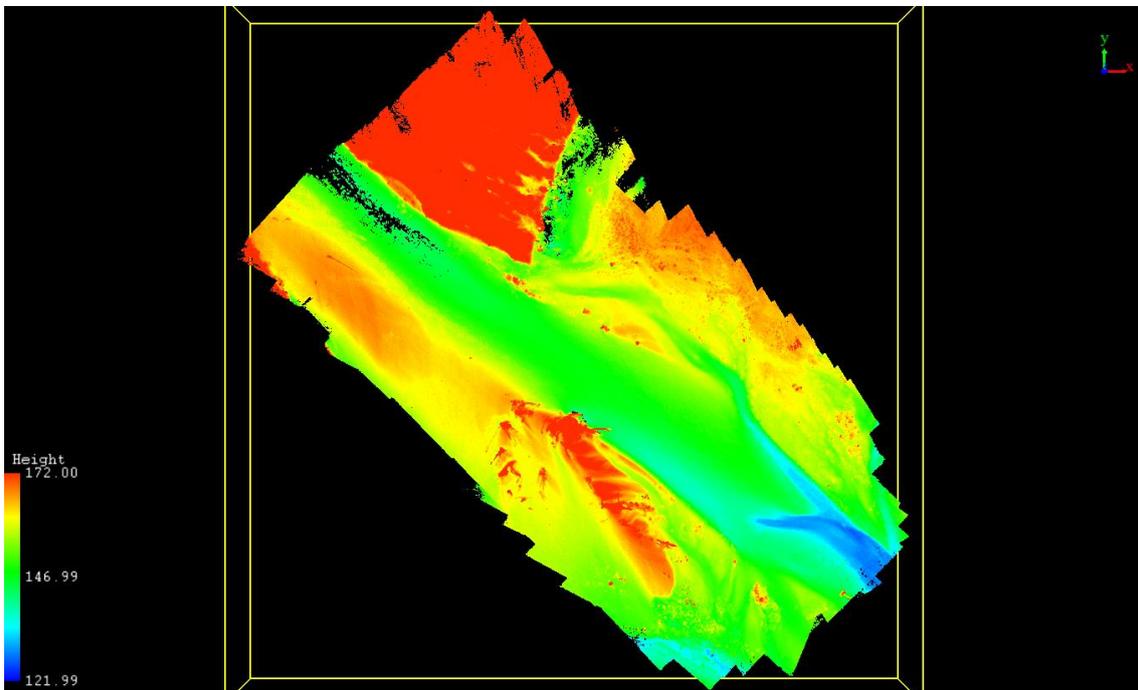


Figura 4.12, nuvola di punti colorata in funzione della quota.

#### 4.1.5 Generazione DSM e DTM

La fase successiva del processo prevede la generazione, a partire dalla nuvola di punti, del *Digital Surface Model* (DSM) e del *Digital Terrain Model* (DTM). Sia il DSM che il DTM vengono definite superfici statistiche; con superfici statistiche si intende: “Una superficie statistica è una rappresentazione della distribuzione dei valori di un determinato fenomeno definito, per ogni coppia di coordinate (X, Y), da un valore di Z, misurato o calcolato”<sup>5</sup>.

La principale differenza tra DSM e DTM, come rappresentato in Figura 4.13, è dovuta al fatto che il DSM ha il valore di ‘z’ che comprende anche le strutture e la vegetazione mentre il DTM fa riferimento al solo terreno. Nello specifico caso, il DTM differirà dal DSM per la sola componente vegetazionale, entrambe le superfici passeranno per il fondo alveo apparente, cioè per i punti determinati dal processo fotogrammetrico. In linea generale, per la costruzione del DTM bisognerà partire da una nuvola di punti filtrata con i soli punti del terreno, mentre per il DSM verranno mantenuti tutti i punti originari. In questo caso studio sono stati generati due file in formato raster per il DSM e due per il DTM rispettivamente con dimensione del singolo pixel di 2 e 5 cm.

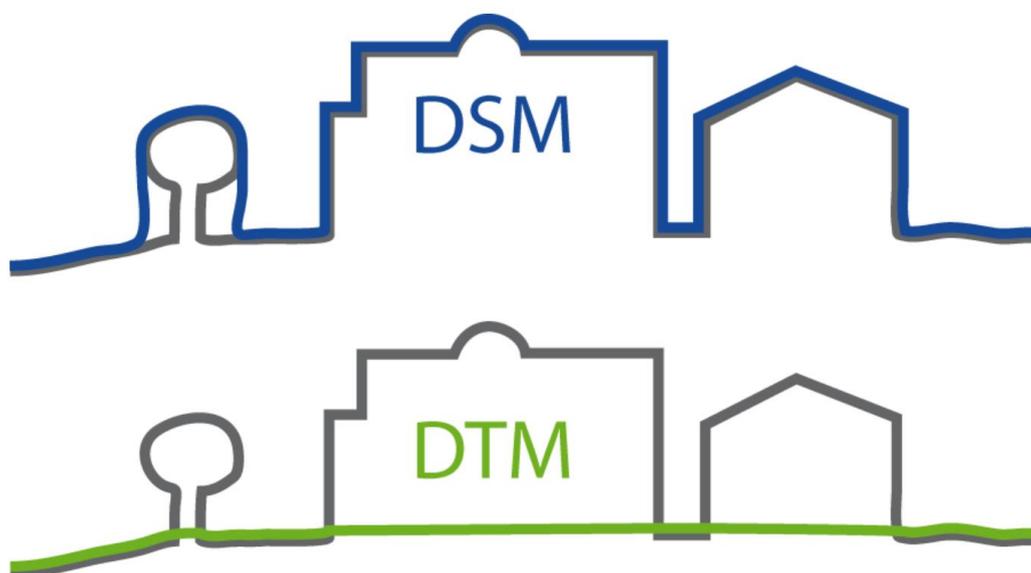


Figura 4.13, rappresentazione schematica DSM e DTM.

<sup>5</sup> Robinson et al., 1995; DeMers, 1997.

In Figura 4.14 è rappresentato il DSM a maglia 2 cm, generato mediante il software Agisoft Metashape, mentre in Figura 4.15 il DTM a medesima maglia. La durata del processo è stata di circa due minuti per ognuno dei raster generati.

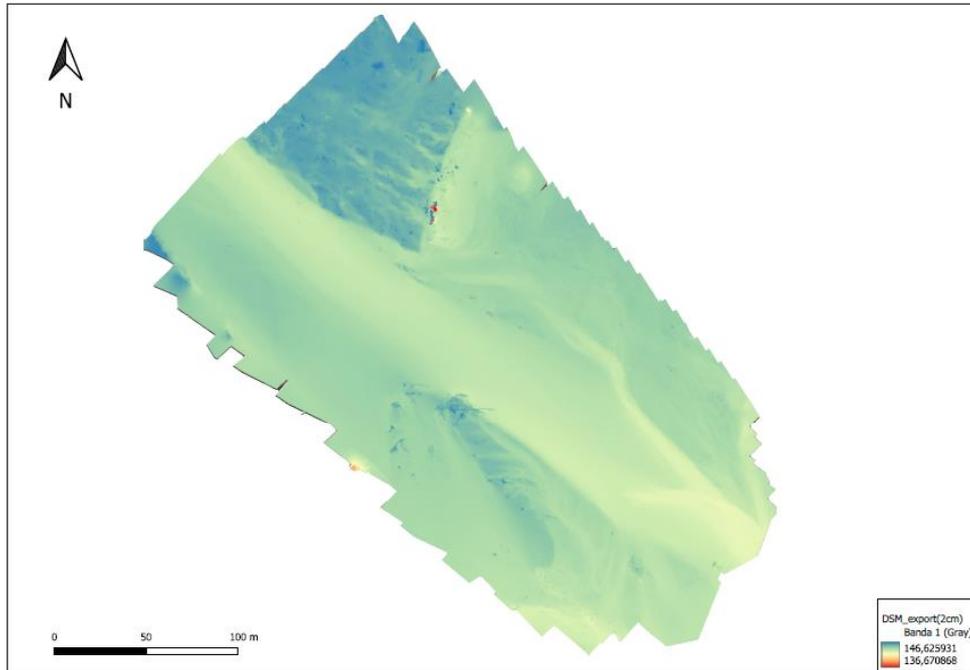


Figura 4.14, Digital Surface Model a maglia 2 cm.

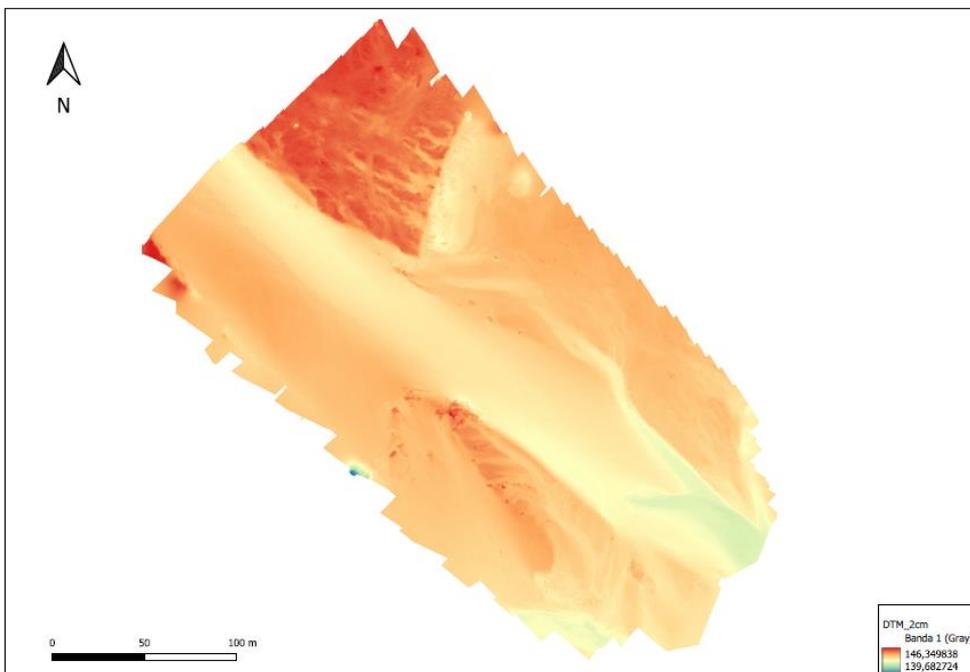


Figura 4.15, Digital Terrain Model a maglia 2 cm.

#### 4.1.6 Generazione ortomosaico

Con il termine ortomosaico si intende una composizione di immagini, secondo i canoni della fotogrammetria, di singole immagini. Tale composizione è geometricamente corretta grazie ad un processo di ortorettifica e successiva georeferenziazione in modo tale che la scala di rappresentazione diventi uniforme in ogni sua parte. Al termine di questo processo è possibile attribuire all'ortomosaico lo stesso valore di una vera e propria carta geografica. La finestra di generazione dell'ortomosaico in Agisoft Metashape, rappresentata in Figura 4.16, richiede in input diversi parametri, tra cui la possibilità di riempire le parti mancanti mediante interpolazione dei dati più prossimi e la grandezza delle celle dei pixel che, in questo caso, è stata parametrata a 2 cm.

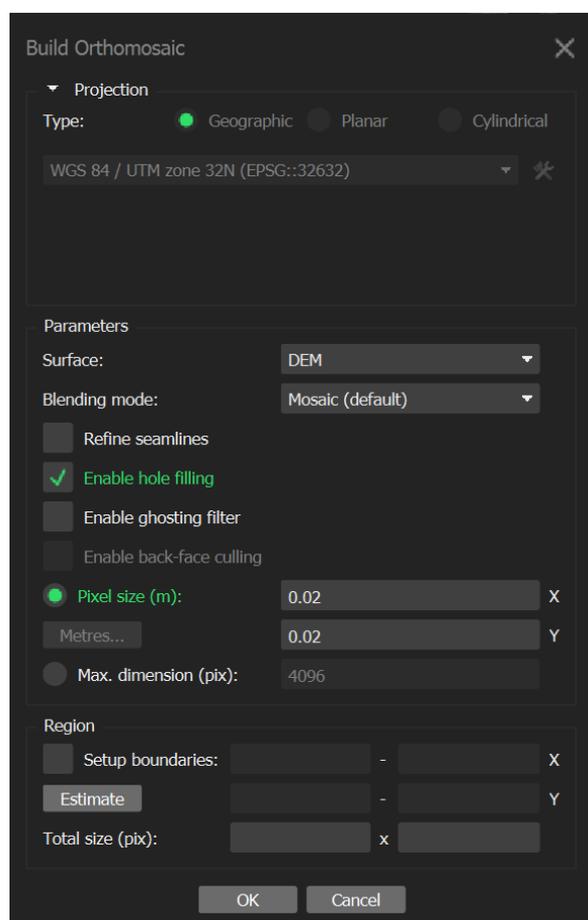


Figura 4.16, finestra Metashape generazione ortomosaico

L'output generato è raffigurato Figura 4.17 e Figura 4.18.

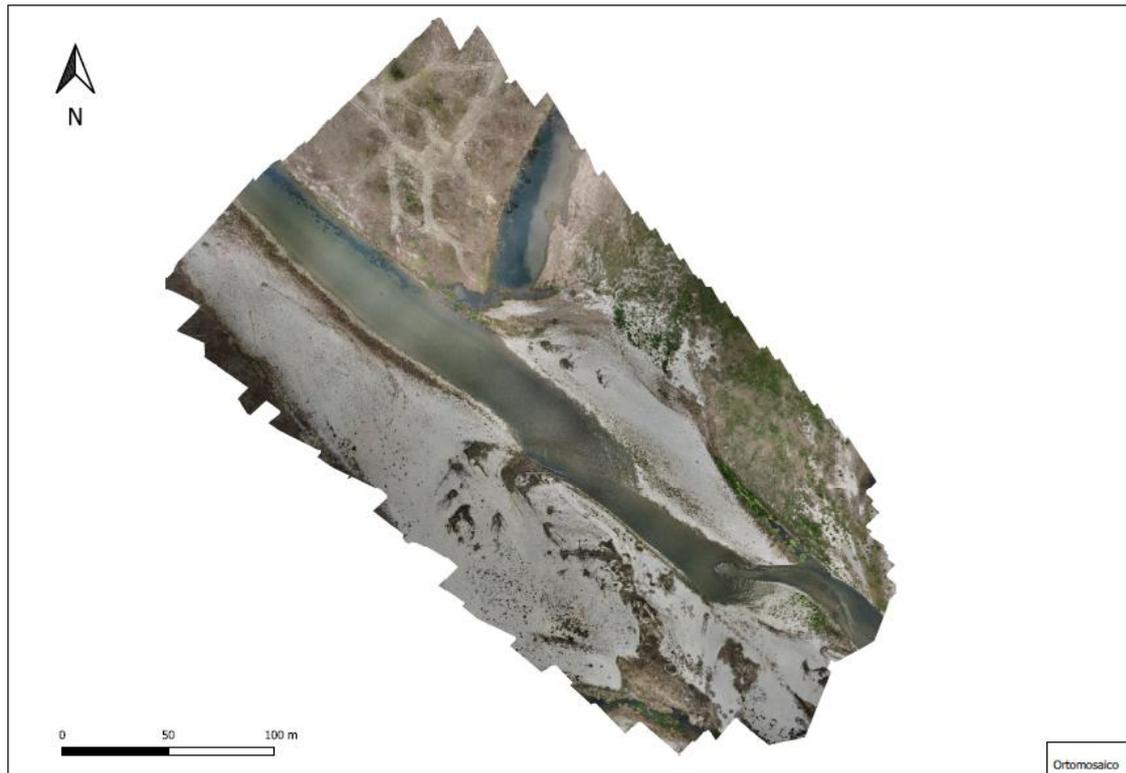
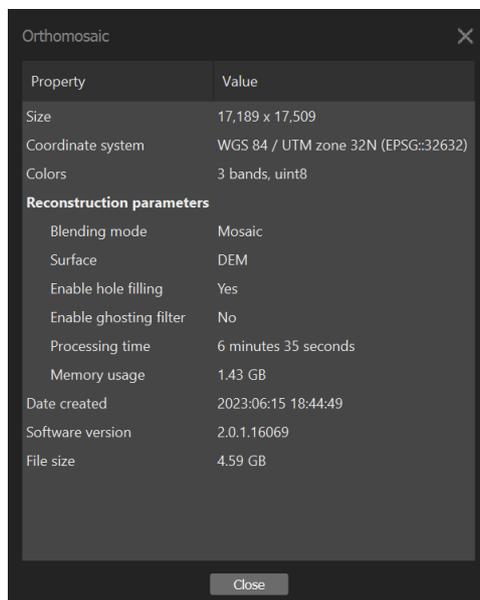


Figura 4.17, ortomosaico a maglia 5 cm



Figura 4.18, dettaglio ortomosaico

Il tempo di elaborazione è stato di 6 minuti e 35 secondi con la generazione di un file di dimensioni di 1,43 GB. In Figura 4.19 è riportato il report generato dal software Agisoft Metashape.



Property	Value
Size	17,189 x 17,509
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG:32632)
Colors	3 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	6 minutes 35 seconds
Memory usage	1.43 GB
Date created	2023:06:15 18:44:49
Software version	2.0.1.16069
File size	4.59 GB

Figura 4.19, report ortomosaico Metashape

## 4.2 Generazione risultati finali

Gli output generati, che sono riassunti nei capitoli precedenti, sono funzionali all'inquadramento e all'identificazione del problema ma, prima ancora, all'applicazione dell'algoritmo 'pyBathySfM'. La nuvola di punti ha la funzione di inquadrare il problema da un punto di vista prettamente geometrico; il DSM e il DTM permettono di identificare l'andamento piano-altimetrico dell'area di rilievo, mentre l'ortomosaico permette un inquadramento fotografico generale dell'area. Tuttavia, vedremo che questi *output* dovranno essere parzialmente modificati ed integrati al fine di poter essere utilizzati come *input* dell'algoritmo di correzione dei dati batimetrici. In Tabella 19 sono riportati i principali *output* generati associati alla tipologia di formato di esportazione ed al rispettivo peso in *megabyte*.

OUTPUT PRODOTTI		
TIPOLOGIA	FORMATO	GRANDEZZA (mb)
Nuvola di punti sparsa	.las / .laz	3050
Nuvola di punti densa	las / .laz	7200
Digital Surface Model (DSM) 2 cm/pixel	.TIFF	570
Digital Terrain Model (DTM) 2 cm/pixel	.TIFF	560
Ortomosaico	.jpg	57

*Tabella 19, output del processo fotogrammetrico*

## 5 Rilievo batimetrico con fotogrammetria multi-immagine

La parte innovativa dell'attività si concentra proprio in questo capitolo mediante il quale verranno descritte le differenti fasi che hanno portato alla generazione del dato di batimetria corretto. A partire dalla fotogrammetria multi-vista il dato è stato corretto mediante l'algoritmo '*Bathymetric Structure from Motion*'.

Come già anticipato nei precedenti capitoli, la batimetria è di fondamentale importanza in differenti campi, tra cui quello della pianificazione e della progettazione di opere ed interventi sui corpi idrici superficiali. La tecnologia utilizzata per determinare la morfologia dell'alveo sotto il pelo libero dell'acqua è quella della fotogrammetria che però, a causa del fenomeno di rifrazione all'interfaccia aria-acqua, genera errori di sottostima del dato di profondità. Per ovviare a tale problema si è pensato di applicare un algoritmo iterativo in grado di calcolare una serie di equazioni di correzione per ogni combinazione punto-fotocamera nella nuvola di punti. La generazione dell'andamento batimetrico, a partire da processi fotogrammetrici, è determinabile a meno di alcuni prerequisiti che vengono di seguito elencati:

- acqua limpida. Livelli elevati di sedimenti sospesi o acqua torbida inibiranno l'uso della fotogrammetria per misurare la profondità. La regola è che, se non riesci a vedere il fondo dell'alveo, non può vederlo nemmeno la telecamera e questo causerà problemi;
- onde superficiali minime. Sia le onde spinte dal vento che le onde idrauliche aumenteranno il "rumore" nella nuvola di punti. Ciò porterà a imprecisioni, errori o rumore negli *output* finali;
- condizioni meteorologiche nuvolose, nebbiose o con presenza di fumo creano molti riflessi superficiali sull'acqua che impediscono misurazioni accurate;
- le immagini dovrebbero essere raccolte ad angoli bassi e obliqui (circa 20° dal nadir) in schemi convergenti e sovrapposti. Anche la raccolta a due quote di volo differenti è vantaggiosa;
- l'uso di un filtro polarizzatore, regolato per ridurre i riflessi, aiuterà a rendere maggiormente visibile il fondale;
- mantenere il sole dietro la camera per quanto possibile;
- raccogliere le immagini in un momento della giornata che riduca al minimo le ombre.

## 5.1 Principi del metodo

Come anticipato, il metodo si pone l'obiettivo di correggere i dati batimetrici errati a causa del fenomeno della rifrazione. Nello specifico, verrà corretto il dato di quota dei punti sommersi che viene tendenzialmente sovrastimato a causa della sottostima della profondità dell'acqua. Questo fenomeno, trattato nel capitolo 3.2, è rappresentato geometricamente in Figura 5.1 con le variabili in Tabella 20 e viene risolto con un sistema di equazioni di seguito descritto.

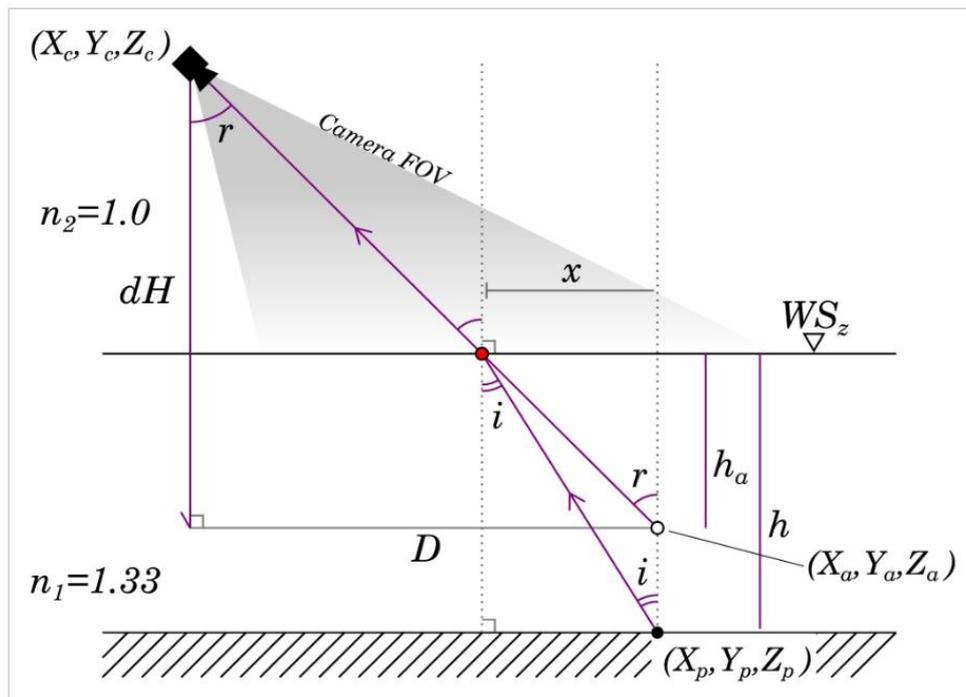


Figura 5.1, schema geometrico fenomeno della rifrazione

Variabili dello schema geometrico	
Variabile	Descrizione
$X_a, Y_a, Z_a$	Coordinate apparenti dei punti generati dal processo SfM
$X_p, Y_p, Z_p$	Coordinate reali dei punti
D	Distanza Euclidea tra punto apparente e camera
dH	Altezza tra punto apparente e camera
r	Angolo di rifrazione
i	Angolo di incidenza
x	Distanza orizzontale tra punto apparente e punto all'interfaccia aria/acqua
$h_a$	Profondità del punto apparente
h	Profondità del punto reale
$n_1$	Indice di rifrazione dell'acqua (1.37)
$n_2$	Indice di rifrazione dell'aria (1.0)

Tabella 20, variabili dello schema geometrico della rifrazione

Al fine di correggere il dato di quota errato è necessario risolvere un sistema di equazioni per 'h', profondità effettiva del punto immerso, che può essere utilizzato singolarmente oppure sottratto al valore della quota della superficie dell'acqua 'WSz' per fornire un valore corretto di elevazione.

Il fenomeno si basa sulla legge di Snell che governa la rifrazione all'interfaccia tra due mezzi diversi:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Dove  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $i$  e  $r$  sono riportati in Tab. 19.

Nella stereofotogrammetria convenzionale, l'applicazione diretta della legge di Snell è complicata dal fatto che il singolo punto è visto da due immagini sovrapposte. Le posizioni delle telecamere sono diverse e, di conseguenza, gli angoli ' $r$ ' e ' $i$ ' saranno diversi per ciascuna telecamera. Tale condizione richiede che l'equazione di Snell debba essere risolta per ciascuna telecamera, il che genererà profondità effettive 'h' leggermente diverse.<sup>6</sup> I *dataset* di SfM complicano ulteriormente il processo di correzione della rifrazione aggiungendo più viste, fino a 20, per un singolo punto. Per ogni punto, in un set di dati della nuvola di punti SfM, esiste un set unico di fotografie in grado di vederlo.

Ciascuna telecamera del set multicamera osserva l'area oggetto di studio da un'angolazione diversa e, secondo le leggi della rifrazione, dovrebbe produrre diversi angoli di incidenza e rifrazione (' $r$ ' e ' $i$ ') e quindi diverse profondità apparenti (' $h_o$ ') (Figura 5.2). Questi diversi valori di ' $h_o$ ' potrebbero creare un'ampia gamma di elevazioni che potrebbero a loro volta generare una nuvola di punti molto 'rumorosa'.

---

<sup>6</sup> (Fryer e Kniest, 1985b ; Westaway et al. , 2001 ; Butler et al. , 2002 ).

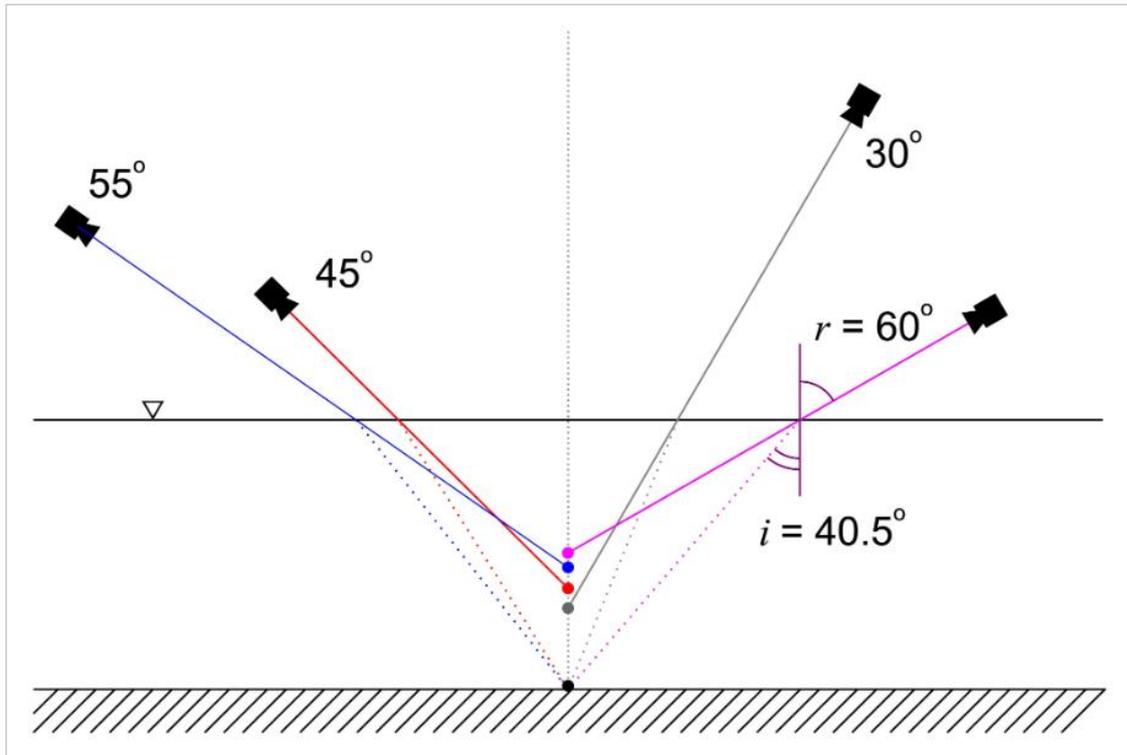


Figura 5.2, schema geometrico delle profondità apparenti multiple

Tuttavia, negli esperimenti di James T. Dietrich,<sup>7</sup> le porzioni immerse delle nuvole di punti derivanti da fotogrammetria producono una superficie con un rumore superficiale leggermente maggiore rispetto alle porzioni emerse. Woodget<sup>8</sup> ha proposto un metodo per la correzione della rifrazione che tentava di aggirare alcune delle complicazioni causate dall'uso di più fotocamere. Il suo metodo è specifico per le immagini SfM nadirali e propone di utilizzare una versione semplificata della legge di Snell che utilizza la sostituzione dell'approssimazione del piccolo angolo. Con l'approssimazione del piccolo angolo, per angoli ( $\theta = r \parallel i$ ) inferiori a  $10^\circ$ ,  $\sin\theta \cong \tan\theta$  e questo semplifica l'equazione come di seguito descritto :

<sup>7</sup> James T. Dietrich, Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry, in Earth Surface Processes and Landforms, 2017.

<sup>8</sup> Woodget AS, Carbonneau PE, Visser F, Maddock IP., Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry, in Earth Surface Processes and Landforms, 2015

$$\sin i \approx \tan i = \frac{x}{h} \qquad \sin r \approx \tan r = \frac{x}{h_a}$$

$$h = 1.337 \times h_a$$

Questa forma di correzione della rifrazione è di fondamentale importanza nella sua semplicità. Tuttavia, la ricerca attuale sulle strategie di raccolta delle immagini idonee per SfM suggerisce che le immagini *off-nadir* producano set di dati fotogrammetrici con meno errori sistematici e migliori calibrazioni della fotocamera. Pertanto, le immagini *off-nadir* creano dei set di dati di qualità superiore con migliore accuratezza e precisione.<sup>9</sup> Gli angoli della telecamera *off-nadir* (solitamente compresi in 10°–30°) precludono l'uso dell'approssimazione dell'angolo piccolo, perché 'r' può variare dal nadir (0°) a un limite teorico di 89° e 'i' può variare da 0° a ~ 48° (il limite per la riflessione interna totale). Questa gamma di possibili angoli richiede un approccio alternativo per la fotogrammetria multi-vista *off-nadir* in quanto preclude la possibilità di applicare l'approssimazione dei piccoli angoli. Tale considerazione implica la necessità di risolvere il problema trigonometrico per ogni combinazione punto-multicamera.

Tale tecnica è basata su un processo iterativo che, per ogni punto della porzione immersa della nuvola di punti, calcola le equazioni di correzione della rifrazione per ogni camera che può vedere il singolo punto. Il primo passo prevederà quindi un'analisi di tutti i singoli fotogrammi finalizzata a determinare i punti immersi visibili. Tale fase risulta possibile in quanto il processo fotogrammetrico genera, per ogni fotocamera, una riga di file contenente la sua posizione e il suo orientamento. Per i punti che risultano essere visibili dalla singola fotocamera è calcolato l'angolo di rifrazione 'r' con la formula che segue:

$$r = \tan^{-1} \frac{D}{dH}$$

Dove:

D: distanza Euclidea tra la camera e il punto;

dH: differenza di altezza tra la fotocamera e il punto.

<sup>9</sup> James e Robson, 2014 ; Carboneau e Dietrich, 2016

Inoltre, potendo determinare una superficie dell'acqua interpolata a partire dai punti di pelo libero materializzati, è anche stato possibile determinare i valori di profondità  $h_a$ . Noti questi parametri sono state definite le equazioni per le seguenti variabili incognite:

$$i = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} * \sin r \right)$$

$$x = h_a * \tan r$$

$$h = \frac{x}{\tan i} = \frac{h_a * \tan r}{\tan \left[ \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} * \sin r \right) \right]}$$

$$Z_p = WS_z - \bar{h}$$

Il valore di  $Z_p$  è determinato a partire dalla media di tutti i valori di 'h' per il singolo punto.

L'obiettivo è quindi quello di testare un algoritmo di correzione della rifrazione multicamera in grado di fornire una soluzione completa per la correzione del fenomeno di rifrazione all'interfaccia aria-acqua.

## 5.2 Preparazione dei dati di input

La preparazione dei dati di *input* prescinde da alcuni prerequisiti fondamentali, senza i quali si rischia la compromissione dell'intero processo. Tali prerequisiti sono elencati nel primo paragrafo del Capitolo 5 del presente documento.

Nello specifico l'algoritmo 'pyBathySfM', che permette la correzione del dato batimetrico, ha bisogno di tre file di *input* che sono di seguito riportati:

- *Point cloud file*, è il file contenente la nuvola di punti da correggere ove però, oltre ai dati minimi di coordinate (x, y, sfm\_z), è anche necessario che sia associato un dato di quota della superficie dell'acqua (w\_surf). Il formato complessivo del file dovrà quindi essere (x, y, sfm\_z, w\_surf).

- *Cameras file*, è un file contenente le coordinate delle posizioni di scatto (x, y, z) e di orientamento della camera (pitch, roll, yaw). Il formato del file dovrà quindi essere (x, y, z, pitch, roll, yaw).
- *Sensor file*, è un file contenente la lunghezza focale della camera in millimetri (focal) e le dimensioni fisiche del sensore sempre in millimetri (sensor\_x, sensor\_y). Il formato del file dovrà quindi essere (focal, sensor\_x, sensor\_y).

Per quanto concerne il '*Cameras file*' ed il '*Sensor file*' questi sono facilmente generabili, il primo come export a partire dal *software* Agisoft Metashape, mentre il secondo in maniera manuale a partire dai dati tecnici della camera montata a bordo dell'APR. Invece, per quanto riguarda il '*Point cloud file*' e soprattutto la componente '*w\_surf*' è necessaria la realizzazione di un iter procedurale finalizzato alla generazione di una superficie interpolata. Tale processo verrà svolto mediante il software Qgis come di seguito riportato.

### 5.2.1 Importazione dei file e delimitazione area di interesse sul software open source QGis

Il primo step prevede l'importazione dell'ortomosaico e del *Digital Terrain Model* (DTM), generati mediante il processo di SfM, sul software *open source* QGis (Figura 5.3).

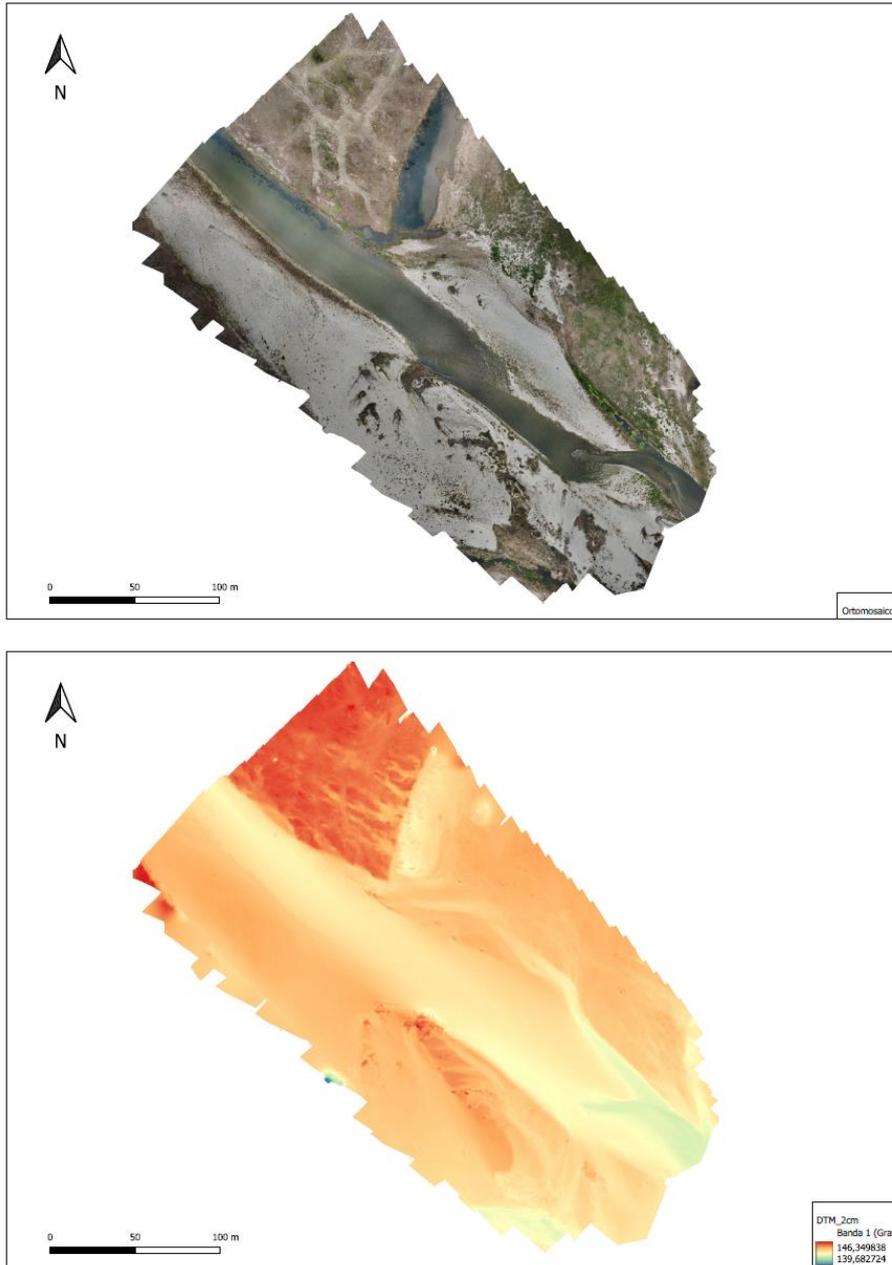


Figura 5.3, ortomosaico e DTM

Oltre ad importare questi due file in formato rispettivamente '.jpg' e '.TIF' è anche necessario importare tutti i punti acquisiti mediante il ricevitore GNSS. Tra questi, quelli definiti come punti di 'battigia', quelli definiti come punti di 'pelo libero' e infine anche quelli di 'sezione'. Lo step successivo ha previsto la generazione, sulla base dell'ortofoto, di un poligono '.shp' che contenesse tutti i punti bagnati compresi all'interno di quelli di battigia. La delimitazione di questa area di interesse ha generato l'area retinata in verde che è possibile apprezzare in Figura 5.4, tale poligono copre un'area pari a 5105 m<sup>2</sup>.

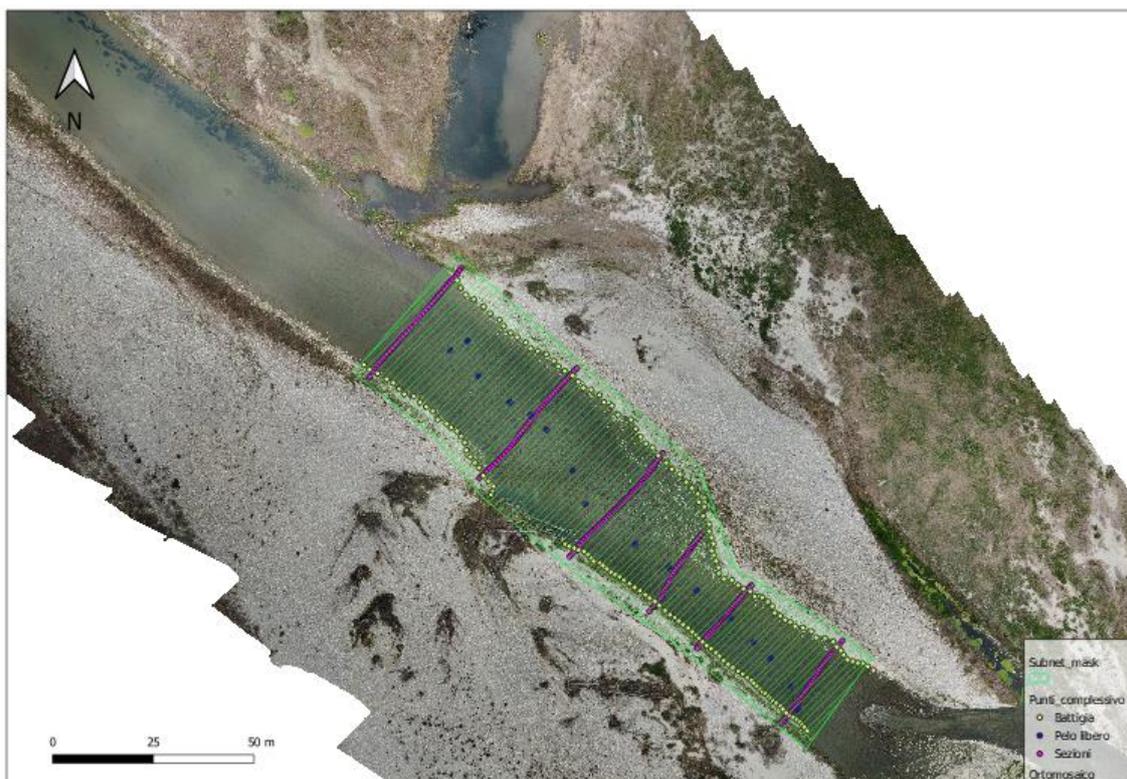


Figura 5.4, poligono di delimitazione area di interesse e puntuali acquisiti mediante antenna GPS/GNSS

### 5.2.2 Interpolazione superficie di pelo libero

Successivamente alla fase di importazione dei dati puntuali e alla trasformazione degli stessi in Shapefile, si procede alla creazione di una superficie interpolata a partire dall'integrazione dei punti di battigia e di pelo libero. L'interpolazione lineare mediante il *metodo Inverse Distance Weighting (IDW)* viene applicata alla sola superficie identificata come maschera nel Cap. 5.2.1. L'interpolazione IDW è possibile generarla con il seguente comando *Strumenti di processing -> interpolazione -> Interpolazione IDW*, a questo punto si aprirà una finestra come quella in Figura 5.5.

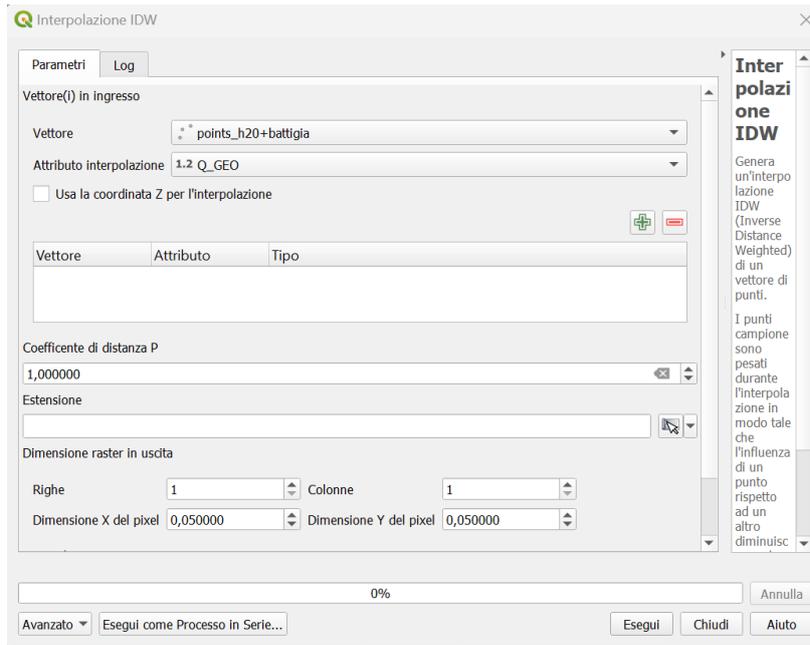


Figura 5.5, finestra per input parametri interpolazione IDW

Il vettore scelto è quello contenente i punti di battigia e quelli di pelo libero e l'attributo di interpolazione è quello di quota ortometrica. Una volta avviato il processo verrà generata una superficie interpolata linearmente (Figura 5.6) sulla base delle quote dei singoli punti, il raster prodotto avrà le dimensioni delle singole celle pari a quelle del DTM.

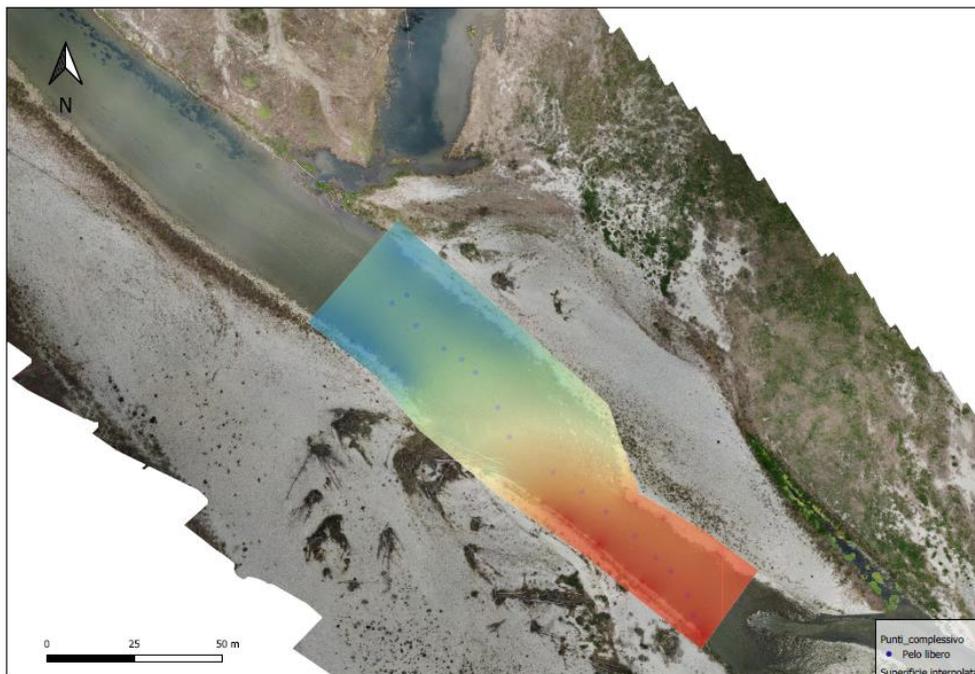


Figura 5.6, superficie interpolata

### 5.2.3 Sottrazione tra raster IDW e DTM ed estrazione dei punti sommersi

L'intento principale rimane quello di generare, per ogni punto, un dato di quota di pelo libero da associare al *'point cloud file'* al fine di poterlo inserire come *input* all'interno dell'algoritmo di correzione dei dati batimetrici. Per perseguire questo obiettivo è quindi necessario effettuare una sottrazione tra il raster interpolato mediante IDW e il raster DTM. Tale processo è finalizzato a consentire la differenziazione dei punti in acqua da quelli emersi. Nel caso specifico, avendo effettuato la sottrazione tra la superficie ipotetica dell'acqua e quella del terreno, avremo valori compresi in un range tra  $- 2,04$  m e  $+ 0,58$  m come è possibile vedere nell'istogramma rappresentato in Figura 5.7.

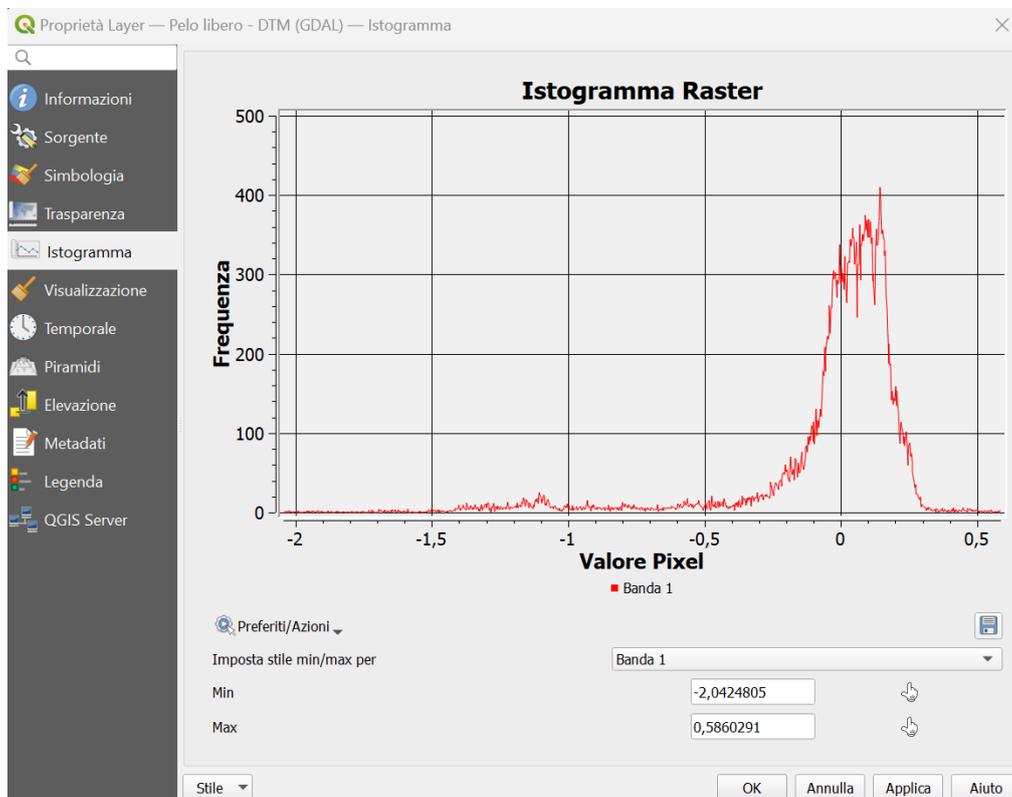


Figura 5.7, istogramma generato dalla sottrazione tra raster IDW e raster DTM.

Data la tipologia di sottrazione è necessario valutare i valori positivi come punti sommersi con profondità massima dell'acqua pari a 0,58 m e come punti emersi tutti i valori  $< 0$ . La rappresentazione del raster 'sottrazione' è possibile apprezzarla in Figura 5.8 ove i punti in verde sono quelli sommersi e in rosso quelli emersi.

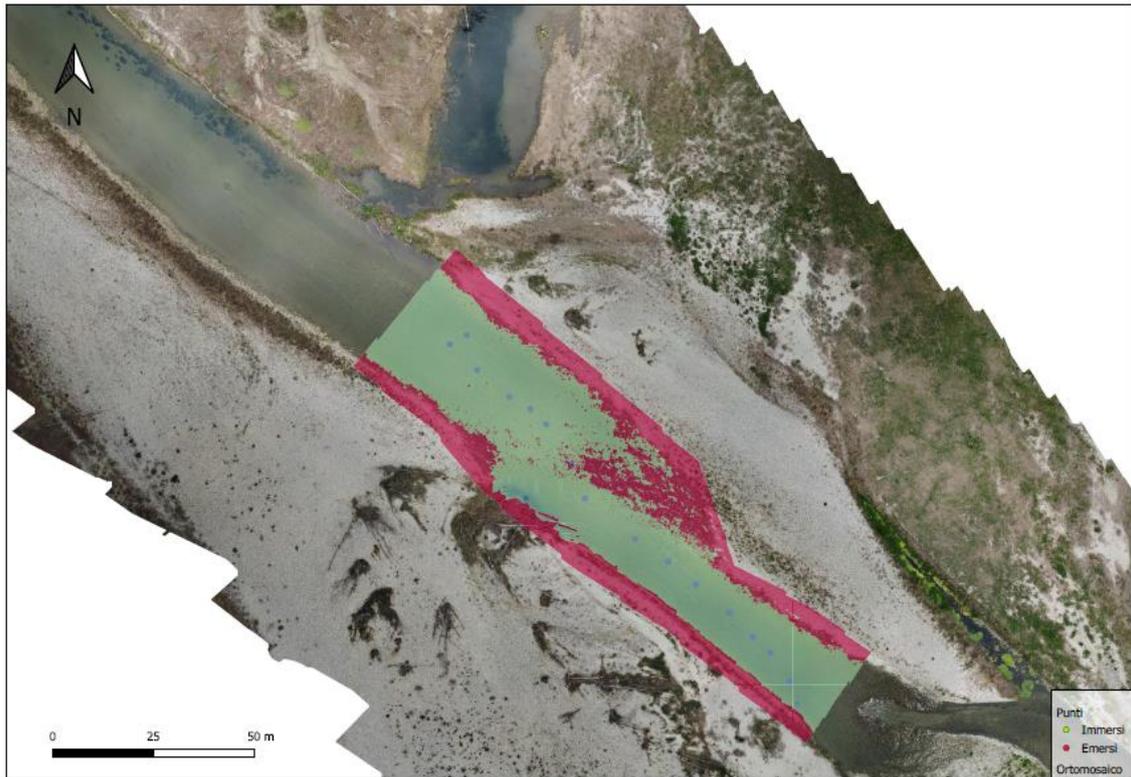


Figura 5.8, punti immersi e punti emersi

Una volta identificati i punti sommersi (colore verde) è necessario effettuarne l'estrazione al fine di procedere con la correzione. L'estrazione è effettuata attraverso lo strumento 'Calcolatore raster' di Qgis, i risultati possono essere apprezzati in Figura 5.9 e in Figura 5.10.

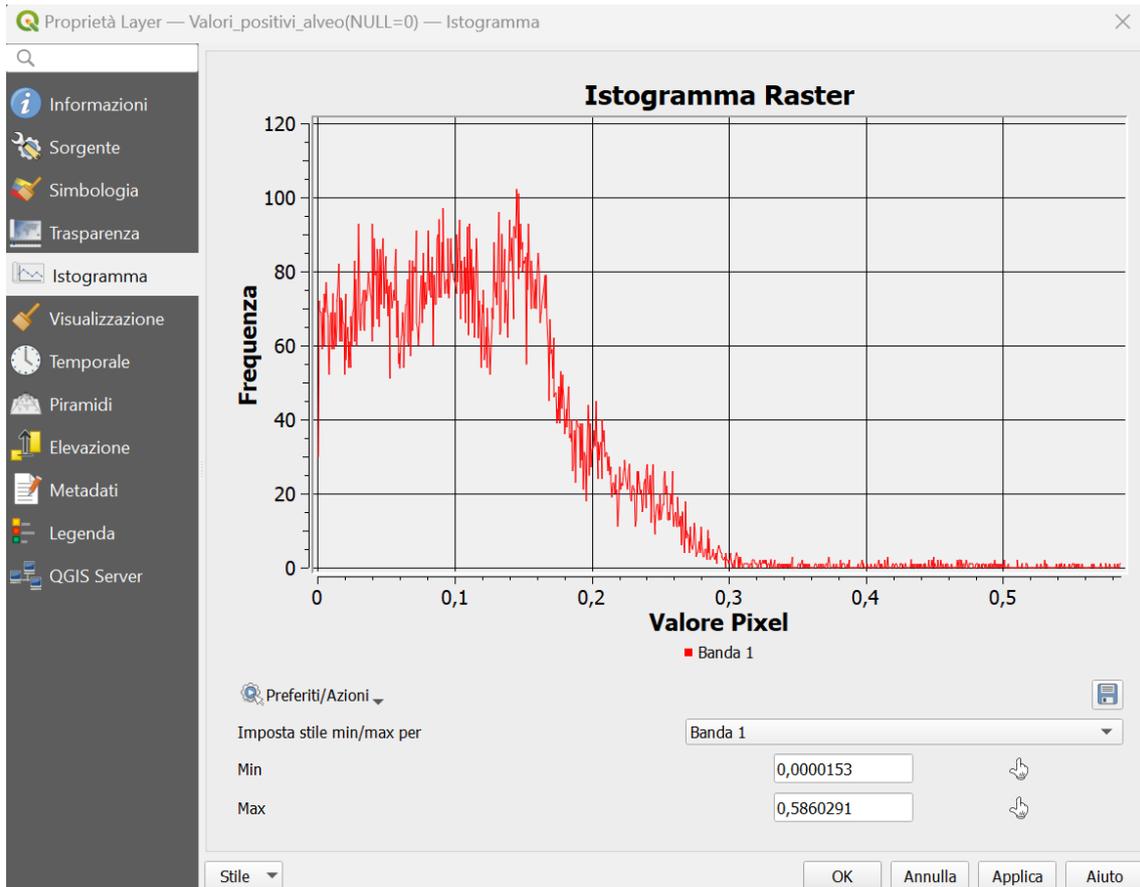


Figura 5.9, istogramma raster dati di profondità (software Qgis)

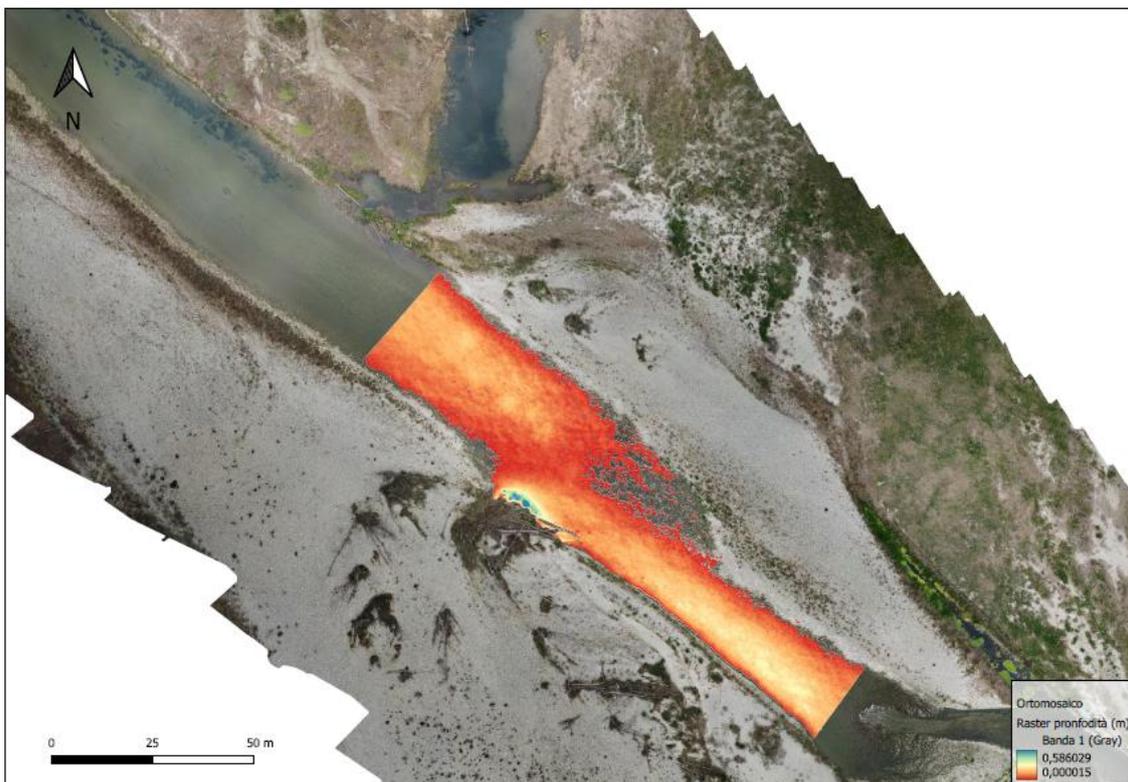


Figura 5.10, raster profondità derivante da SfM

### 5.2.4 Da raster a Shapefile puntuale

Successivamente alla creazione del raster, che contiene in ogni cella i valori di profondità dell'acqua, sarà necessario trasformarlo in uno shapefile puntuale avente come coordinate 'X' e 'Y' quelle del centroide di ogni singolo pixel mentre, per 'Z', il valore di tirante idrico. In Figura 5.11 è rappresentato il metadato associato ad ogni punto.

Elemento	Valore
▼ Point_from_DTMalveo (profondità)	
▼ Z	0,00848389
▶ (Derivato)	
▶ (Azioni)	
Z	0,00848389
coord_x	408318,886100
coord_y	5006856,057000

Modalità Layer Corrente

Figura 5.11, metadato punti

La medesima trasformazione verrà effettuata anche per il raster 'DTM' generato a partire dalla fotogrammetria e per il raster 'interpolato' della superficie dell'acqua. La composizione dei tre shapefile puntuali generati (*Profondità*, *DTM\_SfM*, *Superficie\_interpolata*) permetterà la creazione del '*Point cloud file*' richiesto dall'algoritmo 'pyBathySfM'.

Il '*Point cloud file*' generato, che è rappresentato in Figura 5.12, è quindi composto da un numero pari a 1'285'858 punti per ognuno dei quali è presente il seguente dato (*coord\_x*, *coord\_y*, *sfm\_z*, *w\_surf*, *profondità*).

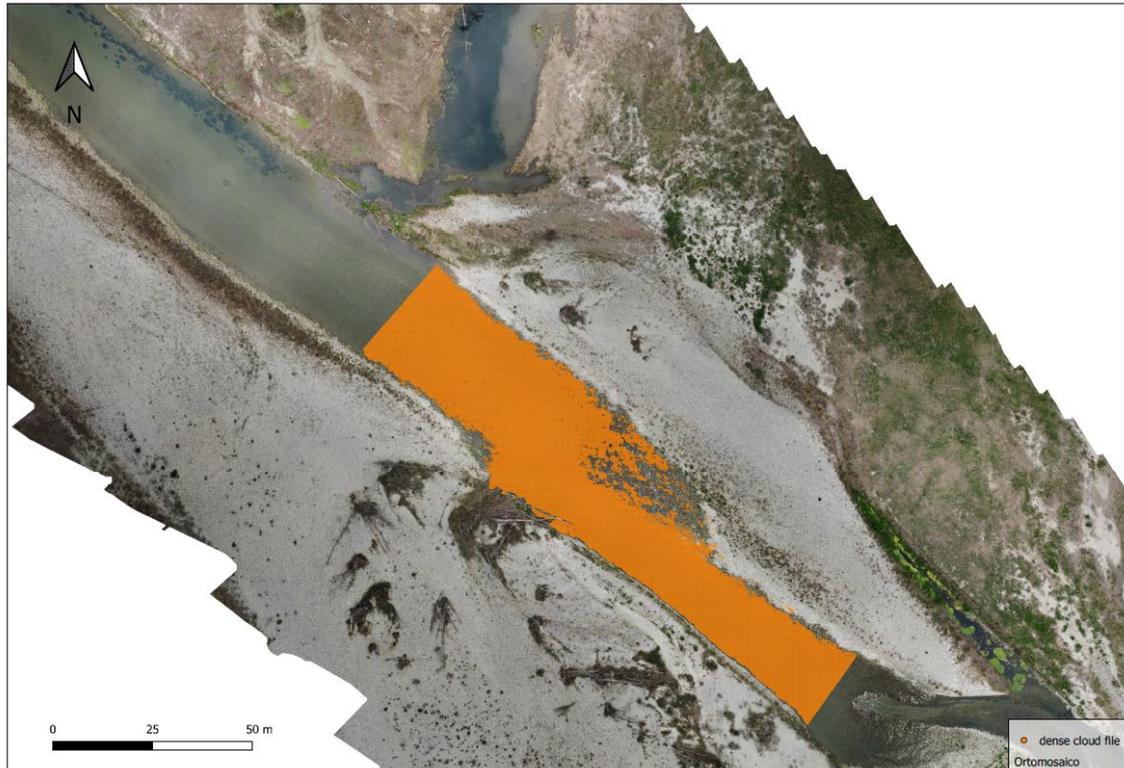


Figura 5.12, Planimetria punti da correggere (Point cloud file)

### 5.3 Workflow algoritmo

La fase successiva alla creazione dei tre file sopra descritti (*Point cloud file*, *Cameras file*, *Sensor file*) prevede l'esecuzione dello script mediante l'ambiente di lavoro Anaconda, cioè la distribuzione scientifica, *open source*, del linguaggio di programmazione Python per il calcolo scientifico. I tre file sopra descritti in formato '.txt' sono di seguito rappresentati rispettivamente nelle Figura 5.13- Figura 5.14 - Figura 5.15.

```

x,y,sfm_z,w_surf
408303.236100,5006904.257000,143.65115356,143.65713501
408303.186100,5006904.207000,143.63995361,143.65705872
408303.236100,5006904.207000,143.64509583,143.65730286
408303.286100,5006904.207000,143.65299988,143.65753174
408303.136100,5006904.157000,143.63467407,143.65698242
408303.186100,5006904.157000,143.63653564,143.65722656
408303.236100,5006904.157000,143.64106750,143.65745544
408303.286100,5006904.157000,143.64898682,143.65769958
408303.336100,5006904.157000,143.65614319,143.65794373
408303.136100,5006904.107000,143.63237000,143.65713501
408303.186100,5006904.107000,143.63572693,143.65737915
408303.236100,5006904.107000,143.64465332,143.65762329
408303.286100,5006904.107000,143.65492249,143.65786743
408303.336100,5006904.107000,143.65710449,143.65811157

```

Figura 5.13, Point cloud file in formato .csv

```

Label,x,y,z,roll,pitch,yaw
DJI_0140,408285.4213,5006997.279,188.8788222,0.168726288,0.549484845,136.035387
DJI_0141,408276.5056,5006989.493,189.2831868,0.152581667,0.686083095,136.2054854
DJI_0142,408270.3432,5006983.414,189.1652264,-0.000304472,0.946284863,135.8052745
DJI_0143,408263.7852,5006977.151,189.1336687,-0.024490544,0.869350108,135.6014743
DJI_0144,408256.6057,5006970.36,189.1783706,-0.133186187,0.954051877,135.4038324
DJI_0145,408247.9957,5006962.237,189.1068886,-0.200986068,0.957845577,135.2420356
DJI_0146,408239.1823,5006953.909,189.1301523,-0.210703355,0.98698,135.0672542
DJI_0147,408232.134,5006947.282,188.9758374,-0.188301513,1.036588623,134.9165043
DJI_0148,408225.9175,5006941.412,189.110714,-0.114182208,0.981723756,134.0094482
DJI_0149,408218.849,5006934.703,189.0081619,-0.102872653,1.067203506,133.6575726
DJI_0150,408209.8146,5006926.056,188.8364691,0.026576786,1.130738371,133.1667175
DJI_0151,408201.4914,5006918.003,188.9461464,0.115549918,1.136174917,132.7513289
DJI_0152,408195.2028,5006912.283,189.0472463,-0.026132159,1.196350432,132.711224
___

```

Figura 5.14, Cameras file in formato .csv.

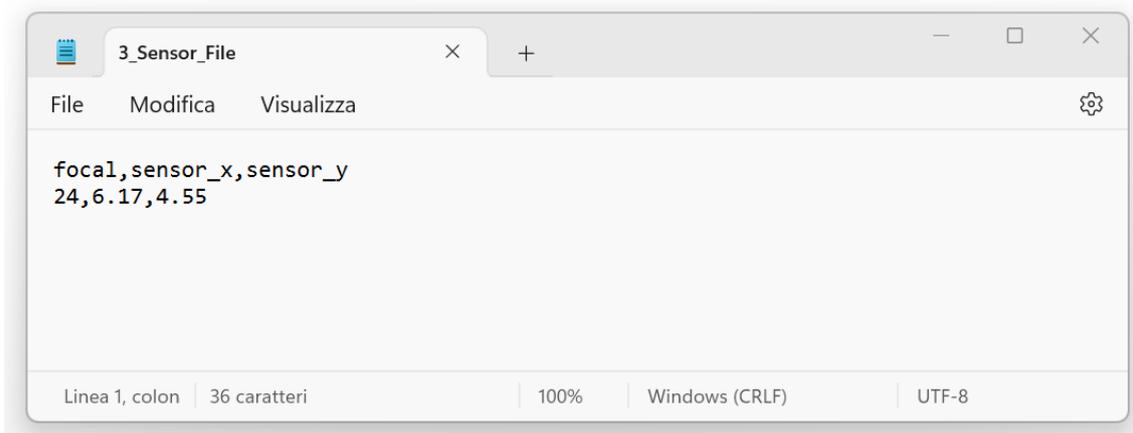


Figura 5.15, Sensori file in formato .csv.

L'avvio dell'ambiente Anaconda può essere effettuato mediante il prompt proprietario (Figura 5.16) dando l'indirizzo della posizione di allocamento del file 'pyBathySfM' e avviando l'esecuzione.

```
Anaconda Prompt - py x + - □ x
(base) C:\Users\corin>conda activate pyBathySfM
(pyBathySfM) C:\Users\corin>D:
(pyBathySfM) D:\>cd D:\Personale\Tesi\pyBathySfM
(pyBathySfM) D:\Personale\Tesi\pyBathySfM>python py_BathySfM.py
```

Figura 5.16, prompt ambiente Anaconda

Dopo aver lanciato l'esecuzione dal prompt dei comandi si aprirà una finestra (Figura 5.17) che permetterà il caricamento dei tre file descritti in precedenza (*Point cloud file*, *Cameras file*, *Sensor file*). Oltre al caricamento di questi file è possibile compilare alcuni campi nelle finestra, tra cui

‘Export camera file’, tale funzione permette di generare un file ‘.pkl’ con i campi visivi delle camere calcolati, utili a ridurre i tempi di successive rielaborazioni. Nel caso in cui venisse effettuata una successiva elaborazione dei medesimi dati potrà essere flaggato il check denominato ‘Use Precalc’d Camera’ e inserito il file ‘.pkl’. All’interno della medesima finestra è anche possibile modificare il parametro di ‘refractive index’; nello specifico contesto è stato mantenuto il valore di default pari a 1,337 in quanto corrisponde a quello tipico dell’acqua dolce.

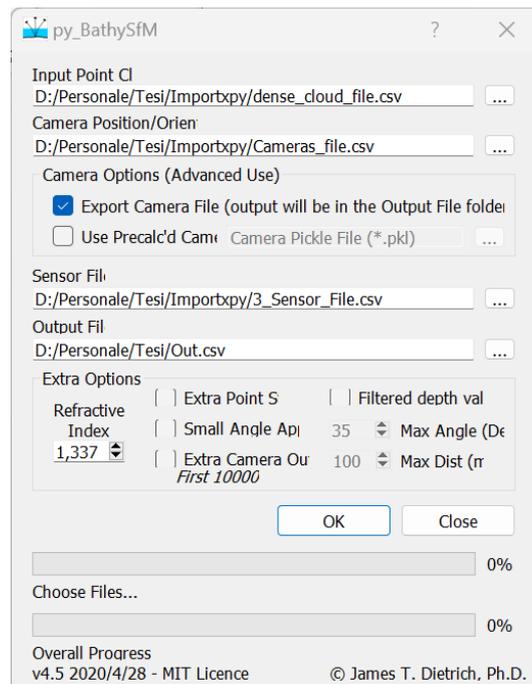


Figura 5.17, finestra interfaccia algoritmo per caricamento file

Terminata la compilazione della finestra potrà essere avviato l’algoritmo mediante la casella ‘OK’. Il tempo di processamento per la generazione del file di output è risultato pari a 5,60 minuti. Il file generato (Tabella 21) è composto da sette colonne distinte rispettivamente:

- I. X: Coordinata x del punto;
- II. Y: Coordinata y del punto;
- III. Sfm\_z: Quota geodetica del punto generata da fotogrammetria;
- IV. w\_surf: Quota geodetica pelo libero da interpolazione;
- V. h\_a: Profondità dell’acqua apparente;
- VI. h\_avg: profondità dell’acqua corretta;
- VII. corElev\_avg: quota ortometrica del punto corretta dall’algoritmo.

OUTPUT ALGORITMO pyBathySfM						
x (m)	y (m)	sfm_z (m)	w_surf (m)	h_a (m)	h_avg (m)	corElev_avg (m)
408303.2361	5006904.257	143,6511536	143,657135	0,006	0,008	143,649
408303.1861	5006904.207	143,6399536	143,6570587	0,017	0,023	143,634
408303.2361	5006904.207	143,6450958	143,6573029	0,012	0,016	143,641
408303.2861	5006904.207	143,6529999	143,6575317	0,005	0,006	143,651
408303.1361	5006904.157	143,6346741	143,6569824	0,022	0,030	143,627
408303.1861	5006904.157	143,6365356	143,6572266	0,021	0,028	143,629
408303.2361	5006904.157	143,6410675	143,6574554	0,016	0,022	143,635
408303.2861	5006904.157	143,6489868	143,6576996	0,009	0,012	143,646
...	...	...	...	...	...	...

Tabella 21, file .csv di output dell'algoritmo 'pyBathySfM'

Il file generato denominato 'Corrected' è stato poi trasformato da file di testo '.txt' in uno shapefile puntuale '.shp' ed importato sul software Qgis (Figura 5.18).

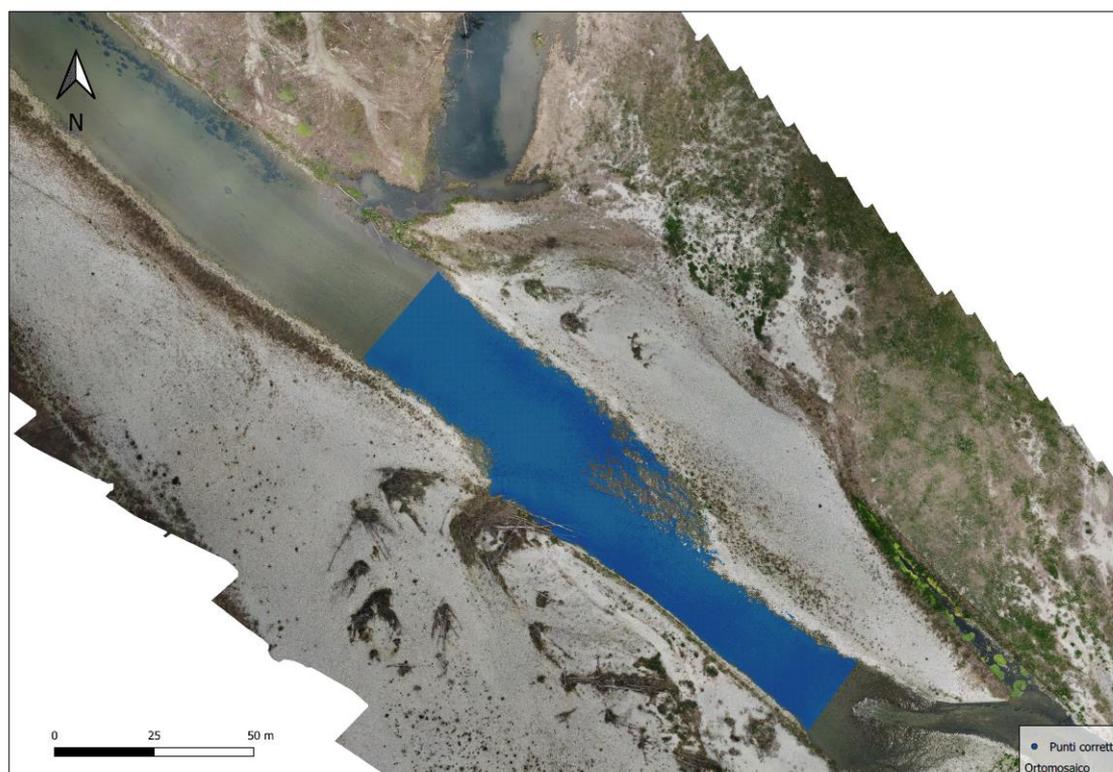


Figura 5.18, shapefile punti con quota corretta.

## 5.4 Analisi dei risultati

Successivamente alla generazione del file di output denominato 'Corrected', realizzato mediante l'algoritmo 'pyBathySfM' e contenete le quote ortometriche dei punti da correggere, è stato necessario confrontare i dati generati per meglio comprendere la qualità del risultato ottenuto.

Nello specifico si hanno a disposizione i seguenti dataset:

- I. shapefile puntuale di sezioni derivanti da acquisizioni mediante ricevitore GNSS;
- II. shapefile puntuale di sezioni derivanti da fotogrammetria;
- III. shapefile puntuale di sezioni derivanti da fotogrammetria corrette con algoritmo 'pyBathySfM'.

Inoltre, al fine di poter analizzare al meglio i dati prodotti dall'algoritmo di correzione, è stato generato un nuovo shapefile poligonale a maglia quadrata contenente, per ogni poligono, i dati rappresentati nelle colonne della Figura 5.19. Di principale importanza risultano le ultime due colonne che rappresentano rispettivamente: (i) la differenza tra la quota del punto di fondo alveo stimata con il processo SfM e quella acquisita mediante ricevitore GNSS, (ii) la differenza tra la quota del punto di fondo alveo ottenuta dall'algoritmo di correzione e quella acquisita mediante ricevitore GNSS. Da una prima analisi sommaria della tabella attributi si può notare che l'errore, passando dalla colonna (sfm - Qgeo) a quella (Corr-Qgeo), è stato ridotto in maniera considerevole.

	coord_x	coord_y	sfm_z	w_surf	h_a	h_avg	corElev_av	Q_GEO	sfm-Qgeo	Corr-Qgeo
1	408287,350	5006880,900	143,6605987499...	143,6888122599...	0,02821351	0,038554164573...	143,6502580954...	143,594	0,0666	0,0563
2	408288,000	5006881,650	143,6380920400...	143,6844482399...	0,046356199999...	0,063532728540...	143,6209155114...	143,586	0,0521	0,0349
3	408288,450	5006882,300	143,6049499499...	143,6803588900...	0,075408940000...	0,103614682198...	143,5767442078...	143,539	0,0659	0,0377
4	408289,750	5006883,800	143,5946807900...	143,6702117899...	0,075530999999...	0,104625525806...	143,5655862641...	143,538	0,0567	0,0276
5	408316,200	5006856,000	143,5533294699...	143,5536499000...	0,000320430000...	0,000429118763...	143,5532207812...	143,530	0,0233	0,0232
6	408289,000	5006882,900	143,6031494099...	143,6761474600...	0,072998050000...	0,101035563171...	143,5751118968...	143,526	0,0771	0,0491
7	408316,800	5006856,600	143,5493011499...	143,5561065699...	0,006805420000...	0,00911020285925	143,5469963671...	143,525	0,0243	0,022
8	408320,300	5006860,450	143,5478515599...	143,5726776100...	0,024826050000...	0,033424646567...	143,5392529634...	143,517	0,0309	0,0223
9	408321,550	5006862,050	143,5275268599...	143,5820159900...	0,054489130000...	0,073237498483...	143,5087784915...	143,517	0,0105	-0,0082
10	408317,550	5006857,350	143,5491180399...	143,5591583300...	0,010040290000...	0,013436829339...	143,5457215006...	143,516	0,0331	0,0297
11	408319,600	5006859,600	143,5361785899...	143,5686035200...	0,032424930000...	0,043418969810...	143,5251845501...	143,510	0,0262	0,0152
12	408318,300	5006858,100	143,5428619399...	143,5621032699...	0,01924133	0,025749248520...	143,5363540214...	143,498	0,0449	0,0384
13	408303,250	5006899,200	143,5777587899...	143,6632385300...	0,085479740000...	0,116176177579...	143,5470623524...	143,492	0,0858	0,0551
14	408290,450	5006884,550	143,5744628900...	143,6654357900...	0,090972899999...	0,126139649389...	143,5392961406...	143,491	0,0835	0,0483

Figura 5.19, tabella attributi shapefile generato

Per meglio comprenderne l'entità degli errori generati, precedentemente alla correzione del dato e a posteriori, sono stati calcolati la media, lo scarto quadratico medio, i valori minimi e massimi di errore (Tabella 22 - Tabella 23).

STATISTICA SUGLI ERRORI DEL DATO SfM [m]			
Errore medio	Scarto quadratico medio dell'errore	Errore massimo	Errore minimo
ME	RMSE	-	-
0,072	0,040	0,16	0,006

Tabella 22, analisi statistica errori pre-correzione

STATISTICA SUGLI ERRORI DEL DATO SfM CORRETTO [m]			
Errore medio	Scarto quadratico medio dell'errore	Errore massimo	Errore minimo
ME	RMSE	-	-
0,030	0,027	0,13	0,001

Tabella 23, analisi statistica errori post-correzione

I medesimi *dataset* possono essere analizzati anche da un punto di vista grafico mediante l'importazione delle tre differenti tipologie di sezioni sul software 'Excel' e la rappresentazione delle stesse con colorazioni diverse. Si è ritenuto necessario rappresentare con una scala differenziata i due assi, scegliendo un rapporto di circa 1:10 tra l'asse delle y e quella delle x. Nello specifico vengono di seguito riportate quattro sezioni tipo (Figura 5.20 - Figura 5.21 - Figura 5.22 - Figura 5.23) in ognuna delle quali sono rappresentati quattro differenti andamenti:

1. In **blu** l'andamento del pelo libero dell'acqua;
2. In **verde** l'andamento topografico derivante da fotogrammetria;
3. In **rosso** l'andamento topografico derivante da acquisizione con ricevitore GNSS;
4. In **giallo-ocra** l'andamento topografico derivante dai dati fotogrammetrici corretti mediante l'algoritmo 'pyBathySfm'.

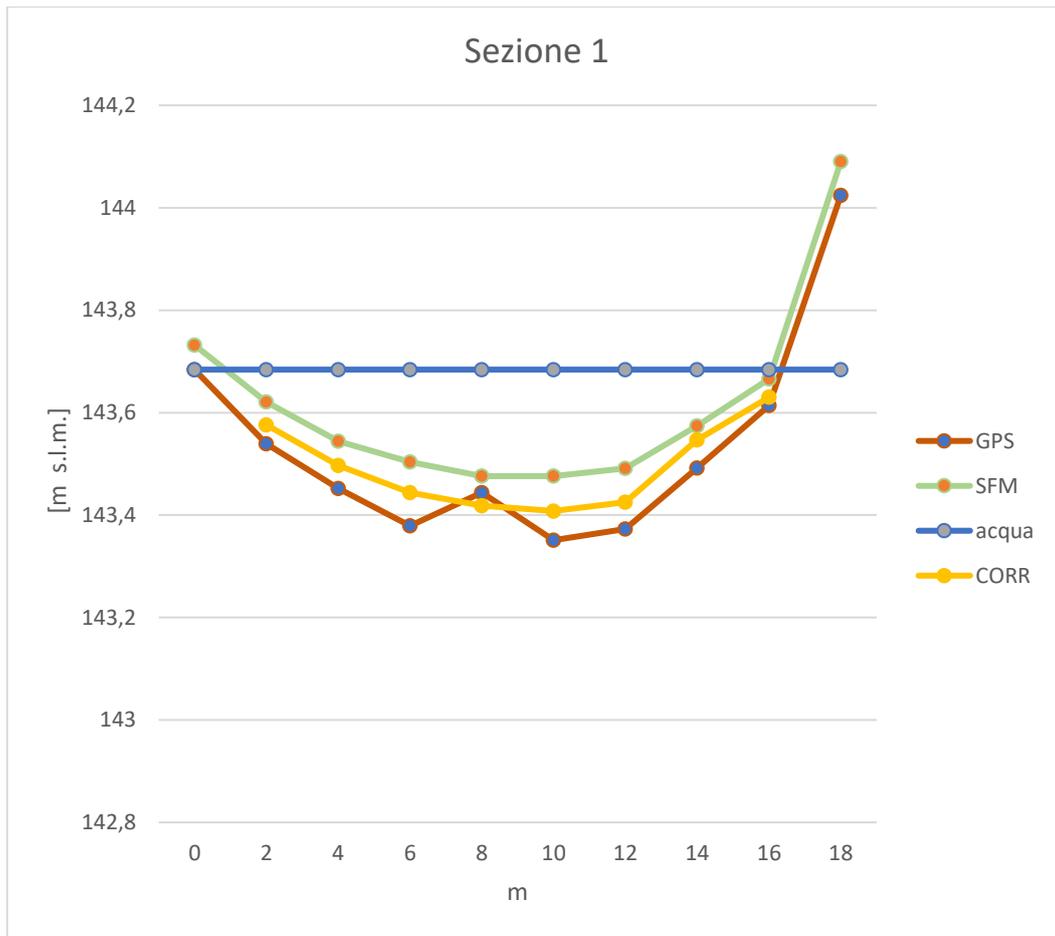


Figura 5.20, rappresentazione dataset differenti sezione 01

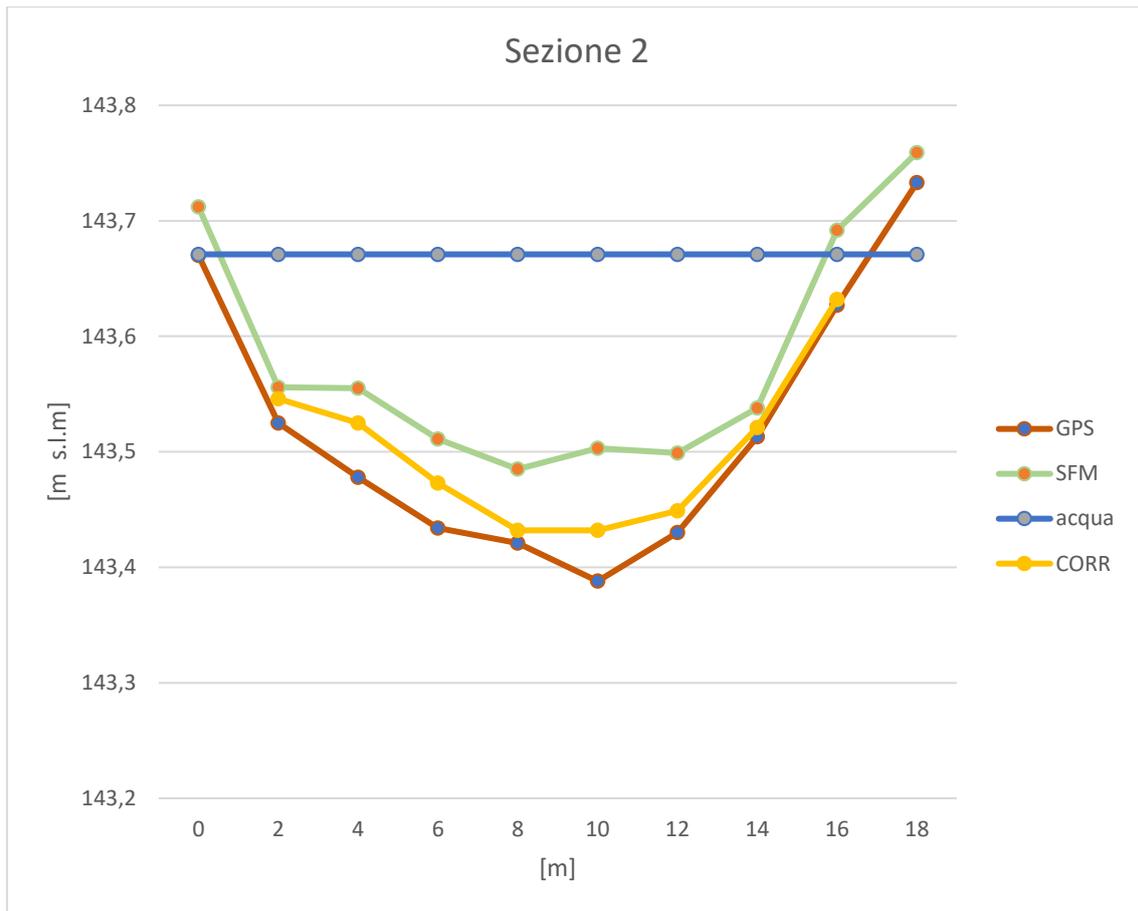


Figura 5.21, rappresentazione dataset differenti su sezione 02

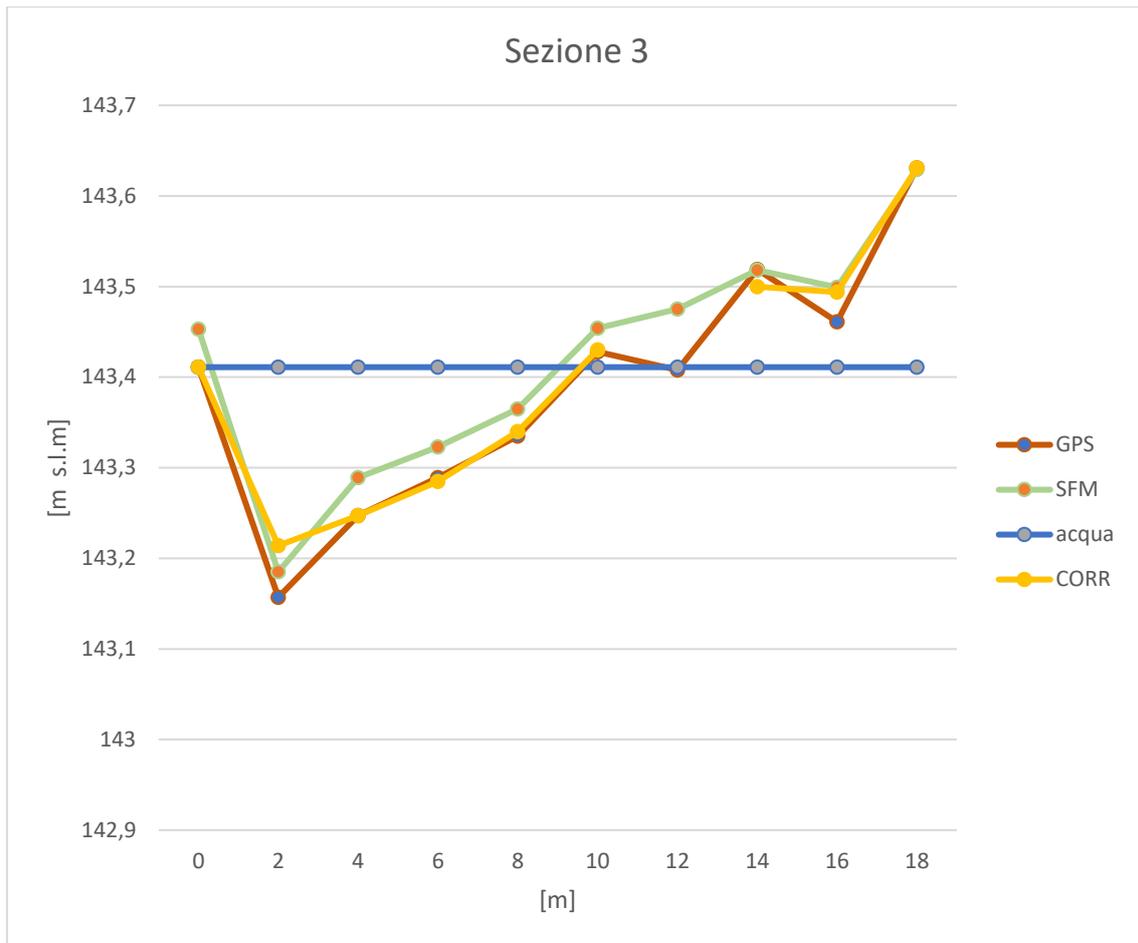


Figura 5.22, rappresentazione dataset differenti su sezione 03

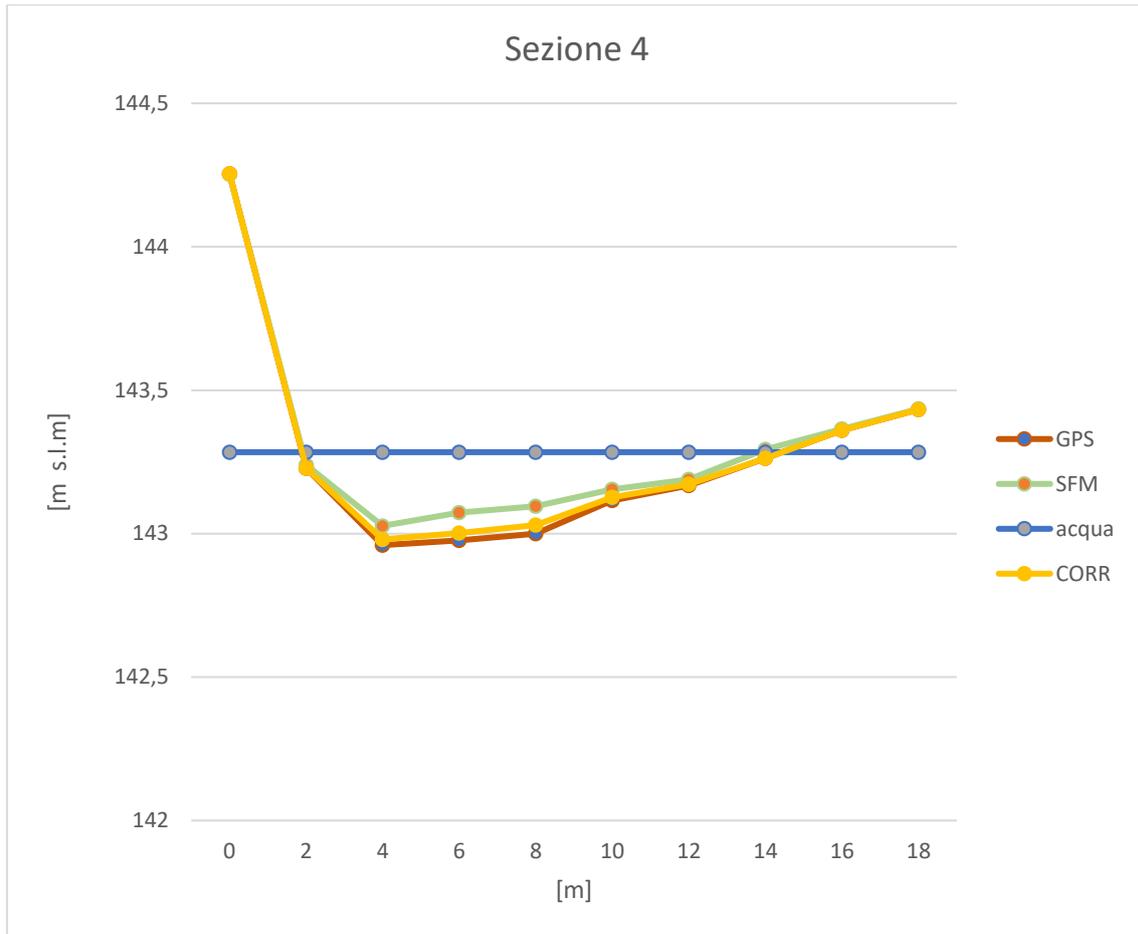


Figura 5.23, rappresentazione dataset differenti su sezione 04

Dall'osservazione della rappresentazione delle sezioni è possibile apprezzare che, lo scostamento tra la sezione topografica derivante da fotogrammetria e dall'acquisizione di punti con il ricevitore GNSS viene mitigato, come da statistiche di Tabella 22 e Tabella 23, dopo il processamento dei dati fotogrammetrici con l'algoritmo di correzione batimetrica.

## 5.5 Review algoritmi di machine learning per la batimetria e conclusioni finali

Dopo aver applicato l'algoritmo di correzione 'pyBathySfM' ci si è domandato quali fossero gli altri metodi per la correzione della batimetria da fotogrammetria sui quali stesse lavorando la comunità scientifica. Al fine di poter rispondere al quesito, si è deciso di inserire un ulteriore paragrafo dedicato all'analisi di articoli scientifici che trattano il tema specifico. Si è inoltre

cercato di reperire articoli che utilizzassero metodi di *machine learning* per l'ottenimento dei risultati.

Di seguito viene riportato un riassunto, corredato da alcune considerazioni, del seguente articolo scientifico:

- Shallow water bathymetry mapping from UAV imagery based on machine learning, P. Agrafiotis , D. Skarlatos , A. Georgopoulos , K. Karantzas.

### 5.5.1 Shallow water bathymetry mapping from UAV imagery based on machine learning.

*Key Words: Point Cloud, Bathymetry, SVM, Machine Learning, UAV, Seabed Mapping, Refraction effect.*

L'articolo presenta un nuovo metodo per la mappatura del fondale marino, sia in acque aperte che chiuse, con i medesimi prerequisiti trattati nel primo paragrafo del Capitolo 5 del presente documento (acqua limpida, onde superficiali minime, etc). Tale tecnica permette l'esecuzione di rilievi, su piccola e media scala, utilizzando immagini aeree acquisite da APR (Figura 5.24) e correggendo l'effetto della rifrazione all'interfaccia aria-acqua con metodi di *machine learning* basati su rilievi LiDAR e modelli di *Support Vector Regression* (SVR).

L'obiettivo specifico è quello di fornire nuvole di punti derivanti da fotogrammetria, riuscendo a stimare la profondità reale a partire dalle differenze sistematiche osservabili tra i rilievi generati da metodi SfM e quelli derivanti da tecnologia LiDAR.

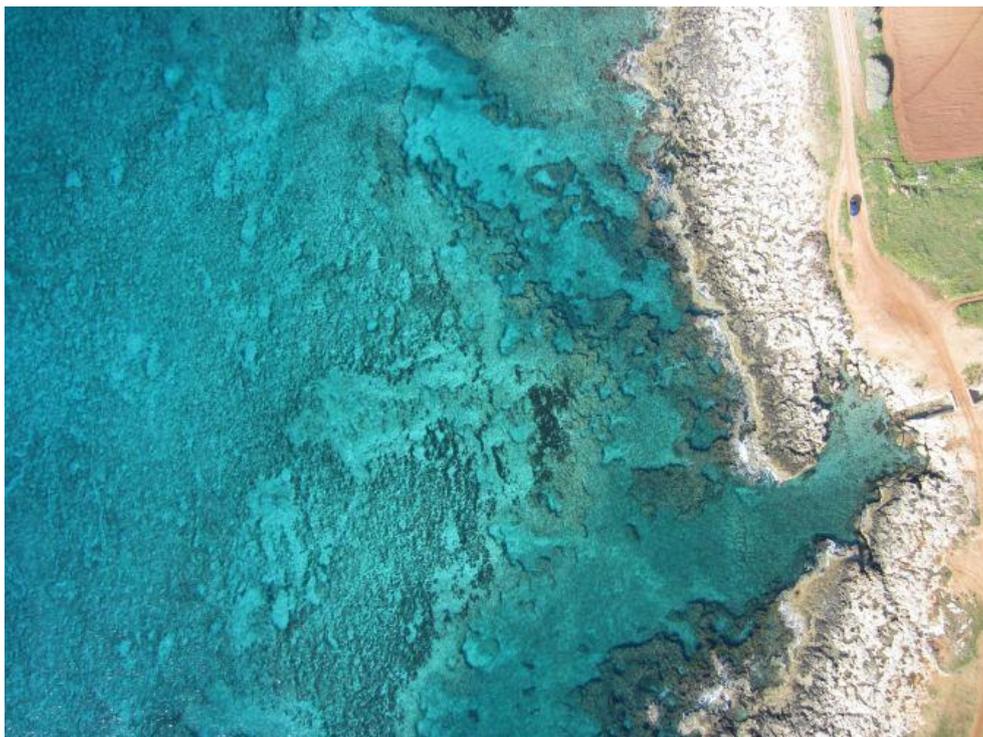


Figura 5.24, esempio di immagine del sito oggetto di studio acquisita da APR.

Il progetto, sviluppato dal *National Technical University of Athens* in collaborazione con *Cyprus University of Technology*, ha previsto la realizzazione di rilievi su due differenti aree:

1. Sito di test di Amathouda. In questo primo sito la profondità dell'acqua raggiunge un valore massimo di 5.57 m. I voli sono stati eseguiti con un UAV dotato di una camera Canon IXUS per un totale di 182 fotogrammi scattati ad una quota di volo di 103 m e un GSD di 3.3 cm.
2. Sito di test di Agia Napa. In questo secondo sito la profondità dell'acqua raggiunge un valore massimo di 14.8 m. I voli sono stati eseguiti con un UAV dotato di una camera Canon IXUS per un totale di 383 fotogrammi scattati ad una quota di volo di 209 m e un GSD di 6.3 cm.

Per entrambe le aree di saggio è presente anche una nuvola di punti dell'area sommersa generata a partire da LiDAR aereo. Tale nuvola LiDAR è stata usata come *ground truth* per la fase di allenamento dell'algoritmo e per la validazione dell'intero processo. L'acquisizione è stata effettuata mediante sensore Leica HawEye III implementato su velivolo. Tale sistema è costituito da un doppio sensore, il primo con frequenza operativa di 10 KHz per le acque profonde e il

secondo, specifico per le acque poco profonde, che lavora sulla frequenza di 35 KHz. In Figura 5.25 sono riportate le specifiche dei rilievi LiDAR.

<b>Test site</b>	<b># of points</b>	<b>Points density</b> [points/m <sup>2</sup> ]	<b>Average pulse spacing</b> [m]	<b>Flight height</b> [m]	<b>Nominal Accuracy</b> [m]
<b>Amathouda</b>	6K	0.4	-	600	0.15
<b>Agia Napa</b>	1.3M	1.1	1.65	600	0.15

Figura 5.25, specifiche del rilievo LiDAR

La metodologia di correzione del dato batimetrico derivante da fotogrammetria, proposta nell'articolo, prevede l'applicazione di un metodo di regressione lineare denominato *Support Vector Regression* (SVR). I dati di input di tale modello provengono dai due diversi siti di test che sono caratterizzati rispettivamente da profondità d'acqua e quote di volo del rilievo differenti. Il modello lineare SVR è stato selezionato dopo aver studiato la relazione tra la profondità reale e quella apparente disponibile per ogni punto. Sulla base di quanto sopra espresso, tale modello si adatta piuttosto bene ai dati forniti ovvero a quelli di profondità reale provenienti da nuvola LiDAR e quelli di profondità apparente derivanti da nuvola SfM. Dopo l'adattamento dei dati, la profondità reale potrà essere stimata per i soli punti ove è presente anche quella apparente. Nello studio condotto, la relazione tra le profondità reali e le profondità apparenti dei punti disponibili segue un modello lineare e pertanto, in una prima fase, non si è ritenuto necessaria un'architettura di apprendimento più complessa. Tuttavia, l'uso di un modello di regressione lineare è stato presto abbandonato in quanto generava errori maggiori rispetto a quelli di un modello più complesso. Questo fenomeno di scostamento tra le due differenti tipologie di regressione è ben apprezzabile nella rappresentazione dei modelli in Figura 5.26; ove si denota una più rapida divergenza dei valori per la regressione lineare semplice rispetto all' SVR.

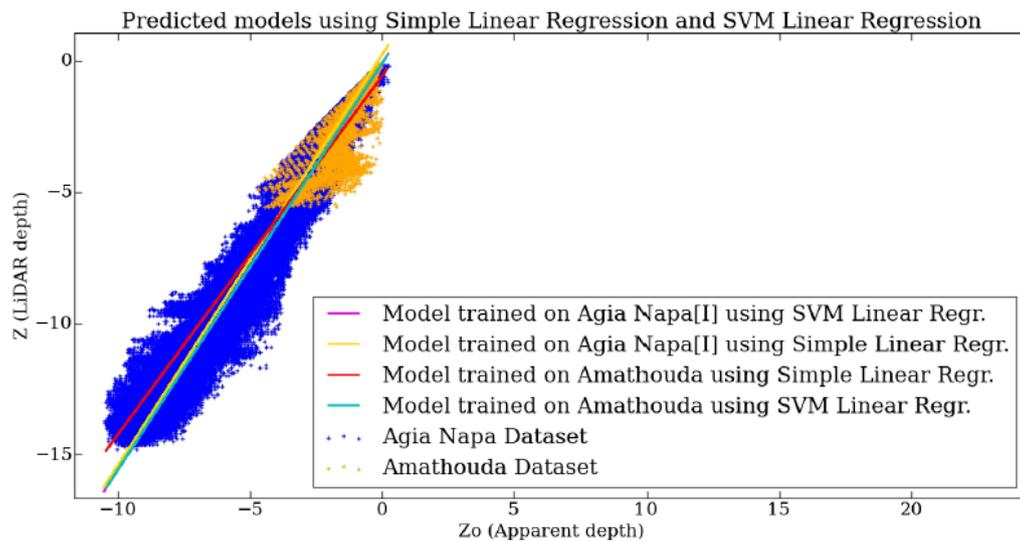


Figura 5.26, regressioni lineari e SVR

Nel caso dell'addestramento sul dataset Amathouda, è evidente che i due modelli previsti (linee in rosso e ciano) differiscano notevolmente all'aumentare della profondità, portando così a previsioni di profondità diverse. Tuttavia, nel caso dei modelli addestrati sul dataset Agia Napa, i due modelli previsti (linee in colore magenta e giallo) sono sovrapponibili anche con il modello previsto dalla Regressione Lineare SVM, addestrata su Amathouda. Questi risultati suggeriscono che l'algoritmo SVM è meno dipendente dalla densità e dal rumore dei dati e, in definitiva, risulta essere il metodo più robusto in grado di predire modelli sistematicamente affidabili, superando la semplice regressione lineare. Per valutare le prestazioni del modello sviluppato, in termini di robustezza ed efficacia, sono stati generati n. 6 differenti set di dati per la fase di addestramento che prendono i punti, in sezioni e percentuali differenti, dai due siti pilota. Per la convalida sono stati invece considerati n. 13 diversi set di test. Quindi, al fine di valutare l'accuratezza complessiva del metodo, è stata fatta una comparazione tra la nuvola di punti generata da fotogrammetria non corretta e il dato LiDAR e tra la fotogrammetria corretta e quella da dato LiDAR. Lo scostamento medio delle due nuvole, prima dell'applicazione del metodo, era di 0.44 m con un RMSE di 0.51m nel sito test di Amathouda e di 2.23 m con un RMSE di 2.64 m nel sito test di Agia Napa, tale differenza è possibile apprezzarla anche in Figura 5.27.

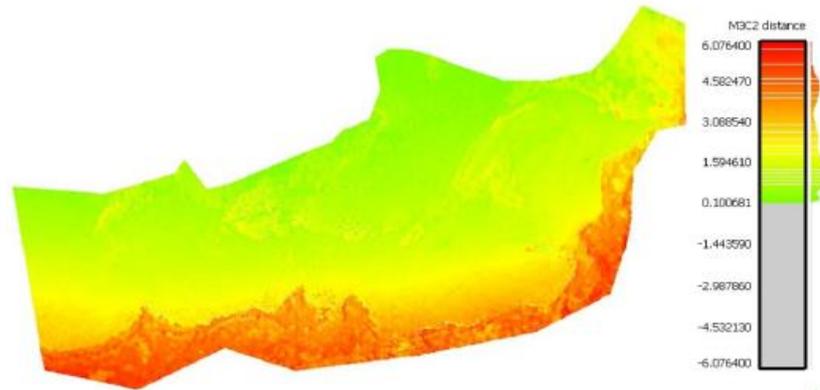


Figura 5.27, rappresentazione grafica distanza tra la nuvola di punti generata da SfM e quella LiDAR

In Figura 5.28 è invece rappresentata un'analisi statistica dei principali risultati di ciascuno dei 13 test eseguiti appaiando diversi siti di training con diversi siti di valutazione. Nella tabella si osserva un netto miglioramento complessivo; per esempio, nel sito di Agia Napa la distanza media iniziale di 2,23 m si riduce a 0,10 m mentre nel sito di Amathouda la distanza media iniziale di 0,44 m si riduce a - 0,03 m.

Training Site	Training points	Training percentage	Testing Percentage	Fitting Score	Evaluation Site	Max /Min depth of test site	Evaluation points	Corrected data		Uncorrected data	
								Mean Dist. (m)	Stdev (m)	Mean Dist. (m)	Stdev (m)
Ag. Napa[I]	627.552	5%	95%	0.984	Ag. Napa[II]	14.7/0.30	661.208	-0.15	0.49	2.23	1.42
Ag. Napa[I]	627.552	30%	70%	0.984	Ag. Napa[II]	14.7/0.30	661.208	-0.14	0.50	2.23	1.42
Ag. Napa[I]	627.552	5%	95%	0.984	Amathouda[all]	5.57/0.10	5400	-0.03	0.19	0.44	0.26
Ag. Napa[I]	627.552	30%	70%	0.984	Amathouda[all]	5.57/0.10	5400	-0.03	0.19	0.44	0.26
Ag. Napa[II]	661.208	5%	95%	0.967	Ag. Napa[I]	14.8/0.20	627.552	0.14	0.49	2.23	1.42
Ag. Napa[II]	661.208	30%	70%	0.967	Ag. Napa[I]	14.8/0.20	627.552	0.14	0.49	2.23	1.42
Ag. Napa[III]	661.208	5%	95%	0.967	Amathouda[all]	5.57/0.10	5400	0.25	0.11	0.44	0.26
Ag. Napa[III]	661.208	30%	70%	0.967	Amathouda[all]	5.57/0.10	5400	0.25	0.11	0.44	0.26
Amathouda[all]	5400	100%	0%	-	Ag. Napa[I]	14.8/0.20	627.552	-0.10	0.45	2.23	1.42
Amathouda[all]	5400	100%	0%	-	Ag. Napa[II]	14.7/0.30	661.208	-0.26	0.49	2.23	1.42
Merged	11873	100%	0%	-	Ag. Napa[I]	14.8/0.20	627.552	0.13	0.45	2.23	1.42
Merged	11873	100%	0%	-	Ag. Napa[II]	14.7/0.30	661.208	-0.06	0.50	2.23	1.42
Merged	11873	100%	0%	-	Amathouda[all]	5.57/0.10	5400	0.00	0.18	0.44	0.26

Figura 5.28, risultati dei modelli predittivi per le tredici aree test.

In conclusione, l'approccio proposto, sulla base delle osservazioni note dal rilievo LiDAR, permette la correzione del dato batimetrico mediante un modello SVR applicato alla nuvola di punti generata da SfM. I risultati ottenuti sui due siti di prova e la validazione quantitativa mediante *cloud to cloud* hanno dato esito positivo del metodo applicato. Inoltre, è stata anche dimostrata la possibilità di allenare un modello su un sito per poi utilizzarlo su un altro ottenendo risultati soddisfacenti.

## 6 Conclusioni finali

L'intera attività si pone l'obiettivo di determinare l'andamento batimetrico per fondali marini, lacustri o fluviali sommersi da acque poco profonde, limpide e prive di increspature. La tecnologia impiegata è costituita da un APR e da un ricevitore GPS/GNSS oltre che da workstation dotate di appositi software per l'elaborazione del dato fotogrammetrico.

Il principale problema riscontrato è riconducibile al fenomeno della rifrazione all'interfaccia tra aria e acqua che determina, in fase di ricostruzione della nuvola di punti, una sottostima del tirante idrico. L'errore così generato evidenzia una tendenza dei punti di fondo alveo ad avere valori di quota assoluta maggiori di quelli reali.

Ad oggi esistono differenti soluzioni e tecnologie che permettono di determinare il reale andamento topografico dei fondali che si basano prevalentemente su tecnologia LiDAR o ad onda sonora. Le più diffuse sono state analizzate nel secondo capitolo del presente documento. Tuttavia, tali tecniche presentano limiti dovuti agli elevati costi di acquisto ed esercizio oppure, come per esempio nel caso degli ecoscandagli, alla necessità di avere tiranti idrici minimi per la navigazione. Un'altra tecnologia ampiamente impiegata è quella del ricevitore GNSS che permette, ove i tiranti idrici lo consentono, la realizzazione di sezioni. Questa tecnologia, seppur molto facilmente implementabile, richiede tempi di acquisizione piuttosto elevati; basti pensare che, la realizzazione di una sezione di circa 100 m con 1 punto ogni metro, difficilmente si riuscirà ad acquisirla in un tempo inferiore ai 20 minuti. Se si pensa di rilevare un tratto di copro idrico di lunghezza pari ad 1 km con sezioni ad interasse costante pari a 50 m è compatibile stimare un tempo non inferiore a due giorni di attività in campo. Con grande probabilità tale rilievo potrebbe essere effettuato mediante un *green LiDAR* implementato su drone, in un tempo che non supera qualche decina di minuti. Tuttavia, è noto che questa tecnologia abbia ancora dei limiti economici che non ne permettono l'ampia diffusione. Un'altra possibilità, come accennato precedentemente, potrebbe essere quella di affidarsi ad un ecoscandaglio implementato su piccole imbarcazioni a guida autonoma; in tal caso però viene richiesto un battente idrico tale da permettere la navigazione e il buon funzionamento dei sensori a bordo.

La tecnica della fotogrammetria da APR, corretta mediante l'algoritmo '*pyBathySfm*', permette, con costi dell'operazione piuttosto ridotti, di superare la gran parte delle problematiche sopra esposte. Tale metodo prevede la realizzazione del rilievo fotogrammetrico tradizionale, associato

ad un'elaborazione funzionale alla correzione della quota dei singoli elementi della nuvola di punti, in modo tale che siano fedeli all'andamento della reale superficie batimetrica.

Il confronto, tra le differenze di quota dei punti generati da SfM e quelli acquisiti mediante ricevitore GNSS, dimostra avere valori notevolmente maggiori rispetto a quelli derivanti dalla differenza tra i punti corretti dall'algoritmo e quelli acquisiti mediante ricevitore. Tale analisi viene di seguito sintetizzata in Tabella 24.

STATISTICA SUGLI ERRORI DEL DATO SfM [m]				
Tipo di differenza	Errore medio	Scarto quadratico medio dell'errore	Errore massimo	Errore minimo
	ME	RMSE	-	-
(SfM – GNSS)	0,072	0,040	0,16	0,006
(SfM_corr – GNSS)	0,030	0,027	0,13	0,001

Tabella 24, analisi statistica dei risultati

I risultati appaiono quindi idonei all'applicazione in differenti contesti, tra cui quello della modellazione di flusso idraulica e della mappatura batimetrica. Tuttavia, si ritengono necessarie ulteriori indagini finalizzate ad approfondire e validare ulteriormente il metodo.

## Bibliografia

- Massimo Micieli, *Aerofotogrammetria con i droni. Mappatura e modellazione 3D del territorio con tecniche aerofotogrammetriche da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto)*. Torino, 2019, Dario Flaccovio Editore.
- Renato Cannarozzo, Lanfranco Cucchiari e William Meschieri, *Misure, rilievo, progetto*. Sesta edizione, 2022, Zanichelli editore.
- American Society of Photogrammetry, *Manual of Photogrammetry*. 1980, Asprs Pubns editore.

### ARTICOLI

- Lacka, M. Lubczonek J., *Methodology for Creating a Digital Bathymetric Model Using Neural Networks for Combined Hydroacoustic and Photogrammetric Data in Shallow Water Areas*, in 'Sensors', 2024.
- Jaud M, Delsol S, Urbina-Barreto I, Augereau E, Cordier E, Guilhaumon F, Le Dantec N, Floch F, Delacourt C, *Low-Tech and Low-Cost System for High-Resolution Underwater RTK Photogrammetry in Coastal Shallow Waters*, in 'Remote Sensing', 2024.
- Bartosz Szostak, Mariusz Specht , Paweł Burdziakowski, Andrzej Stateczny , Cezary Specht , Oktawia Lewicka, *Methodology for performing bathymetric measurements of shallow waterbodies using an UAV, and their processing based on the SVR algorithm*, 2023.
- Anna Sazafarczyk, Cezary Tos', *The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements*, 2023.

### DISPENSE CORSI POLITECNICO DI TORINO

- Appunti del corso di Cartografia Numerica e GIS, A. Lingua, F. Matrone, Politecnico di Torino, 2020

### MANUALI

- Manuale online Metashape
- Manuale online di Drone Link
- Manuale online Lidar360

## *NORMATIVE*

- Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto, ENAC, 2020

## *SITOGRAFIA*

- [www.dji.com](http://www.dji.com)
- [www.geomax.it](http://www.geomax.it)
- [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [www.3dmetrica.it](http://www.3dmetrica.it)
- [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com)
- [www.microgeo.it](http://www.microgeo.it) consultato in data 19 febbraio 2024
- [www.mdpi.com](http://www.mdpi.com) in consultato data 19 febbraio 2024
- [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it)

## Indice delle figure

Figura 1.1: andamento dimensione mercato globale dei droni .....	9
Figura 1.2, inquadramento territoriale torrente Orco.....	13
Figura 2.1, esempio ricevitore GPS/GNSS .....	16
Figura 2.2, Schema costellazioni GNSS.....	17
Figura 2.3, schema rappresentativo del funzionamento del LiDAR aereo. ....	21
Figura 2.4, sensore LiDAR aereo.....	22
Figura 2.5, Green LiDAR BathyCopter RIEGL .....	23
Figura 2.6, schema geometrico della generazione di un fotogramma.....	24
Figura 2.7, rappresentazione geometrica di un'acquisizione fotografica da un punto di vista duplice.....	25
Figura 2.8, sensori fotografici montati a bordo di aerei e APR (DJI Matrice 300). ....	26
Figura 2.9, schema rappresentativo del funzionamento di un ecoscandaglio.....	27
Figura 2.10, ecoscandaglio montato a bordo di un natante a pilotaggio remoto.....	29
Figura 2.11, funzionamento MBEAM con acquisizione di un fascio perpendicolare alla direzione di navigazione.....	30
Figura 2.12, esempio di mappatura dettagliata del fondale. ....	30
Figura 2.13, schema profondità di acquisizione in funzione della frequenza utilizzata. ....	31
Figura 3.1, delimitazione dell'area oggetto di rilievo. ....	32
Figura 3.2, schema semplificato del fenomeno della rifrazione .....	34
Figura 3.3, APR DJI Mavic Mini 2 .....	36
Figura 3.4, schema rappresentativo angoli APR.....	38
Figura 3.5, Ricevitore GPS/GNSS Geomax Zenith 60.....	38
Figura 3.6, target. ....	40
Figura 3.7, calzature per l'accesso in alveo. ....	40
Figura 3.8, individuazione area oggetto di rilievo .....	42
Figura 3.9, perimetrazione area oggetto di rilievo. ....	43
Figura 3.10, rappresentazione planimetrica della prima missione di volo.....	44
Figura 3.11, rappresentazione planimetrica della seconda missione di volo.....	44
Figura 3.12, rappresentazione planimetrica della terza missione di volo .....	45
Figura 3.13, rappresentazione planimetrica della quarta missione di volo .....	46
Figura 3.14, Target rosso-nero in campo.....	47
Figura 3.15, schermata di calibrazione Dji Flight.....	51

Figura 3.16, attività di rilievo in campo con APR.....	52
Figura 3.17, rappresentazione planimetrica dei punti di battigia .....	53
Figura 3.18, planimetria punti di sezione.....	55
Figura 3.19, planimetria punti di pelo libero.....	57
Figura 4.1, Importazione dataset immagini nel software Agisoft Metashape. ....	61
Figura 4.2, visualizzazione planimetrica centri di presa.....	61
Figura 4.3, parametri di input per la generazione della nuvola sparsa .....	63
Figura 4.4, nuvola sparsa.....	64
Figura 4.5, dati tecnici della nuvola sparsa.....	64
Figura 4.6, rappresentazione finestra di Metashape con target .....	65
Figura 4.7, finestra Metashape per l'impostazione dei parametri di input.....	66
Figura 4.8, nuvola di punti densa .....	67
Figura 4.9, report nuvola di punti densa. ....	67
Figura 4.10, nuvola di punti colorata in funzione della confidenza.....	68
Figura 4.11, nuvola di punti colorata in funzione delle macrocategorie.....	69
Figura 4.12, nuvola di punti colorata in funzione della quota.....	69
Figura 4.13, rappresentazione schematica DSM e DTM.....	70
Figura 4.14, Digital Surface Model a maglia 2 cm. ....	71
Figura 4.15, Digital Terrain Model a maglia 2 cm. ....	71
Figura 4.16, finestra Metashape generazione ortomosaico.....	72
Figura 4.17, ortomosaico a maglia 5 cm .....	73
Figura 4.18, dettaglio ortomosaico .....	73
Figura 4.19, report ortomosaico Metashape .....	74
Figura 5.1, schema geometrico fenomeno della rifrazione.....	77
Figura 5.2, schema geometrico delle profondità apparenti multiple.....	79
Figura 5.3, ortomosaico e DTM .....	83
Figura 5.4, poligono di delimitazione area di interesse e puntuali acquisiti mediante antenna GPS/GNSS.....	84
Figura 5.5, finestra per input parametri interpolazione IDW .....	85
Figura 5.6, superficie interpolata .....	85
Figura 5.7, istogramma generato dalla sottrazione tra raster IDW e raster DTM. ....	86
Figura 5.8, punti immersi e punti emersi .....	87
Figura 5.9, istogramma raster dati di profondità (software Qgis).....	88
Figura 5.10, raster profondità derivante da SfM .....	88
Figura 5.11, metadato punti.....	89

Figura 5.12, Planimetria punti da correggere (Point cloud file) .....	90
Figura 5.13, Point cloud file in formato .csv .....	91
Figura 5.14, Cameras file in formato .csv.....	91
Figura 5.15, Sensori file in formato .csv.....	92
Figura 5.16, prompt ambiente Anaconda .....	92
Figura 5.17, finestra interfaccia algoritmo per caricamento file .....	93
Figura 5.18, shapefile punti con quota corretta .....	94
Figura 5.19, tabella attributi shapefile generato .....	95
Figura 5.20, rappresentazione dataset differenti sezione 01 .....	97
Figura 5.21, rappresentazione dataset differenti su sezione 02 .....	98
Figura 5.22, rappresentazione dataset differenti su sezione 03 .....	99
Figura 5.23, rappresentazione dataset differenti su sezione 04 .....	100
Figura 5.24, esempio di immagine del sito oggetto di studio acquisita da APR.....	102
Figura 5.25, specifiche del rilievo LiDAR.....	103
Figura 5.26, regressioni lineari e SVR .....	104
Figura 5.27, rappresentazione grafica distanza tra la nuvola di punti generata da SfM e quella LiDAR .....	105
Figura 5.28, risultati dei modelli predittivi per le tredici aree test.....	105

## Indice delle tabelle

Tabella 1, Principali parametri caratteristici dei laser scanner. ....	20
Tabella 2, caratteristiche tecniche DJI Mavic Mini due .....	37
Tabella 3, caratteristiche tecniche antenna GNSS .....	39
Tabella 4, caratteristiche tecniche sensore fotografico .....	42
Tabella 5, dati tecnici di input nel software di pianificazione della missione di volo .....	42
Tabella 6, dati tecnici Ground Control Point (GCP).....	49
Tabella 7, dati tecnici Check Point (CP) .....	49
Tabella 8, statistica errori orizzontali .....	50
Tabella 9, statistica errori verticali.....	50
Tabella 10, esempio dati punti di battigia .....	54
Tabella 11, statistica errori orizzontali.....	54
Tabella 12, statistica errori verticali.....	54
Tabella 13, esempio dati punti di sezione. ....	56
Tabella 14, statistica sugli errori orizzontali .....	56
Tabella 15, statistica sugli errori verticali .....	57
Tabella 16, dati punti di pelo libero.....	58
Tabella 17, statistica sugli errori orizzontali .....	58
Tabella 18, statistica sugli errori verticali .....	58
Tabella 19, output del processo fotogrammetrico .....	75
Tabella 20, variabili dello schema geometrico della rifrazione .....	77
Tabella 21, file .csv di output dell’algoritmo ‘pyBathySfM’ .....	94
Tabella 22, analisi statistica errori pre-correzione.....	96
Tabella 23, analisi statistica errori post-correzione .....	96
Tabella 24, analisi statistica dei risultati .....	107

## Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento al Professore Andrea Maria Lingua e ad Alessandra Spadaro che mi hanno seguito, con disponibilità e gentilezza, nella progettazione e nella stesura dell'intero elaborato.

Un ringraziamento va anche al mio collega e omonimo Giulio Donati Sarti per l'aiuto datomi nelle parti più strettamente topografiche e di elaborazione del progetto e al mio amico Francesco Bargerò per il supporto nelle attività di rilievo.

Desidero inoltre esprimere la mia più sincera gratitudine alla Soc. Coop. Corintea per avermi fornito l'opportunità di svolgere la tesi all'interno delle sue strutture. L'esperienza che ho avuto durante il mio periodo di ricerca è stata estremamente preziosa e formativa, e non avrebbe potuto essere possibile senza il sostegno e la collaborazione offerti dalla vostra organizzazione.

Desidero ringraziare in particolare Mauro Busa, Ivano Rossato, e Marco Busa per avermi supportato durante il mio lavoro.