



MINISTERO
DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI



E.N.A.C
ENTE NAZIONALE per
L'AVIAZIONE CIVILE

Committente Principale



AEROPORTO INTERNAZIONALE DI FIRENZE AMERIGO VESPUCCI

Opera

PROJECT REVIEW – PIANO DI SVILUPPO AEROPORTUALE AL 2035

Titolo Documento

OPERE DI COMPENSAZIONE AMBIENTALE E PAESAGGISTICA
Area "Il Piano di Manetti" - Quadro conoscitivo - Rilievo topografico e
erofotogrammetrico integrativo: relazione tecnico-metodologica

Livello di Progetto

SCHEDE DI APPROFONDIMENTO PROGETTUALE A LIVELLO MINIMO DI PROGETTO DI
FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

LIV PSA	REV 01	DATA EMISSIONE MARZO 2024	SCALA N/A	CODICE FILE FLR-MPL-PSA-CAP4-003-GE-RT_Manetti QC RT Ril Top
				TITOLO RIDOTTO Manetti QC RT Ril Top

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
01	03/2024	EMISSIONE PER PROCEDURA VIA-VAS	TAE	F. BOSI	L. TENERANI
00	10/2022	EMISSIONE PER DIBATTITO PUBBLICO	TAE	F. BOSI	L. TENERANI

COMMITTENTE PRINCIPALE	GRUPPO DI PROGETTAZIONE	SUPPORTI SPECIALISTICI
 ACCOUNTABLE MANAGER Dott. Vittorio Fanti	 DIRETTORE TECNICO Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631	PROGETTAZIONE SPECIALISTICA Arch. Filippo Bosi Ordine degli Architetti di Firenze n° 9004
POST HOLDER PROGETTAZIONE Ing. Lorenzo Tenerani	RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Arch. Filippo Bosi Ordine degli Architetti di Firenze n° 9004	SUPPORTO SPECIALISTICO RESPONSABILE SCIENTIFICO INTERVENTI DI ECOLOGIA APPLICATA ALLA CONSERVAZIONE Dott. Biol. Carlo Scoccianti
POST HOLDER MANUTENZIONE Ing. Nicola D'Ippolito		 PROGETTISTA SPECIALISTICO Arch. Valerio Montieri
POST HOLDER AREA DI MOVIMENTO Geom. Luca Ermini		aspetti fruitivi Ing. Emma Macchi aspetti ambientali Dott.sa Claudia Boeris Clemen aspetti idraulici HYDEA S.p.a. Ing. Stefano Monni, Ing. Enzo Floridi aspetti agronomici ENVIarea Dott.sa Elena Lanzi aspetti faunistici Studio Pteryx Dott. Giampiero Calvi aspetti botanici Dott.sa Elena Ballabio

È SEVERAMENTE VIETATA LA RIPRODUZIONE E/O LA CESSIONE A TERZI SENZA AUTORIZZAZIONE DELLA COMMITTENTE

1.	PREMESSA.....	3
2.	L'AREA DI RILIEVO.....	5
3.	TECNOLOGIA DI RILIEVO	6
3.1	Cenni di fotogrammetria.....	7
3.2	Gli strumenti impiegati.....	8
3.2.1	Il sistema aeromobile a pilotaggio remoto – drone.....	8
3.2.2	Il sistema satellitare per il rilievo dei punti a terra	9
4.	IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO.....	11
4.1	Pianificazione delle operazioni	11
4.1.1	Le missioni di volo	12
4.1.2	Il G.D.S. ed il concetto di accuratezza	13
5.	IL RILIEVO SATELLITARE A TERRA	15
5.1	Aspetti generali.....	15
5.2	Trasformazione delle coordinate e definizione della quota.....	17
6.	ELABORAZIONE, ORIENTAMENTO E RESTITUZIONE DEI RISULTATI	19
6.1	Principi di modellazione tridimensionale.....	19
6.2	Elaborazione dei dati	20
6.2.1	Caricamento delle immagini ed allineamento	20
6.2.2	Generazione della nuvola di punti densa	21
6.2.3	Generazione della mesh triangolare	21
6.2.4	Generazione della texture.....	22
6.3	Verifica dell'accuratezza del modello	23
6.4	Georeferenziazione	23
6.5	Restituzione dei risultati.....	23

1. PREMESSA

Il presente documento si pone l'obiettivo di descrivere gli aspetti metodologici e quelli operativi seguiti per l'esecuzione di rilievi topografici ed aerofotogrammetrici di una porzione dell'area interessata dal progetto di compensazione ecologica "Il Piano di Manetti", ricadente nel Comune di Signa (FI), che – all'epoca dell'esecuzione del rilievo topografico commissionato da ENAC nell'ambito del Masterplan 2014-2029 dell'Aeroporto Amerigo Vespucci di Firenze (2016) – non era stata presa in considerazione perché non interessata dagli interventi di compensazione ecologica.

Successivamente, nella definizione dei confini dell'area di compensazione ecologica, è emersa l'assenza, in tale area di una adeguata copertura topografica ed aerofotogrammetrica. Per tale motivo si è conferito specifico incarico per l'esecuzione di attività di rilievo topografico ed aerofotogrammetrico, nell'ottica generale di avere una base su cui poter condurre le attività di progettazione dell'area di compensazione ecologica de "Il Piano di Manetti".

Si veda, a chiarimento di quanto sopra, una comparazione tra l'area di compensazione ecologica come conterminata nello studio di impatto ambientale del Masterplan 2035 dell'Aeroporto di Firenze e quella effettivamente interessata dal progetto esecutivo di cui trattasi. Nello stesso estratto cartografico è riportata l'estensione dell'area interessata da rilievo topografico eseguito – per conto di ENAC – nell'anno 2016.

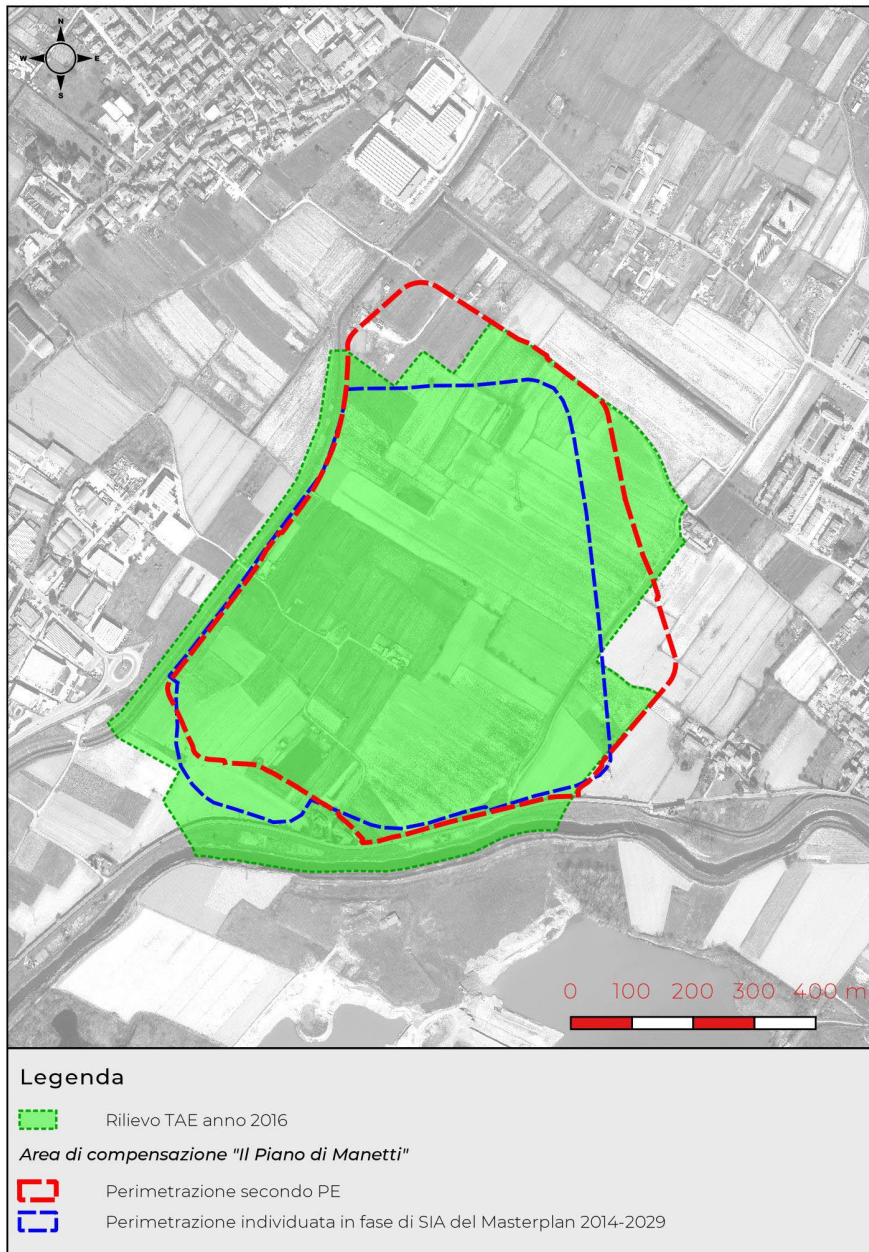


Figura 1. La perimetrazione dell'area di compensazione (in fase di SIA e di PE) e l'estensione del rilievo eseguito nel 2016 da ENAC-TAE

Il rilievo integrativo è stato eseguito nel novembre 2017 dall'Ing. Paolo Corradeghini il quale, come meglio dettagliato più oltre, ha fatto ricorso alla tecnica aerofotogrammetrica mediante Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) con materializzazione a terra di punti di inquadramento rilevati mediante strumentazione GNSS.

E' necessario segnalare che il presente elaborato si completa (nei suoi contenuti e nella sua lettura generale) con gli elaborati denominati "Rilievo topografico integrativo" (cod. el. FLR-MPL-PSA-CAP4-002-GE-PL_Manetti QC Ril Top), al quale si rimanda per una lettura sinottica di quanto di seguito riportato nel presente elaborato.

2. L'AREA DI RILIEVO

L'area interessata da rilievo integrativo si trova in località "Il Piano di Manetti", al confine tra i Comuni di Signa (FI) e Campi Bisenzio (FI) (Figura 2). Si tratta di un'area pianeggiante ampia circa 4 ettari, occupata da appezzamenti agricoli e strade poderali sterrate.

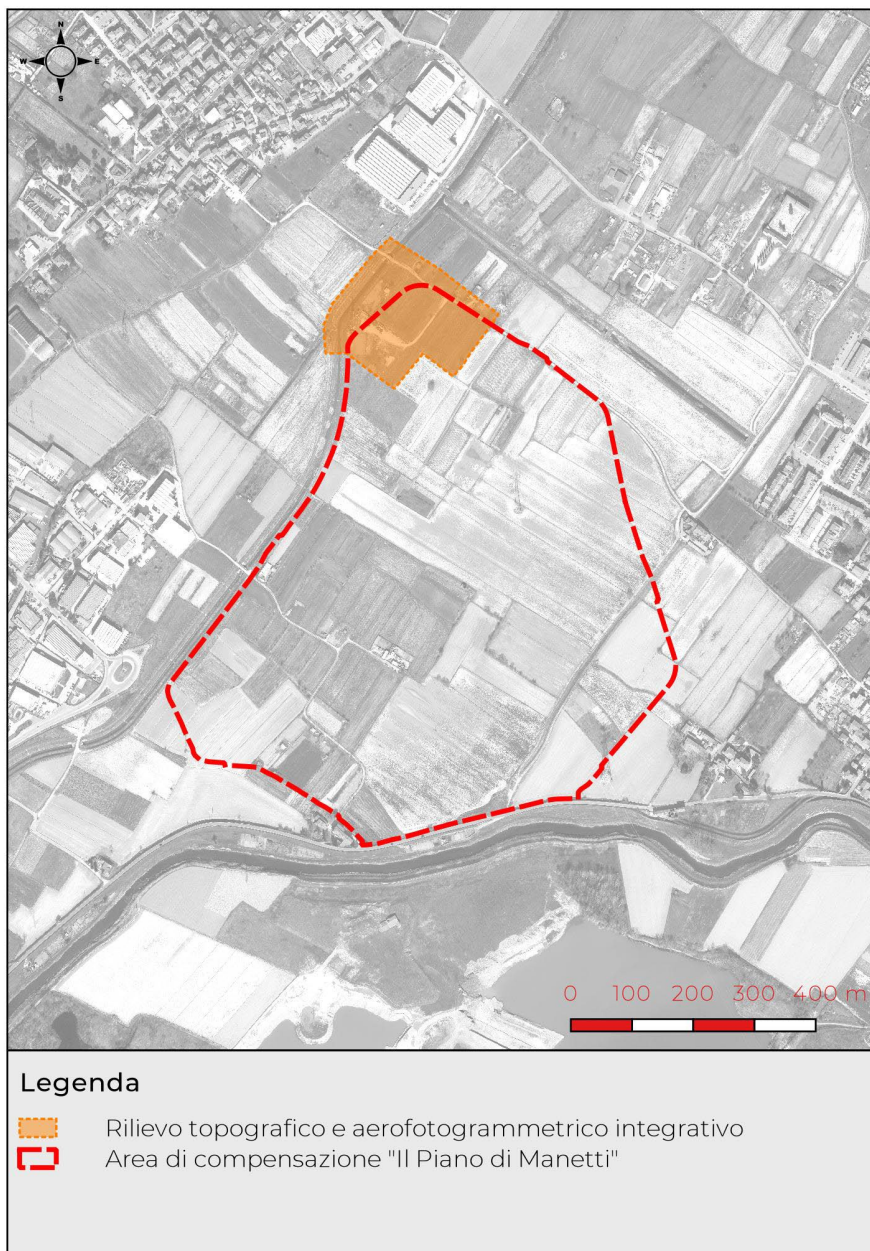


Figura 2: Area interessata dai rilievi topografici ed aerofotogrammetrici integrativi

3. TECNOLOGIA DI RILIEVO

Le caratteristiche dell'area da rilevare hanno guidato la scelta delle tecnologie di rilievo topografico verso la **tecnica aerofotogrammetrica** con l'impiego di **sistemi aerei a pilotaggio remoto (S.A.P.R.)**, meglio noti come **droni**, integrata da strumentazione topografica ad alta precisione di appoggio a terra.

La fotogrammetria consente l'acquisizione di informazioni metriche di oggetti a partire dall'elaborazione di immagini fotografiche scattate da punti di vista differenti. L'aerofotogrammetria impiega immagini scattate da mezzo aereo, nel caso specifico da drone. Le fotografie riprese dalle fotocamere con cui sono equipaggiati tutti i droni commerciali sono immagini digitali, pertanto è più corretto riferirsi a tecniche di **aerofotogrammetria digitale**.

Sebbene l'accuratezza di un rilievo aerofotogrammetrico sia generalmente inferiore rispetto ad altre tecnologie di rilievo topografico (stazione totale, laser scanner) si è ritenuto che questa fosse la migliore soluzione per lo studio in oggetto. Di seguito si riportano le motivazioni della scelta:

- Il sorvolo ed il rilievo mediante drone (e la successiva elaborazione delle immagini riprese) permette di acquisire la topografia dei luoghi con un'**alta densità di informazioni** ed in **tempi sensibilmente inferiori** rispetto all'uso di strumentazione a terra (stazione totale).
- L'utilizzo di un mezzo aereo permette di **rilevare aree che non sono accessibili** a piedi, con un GPS o una stazione totale: aree agricole recintate ed appezzamenti di proprietà privata.
- La tecnica aerofotogrammetrica, basandosi sull'acquisizione delle immagini, unisce al rilievo topografico (elaborato a partire dalle fotografie scattate) la possibilità di studiare e analizzare le riprese da un punto di vista vantaggioso (vista aerea) per la qualità e quantità di informazioni che si riescono ad ottenere.
- I risultati di un rilievo aerofotogrammetrico (ortofoto, modello digitale delle superfici, modello tridimensionale del terreno) sono fruibili ed integrabili all'interno di strumenti e software di analisi generale come i GIS ed all'interno di comuni software di disegno assistito (CAD).

3.1 CENNI DI FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi.

Per poter determinare le posizioni dei punti di un oggetto nell'ambiente reale o del territorio utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulla fotografia, è necessario definire le relazioni geometriche fra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia. A ogni punto dell'oggetto tridimensionale corrisponde un punto omologo sull'immagine. A questo proposito è possibile, con sufficiente approssimazione, pensare alla fotografia come a una prospettiva centrale, in base alla quale i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini (stella proiettante) si incontrano tutti in un punto distante pochi centimetri dal piano del sensore fotografico, il centro di presa.

Una sola immagine piana non contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale (lo sarebbe solo se anche l'oggetto fosse piano). Tuttavia queste informazioni possono essere ottenute disponendo di due fotografie che riprendono lo stesso oggetto osservato da due differenti punti di presa (un'unica camera che riprende l'oggetto in posizioni e in tempi diversi).

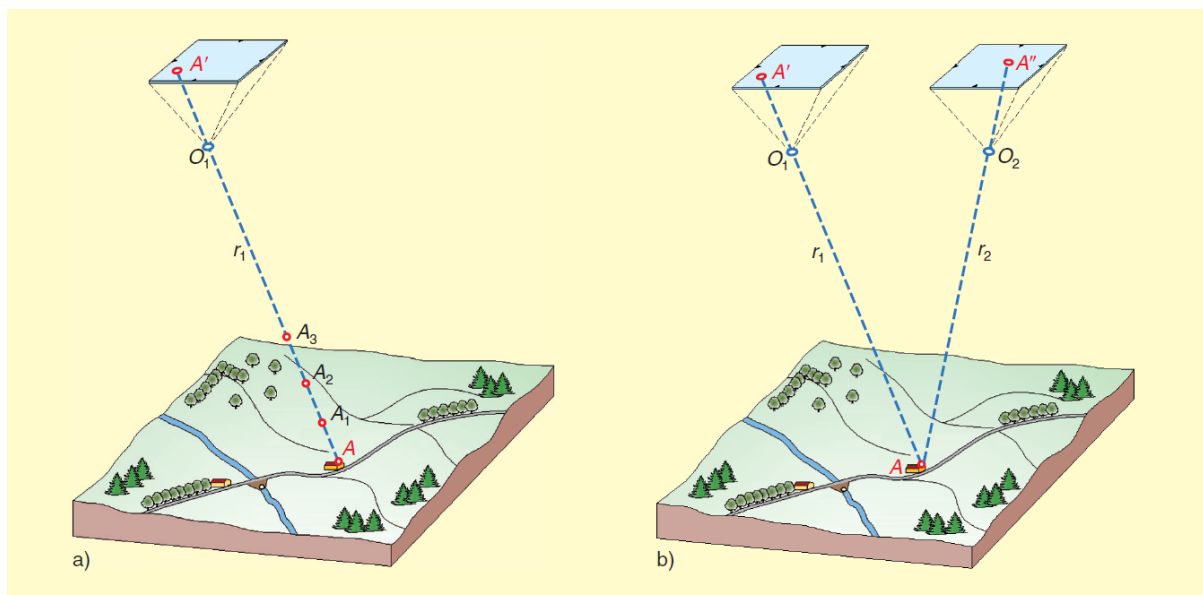


Figura 3. Principio fotogrammetrico: impiego di più immagini per definire le posizioni univoche dei punti sul terreno rilevato

Le posizioni dei centri di presa e l'orientamento del sensore fotografico tuttavia (salvo poche eccezioni) non sono note a priori. È però possibile ottenere queste informazioni dalle stesse fotografie, se queste contengono un certo numero di punti di appoggio sul

terreno le cui posizioni vengono ricavate da tradizionali operazioni topografiche (fase di orientamento assoluto).

Nel rilievo fotogrammetrico tradizionale si riconoscono sempre le seguenti fasi:

- **acquisizione:** operazioni riguardanti la presa delle immagini fotografiche;
- **orientamento:** operazioni per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa e la posizione dei piani dei sensori fotografici con la stessa posizione nello spazio che essi avevano al momento della presa, quindi la ricostruzione della forma e delle dimensioni dell'oggetto ripreso;
- **restituzione:** operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando strumenti detti restitutori, in grado di produrre, come risultato finale un modello tridimensionale, un disegno, un insieme numerico di coordinate o una immagine rettificata e raddrizzata (ortofoto).

3.2 GLI STRUMENTI IMPIEGATI

3.2.1 IL SISTEMA AEROMOBILE A PILOTAGGIO REMOTO – DRONE

Il rilievo aerofotogrammetrico è stato realizzato con un **Sistema Aeromobile Pilotaggio Remoto** (S.A.P.R.) costituito da un drone multi rotore a quattro eliche APR: APLKPH41 – SPR: SPLKPH41 – Flight Controller: FPLKPH41 e peso al decollo 1,380 kg, equipaggiato con fotocamera da 20 Mpixel (sensore da 1") e lunghezza focale dell'ottica 24 mm. Per facilità di comprensione si parlerà nel proseguo di questa relazione di **drone** (Figura 4).

L'operatore SAPR autorizzato è stato l'Ing. Paolo Corradeghini, iscritto ai registri ENAC (Ente Nazionale dell'Aviazione Civile) per operazioni specializzate non critiche al n. 6980 ed autorizzato ad operazioni specializzate critiche in scenario standard S01, S04 e S06 (autorizzazione prot. 128300-P del 13.12.2016 – rif. 9026).

Lo stesso Ing. Corradeghini ho coperto anche il ruolo di pilota in quanto in possesso di certificato di addestramento teorico N. 006/2016 del 27.02.2016 (ENAC.APR.OA.5368) e di addestramento pratico N. 006/2016 del 10.04.2016 (ENAC.APR.OA.5368), ad oggi convertiti ai sensi del nuovo regolamento nell'Attestato di Pilota I APRA 001587 per la classe e categoria VL/Mc (27.03.2017) e VL/Mc/CRO (04.04.2017).

Le operazioni si sono svolte nel rispetto delle vigenti norme in materia di sorvolo con aeromobili a pilotaggio remoto.



Figura 4: Aeromobile in volo nell'area di rilievo

3.2.2 IL SISTEMA SATELLITARE PER IL RILIEVO DEI PUNTI A TERRA

9

L'acquisizione di punti di riferimento ed appoggio a terra è necessaria affinché il modello finale elaborato sia correttamente orientato e scalato. Il rilievo topografico di appoggio è stato effettuato con strumentazione satellitare a doppia frequenza. Si è impiegato un ricevitore *rover* in modalità *RTK (Real Time Kinematic)* con correzione in tempo reale della posizione sulla base delle informazioni provenienti dalla rete di stazioni fisse sul territorio nazionale (*Rete Italpos*). La connessione e la trasmissione di informazioni al fine del posizionamento è avvenuta in modalità GSM. I ricevitori hanno sfruttato le costellazioni di satelliti *GPS*, *GLONASS* e *BEIDOU*. Le coordinate dei punti battuti sono state acquisite nel sistema di riferimento ellissoidico WGS84 (*EPSG 4326*). Per semplicità e maggiore comprensione (anche se non del tutto corretto) si parlerà nel proseguo di questa relazione di rilievo GPS e ricevitore/antenna GPS.



Figura 5. Ricevitore GPSS durante il rilievo delle coordinate dei punti di appoggio a terra

4. IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO

In questo capitolo sono illustrate le modalità operative del rilievo aerofotogrammetrico condotto.

4.1 PIANIFICAZIONE DELLE OPERAZIONI

La vigente normativa in materia di droni (Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto" - Seconda Edizione – Emendamento 3) limita il campo di azione di un aeromobile ad un'altezza massima dal punto di decollo di 150 m e ad una distanza massima dalla stazione di terra di 500 m. Inoltre tutte le attività devono essere condotte in modalità "VLOS" (*Visual Line of Sight*), ossia il pilota deve sempre mantenere il contatto visivo con il drone in volo.

Allo scopo di mantenere sempre un contatto visivo robusto tra l'aeromobile in volo ed il pilota a terra, l'area di indagine è stata suddivisa in quattro sotto-aeree di estensione simile tra loro e indicativamente compresa tra 1.5 e 2 ettari (Figura 6).

L'area di indagine è stata incrementata rispetto alla porzione per la quale si è richiesta l'integrazione dei dati topografici. Questo per poter suddividere la superficie nelle quattro sotto-porzioni omogenee, per avere una maggiore affidabilità dei dati topografici restituiti nella porzione centrale dell'intera area rilevata e per poter collegare agevolmente il nuovo rilievo con i dati topografici già esistenti.



Figura 6: Suddivisione dell'area oggetto di rilievo in quattro sotto-aree omogenee. In colore rosso è riportata la porzione di territorio per la quale è stata richiesta l'integrazione topografica.

4.1.1 LE MISSIONI DI VOLO

Un'area pianeggiante come quella oggetto di queste indagini si presta molto bene ad essere rilevata con mezzo aereo secondo missioni di volo programmate.

Nel caso specifico sono **state programmate due missioni per ogni sotto-area** in modo che le traiettorie del drone in volo formassero un *pattern incrociato*.

Per ciascuna missione si è impostata:

- l'**altezza di volo**, scelta pari a **60 m AGL** (*Above Ground Level*) in considerazione della presenza in sito di tralicci e linee elettriche aeree ad alta tensione fino a 50 metri dal suolo;
- la **velocità di crociera di 10 km/h**, sufficientemente ridotta per evitare sfocature nelle immagini dovute al possibile effetto mosso per velocità elevate;
- l'**intervallo di scatto delle fotografie** nadirali di **5 secondi** per avere una sovrapposizione tra fotogrammi adiacenti dell'**80%**;

Ciascuna missione ha avuto una **durata di circa 5 minuti** e sono state scattate in tutto circa **500 fotografie nadirali**.

In considerazione dello sviluppo esclusivamente pianeggiante dell'area indagata, non si è ritenuto utile eseguire riprese fotografiche con fotocamere inclinata rispetto

all'orizzontale, necessarie per rilievi di ambiti a marcato o prevalente sviluppo verticale (versanti, falesie rocciose, cave, ecc.).

La scelta di eseguire per ciascun'area due missioni di volo incrociate con acquisizione di immagini in entrambe le traiettorie è stata dettata dalla volontà di avere ridondanza di fotografie per maggiore confidenza nella ricostruzione del modello tridimensionale e, eventualmente, poter scartare immagini non idonee, senza perdere definizione e dettaglio della restituzione finale.



Figura 7: Missioni di volo programmate per le aree oggetto di indagine topografica.

4.1.2 IL G.D.S. ED IL CONCETTO DI ACCURATEZZA

Un parametro importante in un rilievo aerofotogrammetrico è la Risoluzione Spaziale che è definita dal **G.S.D.** (*Ground Sampling Distance*) ossia la distanza, misurata a terra, tra due pixel vicini dell'immagine. Il GSD è quindi la dimensione del pixel sul campo. Al decrescere del valore del GSD aumenta il dettaglio della fotografia. Esso dipende dalla risoluzione della macchina fotografica a bordo del drone, dalla lunghezza focale della sua ottica e dall'altezza di volo.

Le operazioni di sorvolo per il rilievo dell'area oggetto di studio sono state condotte in modo che la distanza tra la macchina fotografica a bordo del drone ed il terreno fosse circa pari a **60m**. Da ciò ne deriva un valore del **GSD pari a 1.65 cm/pixel**.

Non si deve tuttavia confondere il valore del GSD con quello dell'accuratezza del rilievo. Se le missioni di volo per un rilievo aerofotogrammetrico sono pianificate per un GSD di 1 cm non significa che l'accuratezza del rilievo restituito sia di 1 cm.

L'accuratezza di un rilievo aerofotogrammetrico può essere relativa o assoluta.

L'accuratezza relativa è la misura di come i punti sono posizionati relativamente uno con l'altro in un modello ricostruito (ad esempio in un'ortofoto o in un D.S.M.).

L'accuratezza assoluta invece si riferisce alle differenze tra la posizione dei punti nel modello ricostruito e la loro effettiva posizione sulla superficie terrestre.

Sebbene per alcune applicazioni ed impieghi l'accuratezza relativa possa essere sufficiente è buona norma ricercare l'accuratezza assoluta. In questo senso ci si affida ai punti di controllo misurati a terra con strumentazione topografica, chiamati *Ground Control Points (G.C.P.)*.

L'accuratezza assoluta dell'intero rilievo aerofotogrammetrico non può essere maggiore di quella con cui sono rilevati i Ground Control Points.

5. IL RILIEVO SATELLITARE A TERRA

5.1 ASPETTI GENERALI

Come anticipato in precedenza l'elaborazione fotogrammetrica necessita di punti di controllo a terra di coordinate note per effettuare le operazioni di orientamento e scalatura del modello ricostruito. La posizione dei punti deve essere rilevata a terra con strumenti topografici ad alta precisione e nel caso in esame è stato impiegato un ricevitore GPS.

Nonostante una stazione totale permetta precisioni sulle misure maggiori, si è scelto di rilevare con un antenna GPS per i seguenti motivi:

- Velocità di utilizzo: le operazioni di messa in stazione di una stazione totale sono più lunghe e rigorose rispetto alla "messa in bolla" di un GPS, quasi immediata;
- Praticità di utilizzo: la stazione totale necessita di punti di coordinate note per conoscere la propria posizione assoluta e trasformare conseguentemente le coordinate dei punti battuti che, inoltre, devono essere visibili dal cannocchiale dello strumento, rendendo necessario un elevato numero di stazioni di misura. Un ricevitore GPS in modalità RTK necessita esclusivamente di avere una buona copertura satellitare visibile nella porzione di volta celeste al di sopra dello stesso;
- Accessibilità dei luoghi: la stazione totale, con il treppiede per lo stazionamento, è uno strumento più pesante rispetto ad un ricevitore satellitare montato su palina in carbonio;
- Personale all'opera: la stazione totale necessita di un operatore allo strumento ed un secondo operatore, il *canneggiatore*, incaricato di posizionare il prisma riflettente montato su palina sul punto da battere. Il rilievo con GPS RTK necessita di un solo operatore che stazione direttamente sul punto;

È stata rilevata la posizione di 14 punti di controllo a terra *G.C.P.* (*Ground Control Points*) che sono stati impiegati nella fase di elaborazione dei rilievi aerofotogrammetrici per l'orientamento e scalatura del modello restituito e di altri 8 punti di controllo della qualità *Q.C.P.* (*Quality Control Points*) per la verifica dell'accuratezza finale della restituzione.

I punti a terra sono stati materializzati con **target amovibili ad alta visibilità e contrasto** per rendere più semplice l'individuazione all'interno delle fotografie scattate in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

I *G.C.P.* hanno target di colore giallo nero ad elementi triangolari mentre i *Q.C.P.* sono rossi e neri con motivi quadrati (Figura 8 e Figura 9).



Figura 8: *G.C.P.* e *Q.C.P.* materializzati a terra con target artificiali ad alta visibilità



Figura 9: Posizionamento dei G.C.P. e Q.C.P. su ortofoto risultante dall'elaborazione dei dati acquisiti.

5.2 TRASFORMAZIONE DELLE COORDINATE E DEFINIZIONE DELLA QUOTA

Le coordinate rilevate dal ricevitore satellitare a terra (come per altro quelle registrate dal GPS di bordo del drone ed associate a ciascuna immagine scattata) sono riferite all'ellissoide WGS84. Il sistema è identificato dal codice *EPSG 4326* (i codici EPSG fanno riferimento alla banca dati *European Petroleum Survey Group - Geodetic Parameter Dataset* - e sono considerati standard a livello globale). Sono pertanto forniti valori di **latitudine**, **longitudine** e **quota** in tal senso.

Latitudine e longitudine individuano la posizione di un punto sulla superficie dell'ellissoide mentre la quota rilevata rappresenta la distanza del punto battuto dalla superficie dell'ellissoide. Considerare tale valore come quota reale comporterebbe un errore grossolano. Infatti la quota nota come tale è quella ortometrica (o geoidica), ossia la distanza del punto battuto dalla superficie del geode. Nel territorio italiano il geode e l'ellissoide hanno uno scostamento relativo variabile tra 40 e 50 m.

Al fine di georeferenziare il risultato del rilievo all'interno di sistemi di riferimento cartografici in uso (*WGS84-UTM*) e determinare precisamente ed univocamente la quota ortometrica dei punti del rilievo topografico a terra, si sono condotte opportune trasformazioni delle coordinate mediante l'impiego del software *Verto3K* (IGM - Istituto Geografico Militare) unitamente alla griglia di trasformazione valida per un cerchio di raggio 10 km a partire dal caposaldo IGM più vicino all'area di indagine (N. 106702 – in località *Indicatore* – Comune di Campo Bisenzio), che fornisce puntualmente i valori di scostamento tra geoida ed ellissoide, noto come ondulazione del geode (N), oltre che i parametri di conversione da applicare agli algoritmi di trasformazione delle coordinate.

6. ELABORAZIONE, ORIENTAMENTO E RESTITUZIONE DEI RISULTATI

Terminate le operazioni di campo i dati acquisiti sono stati elaborati per restituire i risultati topografici richiesti.

6.1 PRINCIPI DI MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

Tramite la modellazione tridimensionale si ricostruisce ciò che si vede realmente ed in particolare la forma, l'illuminazione e la distribuzione del colore in un dato oggetto o scena reale rappresentati in una o più immagini.

Le tecniche di calcolo che sono implementate nei software utilizzati per questo scopo sfruttano diverse informazioni ricavabili dalle immagini per ricostruire la forma 3D degli oggetti, come per esempio le ombre (*shape from shading*), la texture (*shape from texture*), la silhouette (*shape from silhouette*). In generale si parla più comunemente di tecnologia **Structure from Motion**, includendo al suo interno tutte le tecniche che permettono la ricostruzione di oggetti 3D partendo da punti estrapolati da immagini 2D.

Tale tecnica, a partire dalle tecniche fotogrammetriche classiche ed integrandole con le moderne tecnologie di *imaging* su immagini digitali sempre più definite consente nello specifico di estrarre punti da immagini attraverso parametri fotografici: lunghezza focale, dimensioni del sensore, distorsioni e pixels. A differenza delle tecniche fotogrammetriche tradizionali, che richiedono l'utilizzo di una fotocamera calibrata o di una camera fotogrammetrica, per la *Structure From Motion* si può usare una qualsiasi fotocamera, di cui è necessario conoscere solo alcuni parametri, purché si rilevino direttamente sull'oggetto o nell'ambiente misure che possano servire per il dimensionamento della nuvola di punti. In fase di elaborazione si riesce a calcolare la posizione nello spazio della fotocamera rispetto all'oggetto e individuare i punti in comune in più immagini. Verranno quindi calcolate le coordinate dei punti nello spazio, che costituiranno una nuvola di punti densa.

Trattandosi di un'elaborazione di immagini e non di un rilievo topografico tramite sensori ottici, la nuvola di punti apparirà colorata, poiché i vertici ereditano il colore dei pixel.

La procedura *Structure From Motion* si compone di quattro fasi successive:

- Rilevamento ed estrazione delle features, individuazione dei punti di legame (*keypoints*) e loro descrizione tramite vettori di numeri (*descriptor*);

- Accoppiamento delle feature: una volta individuati ed estratti i punti omologhi, viene eseguito il loro accoppiamento (*matching*) nelle diverse immagini;
- Stima dei parametri della camera: calcolo dei parametri di orientamento interno ed esterno attraverso una procedura iterativa;
- Esecuzione del *matching* denso: calcolo di una nuvola di punti più completa attraverso algoritmi di *dense image matching*.

6.2 ELABORAZIONE DEI DATI

Il programma che è stato utilizzato per l'elaborazione delle immagini e dei dati rilevati a terra è *Agisoft Photoscan*, il quale lavora individuando i punti omologhi tra le diverse immagini e garantendo da qui la ricostruzione tridimensionale e l'estrazione di tutti i dati metrici ricercati.

6.2.1 CARICAMENTO DELLE IMMAGINI ED ALLINEAMENTO

Inizialmente tutte le immagini scattate durante le operazioni di sorvolo e rilievo sono caricate all'interno del software. Essendo il drone equipaggiato con sistema GPS di bordo (di ridotta precisione rispetto ad uno strumento satellitare topografico a doppia frequenza), tutte le immagini hanno associato un dato *exif* contenente le informazioni sulla posizione dello scatto in coordinate WGS84.

Le immagini vengono poi successivamente analizzate allo scopo di trovare i punti comuni tra di esse, i *matching points* sui quali verranno basate le successive elaborazioni. Questi punti formano una nuvola di punti a ridotta densità denominata **nuvola sparsa**.

La nuvola sparsa in oggetto conta circa 150.000 punti.

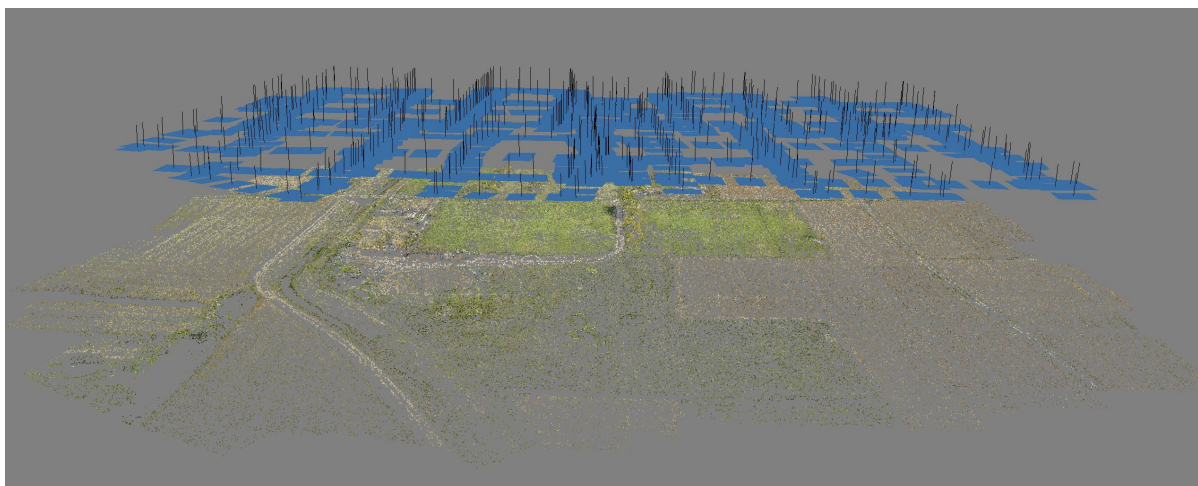


Figura 10: Nuvola sparsa formata dai punti di contatto (*matching points*) comuni alle immagini riprese e posizione dei punti di presa fotografica.

6.2.2 GENERAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI DENSA

A partire dalla nuvola sparsa e dopo l'orientamento della stessa mediante le coordinate dei punti di controllo (*G.C.P.*) il software procede al calcolo che richiede maggiori risorse in termini di tempo e prestazioni del calcolatore: la generazione della **nuvola densa**. Ai punti della nuvola sparsa si aggiungono altri punti a partire dalle informazioni grafiche contenute nelle immagini scattate in volo.

La nuvola densa in questo caso è formata da 100.000.000 di punti.



Figura 11: Nuvola di punti densa relativa all'area indagata.

6.2.3 GENERAZIONE DELLA MESH TRIANGOLARE

A partire dalla nuvola di punti il software genera poi una **mesh triangolare tridimensionale** dove i punti che costituiscono la nuvola densa diventano vertici di triangoli che costituiscono una sorta di scheletro del modello tridimensionale finale.

La mesh costruita per l'area rilevata è formata da poco più di 20.000.000 di facce.



Figura 12: Dettaglio della mesh triangolare tridimensionale del modello.

6.2.4 GENERAZIONE DELLA TEXTURE

Sulla base delle informazioni ricavate dalle immagini digitali il software genera una **texture ad alta risoluzione** con la quale "veste" lo scheletro triangolare, realizzando pertanto un modello tridimensionale realistico.

La risoluzione della texture qui generata è di 1,55 cm/pixel

22



Figura 13: Texture ad alta definizione applicata al modello triangolare tridimensionale.

6.3 VERIFICA DELL'ACCURATEZZA DEL MODELLO

L'elaborazione dei dati rilevati sul campo termina con la generazione di un modello tridimensionale dell'area indagata. Prima della restituzione dei risultati utilizzabili nello studio si è proceduto alla verifica dell'accuratezza globale mediante l'impiego dei punti di controllo a terra QCP la cui posizione è stata rilevata mediante strumentazione GPS.

L'analisi degli scarti tra la posizione rilevata sul campo e la posizione restituita dal modello elaborato rende possibile stimare l'accuratezza del rilievo.

Si stima che l'accuratezza media distribuita sulla superficie rilevata sia di 5 cm per il posizionamento planimetrico ed altimetrico.

6.4 GEOREFERENZIAZIONE

Il rilievo è restituito georeferenziato nel Sistema di Riferimento Cartografico su ellissoide WGS84, proiezione UTM, Fuso 32N. Il suo codice EPSG è il 32632.

6.5 RESTITUZIONE DEI RISULTATI

I risultati del rilievo aerofotogrammetrico sono rappresentati nell'elaborato Restituzione planimetrica in scala 1:500 (cod. FLR-MPL-PSA-CAP4-002-GE-PL_Manetti QC Ril Top).

Si fa presente inoltre che l'ortofoto realizzata a seguito del rilievo aerofotogrammetrico qui condotto è stata integrata all'ortofoto restituita con il rilievo del 2016.

Le due immagini sono state unite in apposito software di fotoritocco, uniformate nelle tonalità e nell'esposizione e, successivamente, l'immagine risultante è stata nuovamente georeferenziata sulla base delle informazioni topografiche rilevate sul campo (Figura 14).

Sono inoltre disponibili, su supporto informatico, la seguente documentazione informatica:

- Nuvola di punti tridimensionale in formato *dxf* e *shapefile*;
- File vettoriale tridimensionale della restituzione planimetrica del nuovo rilievo integrato a quanto già rilevato, in formato *dwg*, *dxf* e *shapefile* (complessivo e dei singoli elementi componenti il disegno);
- Ortofoto ad alta risoluzione (formato *tif*) georeferenziata nel Sistema di riferimento EPSG32632, riferita alla nuova porzione rilevata che relativa all'intera area oggetto di misure di compensazione e naturalizzazione;

- Fotografie panoramiche in alta definizione (formato jpg) riprese durante i sorvoli dell'area indagata con mezzo aereo.



Figura 14: Unione dell'ortofoto esistente con la nuova ortofoto (nella porzione superiore) generata a seguito del presente lavoro integrativo.