



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Anno Accademico 2020/2021

Sessione di Laurea dicembre 2021

Realizzazione di un modello 3D urbano ad altissima risoluzione: l'esempio del Comune di Livorno Ferraris

Relatore:

prof. Piero Boccardo

Correlatori:

ing. Giuseppe Mansueto

Candidato:

Federico Monteforte

Sommario

Sommario	1
Abstract	5
Nomenclatura	7
1 Introduzione	9
2 Modelli 3D e Digital Twin	11
2.1 <i>Cos'è un Digital Twin</i>	11
2.2 <i>Il livello di dettaglio (LOD)</i>	12
2.3 <i>Urban Digital Twin</i>	14
2.4 <i>DEM e DSM: definizioni</i>	17
3 Principi di fotogrammetria	20
3.1 <i>La fotogrammetria digitale</i>	20
3.2 <i>Struttura di un'immagine digitale</i>	21
3.3 <i>Risoluzione di un'immagine digitale</i>	22
3.3.1 <i>Risoluzione radiometrica</i>	22
3.3.2 <i>Risoluzione spaziale / geometrica</i>	23
3.4 <i>Acquisizione di un'immagine digitale</i>	24
3.5 <i>Rilievo aerofotogrammetrico</i>	25
3.6 <i>L'orientamento interno dei fotogrammi</i>	26
3.7 <i>L'orientamento esterno in fotogrammetria</i>	28
4 Caso studio e dataset	31
4.1 <i>Comune di Livorno Ferraris</i>	31
4.2 <i>Dataset</i>	32
4.2.1 <i>Immagini aeree ottiche</i>	32
4.2.1.1 <i>Orientamento Esterno</i>	35
4.2.1.2 <i>Calibrazione fotocamera</i>	36
4.2.2 <i>Acquisizione laser scanning (LIDAR)</i>	37
5 Metodologia operativa	41
5.1 <i>Operazioni preliminari</i>	42
5.2 <i>Processamento delle immagini</i>	48
5.1 <i>Post-processing: generazione DSM ed orto-mosaico</i>	50

6	Software	52
6.1	Ambiente di lavoro	52
6.2	Agisoft © Metashape	53
6.2.1	Workflow	54
6.2.1.1	Caricamento delle immagini	54
6.2.1.2	Allineamento delle immagini	56
6.2.1.3	Collimazione dei punti	58
6.2.1.4	Secondo allineamento delle immagini	61
6.2.1.5	Generazione della nuvola densa di punti	61
6.2.1.6	Generazione del DEM	63
6.2.1.7	Creazione dell'ortomosaico	64
6.2.1.8	Altri output: modello 3D texturizzato "tiled model" e "mesh" poligonale	65
6.2.2	Risultati del processamento	66
6.2.3	DSM e Ortomosaico	77
6.3	ESRI™ ArcGIS Pro	80
6.3.1	Workflow	80
6.3.1.1	Creazione spazio lavoro di Ortho Mapping	82
6.3.1.2	Allineamento del blocco (Block Adjustment)	85
6.3.1.3	Generazione del modello digitale di elevazione (DEM)	89
6.3.1.4	Generazione di un ortomosaico	91
6.3.2	Risultati del processamento	92
6.3.3	DSM ed Ortomosaico	103
6.4	PCI Geomatics Catalyst Professional	105
6.4.1	Workflow	105
6.4.1.1	Setup Informazioni sul Progetto (Project Information)	105
6.4.1.2	Calibrazione della fotocamera	107
6.4.1.3	Impostazione sistema di riferimento	107
6.4.1.4	Caricamento immagini	108
6.4.1.5	Raccolta dei GCP/TP	111
6.4.1.6	Calcolo del modello	115
6.4.1.7	Creazione DEM da coppie di immagini epipolari	115
6.4.1.8	Generazione ortofoto	120
6.4.1.9	Mosaicatura	121
6.4.2	Risultati del processamento	123
6.4.2.1	Report errori residui GCP / TP	124
6.4.2.2	Report del progetto	125
6.4.3	DSM ed Ortomosaico	125
6.5	Pix4d™ PIX4Dmapper	128
6.5.1	Workflow	128
6.5.1.1	Impostazione nuovo progetto	128
6.5.1.2	Caricamento e gestione GCP	133
6.5.1.3	Collimazione delle immagini	135
6.5.1.4	Allineamento iniziale	137
6.5.1.5	Affinamento allineamento immagini	140
6.5.1.6	Generazione nuvola punti e prodotti finali	144

6.5.2	Risultati del processamento	148
6.5.2.1	DSM ed Ortomosaico.....	157
7	Benchmarking	160
7.1	Ortorettifica	160
7.2	Analisi geometrica.....	161
7.2.1	RMSE.....	164
7.2.2	MSE.....	164
7.2.3	Deviazione standard.....	164
7.3	Analisi altimetrica.....	164
7.3.1	RMSE.....	165
7.3.2	MSE.....	165
7.3.3	Deviazione standard.....	166
7.4	Considerazioni e tabella di confronto.....	166
8	Creazione del modello tridimensionale	169
8.1	Processamento immagini oblique.....	169
8.2	Processamento nuvola punti LIDAR.....	171
8.3	Allineamento delle nuvole di punti.....	174
8.4	Elaborazioni successive su nuvole punti.....	177
8.5	Creazione modello texturizzato.....	180
8.6	Dal modello texturizzato a quello vettoriale.....	188
8.7	Creazione del modello 3D vettoriale (3Dfier).....	188
8.8	Elaborazione con 3Dfier.....	190
8.9	Considerazioni.....	197
9	Applicazioni.....	199
9.1	L'irraggiamento solare.....	203
9.2	Calcolo dell'insolazione: operazioni preliminari.....	204
9.2.1	Elaborazione del viewshed emisferico.....	206
9.2.2	Creazione della SunMap.....	207
9.2.3	Calcolo della SkyMap.....	207
9.2.4	Sovrapposizione viewshed con SunMap e SkyMap.....	208
9.2.5	Equazioni della radiazione solare.....	209
9.3	Calcolo dell'irradiazione solare incidente.....	211
9.4	Calcolo del potenziale fotovoltaico.....	224

10	Conclusione e sviluppi futuri	228
11	Riferimenti	231
12	Tabella delle Figure	235
13	Tabella degli Output	239

Abstract

Sempre più spesso ci si imbatte nel concetto di città “intelligente”, modello capace di efficientare l’amministrazione / pianificazione dei servizi urbani e delle sue risorse. Questo concetto è strettamente connesso a quello di Urban Digital Twin, strumento d’unione tra la rappresentazione virtuale del modello urbano e delle risorse fisiche della città stessa.

Questo studio ha come oggetto la realizzazione e parametrizzazione di un **modello tridimensionale solido**, alla base di un Digital Twin urbano, ottenuto dall’**elaborazione** di un **dataset eterogeneo di immagini aeree ottiche (oblique e nadirali), dati LIDAR**.

La prima fase del lavoro di tesi è consistita nella generazione di un **modello digitale della superficie (DSM)** e di un **ortomosaico**, successivamente analizzati dal punto di vista dell’**accuratezza geometrica** ed **altimetrica**, al fine di ottenere un **benchmark** sugli output generati da **differenti software per la modellazione 3D** (Agisoft – Metashape, ESRI – ArcGIS Pro, PCI Geomatics – Catalyst Professional, Pix4d – PIX4Dmapper).

Definito il software più idoneo, a seguito dell’implementazione del modello già generato con una nuvola di punti LIDAR, si è proceduti alla **generazione di un modello 3D texturizzato ad altissima risoluzione e di un modello 3D vettoriale LOD1.3**. Quest’ultimo è stato valutato come possibile **strumento innovativo** a supporto della **pianificazione territoriale** e per la valutazione energetica del patrimonio edilizio esistente, con un particolare riguardo alla **stima del potenziale fotovoltaico** dei tetti degli edifici.

Abstract

Nowadays we often come across the concept of a “smart” city, a model capable of managing and administrate the urban resources more efficiently. This concept is closely connected to the Urban Digital Twin one, a tool that links the virtual representation of the urban model to the physical resources of the city itself.

The subject of this study is the creation and the parameterization of a solid three-dimensional model, which stands at the basis of a urban Digital Twin, obtained by integrating a heterogeneous dataset of optical (oblique and nadiral) imagery and laser scanning data (LiDAR).

The first phase of the thesis work involved the elaboration of a digital model (DSM) and an orthomosaic, and the analysis of their geometric and altimetric accuracy, in order to obtain a benchmark on the outputs generated by different 3D modeling software (Agisoft - Metashape, ESRI - ArcGIS Pro, PCI Geomatics - Catalyst, Pix4d - PIX4Dmapper).

Once the most suitable software was defined, and after the implementation of the LiDAR point cloud, a textured very high-resolution 3D model, as well as a LOD1.3 vector 3D model, were generated. The latter has been evaluated as a possible innovative support tool in territorial planning and for energy efficiency of the existing building heritage, with a specific focus on the estimation of the photovoltaic potential of building roofs.

Nomenclatura

AOI	Area of Interest – Area di interesse / studio
BDTRE	Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti piemontesi
CCS	Charghed-Coupled Device – Dispositivo ad accoppiamento di carica
CLI	Command-Line Interface – interfaccia a riga di comando
CMOS	complementary metal-oxide semiconductor
DEM	Digital Elevation Model – modello digitale di elevazione
Dense Cloud	Nuvola densa di punti
DN	Digital Number
DSM	Digital Surface Model – modello digitale di superficie
DTM	Digital Terrain Model – modello digitale del terreno
EO	External Orientation – Orientamento esterno
EPSG	European Petroleum Survey Group – Registro pubblico geodetico
FLIR	Forward Looking Infrared – Tecnica di acquisizioni immagini infrarosse
GCP	Ground Control Point, – Punti di controllo a terra
GIS	Geographic Information System – Sistema informativo territoriale
GML	Geographic Markup Language – metalinguaggio per la modellazione di sistemi geografici
GNSS	Global Navigation Satellite System – Sistema satellitare di navigazione globale
GPS	Global Positioning System – Sistema di posizionamento globale
GSD	Ground Sample Distance – Risoluzione geometrica del pixel
IMU	Inertial Measurement Unit – Unità di misura inerziale
INS	Inertial Navigation System – Sistema di navigazione interziale
IO	Internal Orientation – Orientamento interno
LAS	LASer (format) – formato file progettato per l'archiviazione dati di una nuvola punti LIDAR
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging – tecnica di telerilevamento laser
LOD	Level of Detail – Livello di dettaglio

MSE	Mean Square Error – Errore quadratico medi
MWIR	Middle-Wave Infrared – Infrarosso medio
OGC	Open Geospatial Consortium – Consorzio Geospaziale Open-source
PV	Photovoltaic
PR	Performance Ratio – Parametro per il calcolo del potenziale fotovoltaico
Raster	Immagine digitale composta da una griglia di punti areali (raster)
RGB	Red-Green-Blue – Sequenza standard delle immagini a colori reali
RMSE	Root Mean Square Error – Radice dell'errore quadratico medio
RTK	Real Time Kinematic – Cinematica in tempo reale
SFM	Structure from Motion – Algoritmo di struttura dal movimento
Tiled Model	modello tridimensionale a tasselli
TIR	Thermal Infrared – immagini all'infrarosso
TP	Tie Point – Punti di collegamento
UAV	Unmanned Aerial Vehicle – Veicolo aereo senza equipaggio (Drone)
UTM	Universal Transverse of Mercator – Proiezione universale trasversa di Mercatore
XML	eXtensible Markup Language – Metalinguaggio di marcatura estendibile
WGS	World Geodetic System – Sistema di coordinate geografiche geodetico

1 Introduzione

Le moderne comunità urbane sono chiamate ad affrontare una delle sfide più ardue del nuovo Millennio: la realizzazione di habitat sostenibili e resilienti. A tale scopo hanno sviluppato competenze multidisciplinari rispondendo alla ineluttabile trasformazione digitale della società contemporanea.

In questo contesto, il Digital Twin si inserisce come strumento di unione tra la **representazione virtuale del modello urbano** e la città stessa, dando vita al cosiddetto: **“Urban Digital Twin”**.

Nella prima parte dell’elaborato vengono affrontati gli aspetti generali e i principi fondamentali legati alla **modellizzazione 3D**, nonché la contestualizzazione del *“gemello digitale”* in ambito urbano, per comprendere quelli che possono essere i risvolti applicativi di tale modello nella realtà contemporanea sempre più digitalizzata ed interconnessa.

L’analisi è stata condotta sul territorio di Livorno Ferraris (VC), cittadina del vercellese posizionata sul sistema di coordinate geografiche WGS84 UTM 32N a 428231.88m Est ed a 5014654.95m Ovest. Per questo studio è stato utilizzato un dataset di immagini eterogeneo composto da: **immagini aeree nadirali e oblique** ed **acquisizioni georeferenziate a scansione laser (LIDAR)**.

Per l’elaborazione di questi sono stati utilizzati software di **Structure from Motion (SfM)**, ossia Agisoft © Metashape, ESRI™ ArcGIS Pro, PCI Geomatics® Catalyst Professional, Pix4d™ PIX4Dmapper, specifici nella gestione di dataset consistenti di immagini acquisite da volo aereo o da drone e nella realizzazione di modelli 3D ad alta risoluzione quali: **DSM, modelli tridimensionali texturizzati, modelli mesh**.

In questa fase, lo studio si è focalizzato sulle capacità computazionali di tali programmi per la generazione di DSM ed ortomosaici, consentendo la realizzazione di un **benchmark** incentrato sull'**accuratezza geometrica** e **altimetrica** degli output ottenuti.

Definito il software più idoneo, a seguito dell'implementazione del modello già generato con una nuvola di punti LIDAR, si è proceduto, alla **generazione di un modello 3D texturizzato ad altissima risoluzione e di un modello 3D vettoriale LOD1.3**. La peculiarità di tale studio è stata l'elaborazione di **tre diverse nuvole dense di punti** allo scopo di **incrementare la qualità finale del modello**, in particolar modo del dettaglio degli elementi architettonici e strutturali presenti sulle facciate degli edifici.

Infine, nell'ultima parte della tesi viene analizzata la capacità di declinare la realizzazione di modelli digitali in termini di **stima del potenziale fotovoltaico delle coperture inclinate degli edifici**. Questa applicazione pratica dimostrerà come il modello 3D, opportunamente integrati ed "alimentato", può diventare uno strumento fondamentale nella **pianificazione territoriale** e della sempre più complessa gestione del tessuto urbano.

2 Modelli 3D e Digital Twin

Con **modello 3D** (o tridimensionale) si definisce la rappresentazione matematica di una qualsiasi superficie o oggetto reale in uno spazio virtuale, per mezzo del processo di modellazione tridimensionale. [1]

2.1 Cos'è un Digital Twin

Il concetto di digital twin fu usato per la prima volta nel 2001 da Michael Grieves, oggi Chief Scientist for Advanced Manufacturing presso il Florida Institute of Technology, che durante un corso di Product Lifecycle Management (PLM) presso l'Università del Michigan descriveva il gemello digitale come **l'equivalente virtuale e digitale di un prodotto fisico** [2].

Grazie ai digital twin è possibile testare e capire come si comporteranno i sistemi e i prodotti che si vogliono realizzare in un'ampia varietà di ambienti, usando lo spazio virtuale e la simulazione. Il tutto combinando diverse tecnologie afferenti a un unico database che conterrà tutti i dati di progettazione dell'impianto o del prodotto, software di simulazione, dati in tempo reale dall'ambiente di produzione e molto altro. I vantaggi sono molteplici, a partire dalla possibilità di accedere facilmente ai dati di molte fonti diverse, aggregarli e visualizzarli attraverso un unico cruscotto centralizzato, sincronizzato e condiviso, potendo aggiungere informazioni contestuali.

Un digital twin può essere un modello di un componente, di un sistema di componenti o di un sistema di sistemi, come pompe, motori, centrali elettriche, linee di produzione o una flotta di veicoli. I modelli di digital twin possono includere approcci statistici o basati sulla fisica. I modelli riflettono l'ambiente

operativo attuale, l'età e la configurazione dell'asset, che generalmente prevede uno streaming diretto di dati negli algoritmi di ottimizzazione.

2.2 Il livello di dettaglio (LOD)

Per livello di dettaglio (**Level of Detail – LOD**) di un modello 3D, si intende il grado di approfondimento delle informazioni di varia natura che sono contenute all'interno del modello stesso. Secondo Biljecki, Ledoux e Stoter [3], il concetto di livello di dettaglio (LOD) dello standard **OGC CityGML** ha lo scopo di differenziare le **rappresentazioni multi-scala di modelli semantici di città 3D**.

Il **City Geography Markup Language (CityGML)** è uno standard utilizzato per indicare il dettaglio geometrico di un modello tridimensionale, principalmente per gli edifici. Si tratta di un modello informativo comune per la rappresentazione di oggetti urbani 3D: definisce le classi e le relazioni per gli oggetti topografici più rilevanti nelle città e nei modelli regionali rispetto alle loro proprietà geometriche, topologiche, semantiche e di aspetto. Sono incluse le gerarchie di generalizzazione tra classi tematiche, aggregazioni, relazioni tra oggetti e proprietà spaziali. La formattazione dei dati è basata su *XML* per l'archiviazione e lo scambio di modelli di città virtuali 3D. [4]

A differenza di altri formati vettoriali 3D, CityGML si basa su un ricco database di informazioni ad uso generale, oltre alla geometria e al contenuto grafico, che consente di utilizzare modelli di città 3D virtuali per attività di analisi sofisticate in diversi domini applicativi come: simulazioni, data mining urbano, strutture gestione e indagini tematiche. [4]

Le aree di applicazione mirate includono esplicitamente la **pianificazione urbana e paesaggistica; progettazione architettonica**; attività turistiche e ricreative; **Catasti 3D; simulazioni ambientali**; telecomunicazioni mobili;

gestione delle catastrofi; sicurezza territoriale e nazionale; **navigazione veicolare e pedonale**; simulatori di addestramento; e robotica mobile. [5]

CityGML è implementato come schema applicativo per il Geography Markup Language versione 3.1.1 (GML3), lo standard internazionale estendibile per lo scambio di dati spaziali emesso dall'Open Geospatial Consortium (OGC) e dall'ISO TC211. CityGML è uno standard OGC ufficiale e può essere utilizzato gratuitamente. [6]

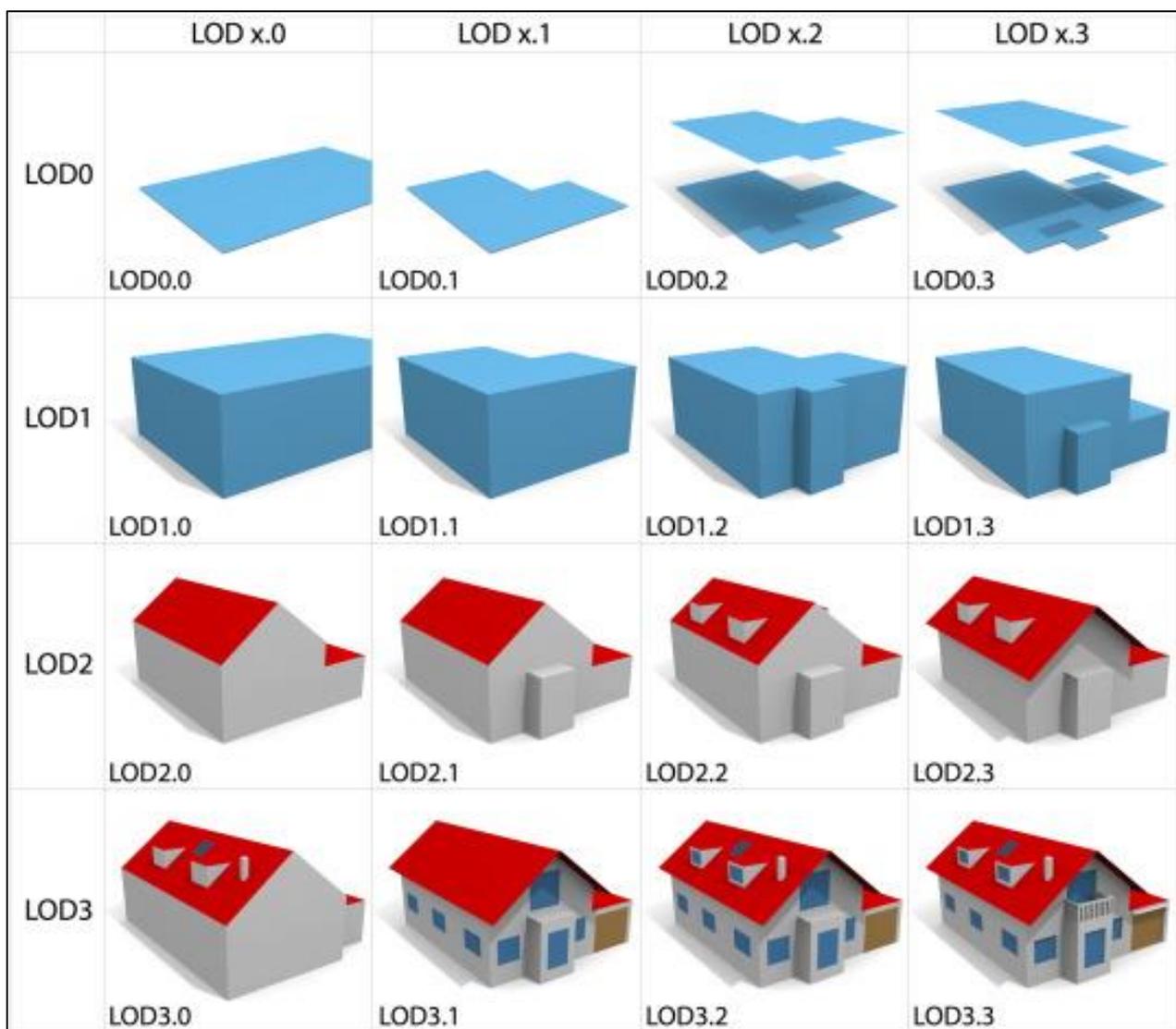


Figura 1 Esempio di LOD a 16 livelli [3]

2.3 Urban Digital Twin

Con **Urban Digital Twin** si definisce il modello 3D intelligente della città [7]. sono una rappresentazione virtuale delle risorse fisiche di una città, utilizzando dati, analisi dei dati e apprendimento automatico per aiutare i modelli di simulazione che possono essere aggiornati e modificati (in tempo reale) man mano che cambiano i loro equivalenti fisici. Alcuni potrebbero considerare un gemello digitale descrivendo solo la realtà (e la sua storia), mentre sono le applicazioni aggiuntive che portano la vera intelligenza e aiutano a creare l'immagine comune della realtà che è il valore aggiunto di un gemello digitale urbano. In termini di logica, possono portare efficienza in termini di costi, efficienza operativa, migliore gestione delle crisi, maggiore apertura e processo decisionale più informato, governance più partecipata o migliore pianificazione urbana. Secondo quanto riporta la piattaforma web dell'Unione Europea dedicata alle smart city(eu-smartcities.eu/):

“Quando si combina il gemello digitale con la potenza predittiva dell'analisi dei big data e dell'intelligenza artificiale, le città sono essenzialmente in grado di avanzare rapidamente nel tempo per migliorare la pianificazione urbana per tutti i tipi di eventi – dagli investimenti infrastrutturali a lungo raggio, alle operazioni di servizio in tempo quasi reale. L'intelligenza scaturita dal gemello digitale permette alle città di migliorare il loro ambiente urbano fisico e sociale”.

Un gemello digitale della città intelligente si basa su una serie di stratificazioni che sovrappongono: informazioni sul terreno, gli edifici, le infrastrutture, la mobilità e dispositivi IoT. Il Digital twin utilizza i dati generati nel livello della città

intelligente virtuale per eseguire ulteriori simulazioni. Le informazioni derivanti dagli strati del modello possono essere implementate nel mondo fisico [8].

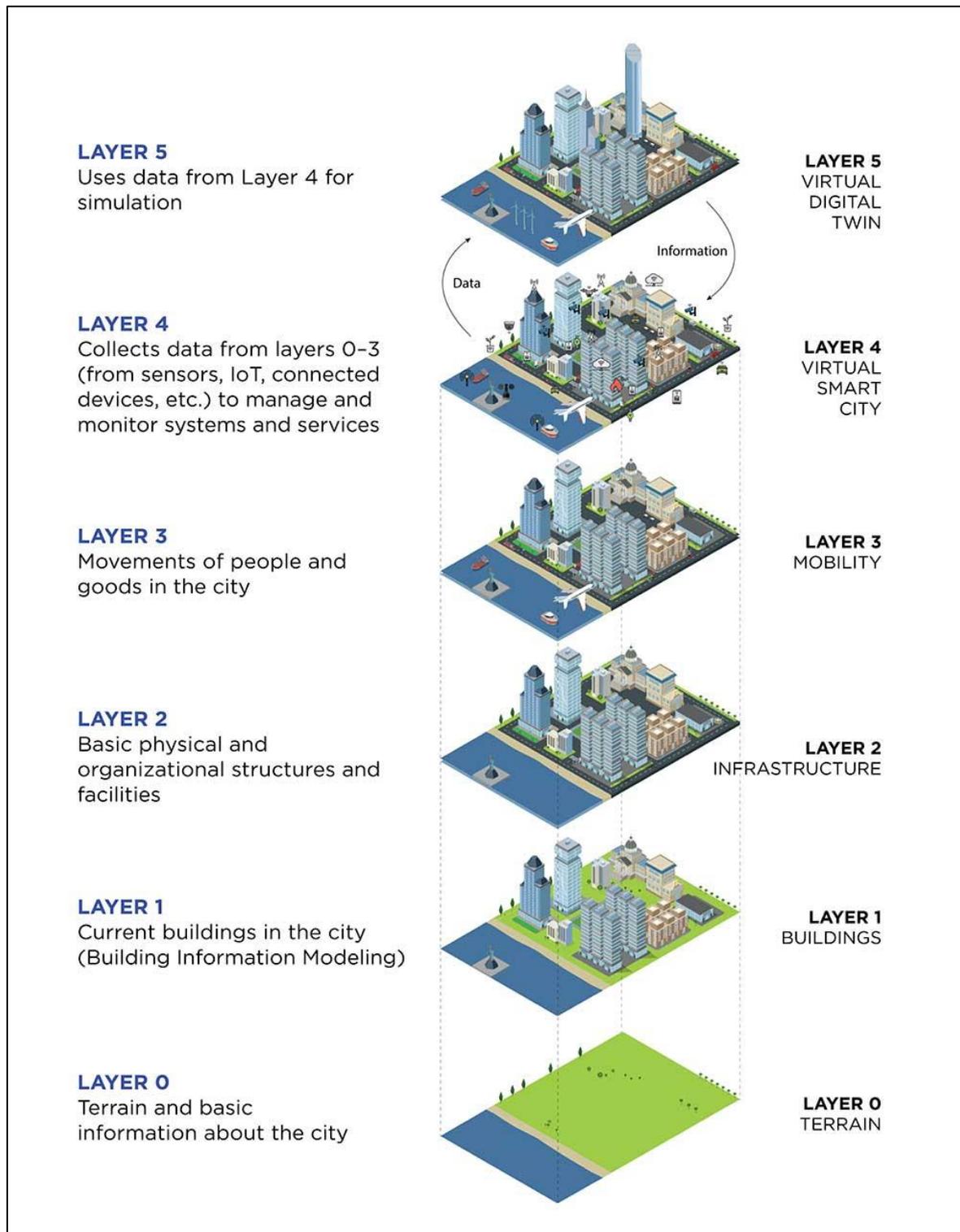


Figura 2 Immagine tratta dall'articolo: "A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback." [8]

Tale modello viene applicato al contesto urbano, grazie ai progressi ottenuti nel campo delle tecnologie geospaziali, specificatamente della **modellazione**

digitale tridimensionale (3D) della città. Una volta realizzato il modello digitale della città (City Model) ad esso sono aggregati i digital twin dei sistemi destinati alla gestione della smart city, quali quelli riguardanti:

- gli edifici intelligenti;
- le infrastrutture dedicate alla mobilità di persone e beni;
- le reti energetiche, di TLC e di distribuzione delle risorse idriche.

L'ecosistema digitale risultante consente ai portatori d'interesse della smart city pubblici, privati e della società civile di:

- seguire il comportamento della città reale e monitorarne l'evoluzione;
- pianificare e sviluppare progetti, osservando preventivamente gli effetti della loro attuazione sulla sua "gemella";
- anticipare eventuali problematiche ed eseguire azioni correttive, prevenendo così l'insorgere di criticità.

Lo schema della seguente figura descrive concettualmente l'abbinamento tra sistema fisico della città e il suo sistema virtuale; le connessioni evidenziano i flussi di dati/informazioni tra le due entità accoppiate.

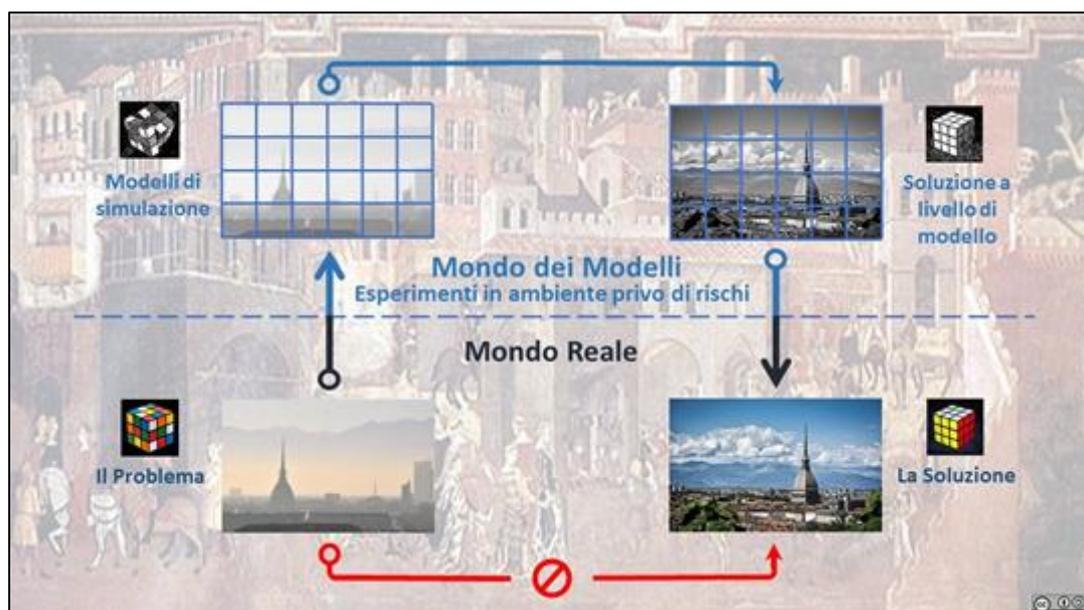


Figura 3 Schema concettuale del Digital Twin per la Smart City [9]

2.4 DEM e DSM: definizioni

Con il termine **Digital Elevation Model (DEM)**, si definisce la "rappresentazione cartografica digitale dell'elevazione del terreno a intervalli regolarmente distanziati in direzioni x e y , usando valori z a cui si fa riferimento a un dato verticale comune" [10].

Il **Digital Surface Model (DSM)** è una rappresentazione della superficie terrestre che comprende tutti gli oggetti, sia naturali che antropogenici (edifici, alberi, linee elettriche ecc.), più adatto per la modellazione 3D, la gestione delle telecomunicazioni o la gestione forestale [11]. Questi modelli di elevazione 3D possono essere riferiti o alla superficie ellissoidale matematica, riportando le altezze ellissoidi, o alla superficie geoidica, mostrando le elevazioni di ogni punto. Un ellissoide è definito come la superficie generata dalla rotazione di un'ellisse, con " α " come semi asse maggiore e " β " come semi asse minore, sul proprio asse maggiore (Figura 4).

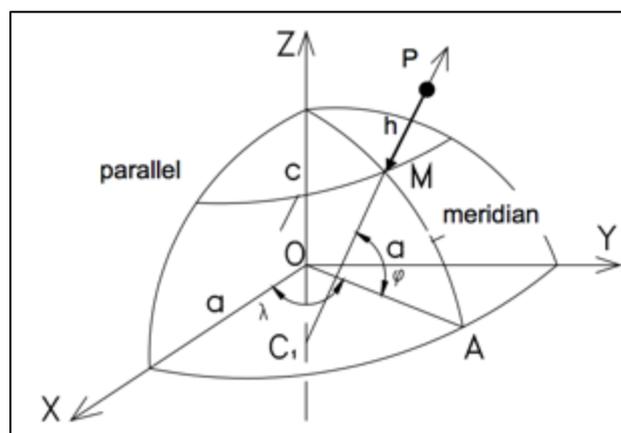


Figura 4 L'ellissoide matematico da cui si fa riferimento alle coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e da cui le altezze ellissoidi sono rilevate dal GPS [12]

L'ellissoide di riferimento usato nella cartografia è una superficie liscia e matematica, in cui la coordinata geografica è la latitudine (ϕ), misurata in gradi Nord o Sud dall'equatore, e la longitudine (λ), misurata in gradi est o ovest dal

meridiano di Greenwich. Le altezze, invece, sono riferite alle rilevazioni GPS, che normalmente adottano come ellissoide di riferimento il Sistema Geodetico Mondiale del 1984 (WGS 84). [13]

Il geoide (Figura 5) è definito come la superficie media dell'oceano, superficie piana irregolare su cui il potenziale gravitazionale è costante. [12]

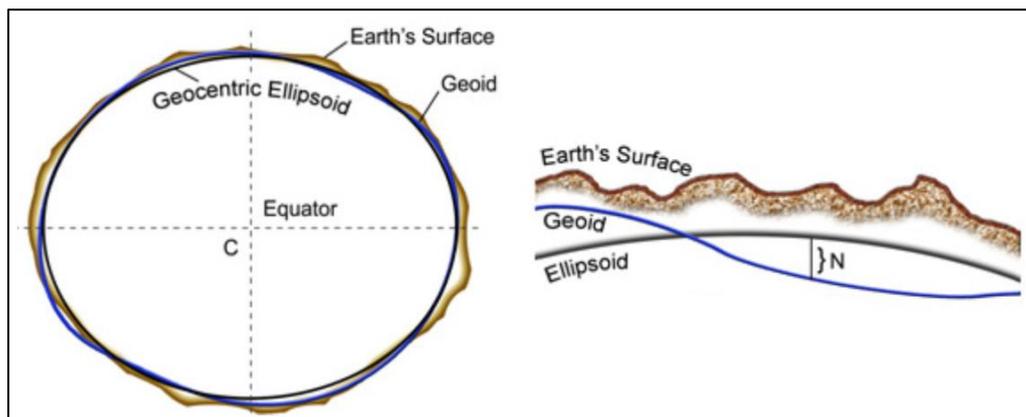


Figura 5 Ellissoide geocentrico, geoide e superficie terrestre a confronto [13]

La differenza di altitudine (N) tra il geoide e l'ellissoide (Figura 6) è definito come ondulazione del geoide, normalmente con variazioni locali nell'intervallo di -106 m e $+85$ m. Questo è espresso matematicamente come:

$$N = h - H \quad (1)$$

dove:

1. H , l'elevazione (chiamata anche altezza ortometrica), è definita come la distanza dal geoide misurata su una linea a piombo;
2. h , altezza ellissoide, definita come distanza tra un punto sulla superficie cardiaca e la superficie ellissoide, misurata dal GPS sul perpendicolare all'ellissoide matematico;
3. N , altezza geoide (ondulazione del geoide), differenza tra h e H .

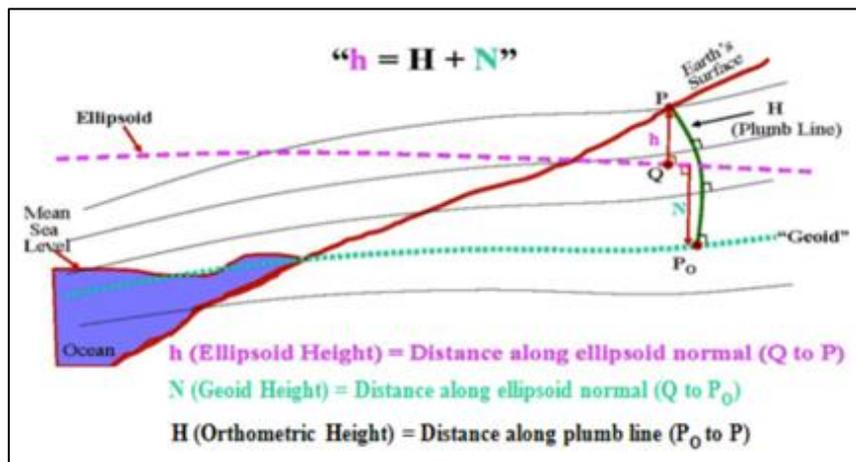


Figura 6 Ellissoide, altezza geoida ed elevazione a confronto [13]

3 Principi di fotogrammetria

3.1 La fotogrammetria digitale

La **fotogrammetria** è la scienza che consente di ottenere informazioni metriche di oggetti fisici attraverso processi di registrazione, misura e interpretazione di immagini fotografiche. Risolvere un problema fotogrammetrico significa individuare le trasformazioni da applicare alle coordinate dello spazio immagine della fotografia in modo da relazionarlo con le grandezze dello spazio oggetto da rilevare [14].

La soluzione del problema fotogrammetrico può essere riassunta in tre fasi:

- *Presca*: dalle coordinate tridimensionali dello spazio oggetto, noti i parametri di orientamento interno di una macchina fotografica si ottengono le coordinate bidimensionali dell'immagine;
- *Orientamento*: una volta individuate le coordinate oggetto e immagine, vengono valutati i parametri di orientamento esterno;
- *Restituzione*: tramite le coordinate immagine e i parametri di orientamento vengono determinate le coordinate spaziali dell'oggetto.

La **fotogrammetria digitale** permette di costruire modelli tridimensionali a partire da immagini fotografiche. Gli algoritmi implementati dai vari software per la comparazione di due o più fotogrammi stereometrici, si basano sui principi teorici della fotogrammetria tradizionale di:

- Collinearità;
- Intersezione di raggi proiettivi;
- Calibrazione della fotocamera;

a cui si affiancano gli algoritmi tipici della visione robotica che consentono di raggiungere un elevato grado di automazione in numerose fasi del processo fotogrammetrico.

Da qui nascono gli algoritmi di **Structure from Motion (SfM)**: è una tecnica che attraverso la collimazione automatica di punti omologhi presenti in un insieme di foto, permette la ricostruzione della forma reale di oggetti. Acquisendo immagini da diverse prospettive, è possibile ricostruire la tridimensionalità, quindi la struttura [15].

3.2 Struttura di un'immagine digitale

Si definisce un'immagine digitale come la rappresentazione numerica di un'immagine bidimensionale (Figura 7). Tale rappresentazione può essere di tipo *vettoriale* o *raster* (anche detta *bitmap*).

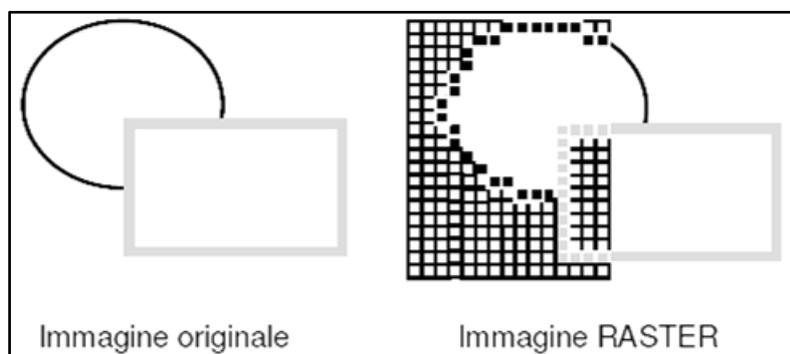


Figura 7 Trasposizione da immagine originale a immagine raster

L'immagine raster è costituita da una griglia di punti areali di dimensioni finite detti **pixel**. Utilizzando una rappresentazione matriciale, i pixel possono essere individuati univocamente da due numeri interi che rappresentano la posizione del pixel all'interno della matrice: l'indice di riga e di colonna [16].

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dove:

1. $x=0, 1, \dots, C-1$ indice di riga
2. $y=0, 1, \dots, R-1$ indice di colonna
3. R =massimo numero di righe

A livello matematico quindi, un'immagine raster è una funzione discreta ottenuta campionando le variabili spaziali x e y in una matrice binaria $g(x,y)$ i cui elementi sono appunto i pixel.

Ad ogni pixel è associato un numero intero positivo detto Numero Digitale o **Digital Number (DN)**, che rappresenta il valore radiometrico della porzione di immagine contenuta all'interno del pixel [17]

3.3 Risoluzione di un'immagine digitale

La risoluzione di un'immagine digitale è composta da due aspetti peculiari:

- 1) La risoluzione radiometrica
- 2) La risoluzione spaziale

3.3.1 Risoluzione radiometrica

Indica il numero di diverse intensità della radiazione luminosa che un sensore ottico è in grado di distinguere, ovvero la trasformazione che viene applicata all'intensità del segnale luminoso, percepita dal sensore, in un valore numerico intero chiamato Digital Number. Il DN viene poi memorizzato per ogni pixel fornendo il valore radiometrico della porzione di immagine occupata.

Esistono diversi tipi di risoluzione radiometrica in funzione della grandezza attribuibile al DN e quindi al tipo di immagine che si vuole ottenere.

Se si vuole rappresentare un'immagine in toni di grigio, il DN varia tra 0 (nero) e 255 (bianco) (Figura 8) [17]

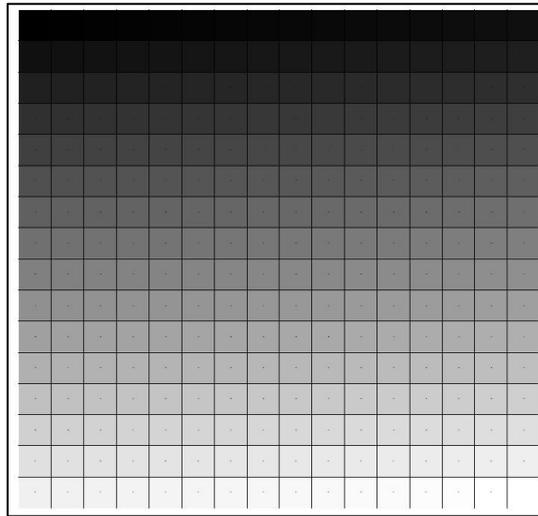


Figura 8 Gradazione di grigio a 8bit. DN compreso tra 0 e 255 (da nero a bianco)

Per le immagini a colori reali (True Color), ogni colore è il risultato della sovrapposizione di tre colori fondamentali: Rosso, Verde e Blu (RGB). Di seguito viene riportata sinteticamente la correlazione tra DN, bit e tipo di immagine (Tabella 1):

n. bit	n. byte (1byte=8bit)	DN	Tipo di immagine
1	1/8	2	Bianco e Nero
8	1	256	Toni di grigio
16	2	65536	64k colori
24	3	16.777.216	RGB (16,7M di colori)

Tabella 1 Tipi di immagine suddivisi per n. di bit e DN

3.3.2 Risoluzione spaziale / geometrica

La risoluzione spaziale dipende dalla porzione di immagine occupata dal singolo elemento costituente il sensore: tanto più è elevato il numero di righe e colonne della matrice di pixel con cui può essere rappresentata un'immagine digitale, tanto più è elevata la risoluzione geometrica.

Per valutare correttamente la risoluzione spaziale, è necessario considerare l'area di superficie reale la cui immagine, proiettata sul piano focale e quindi sul sensore, copre la superficie di un pixel. Tale area viene detta **Ground Sampling Distance (GSD)**. La GSD è data dalla formula:

$$GSD = l * \frac{Z}{c} \quad (3)$$

Dove:

- Z è la distanza di presa,
- c è la focale della camera,
- l è la dimensione del lato del pixel,
- $\frac{Z}{c}$ è il fattore di scala m_b

A parità di distanza dell'oggetto dall'obiettivo, la risoluzione di un'immagine è tanto maggiore quanto più piccola è la dimensione del lato del pixel del sensore: maggiore è il numero di pixel, più l'immagine riproduce in modo fedele la realtà. [17]

3.4 Acquisizione di un'immagine digitale

La fase in cui viene catturata un'immagine da una o più camere digitali viene detta acquisizione diretta. Alcuni esempi sono le acquisizioni tramite volo aereo o per mezzo di drone. L'elemento che raccoglie l'immagine sul piano focale è un sensore che svolge la funzione di cattura e memorizzazione dell'immagine. Nelle moderne camere digitali, tale funzione è assolta dal chip elettronico.

Oggi esistono due tipi di sensori:

- CCD (Charged-Coupled Device);
- CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Entrambi i sensori sono costituiti da elementi disposti in linea o in una matrice in due dimensioni. L'energia della luce cade sugli elementi fotosensibili del grigliato dei pixel e viene convertita in una matrice di valori numerici. Ciò che differenzia sostanzialmente le due tipologie di sensori è la modalità di trasformazione della carica elettrica in tensione e il suo trasferimento dal chip alla camera. [17]

3.5 Rilievo aerofotogrammetrico

Il rilievo aereo è il metodo con cui vengono acquisiti dati metrici per mezzo di sistemi aeromobili che tipicamente sono costituiti da: aeroplani, elicotteri, droni (UAV), palloni aerostatici, etc.

Con aerofotogrammetria, si intende quella specifica tecnica di acquisizione aerea in cui la fotocamera è posizionata in aria. Le misurazioni sulle immagini aeree sono fornite da tecnologie e metodi fotogrammetrici.

Per eseguire un rilievo, è necessario fissare un sensore all'interno o all'esterno della piattaforma aerea: per i velivoli con equipaggio, ciò si ottiene attraverso un'apertura nella carlinga dell'aeromobile oppure tra fissaggio esterno su un puntone alare.

I sistemi di rilevamento aereo sono generalmente composti da:

- 1) *Software di navigazione di volo*: consente al pilota di seguire la rotta di volo stabilita per il rilevamento.
- 2) *Sistema GNSS*: combinazione di GPS e unità di misura inerziale (IMU) necessarie a fornire informazioni di posizione e orientamento dei dati acquisiti.
- 3) *Supporto girostabilizzato* per contrastare gli effetti di rollio, beccheggio e imbardata dell'aereo.

4) Unità di archiviazione dati per il salvataggio dei dati registrati.

Il dataset acquisito necessita successivamente di una fase di pre-processing, necessaria a definire la correlazione reciproca tra i diversi fotogrammi ossia:

- 1) definizione dell'orientamento interno dei fotogrammi;
- 2) definizione dell'orientamento esterno dei fotogrammi.

3.6 L'orientamento interno dei fotogrammi

L'orientamento interno (O.I.) dei fotogrammi consente di individuare la posizione del centro di prospettiva della camera ed il piano in cui si forma l'immagine, eliminando gli effetti delle distorsioni causate dall'obiettivo utilizzato per la presa. Per fare ciò è necessario ricordare che, in fotogrammetria, la relazione tra lo spazio oggetto (tridimensionale) e lo spazio immagine (bidimensionale) viene rappresentata mediante una prospettiva centrale: ogni punto dello spazio oggetto è collegato ad un corrispondente punto dello spazio immagine da una retta, detta retta proiettiva [18].

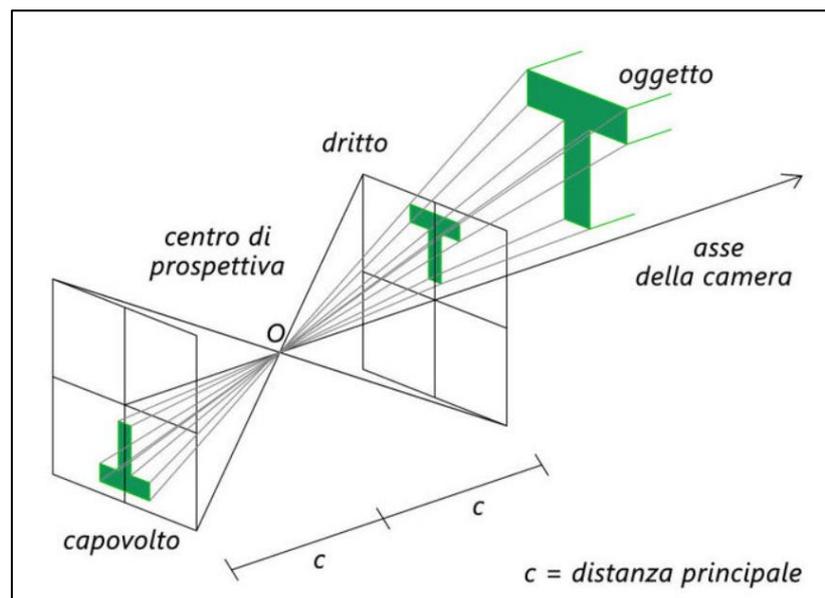


Figura 9 Schema orientamento interno della camera [18]

Nello schema rappresentato in Figura 9, ogni punto dell'oggetto è collegato al suo punto equivalente nello spazio immagine (fotogramma) attraverso una retta, detta **raggio proiettivo**.

L'insieme di rette che collegano i due spazi (fascio proiettivo), si intersecano in un punto, chiamato **centro di prospettiva** (Fangi, 1997). In questo modello teorico, il centro di prospettiva dista di una quantità c dal punto principale del fotogramma.

Questi due parametri, distanza principale c e le coordinate sul piano immagine del punto principale, sono detti **parametri di orientamento** interno e definiscono *la posizione del centro di proiezione rispetto al piano dell'immagine*.

Essi sono identici per tutti i fotogrammi del rilievo, in quanto dipendono dalla camera utilizzata nella presa, e vengono forniti dal costruttore della camera in appositi documenti chiamati certificati di calibrazione.

Grazie alla continua evoluzione dei software sulla restituzione fotogrammetrica è possibile ottenere un ottimo orientamento interno anche in assenza dei certificati di calibrazione delle camere poiché, i parametri vengono determinati dagli stessi software analizzando le immagini scattate.

L'orientamento interno dei fotogrammi permette di ricostruire il fascio dei raggi proiettanti di ciascun fotogramma nello spazio e quindi di individuare la posizione reciproca del centro di prospettiva ed il piano in cui si forma l'immagine.

Questa operazione è indispensabile per le fasi successive in modo da ottenere misure topograficamente affidabili.

Il fotogramma è una prospettiva centrale rigorosa in cui il centro di proiezione si trova ad una distanza c dal punto principale. [18]

Una volta eseguita la fase di orientamento interno si procede con l'orientamento esterno dei fotogrammi, il quale si articola in:

- Orientamento relativo;
- Orientamento assoluto.

Queste due operazioni ci consentono di passare dalle coordinate del sistema immagine alle coordinate del sistema reale. [18]

3.7 L'orientamento esterno in fotogrammetria

Con **orientamento esterno** (EO) si indica la posizione spaziale della fotocamera nell'istante in cui viene acquisita l'immagine: rappresenta una trasformazione dal sistema di coordinate del suolo al sistema di coordinate dell'immagine. Quando la fotocamera fotogrammetrica è dotata del sistema di posizionamento globale (GPS) a bordo del velivolo e del sistema di navigazione inerziale (INS) o unità di misura inerziale (IMU), la registrazione dell'orientamento esterno avviene direttamente sull'aereo. Nella maggior parte dei casi, l'orientamento esterno viene calcolato tramite dei punti di controllo a terra (GCP) e dai punti di collegamento (TP).

L'orientamento esterno dei fotogrammi ha come scopo di stabilire la posizione spaziale dei fotogrammi nel momento dello scatto.

Per effettuare l'orientamento è necessario determinare, per ciascun fotogramma, tanti parametri incogniti quanti sono i movimenti che definiscono la posizione di un corpo rigido nello spazio, cioè sei:

- 3 traslazioni (x, y, z);
- 3 rotazioni (ω, φ, κ) di assetto della camera.

Le tre rotazioni, nel caso di presa aerea, assumono il seguente significato:

- ω intorno asse x: direzione di volo (rollio);
- φ intorno asse y: *beccheggio*;
- κ intorno asse z: *deriva*.

Le operazioni di orientamento esterno sono due:

- 1) l'orientamento relativo
- 2) l'orientamento assoluto

Con l'orientamento relativo, tutti i fotogrammi acquisiti durante le operazioni di rilievo vengono sovrapposti in corrispondenza dei punti omologhi (precedentemente individuati) creando un blocco fotogrammetrico (Figura 10) [19]

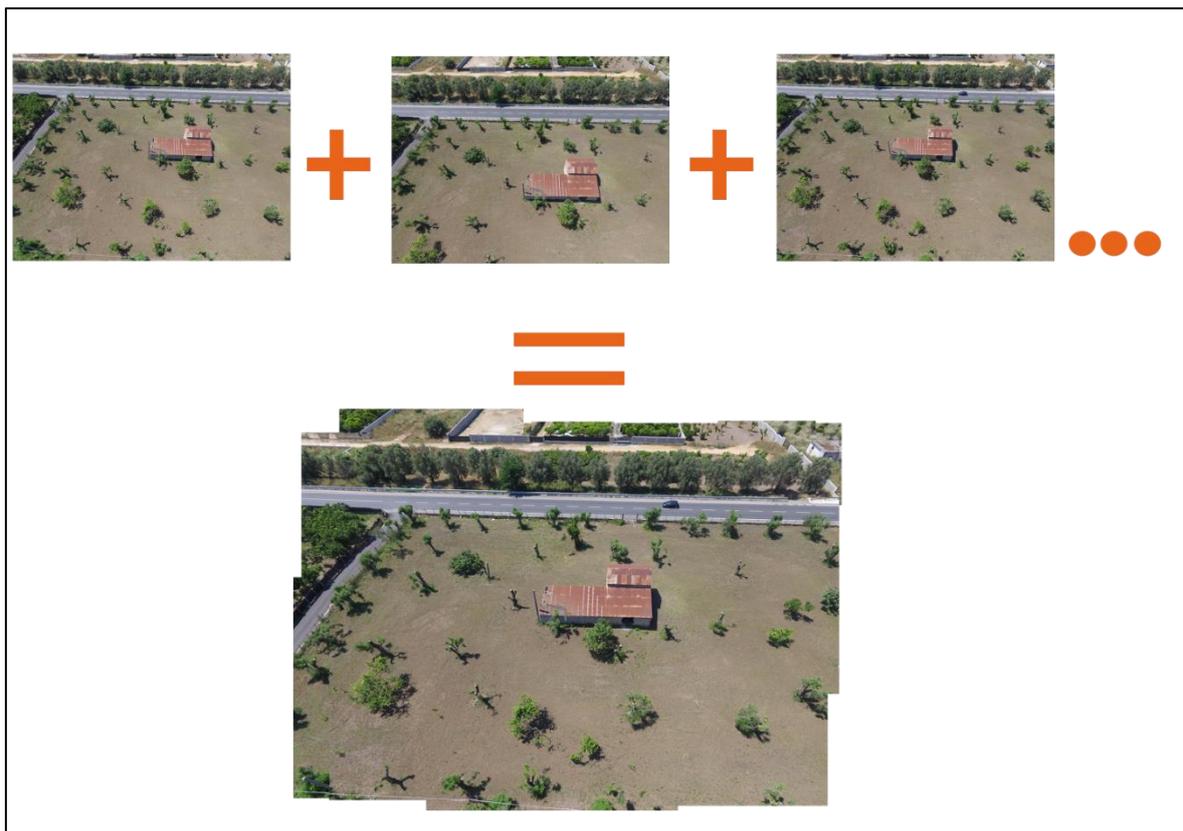


Figura 10 Orientamento relativo: esempio di blocco fotogrammetrico [19]

Il blocco fotogrammetrico creato è orientato in un sistema di riferimento fittizio. È necessario passare in seguito dal sistema di riferimento fittizio al sistema di riferimento reale. Questa operazione avviene con l'orientamento assoluto che

consente di orientare il blocco fotogrammetrico nello spazio per mezzo di punti noti di riferimento [19].

Questi punti, chiamati “punti di appoggio” (**Ground Control Point**) e devono avere le seguenti caratteristiche:

- 1) devono essere misurati in loco con specifici strumenti topografici (GPS o stazioni totali);
- 2) Devono misurare esattamente le coordinate nel sistema di riferimento desiderato;
- 3) Devono essere ben visibili in più fotogrammi.

Si utilizzano solitamente delle piastre fotogrammetriche colorate in modo da poterne facilmente individuare il centro. Tuttavia, è possibile avvalersi di elementi topografici ben visibili sul posto quali: pozzetti, segnaletica stradale orizzontale, etc. Maggiore è il numero di GCP acquisiti, maggiore sarà la precisione del modello finale. [19]

4 Caso studio e dataset

Nell'ambito di questo studio, è stato utilizzato un dataset di immagini acquisite il 17 marzo 2021 tramite volo aereo effettuato dalla ditta DigiSky sul territorio della cittadina di Livorno Ferraris. Di seguito vengono forniti i dettagli relativi al caso studio (Livorno Ferraris) ed al dataset di riferimento.

4.1 Comune di Livorno Ferraris

Livorno Ferraris è un comune italiano di 4171 abitanti della provincia di Vercelli in Piemonte. Sorge nelle campagne vercellesi e si sviluppa su una vasta area che lo rende uno dei paesi con il territorio più vasto della sua zona con una superficie di 58,03 km² e una densità di 71,88 abitanti/km². A livello di collocamento geografico, il comune è posizionato a 428231.88 Est 5014654.95 Nord, Zona 32N in base al sistema di riferimento UTM (WGS84) (Figura 11)

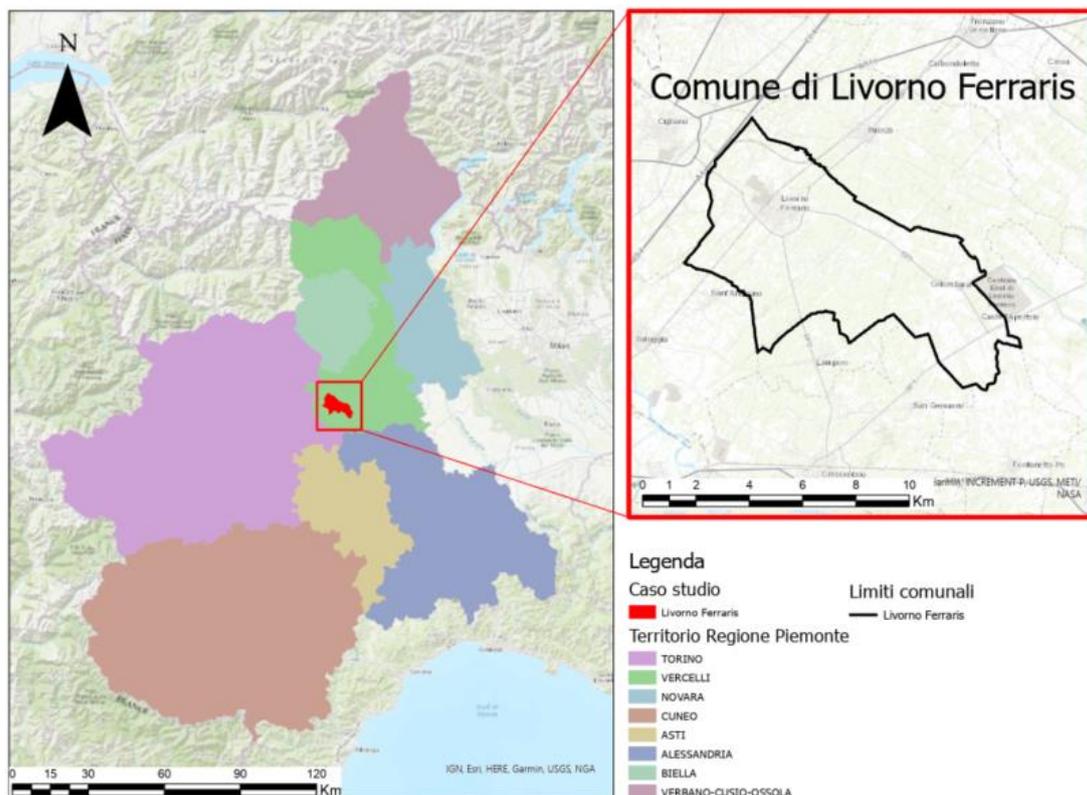


Figura 11 Inquadramento territorio Livorno Ferraris

4.2 Dataset

Il dataset è composto da un insieme di **immagini aeree ottiche** (nadirali e oblique) e da telerilevamento **laser scanning** da terra per l'acquisizione di una **nuvola punti LIDAR**.

4.2.1 Immagini aeree ottiche

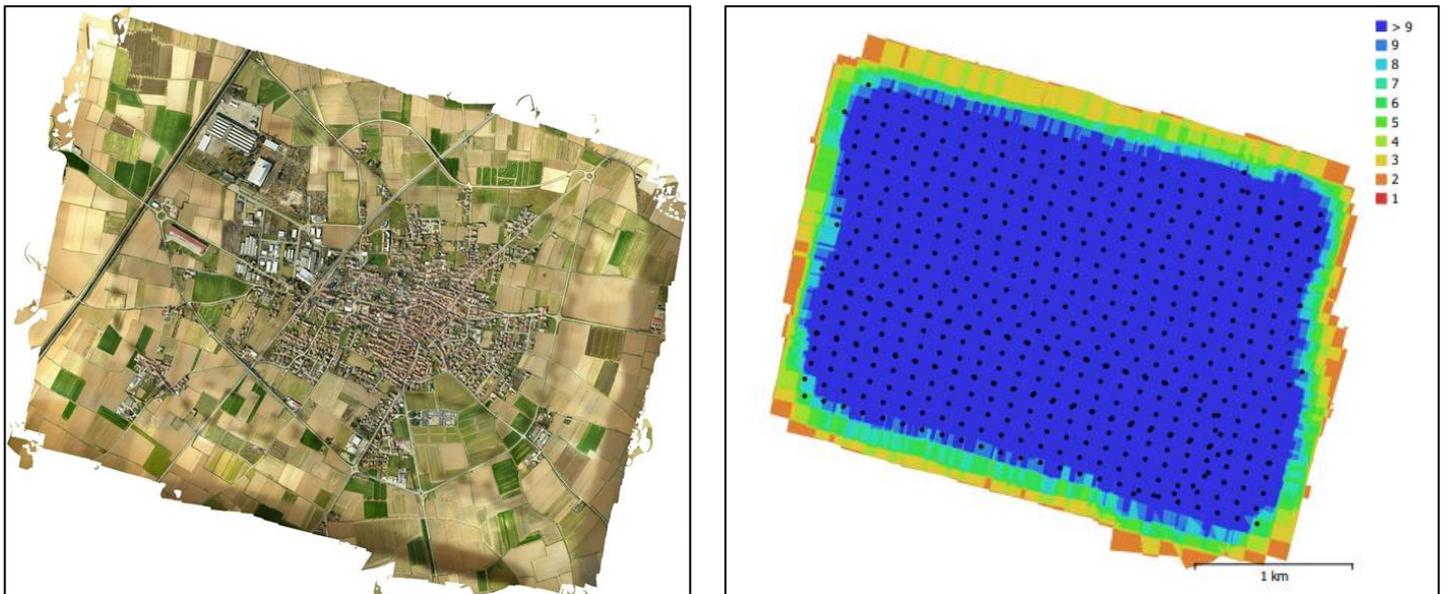


Figura 12 Mosaico (a sinistra) e copertura del volo nadirale (a destra) delle immagini ottiche

Questo dataset è stato acquisito in data 17 marzo 2021 dalla DigiSky, società certificata EASA che svolge attività di mappatura aerea in modo da eseguire direttamente servizi di fotogrammetria aerea con una propria flotta di aeromobili basata sull'aeroporto di Torino-Aeritalia [20]. È stato impiegato un sistema aereo integrato, costituito da una fotocamera **PhaseOne © iXM-RS150F** equipaggiata con una **Lente Rodenstock © da 50mm** (Figura 13).



Figura 13 Sistema aereo integrato PhaseOne (in alto a sinistra); Camera PhaseOne iXM-RS150F (in alto a destra); Lente Rodenstock RS-50mm (in basso) - © Copyright 2020 Phase One A/S

Di seguito sono riportate le specifiche tecniche del produttore sia della camera iXM-RS150F (Tabella 2) che della lente RS-50mm (Tabella 3):

Tabella 2 Camera PhaseOne iXM-RS150F: specifiche tecniche

Model	iXM- RS150F
Resolution	150MP - 14204x10652
Dynamic range (dB)	83
Aspect ratio	4:3
Pixel size (μm)	3.76
Effective sensor size (mm)	53.4 x 40.0
Light sensitivity (ISO)	50-6400
Capture rate (fps)	2
Camera type	Medium-format camera for aerial imaging
Lens mount	Phase One RS

Data interfaces	USB3, Ethernet 10G
I/O interfaces	Trigger, mid exposure, ready, serial
HDMI	1920 x 1080 60p
Data storage	XQD card
Synchronization speed	50 microseconds in an array of cameras
Raw file compression 14bit	IIQ large: 150MB / IIQ small: 100MB
IR cut-off filter	Yes
Connection to pod	4 x M4 bolts
Power input	12 - 30 VDC
Max. power consumption (W)	16
Weight - excluding lens (g)	1000
Dimensions - excluding lens (mm)	90x 90 x 91
Approvals	FCC Class A, CE, RoHS
Temperature (°C)	-10 to 40
Humidity (%)	15 - 80 (non-condensing)

Tabella 3 Lente RS-50mm: specifiche tecniche

RS Lens type	50mm
Lens composition	10 elements in 7 groups
Focus range	Infinity
Shutter speed max.	Up to 1/2500
Exposure control	1/3 f - stop increments
Aperture range	f/4 - f/22
Filter diameter (mm)	67
Total Length (mm) with Camera	181
Weight (g/lb)	800/1.76
Angle of view - Long side (°)	54.6
Angle of view - Short side (°)	42.3
Entrance pupil to image plane (mm)	99.3

I dati tecnici della campagna di acquisizione aerea volo sono riportati di seguito (Tabella 4):

Tabella 4 Dati immagini volo aereo

Numero di immagini:	563
Ricoprimento longitudinale	>90%
Altitudine di volo:	598 m
Risoluzione al suolo:	4.04 cm/pix
Area di copertura:	9.66 km ²
Stazioni di ripresa:	563

Per garantire un ricoprimento longitudinale del 90%, sono state acquisite con la PhaseOne © ulteriori **277 immagini oblique** con **angoli di presa di circa 35°**. Durante la fase di processamento delle immagini, in assenza di informazioni GPS accurate per questo subset di fotogrammi, non è stato possibile effettuare l'orientamento. Si è ovviato a tale problema grazie all'allineamento delle immagini nadirali ed alla collimazione dei GCP.

4.2.1.1 Orientamento Esterno

I dati relativi all'orientamento esterno si riferiscono al sistema GPS montato sul velivolo che ha effettuato il rilievo aereo e sono stati forniti insieme al dataset in **coordinate geografiche WGS84 (EPSG: 4326)**. In Tabella 5 vengono riportati a titolo esemplificativo, alcuni dei valori georiferiti.

Tabella 5 Orientamento esterno immagini RGB nadirali

n.	Source File	GPSLatitude	GPSLongitude	GPSAltitude
1	P0029620.jpg	45.27699422	8.054279	713.00
2	P0029621.jpg	45.2766897	8.05580356	707.79
3	P0029622.jpg	45.27638389	8.05738853	704.60
4	P0029623.jpg	45.27603454	8.05898986	714.74
5	P0029624.jpg	45.2757162	8.0605864	718.36
6	P0029625.jpg	45.27539749	8.06216573	715.16
7	P0029626.jpg	45.27506255	8.06375135	716.80
8	P0029627.jpg	45.2747609	8.06536714	718.21
9	P0029628.jpg	45.27445905	8.0669412	717.65
10	P0029629.jpg	45.2741163	8.0685295	722.47
11	P0029630.jpg	45.27376074	8.07009214	718.79
12	P0029631.jpg	45.27343571	8.07169301	712.08
13	P0029632.jpg	45.2731689	8.0732982	719.37
14	P0029633.jpg	45.27286764	8.07490768	723.60
15	P0029634.jpg	45.27252193	8.07649472	725.13
...
554	P0030173.jpg	45.2773795	8.0848784	727.01
555	P0030174.jpg	45.27683985	8.0863689	737.15
556	P0030175.jpg	45.2760273	8.08754888	741.00
557	P0030176.jpg	45.2749816	8.08818373	731.12
558	P0030177.jpg	45.27384295	8.08815345	720.70
559	P0030178.jpg	45.2727855	8.0875234	716.07
560	P0030179.jpg	45.27193919	8.08636523	723.12
561	P0030180.jpg	45.27140216	8.08490308	728.56
562	P0030181.jpg	45.27123	8.08335999	727.78
563	P0030182.jpg	45.27128332	8.08163937	724.92

4.2.1.2 Calibrazione fotocamera

La calibrazione della fotocamera rappresenta il primo step necessario per poter effettuare il processamento delle immagini. I moderni software di fotogrammetria sono in grado di calcolare i parametri di calibrazione estraendoli dal file "EXIF" dell'immagine che contiene informazioni su: **modello di fotocamera**, **dimensioni del sensore** [mm] e **lunghezza focale** [mm] (Tabella 6):

Tabella 6 Dati fotocamera per il volo nadirale

Modello di fotocamera	iXM-RS150F, Rodenstock RS-50mm/Aerial (50mm)
Risoluzione	14204 x 10652 pix
Tipo di sensore	CMOS
Lunghezza focale	50 mm
Dimensione pixel	3.76 x 3.76 μm
Precalibrazione	No

Il modello di calibrazione implementato nel software utilizzato è di tipo parametrico a proiezione centrale e distorsioni non lineari. Tra gli output generati dalla calibrazione, si possono ottenere ed esportare:

- 1) I residui dell'immagine** (Figura 14): vettori che rappresentano gli errori di riproiezione dei pixel;

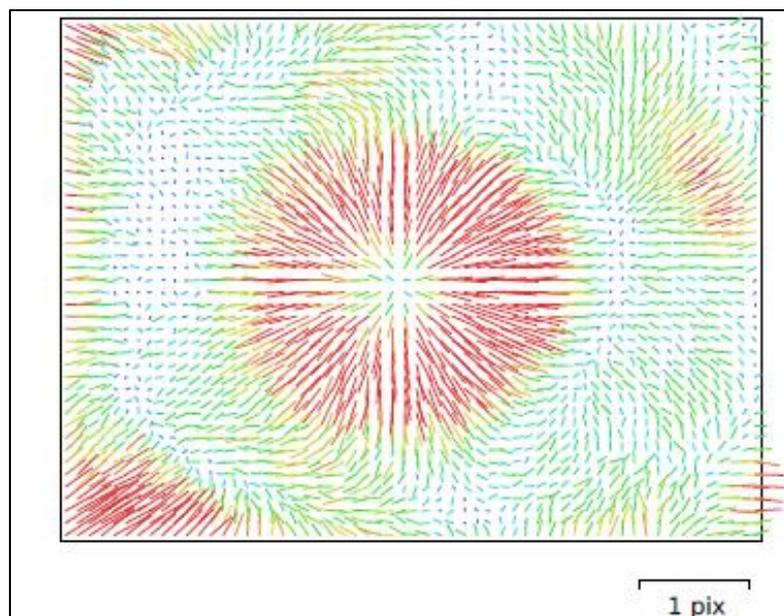


Figura 14 Residui di immagine per la iXM-RS150F, Rodenstock RS-50mm/Aerial (50mm)

- 2) **Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione** (Tabella 7): tabella riepilogativa dei valori calcolati, con relativo errore e correlazione tra i parametri.

Tabella 7 Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione della iXM-RS150F

	Valore	Errore	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	13687	0.21	1.00	0.41	-0.17	-0.08	0.09	-0.09	0.05	0.01
Cx	66.1876	0.084		1.00	-0.06	-0.01	0.02	-0.02	0.45	-0.00
Cy	-7.66273	0.069			1.00	0.00	-0.01	0.01	-0.02	0.46
K1	-0.0120626	2.1e-05				1.00	-0.97	0.92	-0.00	0.00
K2	0.0516542	0.00012					1.00	-0.98	-0.00	-0.00
K3	-0.0641195	0.0002						1.00	0.01	0.00
P1	7.14569e-05	1.1e-06							1.00	-0.02
P2	8.39069e-05	9.2e-07								1.00

Dove:

1. **F** è la lunghezza focale [*pix*]
2. **Cx, Cy** sono le coordinate del punto principale [*pix*]
3. **K1, K2, K3** sono i coefficienti di distorsione radiale [-]
4. **P1, P2** sono i coefficienti di distorsione tangenziale [-]

4.2.2 Acquisizione laser scanning (LIDAR)

Il dataset di riferimento è stato integrato con un'ulteriore acquisizione da terra con tecnologia **laser scanning**. Quella del **LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)** è una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o superficie utilizzando un impulso laser [21].

Lo strumento utilizzato è stato il **KAARTA® Stencil 2** (Figura 15) dotato di LIDAR **Velodyne LiDAR® Puck** (Figura 15), avente un raggio di ricoprimento fino a 100 metri. La peculiarità di questo dispositivo è quella di consentire una stima in tempo reale della nuvola di punti, abbinata ad una mappatura 3D integrata.



Figura 15 Dotazione per il rilievo laser scanning: (in alto a sinistra) KAARTA[®] Stencil 2 con tablet per controllo remoto - © KAARTA, 2021; (in alto a destra) LIDAR Velodyne Puck LITE - © Velodyne LiDAR, 2021; (in basso) Ricevitore GPS EMLID Reach RS2 -© EMLID, 2021

Per la campagna di rilievo, anch'essa essa effettuata l'08 ottobre 2021, al KAARTA © Stencil è stato abbinato un ricevitore multibanda RTK/GNSS con precisione centimetrica, **Emlid Reach RS2** (Figura 15) per migliorare l'accuratezza spaziale del dato acquisito. Entrambi i dispositivi sono stati fissati ad un supporto mobile, trasportabile a spalle come mostrato in Figura 16:



Figura 16 LIDAR + GPS montati su struttura mobile

Terminata la sessione di acquisizione, si è reso necessario provvedere all'elaborazione della nuvola di punti LIDAR, utilizzando direttamente sul dispositivo Stencil. Infatti, questo è dotato di un software nativo che si chiama Kaarta[®] Engine (Figura 17):

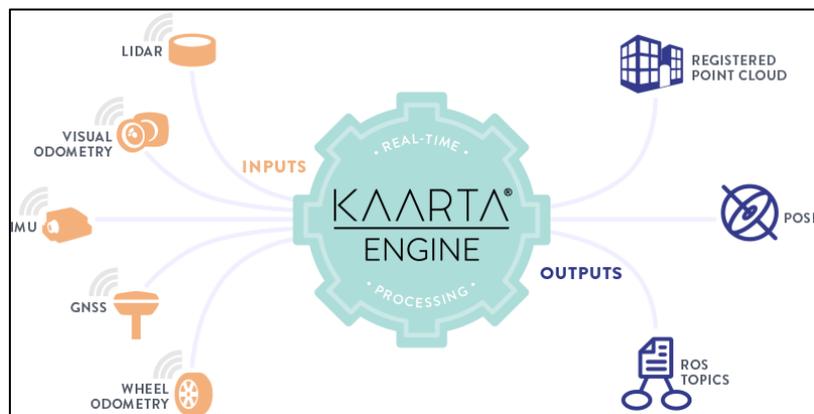


Figura 17 Kaarta[®] Engine: infografica algoritmo – © KAARTA, 2021

Questo algoritmo produce una nuvola di punti accurata basata sulla tecnica “scan-to-point” di corrispondenza della nuvola di punti. I nuovi fotogrammi dei dati di scansione vengono abbinati alla nuvola di punti in tempo reale mentre i dati fluiscono. Il fotogramma viene quindi aggiunto alla nuvola di punti e viene utilizzato per abbinare il successivo set di dati (Figura 18). [22]

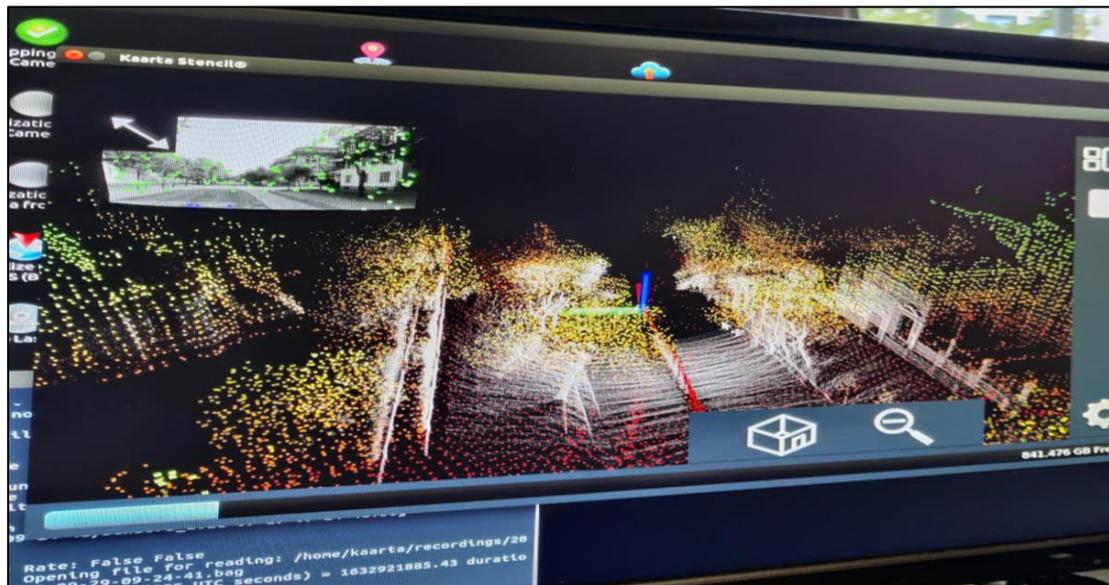


Figura 18 Esecuzione algoritmo Kaarta® Engine direttamente da dispositivo Stencil

Terminata l'esecuzione dell'algoritmo, il risultato ottenuto è quello mostrato in (Figura 19):

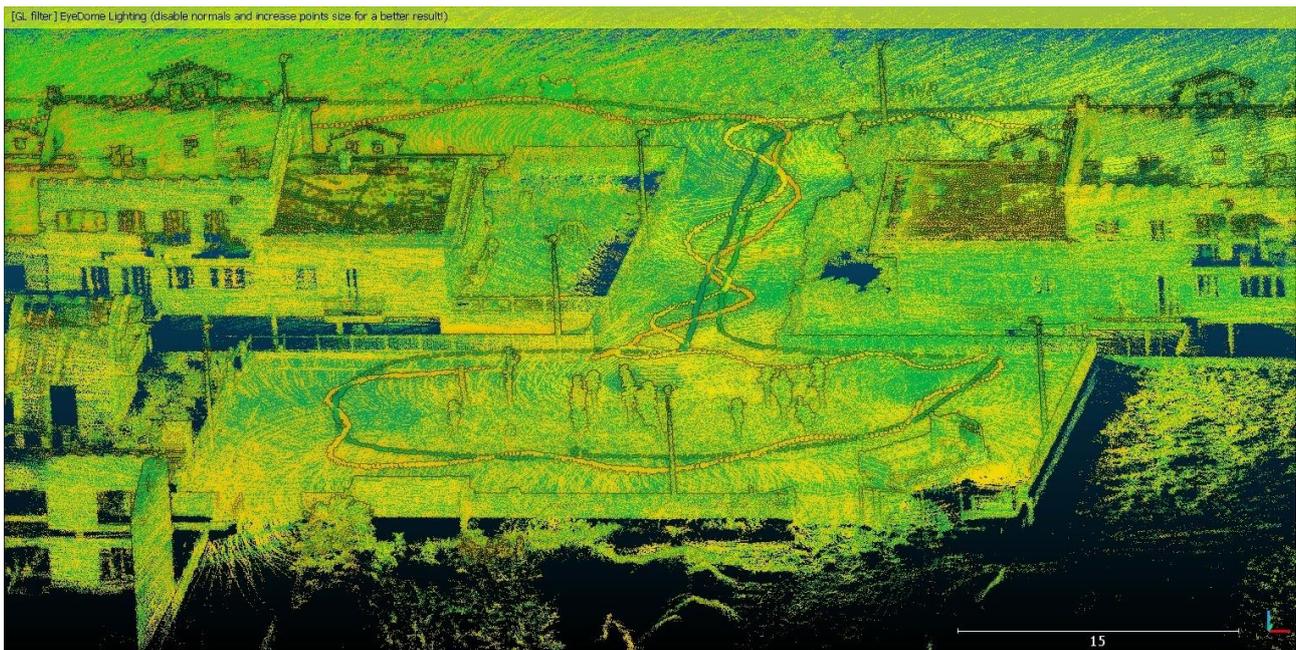


Figura 19 Nuvola di punti LIDAR: particolare

5 Metodologia operativa

In questo capitolo viene descritta la procedura adottata in questo studio per la creazione di un modello 3D della città di Livorno Ferraris.

Nella prima parte del lavoro, il processamento delle immagini è stato replicato su diversi software allo scopo di poter ottenere una comparazione analitica (benchmark) per la generazione di output specifici, ovvero:

- 1) Un modello digitale della superficie (DSM);
- 2) Un orto-mosaico delle immagini ottiche nadirali.

Il confronto è stato considerato non solo in termini di prestazioni dei software stessi, ma anche in virtù della qualità dei prodotti finali.

Per la generazione del modello 3D di Livorno Ferraris, è stato necessario eseguire alcuni passaggi fondamentali che sono riconducibili alle seguenti fasi:

- 1) **Operazioni preliminari e rilievi sul campo:** prevede la progettazione ed esecuzione degli appoggi in campo, con la redazione e la compilazione delle **schede monografiche**. Acquisendo punti RTK (Real-time kinematic positioning) geo-referenziati tramite rete GNSS (Sistema Satellitare di Navigazione Globale), sarà possibile in un secondo momento validare il dataset di immagini aeree.
- 2) Il **processing** delle immagini tramite software basati su algoritmi di *Structure from Motion* (SFM) con l'ausilio dei dati GPS acquisiti nello step precedente;
- 3) Il **post-processing** con la creazione degli output specifici.
- 4) Il **benchmarking** dei software utilizzati. Verrà affrontato nel capitolo successivo

5.1 Operazioni preliminari

Tramite software GIS (ESRI™ ArcMap) sono stati individuati un certo numero di **punti di appoggio (GCP – Ground Control Points)** ed altrettanti **punti di verifica (CP – Check-Points)**, ricavati da un'ortofoto di Livorno Ferraris avente una GSD di 10cm (Figura 20).



Figura 20 Ortofoto con risoluzione 10cm

Il dato vettoriale è stato ottenuto costruendo una griglia di maglia quadrata di circa 500x500 metri a scala d'immagine, di cui i GCP ne costituiscono approssimativamente gli angoli, mentre i check-point sono stati inseriti in posizione baricentrica rispetto alla maglia stessa (Figura 21):

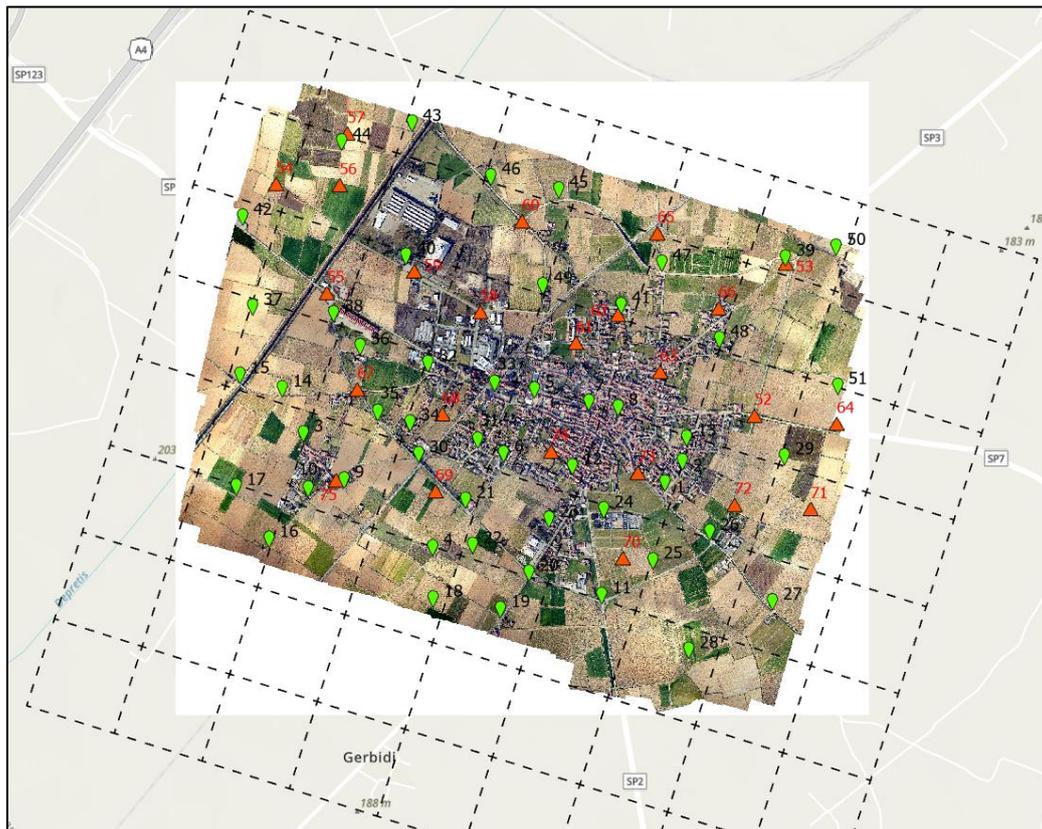


Figura 21 Individuazione con ArcGIS di GCP e CP

Successivamente sono state compilate le schede monografiche per ogni punto d'appoggio (Figura 22) allo scopo di fornire un numero sufficiente di informazioni, tali da consentire l'individuazione in loco in maniera univoca. La fase di rilievo sul campo si è concretizzata in data 11 giugno 2021.

Località: Livorno Ferraris		Data: 29/04/2021 fotografici
Nome:	Numero: 007	<p>Foto particolare:</p> 
Descrizione: Tombino		
Ubicazione: Inizio area pedonale / ciclabile Piazza Galileo Ferraris		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	H ellissoidica:	
Nord:	h ellissoidica(corretta):	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		<p>Foto generale:</p> 
Est:	H ellissoidica:	
Nord:	h ellissoidica(corretta):	
Inquadramento generale:		
		

Figura 22 Esempio scheda monografica

Sono stati utilizzati due **Controller Trimble**® **TSC3** (Figura 23). Si tratta di un computer palmare appositamente progettato per i sistemi di rilievo ottici e GNSS /RTK (Figura 23).

Al termine della sessione di rilievo, sono stati complessivamente acquisiti:

- 27 Ground control point;
- 17 check-point.



Figura 23 Dispositivo Trimble TSC3 (a sinistra) e Stazione GNSS/RTK (a destra)

In Tabella 8 vengono riportati i Punti RTK acquisiti dai due Trimble:

Tabella 8 Punti RTK raccolti dal Trimble TCS3

Dati del file di progetto		Sistema di coordinate	
Nome:	J:\LF\puntiRTK_sq1_2.vce	Nome:	World wide/UTM
Dimensioni:	65 KB	Datum:	WGS 1984
Modificato:	14/06/2021 13:40:18 (UTC:2)	Zona:	32 North
Fuso orario:	ora solare Europa occidentale	Geoide:	
Numero di riferimento:		Datum verticale:	
Descrizione:		Sito calibrato:	
Commento 1:			
Commento 2:			
Commento 3:			

Dettagli su sistema di coordinate aggiuntivo

Impostazioni cantiere locale			
Latitudine del progetto:	?	Fattore di scala suolo:	1
Longitudine del progetto:	?	Offset di direzione nord falsa:	0.000
Quota ellissoidica progetto:	0.000	Offset di direzione est falsa:	0.000

Elenco di punti

ID	Direzione est (Metro)	Direzione nord (Metro)	Elevazione (Metro)	Codice elemento
101	428279.316	5014240.127	229.015	

102	428379.321	5014360.258	228.832	
105	427558.079	5014723.185	234.312	
106	427400.732	5014383.659	235.039	
107	427854.429	5014694.564	233.154	
108	428013.726	5014636.873	232.177	
112	427774.645	5014317.383	231.681	
113	428395.068	5014482.591	229.814	
123	427651.359	5014027.317	232.055	
124	427949.082	5014083.349	230.880	
131	427256.811	5014456.953	235.933	
132	426958.423	5014878.092	238.483	
133	427341.669	5014764.546	236.439	
141	428028.502	5015205.904	234.033	
148	428566.629	5015026.997	229.906	
161	427784.722	5015051.980	234.545	
162	428011.471	5015207.553	233.933	
163	428239.369	5014904.524	230.564	
173	428120.373	5014351.515	229.188	
174	427662.470	5014447.982	233.295	
210	426292.286	5014117.416	239.348	
211	427960.645	5013617.545	229.799	
215	425978.715	5014773.144	247.505	
216	426127.063	5013896.737	239.665	
220	427542.193	5013763.684	231.992	
221	427215.148	5014106.754	235.205	
226	428527.930	5013967.362	228.267	
227	428874.786	5013589.341	225.748	
235	426710.751	5014601.595	240.551	
238	426462.658	5015139.875	244.175	
242	425955.103	5015655.603	249.179	
243	426877.840	5016173.052	245.020	
245	427679.638	5015836.073	238.256	
246	427385.891	5015817.510	240.000	
247	428243.069	5015442.158	232.641	
249	427599.922	5015308.494	236.069	
250	429220.431	5015539.650	228.890	
252	428762.467	5014663.621	228.973	
253	428919.115	5015500.949	230.575	
255	426423.585	5015305.458	246.264	
258	427261.251	5015212.667	238.408	
259	426898.221	5015432.255	241.064	
260	427482.964	5015716.494	238.109	
265	428215.934	5015605.051	233.983	
267	426581.237	5014766.396	241.123	

14/06/2021 13:41:29

J:\LF\puntiRTK_sq1_2.vce

Trimble Business Center

Tali punti RTK verranno utilizzati come dati di input per la collimazione visiva delle immagini aeree nella fase di processing dei fotogrammi.

5.2 Processamento delle immagini

In questo step vengono utilizzati software di elaborazioni immagini basati su algoritmi di **Structure from Motion (SfM)**, in grado di generare modelli 3D georeferenziati delle aeree acquisite da rilievi aerei. Tali software seguono una procedura standard che consiste in:

- 1) **Caricamento del dataset di immagini.** I programmi sono in grado di gestire un elevato numero di fotogrammi per ogni dataset.
- 2) **Allineamento delle immagini.** In funzione del sistema di riferimento del progetto, vengono calcolati dal software sia l'orientamento interno che quello esterno dei fotogrammi: i dati GPS che normalmente sono presenti sui metadati dell'immagine forniscono le informazioni necessarie sul piano di volo e sui punti di presa. Diversamente, è necessario fornire per ogni fotogramma:
 - Obbligatorie: longitudine, latitudine e quota.
 - Facoltative: angoli di rollio, beccheggio e imbardata.
- 3) **Ottimizzazione delle immagini e calibrazione della fotocamera.** Contestualmente al dataset, viene fornito solitamente il certificato di calibrazione della fotocamera che consente di conoscere:
 - La lunghezza focale $[F]$;
 - Le coordinate del punto principale $[C_x, C_y]$;
 - I coefficienti di distorsione radiale $[K_1, K_2, K_3]$;
 - I coefficienti di distorsione tangenziale $[P_1, P_2]$;

In assenza di tale certificato, i software provvedono alla calibrazione automatica della camera.

4) **Collimazione dei punti di appoggio.** In questa fase vengono utilizzati i punti d'appoggio collezionati durante l'acquisizione in campo. Per ognuno dei 44 punti noti (27 GCP + 17 CP), viene effettuato il matching visivo grazie a:

- Confronto con relativa monografia;
- Posizione stimata del punto d'appoggio sull'immagine;
- Individuazione effettiva posizione sul fotogramma.

Come esemplificato in Figura 24.

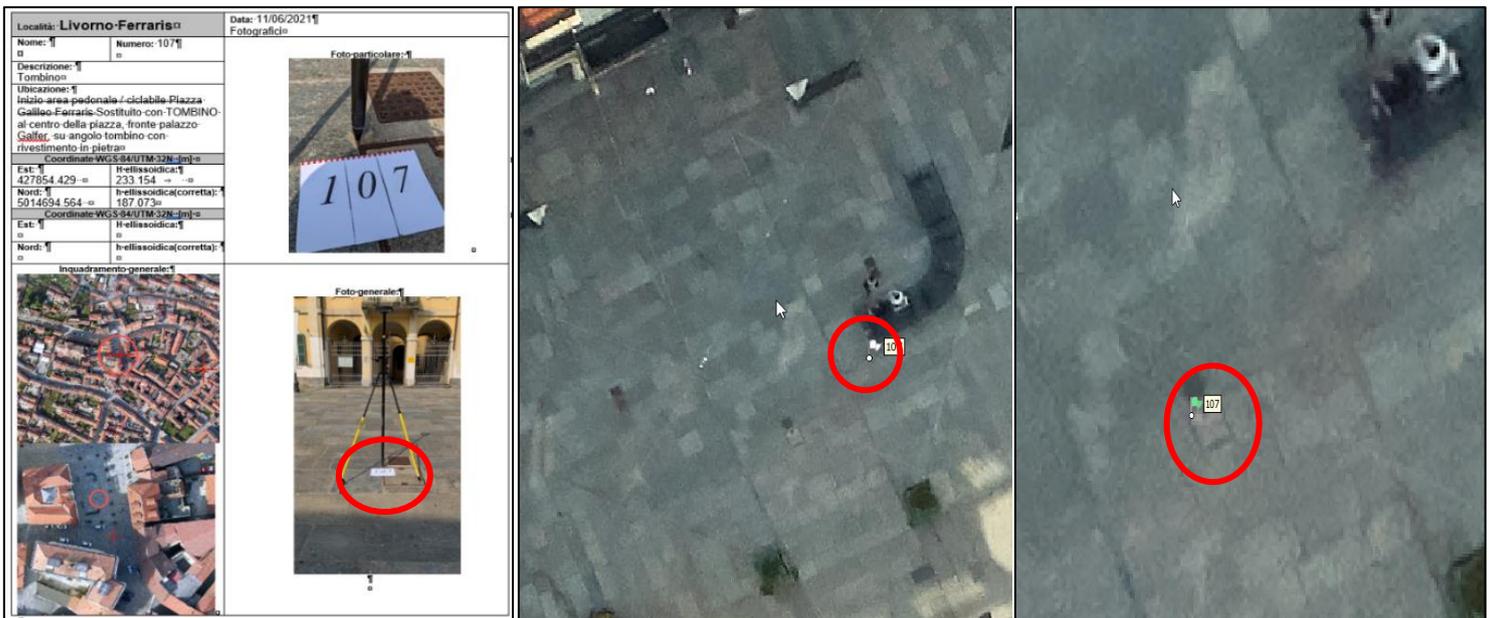


Figura 24 Confronto GCP/CP con monografia (sinistra) – Posizione non collimata del punto (centro) – Collimazione del punto sul fotogramma (destra)

5) **Creazione della nuvola densa di punti.** Gli algoritmi di *Structure from Motion* utilizzano un approccio definito come *image matching* che consente di ricercare corrispondenze *pixel-to-pixel* all'interno di una coppia di immagini. La costruzione di tali corrispondenze, nonché il calcolo delle coordinate 3D, è basato sull'approccio di collinearità che consente di assegnare ad ogni pixel dell'immagine un valore relativo di profondità. Il risultato è la creazione della **"dense point cloud"**: la nuvola di punti nello spazio oggetto [23].

La conoscenza dei parametri di orientamento esterno ed interno di ogni immagine permette la riduzione della complessità in fase di ricerca di analogie, la generazione di immagini rettificate in cui le corrispondenze sono lungo le linee epipolari.

5.1 Post-processing: generazione DSM ed orto-mosaico

Dalla generazione della nuvola di punti è possibile generare alcuni prodotti tra cui:

1. Modelli digitali di elevazione (DTM/DSM) - Figura 25;

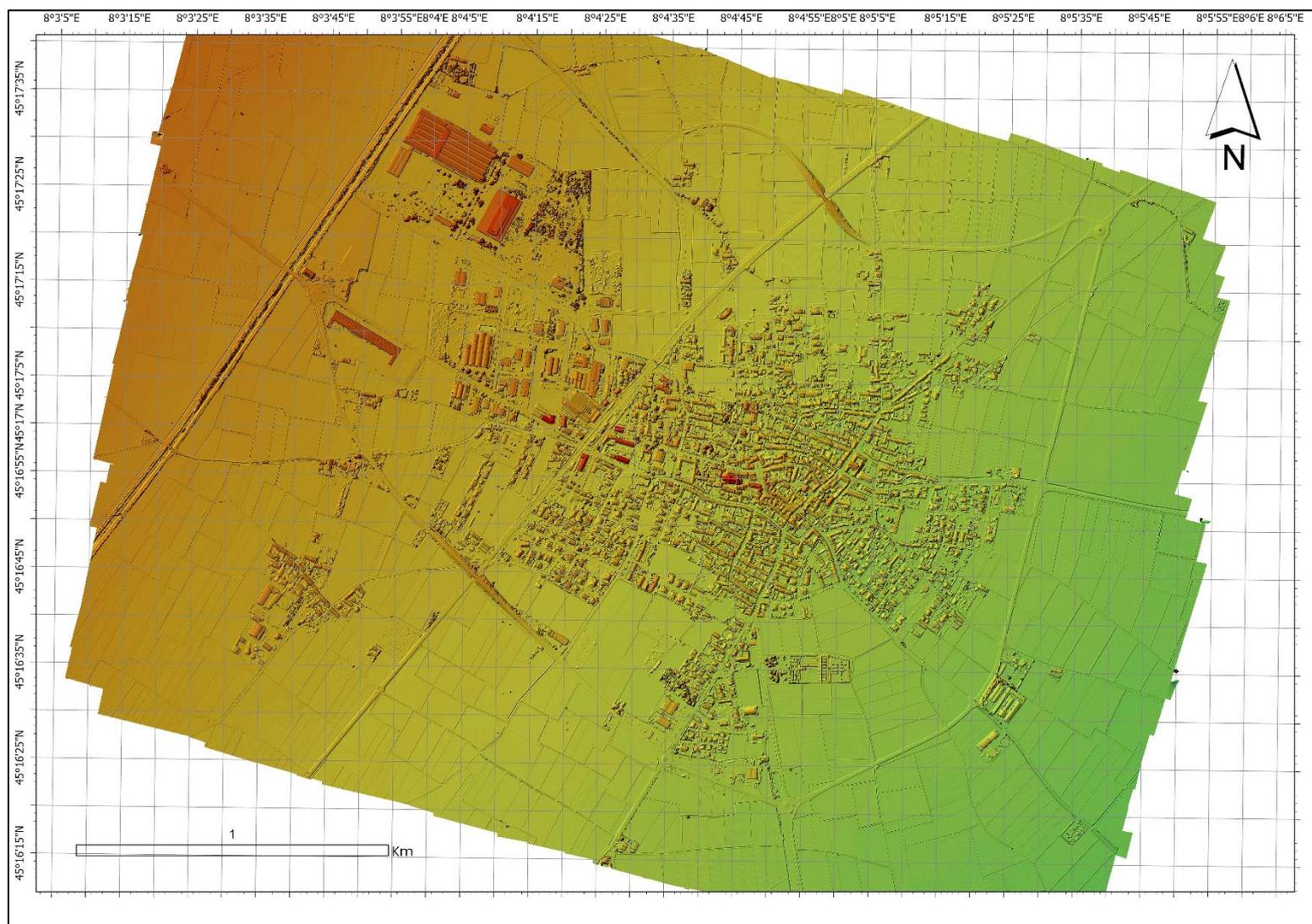


Figura 25 DSM prodotto da immagini nadirali ottiche

2. Ortomosaico (Figura 26);



Figura 26 Ortofoto RGB da immagini nadirali ottiche

3. Modello 3D texturizzato (Figura 27);



Figura 27 Texture 3D del modello digitale

Alcuni di questi prodotti verranno presi in esame nel capitolo successivo riguardante il benchmarking per l'analisi comparativa dei software utilizzati.

6 Software

In questo studio sono stati utilizzati alcuni software di fotogrammetria digitale in grado di generare il modello 3D. Tale scelta è stata funzionale ad ottenere un benchmark tra i diversi applicativi per valutare la qualità degli output generati e validarne il risultato ottenuto.

6.1 Ambiente di lavoro

Le elaborazioni sono state approntate su una workstation aventi configurazione hardware e software come riportate di seguito in Tabella 9:

Tabella 9 Dotazioni hardware e software della workstation adoperata

Informazioni	Workstation
Nome dispositivo	SDG11-PC4
Processore	Intel® Xeon® W-2223 CPU @ 3.60GHz
Scheda grafica	2x NVIDIA™ Quadro RTX 4000 montate in parallelo
RAM installata	128,0 GB
Tipo sistema	Sistema operativo a 64 bit, processore basato su x64
Edizione	Windows 10 Pro for Workstations
Versione	21H1
Software installati	Agisoft© Metashape, versione 1.7.5 build 13229 (64 bit)
	ESRI © ArcGIS Pro, versione 2.8.3
	PCI Geomatics © CATALYST Professional Versione 2222.0.3 2021-07-10
	Pix4d © PIX4Dmapper, versione 4.6.4
	CloudCompare (GNU GPL), versione 2.11.3 (Anoia) [Windows 64-bit]
	Google © Earth Pro, versione 7.3.4.8248 (64-bit)

Per ognuno dei quattro software utilizzati (Metashape, ArcGIS Pro, PCI e Pix4d) sono di seguito riportate la descrizione, il workflow seguito ed i risultati ottenuti.

6.2 Agisoft © Metashape

Agisoft © Metashape è uno dei più diffusi software di fotogrammetria digitale basati su algoritmi SfM. Esso è in grado di elaborare immagini RGB o multispettrali, inclusi i sistemi multicamera, e trasformarli in informazioni spaziali ad alto contenuto tecnico come:

- 1) Nuvola densa di punti
- 2) Modelli poligonalari texturizzati
- 3) Ortomosaici georeferenziati
- 4) DSM/DTM.

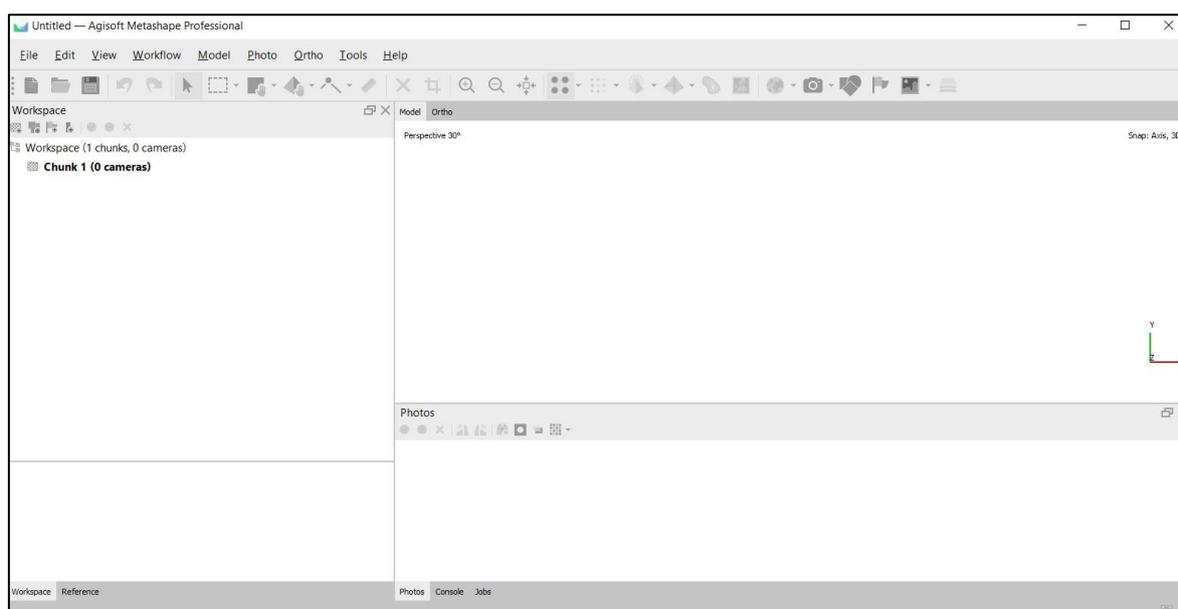


Figura 28 Agisoft © Metashape: interfaccia grafica

L'interfaccia grafica (Figura 28) è strutturata in maniera abbastanza semplice ma molto intuitiva. La parte centrale "Model/Ortho", rappresenta l'area di visualizzazione principale in cui il software proietterà tutte le elaborazioni che progressivamente si susseguiranno.

Nella parte inferiore dello schermo si trova il riquadro "Photos": sarà più chiaro comprendere l'importanza di questo riquadro quando verrà affrontata la procedura per la collimazione delle immagini. Infine, il pannello laterale sinistro

“Workspace” identifica lo spazio di lavoro principale dove verranno elencate tutte le elaborazioni effettuate e da cui sarà possibile operare sulle stesse.

6.2.1 Workflow

Il procedimento di seguito descritto è da intendersi per la realizzazione del modello 3D da immagini nadirali RGB. In maniera del tutto analoga, il workflow è valido per gli altri tipi dataset (RGB oblique, TIR). Per avviare una nuova elaborazione con Metashape, bisogna cliccare su menù **Workflow** come illustrato in Figura 29

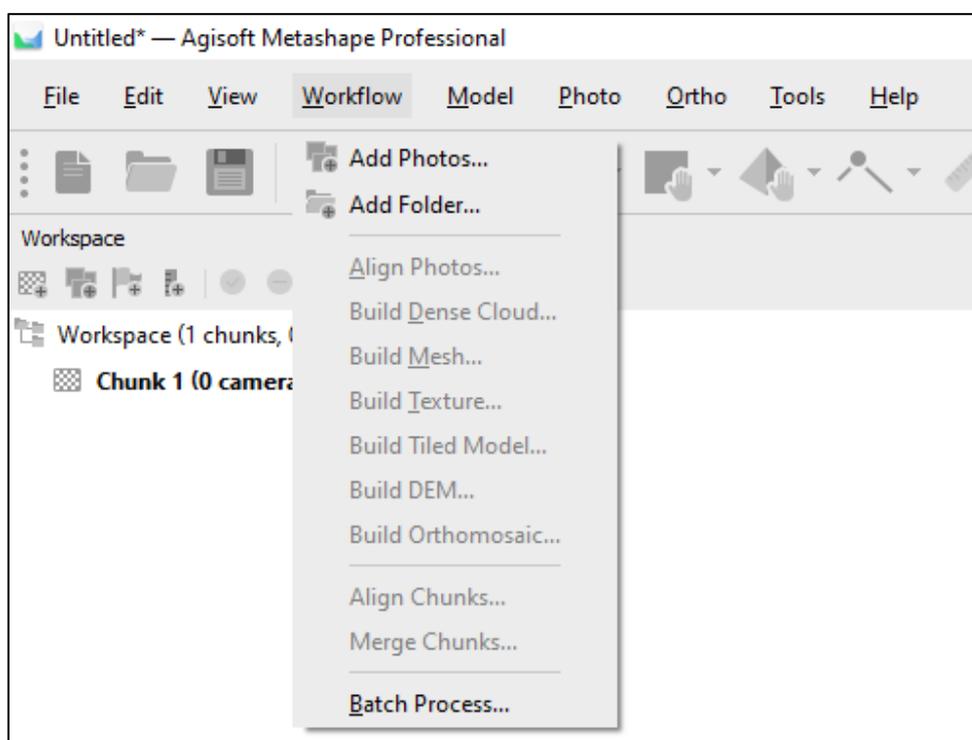


Figura 29 Metashape: menù workflow

E procedere in maniera sequenziale con gli step sotto riportati:

6.2.1.1 Caricamento delle immagini

Si possono aprire i singoli fotogrammi, oppure, come nel caso in esame, caricare tutta la cartella contenente il dataset completo. Per fare ciò, è necessario scegliere l'opzione **Add folder...** (Figura 30):

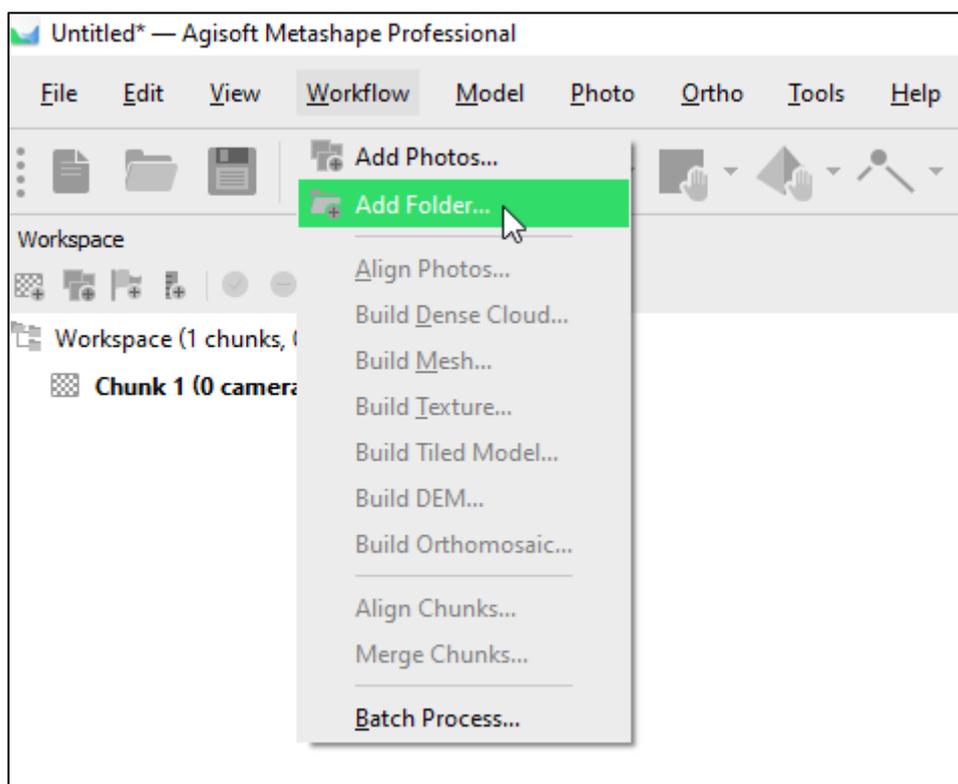


Figura 30 Metashape - step #1: caricamento immagini sul workspace

Metashape è in grado di gestire il layout di una scena dinamica in 4D, come evidente dal pop-up di selezione, ma in questo caso è necessario selezionare l'opzione **Single cameras** (Figura 31)

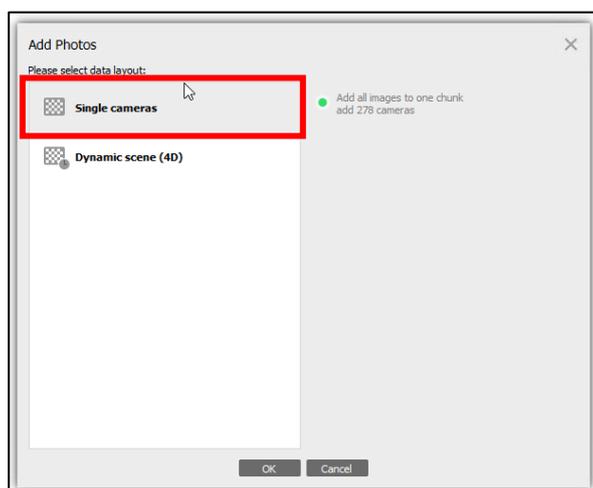


Figura 31 Metashape - step #1: modalità upload foto

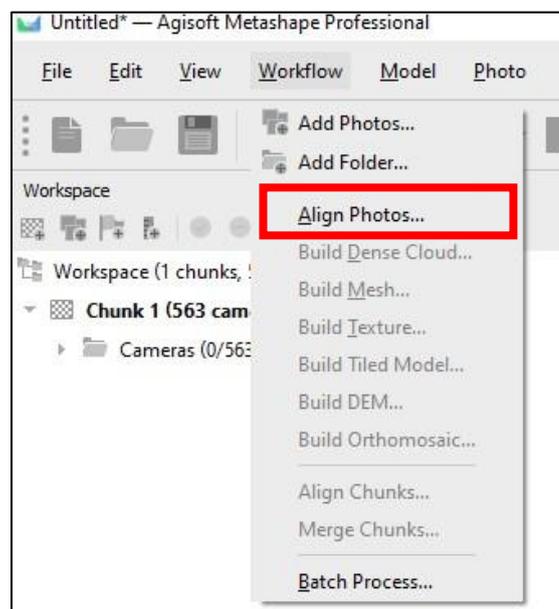


Figura 32 Metashape - step #2: Allineamento immagini

6.2.1.2 Allineamento delle immagini

Cliccando nuovamente sul menu "workflow" è possibile notare come l'opzione **Align Photos...** risulta selezionabile (Figura 32). Tuttavia, per ottenere un allineamento dei fotogrammi più efficace, è opportuno caricare preventivamente il file con i valori dell'orientamento interno delle immagini. Questo consentirà a Metashape di abbinare le tre coordinate spaziali longitudine, latitudine e altezza ad ogni fotogramma. Si passa quindi alla schermata **Reference** da cui è possibile importare il file, in formato *txt* o *csv*, contenente i dati GPS (Figura 33) selezionando opportunamente le opzioni dal pop-up **Import CSV** (Figura 34).

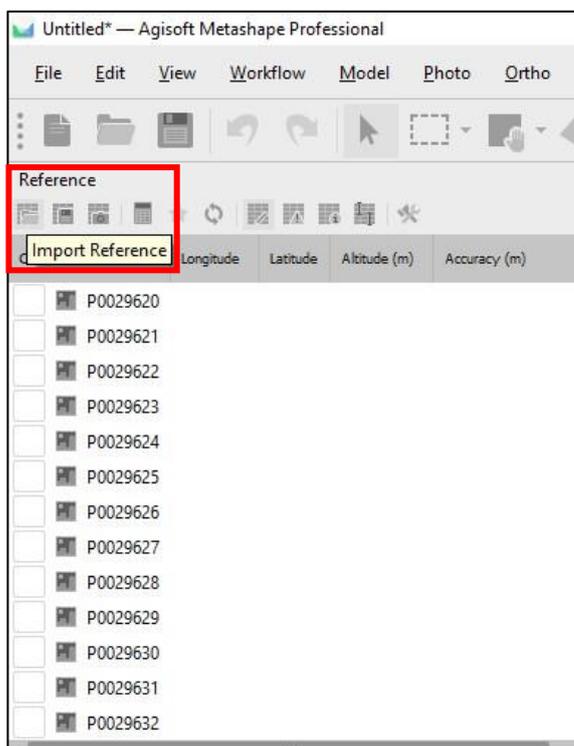


Figura 33 Metashape - step#2: Import file con dati GPS

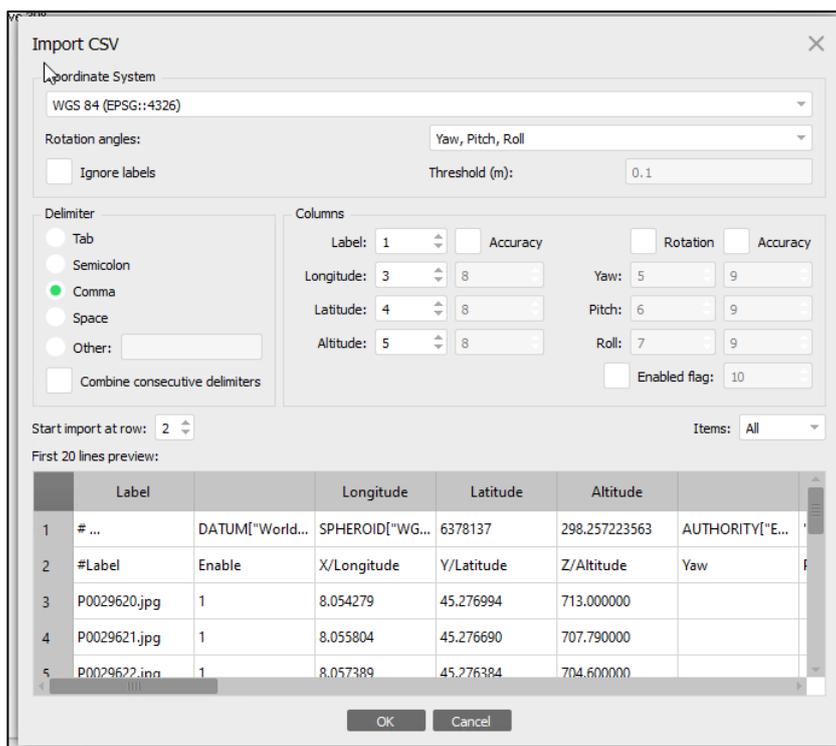


Figura 34 Metashape - step#2: caricamento file CSV

Tramite il comando di Figura 32, è possibile procedere con l'allineamento delle immagini selezionando l'accuratezza del processamento e verificando che l'opzione **Reference preselection** sia attiva (Figura 35). Ciò consentirà di utilizzare i dati GPS caricati precedentemente.

La durata dell'allineamento dipenderà dal numero e tipo di fotogrammi da gestire processare, nonché dalle caratteristiche hardware della macchina su cui gira il software. Al termine dell'operazione, l'insieme delle immagini allineate verranno rappresentate a monitor come una fitta maglia di parallelogrammi blu, opportunamente orientati come mostrato in Figura 36. Le normali ad ogni parallelogramma indicate con un segmento nero, rappresentano proprio l'orientamento del singolo fotogramma, che combinato insieme agli altri, porteranno alla creazione di una nuvola sparsa di punti (Figura 37). La **nuvola sparsa di punti** costituisce il primo livello grezzo di creazione del modello 3D.

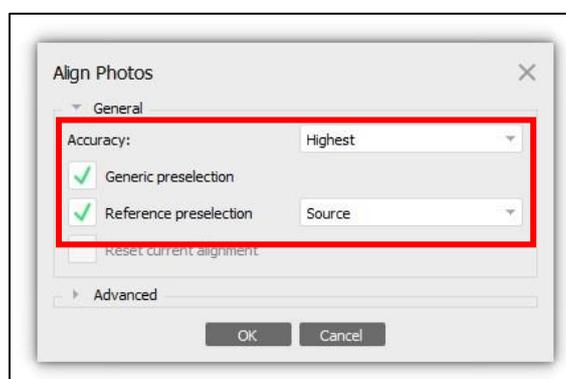


Figura 35 Metashape – step#2: Align Photos

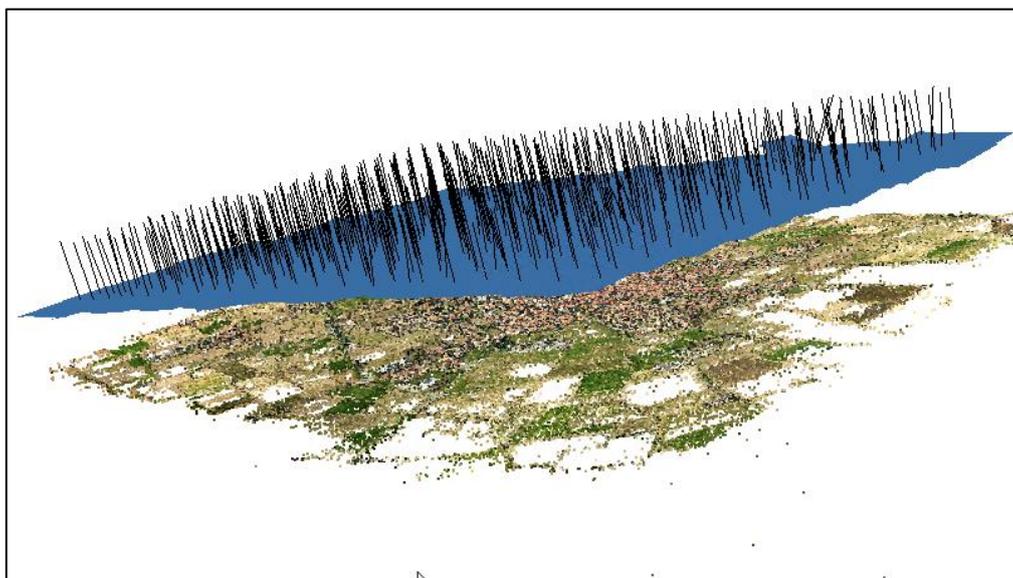


Figura 36 Metashape – step#2: fotogrammi allineati

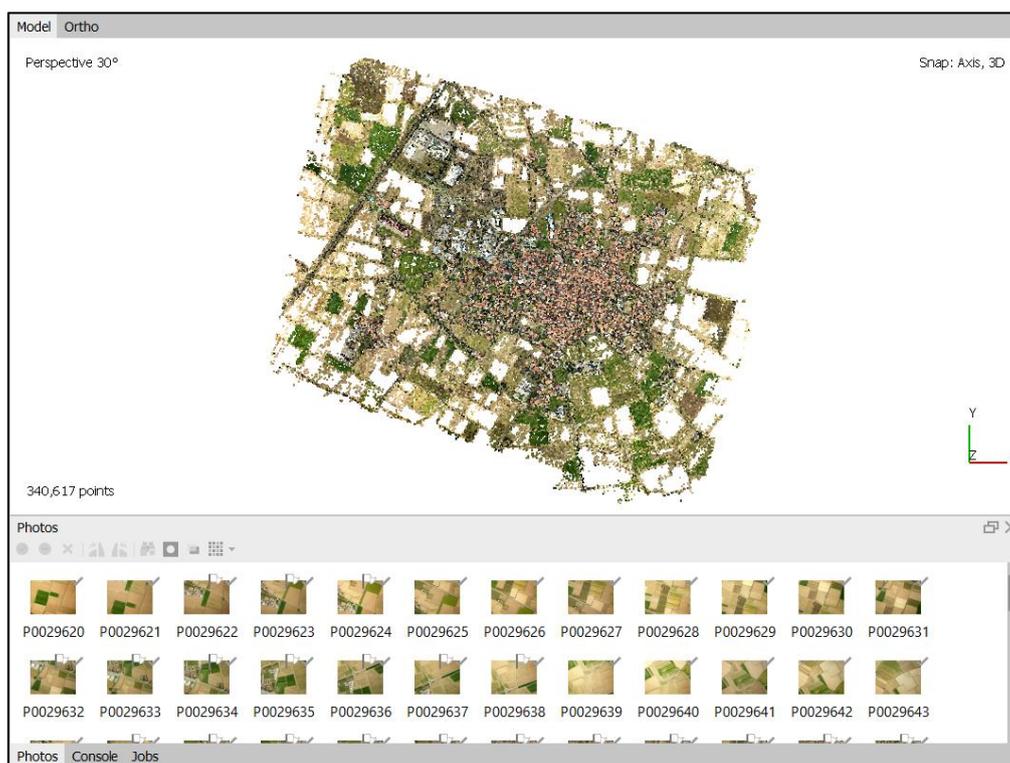


Figura 37 Metashape – step#2: Nuvola sparsa di punti

6.2.1.3 Collimazione dei punti

Completata la fase di allineamento, si passa al caricamento dei punti RTK che sono stati collezionati durante l'appoggio in campo: questi rappresentano i riferimenti esterni (GCP e CP) necessari alla collimazione dei fotogrammi. Tramite il comando **File > Import > Import Markers...** (Figura 38), sull'area di lavoro principale verranno visualizzati i punti appena caricati che si distribuiranno opportunamente sul modello (Figura 39).

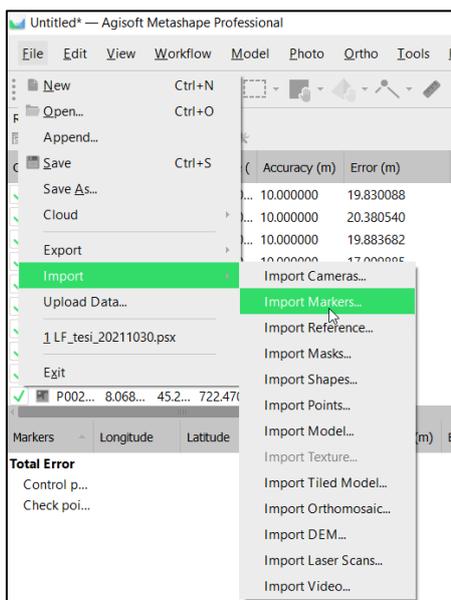


Figura 38 Metashape - step#3: Caricamento GCP e CP

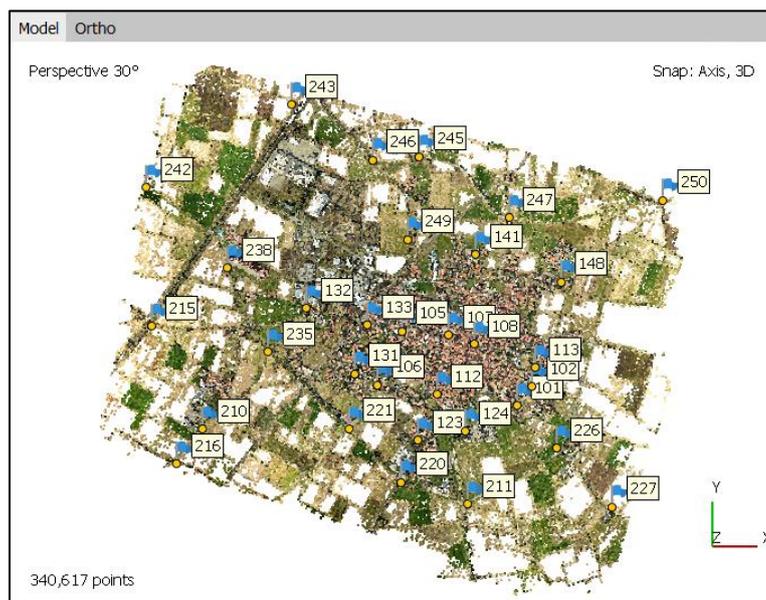


Figura 39 Metashape - step#3: GCP e CP distribuiti sul modello

In questa fase è necessario effettuare la collimazione dei 44 punti noti sul dataset di immagini. Cliccando con il tasto destro sul *Marker* da collimare, verranno filtrati solo i fotogrammi posizionati nell'intorno del GCP selezionato (Figura 40):

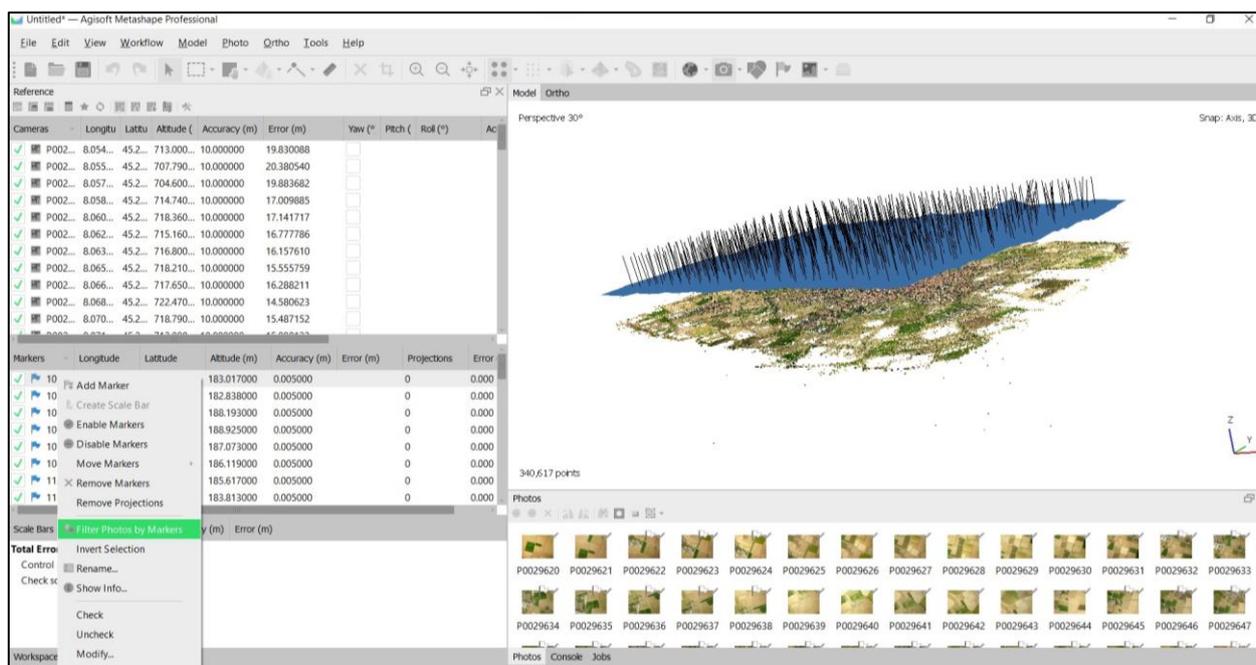


Figura 40 Metashape - step#3: Filtraggio foto da collimare

Aprendo la singola immagine, un elemento puntuale a forma di bandiera indicherà la posizione del marker: risulterà di colore bianco quando il punto non

è collimato (Figura 41), mentre diventerà di colore verde quando verrà spostato manualmente sulla posizione corretta del punto noto (Figura 42).

Affinché il modello produca degli output di buona qualità in termini di precisione geometrica ed altimetrica, è necessario che ogni marker abbia un numero elevato di proiezioni e che l'errore relativo si attesti nell'ordine dei centimetri: è importante controllare ad ogni collimazione i valori riportati nel riquadro di "Reference" corrispondente ai marker (Figura 43).

Effettuando la collimazione su tutti i 44 punti di controllo, è possibile passare allo step successivo.



Figura 41 Metashape – Step#3: fotogrammi con marker non collimati

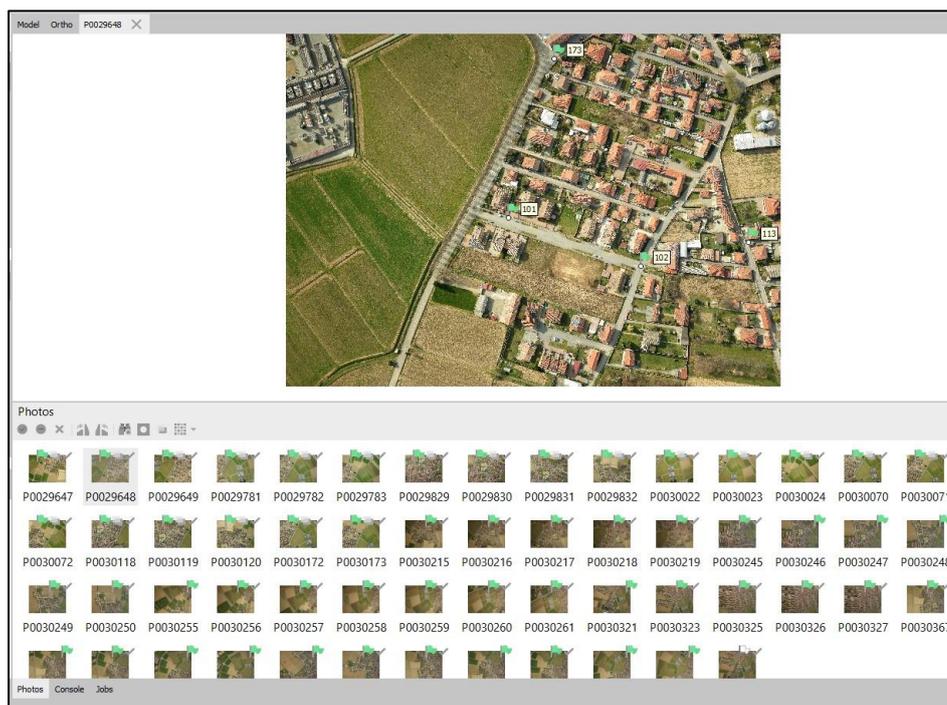


Figura 42 Metashape – step#3: Marker collimati su diversi fotogrammi

Markers	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ 101	8.085583	45.278000	183.017000	0.005000	0.015253	44	3.591
✓ 102	8.086840	45.279092	182.838000	0.005000	0.018003	45	2.381
✓ 105	8.076318	45.282274	188.193000	0.005000	0.033945	38	5.791
✓ 106	8.074361	45.279202	188.925000	0.005000	0.068375	48	5.396
✓ 107	8.080100	45.282047	187.073000	0.005000	0.045937	31	4.697
✓ 108	8.082139	45.281544	186.119000	0.005000	0.060602	23	4.207
✓ 112	8.079138	45.278644	185.617000	0.005000	0.050888	31	4.358
✓ 113	8.087023	45.280194	183.813000	0.005000	0.047147	32	4.068
✓ 123	8.077608	45.276021	185.997000	0.005000	0.042199	25	4.363
✓ 124	8.081396	45.276555	184.854000	0.005000	0.015161	40	3.477
✓ 131	8.072516	45.279847	189.797000	0.005000	0.043102	37	5.078
✓ 132	8.068550	45.282505	182.280000	0.005000	0.018152	10	4.520

Figura 43 Metashape – step#3: Tabella dei GCP con indicazioni dell'errore e del numero di proiezioni

6.2.1.4 Secondo allineamento delle immagini

Terminata la fase di collimazione dei GCP, è opportuno eseguire nuovamente la procedura di allineamento delle immagini che consentirà di affinare la qualità del modello ottenuto.

6.2.1.5 Generazione della nuvola densa di punti

Metashape consente di creare una nuvola densa di punti densa sulla base dei parametri di orientamento interni ed esterni calcolati sull'immagini.

La generazione delle nuvole dense si basa sulle **mappe di profondità** che sono calcolate per le coppie di immagini sovrapposte considerando i loro parametri di orientamento esterno e interno relativi stimati con un aggiustamento “bundle”. Coppie multiple di mappe di profondità generate per ogni telecamera, vengono fuse insieme in una mappa di profondità combinata utilizzando il surplus di informazioni nelle regioni di maggiore sovrapposte per filtrare misurazioni di profondità errate.

Le mappe di profondità combinate generate per ciascuna telecamera vengono trasformate nelle nuvole di punti dense parziali, che vengono poi unite in una nuvola di punti densa finale con un ulteriore passaggio di filtraggio del rumore applicato nelle zone di sovrapposizione.

Le normali dei punti nelle nuvole dense parziali sono calcolate utilizzando l'adattamento del piano al pixel combinate alle mappe di profondità, mentre i colori vengono campionati dalle immagini [24].

Per creare la nuvola densa, dal menu “workflow” si seleziona il comando “**Build dense cloud...**” (Figura 44): è possibile scegliere tra quattro livelli di qualità della nuvola densa. Più è elevato il livello, maggiore sarà la quantità di risorse computazionali necessarie per l'elaborazione e di conseguenza, il tempo necessario per portare a termine il processamento.

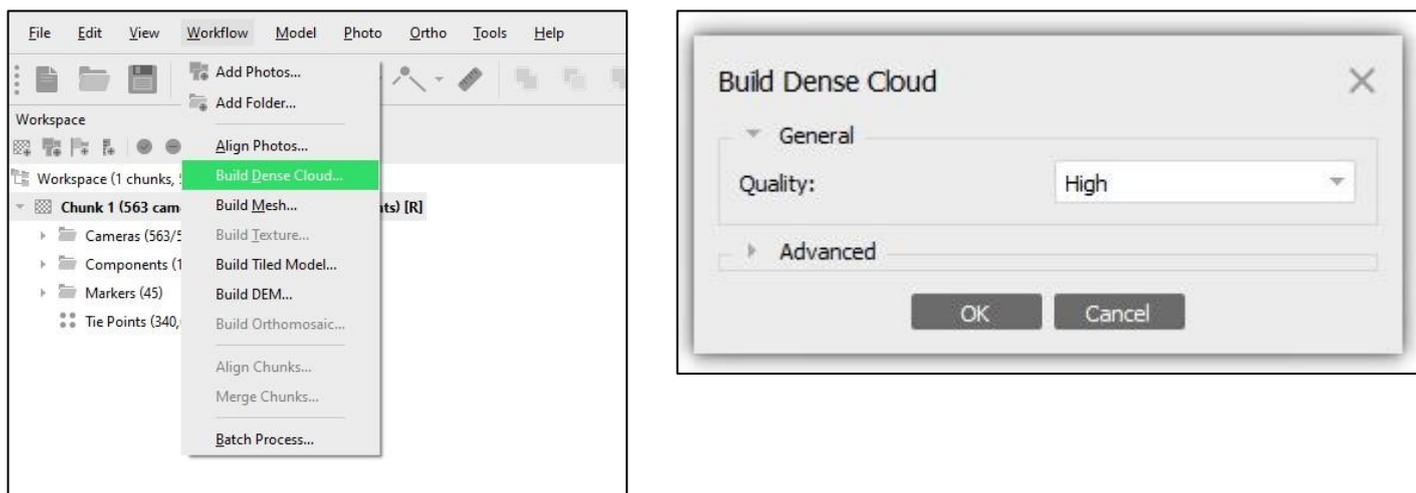


Figura 44 Metashape - step#5: Build Dense Cloud e settaggio qualità

6.2.1.6 Generazione del DEM

In Metashape, il DEM può essere rasterizzato dalla nuvola densa di punti, dalla nuvola sparsa, dal modello poligonale (mesh) o generato direttamente dalla mappa di profondità. Il software è in grado di creare sia il modello digitale di superficie (DSM), sia il modello digitale del terreno (DTM). Quest'ultimo può essere costruito solo sulla scorta dei dati ricavati dalla nuvola densa di punti, che dovrebbe essere classificati in punti base e altre classi semantiche prima della fase di generazione del DTM. [24]

Ultimato lo step di costruzione della nuvola densa, si può procedere alla generazione del DEM tramite il comando **Build DEM...**, avendo opportunamente impostato i parametri voluti (Figura 45).

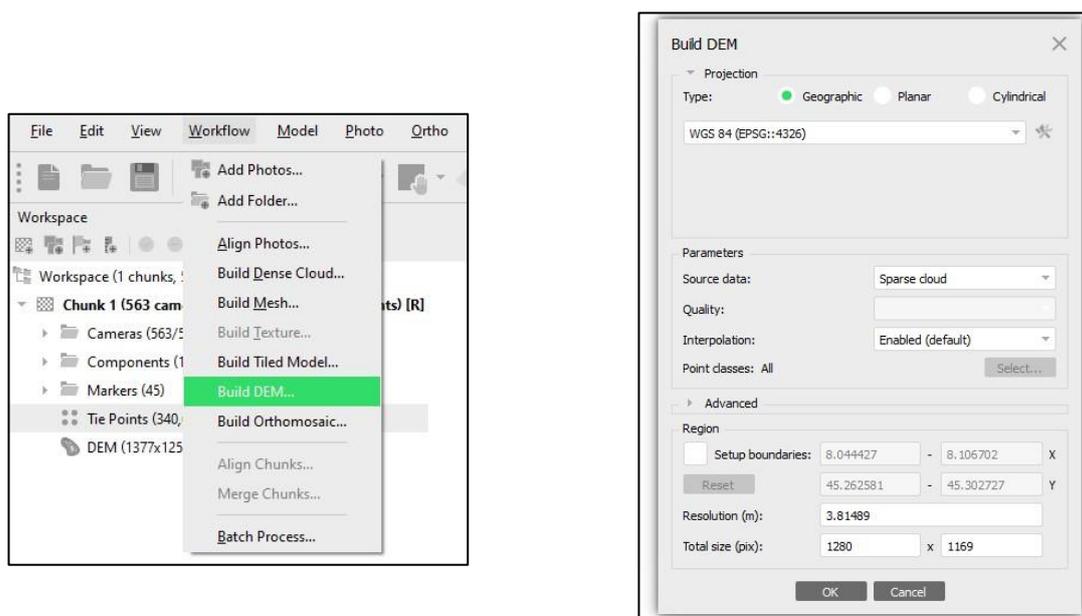


Figura 45 Metashape - step#6: Generazione del DEM e relative impostazioni

6.2.1.7 Creazione dell'ortomosaico

L'ortomosaico è un'immagine combinata creata dalla fusione senza soluzione di continuità delle immagini originali proiettate sulla superficie dell'oggetto e trasformata nella proiezione selezionata. Metashape consente di utilizzare uno dei seguenti tipi di proiezione: Geografica, Planare o Cilindrica.

La proiezione planare consente di selezionare l'orientamento arbitrario del piano di proiezione che è utile per progetti riguardanti le facciate o altre superfici non orizzontali.

Per ridurre al minimo le distorsioni per oggetti di forma cilindrica, come tubi, torri tonde, tunnel, etc., può essere utilizzata una proiezione cilindrica.

In questo contesto viene utilizzata la proiezione geografica che serve per il compito più tipico di creare un ortomosaico in un sistema di coordinate geografiche [24].

Dal DEM ottenuto al punto precedente, si ricava il mosaico ortorettificato del dataset di riferimento. Sempre dal menu "workflow" si seleziona la voce **Build**

Orthomosaic... (Figura 46) e si avvia il processo, scegliendo le impostazioni volute per l'ortomosaicatura.

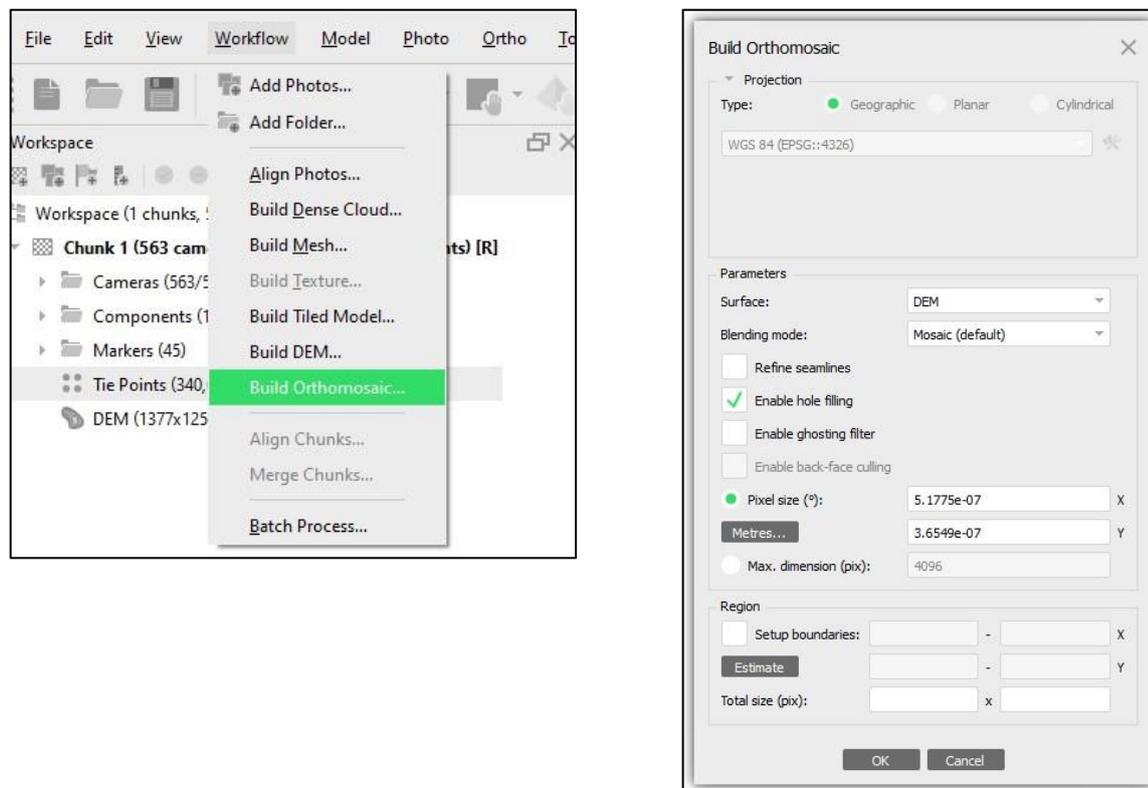


Figura 46 Metashape - step#7: Creazione ortomosaico

6.2.1.8 Altri output: modello 3D texturizzato "tiled model" e "mesh" poligonale

Dalla nuvola densa di punti, è possibile ottenere altri prodotti quali possono essere:

- **Modello Mesh poligonale.** Metashape può ricostruire il modello mesh poligonale in base alle informazioni derivate dalla nuvola di punti - densa, sparsa o importata da fonte esterna - oppure in base ai dati delle mappe di profondità (Figura 47).



Figura 47 Metashape - output: esempio di modello mesh a bassa risoluzione

- **Tiled model.** Rappresenta una buona soluzione per la modellazione a scala urbana. Consente una visualizzazione reattiva di modelli 3D di grandi dimensioni e ad alta risoluzione. Il tiled model può essere costruito sulla base di nuvole dense di punti dense, mesh o mappe di profondità [24]. Le “tessere gerarchiche” di cui il modello è costituito, sono derivate dalle immagini originarie (Figura 48).



Figura 48 Metashape - output: Tiled model da immagini RGB oblique

6.2.2 Risultati del processamento

Il documento di seguito riportato è il report generato da Metashape dove vengono riportati tutti i valori rilevanti dell'intero lavoro di processamento per la realizzazione del modello 3D di Livorno Ferraris. Sinteticamente è suddiviso in:

Titolo sezione	Pagina
Dati Esaminati	2
Calibrazione Fotocamera	3
Posizione Camere (punti di scatto)	4
Punti di Controllo a Terra (GCPs)	5
Modello di Elevazione Digitale (DEM)	8
Parametri di Elaborazione	10

Modello digitale - Livorno Ferraris

Report di processamento modello 3D
13 November 2021



Dati Esaminati

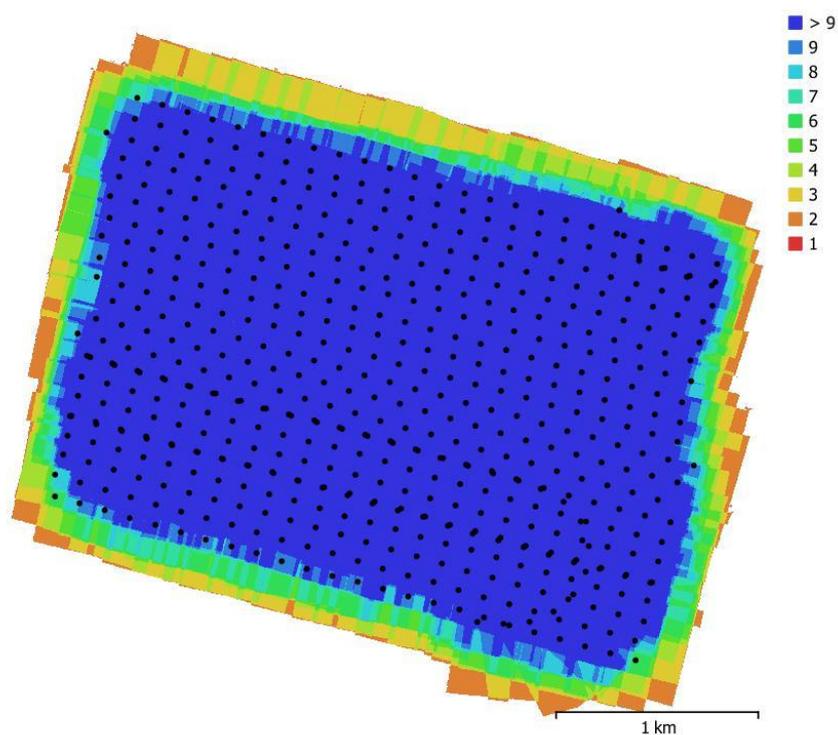


Fig. 1. Posizione delle camere (punti di scatto) e loro sovrapposizione.

Numero di immagini:	840	Puntidi ripresa fissi:	563
Altitudine di volo:	560 m	Punti di vincolo:	363,743
Risoluzione a terra:	3.87 cm/pix	Proiezioni:	2,161,693
Area coperta:	9.05 km ²	Errore di riproiezione:	0.674 pix

Modello Fot...	Risoluzione	Lunghezza Focale	Dimensione Pixel	Precalibrata
iXM-RS150F, ...	14204 x 10652	50 mm	3.76 x 3.76 μ m	No

Tabella 1. Camere.

Calibrazione Fotocamera

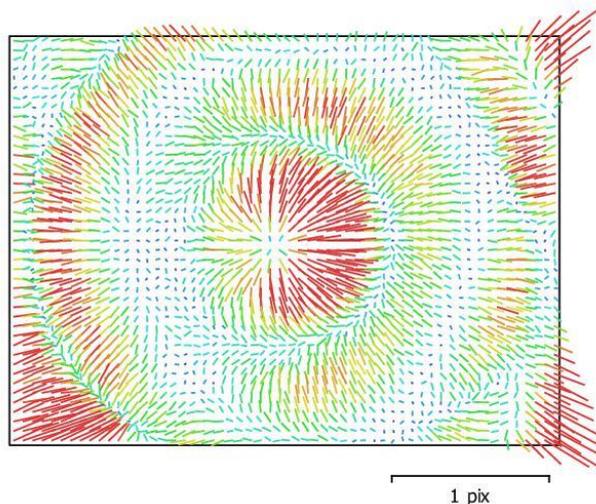


Fig. 2. Residuali Immagine per iXM-RS150F, Rodenstock RS-50mm/Aerial (50mm). I vettori colorati mostrano l'errore medio di riproiezione dei pixel nelle corrispondenti celle, calcolato su tutte le immagini.

iXM-RS150F, Rodenstock RS-50mm/Aerial (50mm)

840 immagini

Tipo	Risoluzione	Lunghezza Focale	Dimensione Pixel
Fotogramma	14204 x 10652	50 mm	3.76 x 3.76 μm

	Valore	Errore	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	13744.6	0.17	1.00	-0.10	-0.27	-0.05	0.07	-0.07	0.01	0.02
Cx	60.6309	0.032		1.00	0.02	-0.00	-0.00	0.00	0.44	-0.01
Cy	-6.06583	0.032			1.00	0.01	-0.01	0.02	-0.02	0.40
K1	-0.00614819	8e-06				1.00	-0.97	0.92	-0.00	0.00
K2	0.0296173	4.5e-05					1.00	-0.99	-0.00	-0.00
K3	-0.0356344	7.5e-05						1.00	0.01	0.00
P1	2.39954e-05	3.8e-07							1.00	-0.03
P2	9.44639e-05	3.3e-07								1.00

Tabella 2. Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione.

Posizione Camere (punti di scatto)

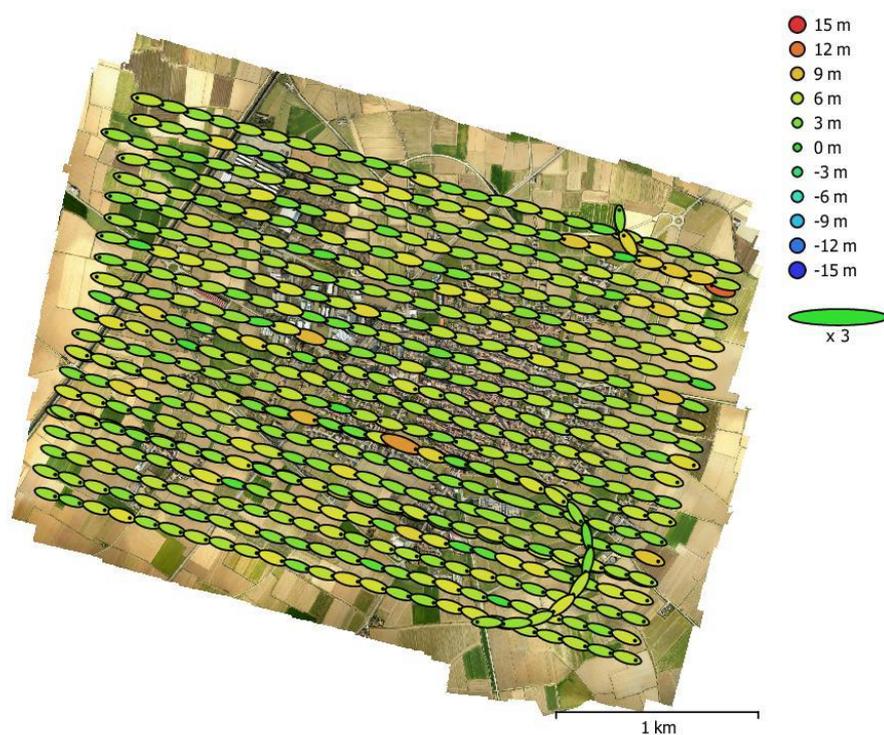


Fig. 3. Posizione Camere (punti di scatto) ed errori stimati.

L'errore Z è rappresentato dal colore dell'ellisse. Gli errori X,Y sono rappresentati dalla forma dell'ellisse.

Le posizioni stimate delle camere sono contrassegnate da un punto nero.

errore X (m)	errore Y (m)	errore Z (m)	errore XY (m)	Errore totale (m)
31.1891	9.63099	5.38214	32.6423	33.083

Tabella 3. Errore medio di posizione delle Camere.

X - Longitudine, Y - Latitudine, Z - Altitudine.

Punti di Controllo a Terra (GCPs)

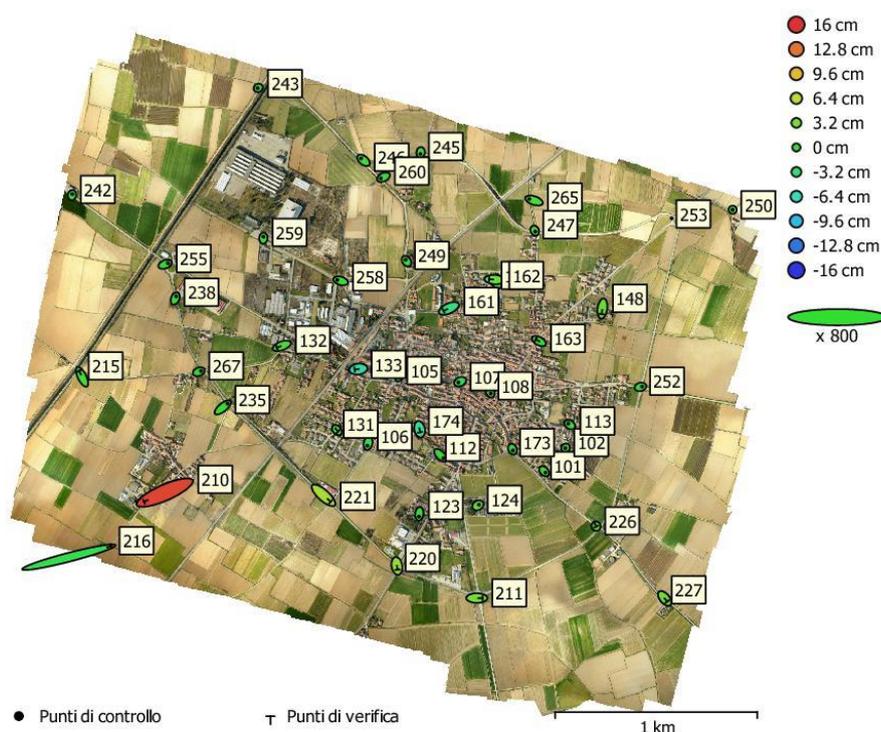


Fig. 4. Posizione dei GCP ed errori stimati.

L'errore Z è rappresentato dal colore dell'ellisse. Gli errori X,Y sono rappresentati dalla forma dell'ellisse.

Le posizioni stimate dei GCP sono contrassegnate da un punto o da una croce.

Conteggio	errore X (cm)	errore Y (cm)	errore Z (cm)	errore XY (cm)	Totale (cm)
27	2.37887	1.98178	0.630471	3.0962	3.15974

Tabella 4. Punti di controllo RMSE.

X - Longitudine, Y - Latitudine, Z - Altitudine.

Conteggio	errore X (cm)	errore Y (cm)	errore Z (cm)	errore XY (cm)	Totale (cm)
17	14.8402	5.77083	4.72901	15.9227	16.6102

Tabella 5. Punti di verifica RMSE.

X - Longitudine, Y - Latitudine, Z - Altitudine.

Etic...	errore X (cm)	errore Y (cm)	errore Z (cm)	Totale (cm)	Immagine (pix)
101	1.514	-1.56432	-0.167405	2.18342	0.853 (21)
102	-0.308804	-0.359786	-0.302595	0.562468	0.534 (21)
105	-0.270965	-1.18827	0.166759	1.23013	0.575 (15)
106	-0.689594	-2.91677	-0.96904	3.14994	0.906 (22)
107	-2.10941	-0.917955	-1.35551	2.67014	1.145 (19)
108	0.88925	-2.1257	0.496753	2.35714	1.073 (13)
112	3.40166	-3.57332	-0.0749409	4.93412	1.631 (18)
113	-1.8848	1.27349	0.114338	2.27757	0.987 (16)
123	-0.378365	-3.50386	-0.035336	3.52441	1.873 (12)
124	1.32516	0.826868	2.25947	2.74681	1.097 (26)
173	0.685239	-1.66802	-0.537642	1.88173	0.645 (18)
235	5.74587	4.70278	-0.0512062	7.42522	1.487 (21)
238	1.1232	2.71683	-0.212896	2.94755	0.957 (16)
242	0.256324	1.30617	0.176927	1.34279	1.269 (6)
243	-0.713539	-0.327215	-0.0289501	0.785523	2.474 (4)
245	-0.205733	-1.68205	-0.501538	1.76725	1.503 (6)
246	-2.91069	2.43627	0.803105	3.87976	1.490 (11)
247	0.623992	-1.3112	-0.0792668	1.45427	0.876 (18)
249	-1.14384	1.59413	0.33142	1.98984	0.717 (16)
250	-0.00837291	-0.0119086	-0.06408	0.0657128	0.990 (2)
252	2.00174	0.543418	-0.487605	2.13073	0.913 (18)
253					
255	3.40257	1.35028	-0.169604	3.66463	1.182 (16)
258	-4.13526	1.20584	0.10868	4.30886	1.246 (15)
259	0.12738	1.82719	0.0626318	1.8327	0.717 (15)
260	-3.10896	-1.49065	-0.348568	3.46543	1.309 (11)
265	-5.76352	1.90347	0.80424	6.12276	2.230 (12)
267	2.54466	0.978976	-0.0107587	2.7265	0.928 (20)
Tot...	2.37887	1.98178	0.630471	3.15974	1.161

Tabella 6. Punti di controllo.
X - Longitudine, Y - Latitudine, Z - Altitudine.

Etic...	errore X (cm)	errore Y (cm)	errore Z (cm)	Totale (cm)	Immagine (pix)
131	1.56188	-1.63898	-0.0793361	2.2654	0.451 (17)
132	-6.08027	-2.27413	1.03271	6.57327	0.744 (16)
133	-4.61499	-0.558724	-5.23116	6.99824	0.587 (15)
141	-3.23699	3.29738	0.542449	4.65243	0.510 (19)
148	-0.914311	-6.89665	2.62872	7.43707	1.344 (22)
161	-6.62502	-3.06152	-3.65085	8.16042	0.651 (18)
162	-7.06662	0.464472	2.29449	7.44429	0.735 (18)
163	-3.95611	2.14563	0.0024139	4.50051	0.533 (17)
174	0.739376	-3.70831	-4.94884	6.22811	0.520 (20)
210	-25.7512	-11.3077	15.1055	31.9244	2.309 (12)
211	6.91642	-0.00542989	3.1679	7.6074	0.698 (14)
215	-3.58502	7.39598	0.625349	8.24281	0.709 (15)
216	52.4365	13.7026	-1.19446	54.2104	1.685 (8)
220	0.729233	-4.70807	4.69592	6.6895	0.734 (11)
221	8.80975	-7.9425	5.45547	13.0559	0.632 (20)
226	0.212436	-0.45668	1.53196	1.61263	0.787 (24)
227	3.20886	-3.97572	2.69476	5.77624	2.736 (8)
Tot...	14.8402	5.77083	4.72901	16.6102	1.010

Tabella 7. Punti di verifica.

X - Longitudine, Y - Latitudine, Z - Altitudine.

Modello di Elevazione Digitale (DEM)

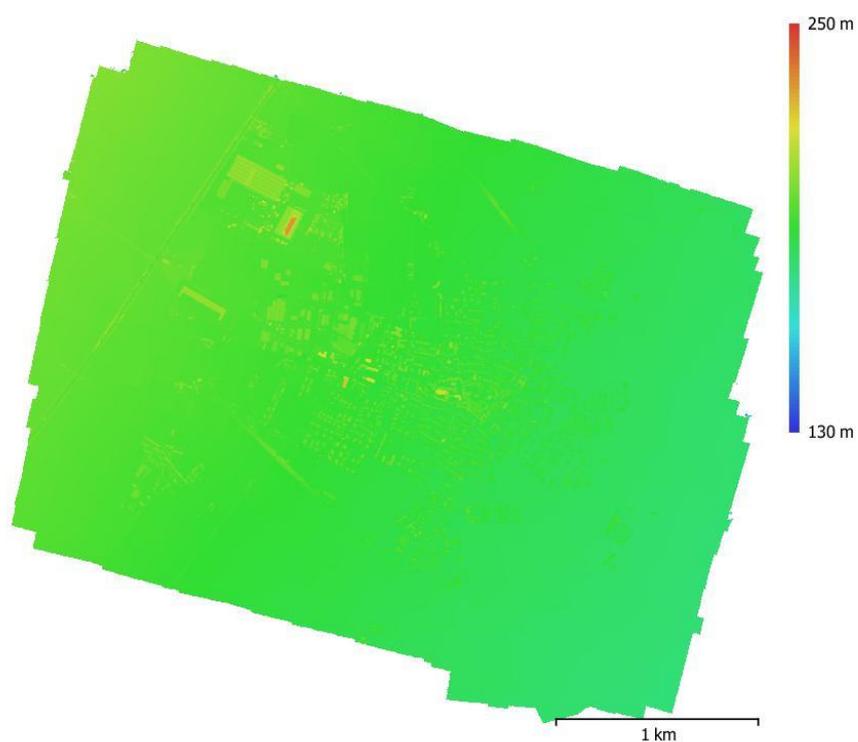


Fig. 5. Modello di elevazione digitale ricostruito.

Risoluzione: 7.73 cm/pix
Densità punti: 167 punti/m²

Parametri di Elaborazione

Generale

Camere (punti di ripresa)	840
Camere allineate	563
Marcatori	72
Sistema di coordinate	WGS 84 (EPSG::4326)
Angoli di rotazione	Omega, Phi, Kappa

Nuvola di Punti

Punti	363,743 di 399,226
Errore RMS di riproiezione	0.152575 (0.674493 pix)
Errore massimo di riproiezione	0.460582 (48.0044 pix)
Dimensione media punti chiave	2.90816 pix
Colori punto	3 bande, uint8
Punti chiave	No
Media molteplicità dei punti di vincolo	6.12101

Parametri di allineamento

Precisione	Alta
Preselezione generica	Si
Preselezione foto georeferenziate	Sorgente
Punti chiave limite	40,000
Limite punti chiave per Mpx	1,000
Punti di vincolo limite	4,000
Escludere i punti di collegamento stazionari	Si
Guided image matching	No
Autoselezione modello di fotocamera adeguato	No
Tempo di ricerca corrispondenze	24 minuti 51 secondi
Conflitto nell'utilizzo della memoria	644.16 MB
Tempo di allineamento	2 minuti 4 secondi
Allineamento della memoria utilizzata	527.44 MB
Data di creazione	2021:10:12 09:29:41
Versione Software	1.7.4.13028
Dimesione File	46.83 MB

Mappe di Profondità

Conteggio	563
-----------	-----

Generazione Parametri Mappe di Profondità

Qualità	Alta
Modalità filtro	Leggero
Massima vicinanza	40
Tempo di elaborazione	6 ore 24 minuti
Memoria in uso	58.99 GB
Data di creazione	2021:10:12 16:01:45
Versione Software	1.7.4.13028
Dimesione File	25.46 GB

Nuvola di Punti Densa

Punti	1,755,953,371
Colori punto	3 bande, uint8

Generazione Parametri Mappe di Profondità

Qualità	Alta
Modalità filtro	Leggero
Massima vicinanza	40
Tempo di elaborazione	6 ore 24 minuti

Pagina 9

Memoria in uso	58.99 GB
Generazione Parametri Nuvola Densa	
Tempo di elaborazione	9 ore 2 minuti
Memoria in uso	51.18 GB
Data di creazione	2021:10:13 01:04:46
Versione Software	1.7.4.13028
Dimesione File	22.63 GB
DEM (modello digitale elevazione-morfologia)	
Dimensione	73,392 x 64,720
Sistema di coordinate	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Parametri di ricostruzione	
Dati in ingresso	Nuvola densa
Interpolazione	Abilitato
Tempo di elaborazione	44 minuti 55 secondi
Memoria in uso	547.59 MB
Data di creazione	2021:11:12 21:08:13
Versione Software	1.7.5.13229
Dimesione File	5.10 GB
Ortomosaico	
Dimensione	96,651 x 88,811
Sistema di coordinate	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colori	3 bande, uint8
Parametri di ricostruzione	
Modalità di fusione	Mosaico
Superficie utilizzata	DEM (Modello Digitale Elevazione-morfologia)
Abilita riempimento buchi	Si
Abilita filtro rimozione artefatti luminosi	No
Tempo di elaborazione	8 ore 54 minuti
Memoria in uso	13.71 GB
Data di creazione	2021:11:13 02:36:32
Versione Software	1.7.5.13229
Dimesione File	110.24 GB
System	
Nome del software	Agisoft Metashape Professional
Versione Software	1.7.5 build 13229
OS	Windows 64 bit
RAM	127.69 GB
CPU	Intel(R) Xeon(R) W-2223 CPU @ 3.60GHz
CPU(s)	Quadro RTX 4000 Quadro RTX 4000

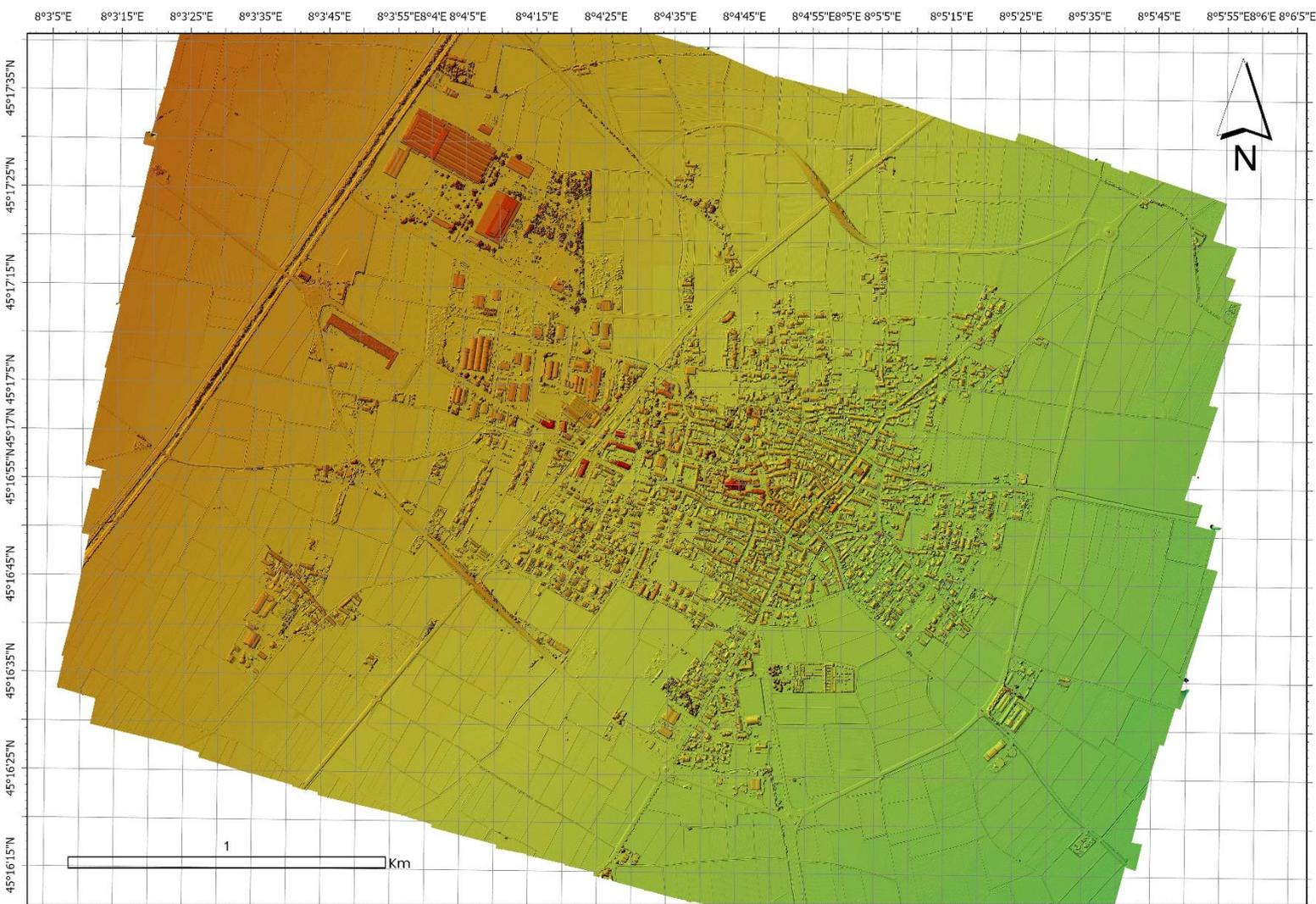
Pagina 10

6.2.3 DSM e Ortomosaico

In questo paragrafo vengono riportati gli output raster generati da Metashape con le relative caratteristiche (Tabella 10 e Tabella 11).

Tabella 10 DSM generato da Metashape: specifiche

Prodotto	Digital Surface Model (DSM)
Dimensione (pixel)	73183 x 64270
Risoluzione (cm/pix)	7.73
Sistema di coordinate	WGS 84 (EPSG: 4326)
GSD	0.08



Output 1 DSM generato con Metashape

Tabella 11 Ortomosaico generato da Metashape: specifiche

Prodotto	Ortomosaico
Dimensione (pixel)	118630 x 5343
Risoluzione (cm/pix)	3.87
Sistema di coordinate	WGS 84 (EPSG: 4326)
GSD	0.04



Output 2 Ortomosaico generato da Metashape

6.3 ESRI™ ArcGIS Pro

ArcGIS Pro è l'applicazione GIS per desktop sviluppata da ESRI™ che supporta la visualizzazione dei dati, l'analisi avanzata e la gestione dei dati in 2D, 3D e 4D [25]

Tra le tante funzioni presenti in ArcGIS Pro, per la presente trattazione è stato utilizzato il tool **“Ortho Mapping”**. Quest'ultimo consente di correggere fotogrammetricamente le immagini aeree digitali raccolte da fotocamera professionale per rimuovere le distorsioni geometriche indotte dal sensore e correggere l'effetto di distorsione del terreno. Dopo aver affrontato tali aspetti, è possibile generare prodotti cartografici [25].

6.3.1 Workflow

Come primo step, è necessario impostare uno spazio di lavoro Ortho Mapping per gestire la raccolta delle immagini aeree. Successivamente, verrà eseguita una regolazione del blocco ed una revisione dei risultati. Infine, verranno generati un DSM e un mosaico ortorettificato. [26]

Ortho Mapping richiede informazioni sulla fotocamera, compresa la lunghezza focale e le dimensioni del sensore, nonché la posizione in cui è stata acquisita ciascuna immagine. Queste informazioni sono comunemente archiviate come metadati nei file di immagine, in genere nell'intestazione EXIF. È anche utile conoscere la precisione del GPS. In assenza di un'intestazione EXIF completa, i dati di geolocalizzazione sono stati importati tramite una tabella opportunamente formata. Di seguito se ne riporta uno stralcio (Tabella 12). [26]

Tabella 12 ArcGIS Pro: stralcio tabella importazione dati GPS (Reference frames table)

ObjectID	Raster	CameraID	PerspectiveX	PerspectiveY	PerspectiveZ	Omega	Phi	Kappa	SRS
1	P0029620.jpg	iXM-RS150F	8.054279	45.27699	713	0	0	0	4326
2	P0029621.jpg	iXM-RS150F	8.055804	45.27669	707.79	0	0	0	4326
3	P0029622.jpg	iXM-RS150F	8.057389	45.27638	704.6	0	0	0	4326
4	P0029623.jpg	iXM-RS150F	8.05899	45.27604	714.74	0	0	0	4326
5	P0029624.jpg	iXM-RS150F	8.060586	45.27572	718.36	0	0	0	4326
6	P0029625.jpg	iXM-RS150F	8.062166	45.2754	715.16	0	0	0	4326
7	P0029626.jpg	iXM-RS150F	8.063751	45.27506	716.8	0	0	0	4326

ObjectID	Raster	CameraID	PerspectiveX	PerspectiveY	PerspectiveZ	Omega	Phi	Kappa	SRS
8	P0029627.jpg	iXM-RS150F	8.065367	45.27476	718.21	0	0	0	4326
9	P0029628.jpg	iXM-RS150F	8.066941	45.27446	717.65	0	0	0	4326
10	P0029629.jpg	iXM-RS150F	8.06853	45.27412	722.47	0	0	0	4326
11	P0029630.jpg	iXM-RS150F	8.070092	45.27376	718.79	0	0	0	4326
12	P0029631.jpg	iXM-RS150F	8.071693	45.27344	712.08	0	0	0	4326
13	P0029632.jpg	iXM-RS150F	8.073298	45.27317	719.37	0	0	0	4326
14	P0029633.jpg	iXM-RS150F	8.074908	45.27287	723.6	0	0	0	4326
15	P0029634.jpg	iXM-RS150F	8.076495	45.27252	725.13	0	0	0	4326
16	P0029635.jpg	iXM-RS150F	8.078092	45.27223	719.54	0	0	0	4326
17	P0029636.jpg	iXM-RS150F	8.079728	45.27193	720.1	0	0	0	4326
18	P0029637.jpg	iXM-RS150F	8.081286	45.27159	726.85	0	0	0	4326
19	P0029638.jpg	iXM-RS150F	8.082873	45.27123	723.9	0	0	0	4326
20	P0029639.jpg	iXM-RS150F	8.084451	45.27091	718.53	0	0	0	4326
...
550	P0030169.jpg	iXM-RS150F	8.078548	45.27875	733.42	0	0	0	4326
551	P0030170.jpg	iXM-RS150F	8.080133	45.27843	726.92	0	0	0	4326
552	P0030171.jpg	iXM-RS150F	8.081754	45.27815	720	0	0	0	4326
553	P0030172.jpg	iXM-RS150F	8.083316	45.27781	721.78	0	0	0	4326
554	P0030173.jpg	iXM-RS150F	8.084878	45.27738	727.01	0	0	0	4326
555	P0030174.jpg	iXM-RS150F	8.086369	45.27684	737.15	0	0	0	4326
556	P0030175.jpg	iXM-RS150F	8.087549	45.27603	741	0	0	0	4326
557	P0030176.jpg	iXM-RS150F	8.088184	45.27498	731.12	0	0	0	4326
558	P0030177.jpg	iXM-RS150F	8.088153	45.27384	720.7	0	0	0	4326
559	P0030178.jpg	iXM-RS150F	8.087523	45.27279	716.07	0	0	0	4326
560	P0030179.jpg	iXM-RS150F	8.086365	45.27194	723.12	0	0	0	4326
561	P0030180.jpg	iXM-RS150F	8.084903	45.2714	728.56	0	0	0	4326
562	P0030181.jpg	iXM-RS150F	8.08336	45.27123	727.78	0	0	0	4326
563	P0030182.jpg	iXM-RS150F	8.081639	45.27128	724.92	0	0	0	4326

Il calcolo della soluzione fotogrammetrica per le immagini aeree è determinato dal suo orientamento esterno (EO), che rappresenta una trasformazione dal suolo alla telecamera e dal suo orientamento interno (IO), che rappresenta una trasformazione dalla telecamera all'immagine. I parametri di orientamento esterno richiesti includono il centro della prospettiva (x, y, z) e Omega, Phi e Kappa e verranno caricati in formato csv opportunamente formattato. [26]

I parametri di orientamento interno includono lunghezza focale, dimensione dei pixel, punto principale e distorsione dell'obiettivo. Queste informazioni possono essere trovate sul certificato di calibrazione della fotocamera associato alle immagini e devono essere fornite in una tabella apposita in formato Esri. In questo caso specifico, è stato editato manualmente un file csv contenente le seguenti informazioni (Tabella 13):

Tabella 13 ArcGIS Pro: tabella dati fotocamera

CameraID	iXM-RS150F
CameraMaker	Phase One
CameraModel	iXM-RS150F
FocalLength	50000
PrincipalX	0
PrincipalY	0
NRows	0
NCols	0
PixelSize	3.76
FilmFiducials	/
DistortionType	DistortionModel
Radial	0
Tangential	0
RadialDistances	0
RadialDistortions	0
FCS	1

6.3.1.1 Creazione spazio lavoro di Ortho Mapping

Uno spazio lavoro di Ortho Mapping è un sotto progetto ArcGIS Pro dedicato ai flussi di lavoro di orto-mappatura: è un contenitore all'interno di una cartella di progetto ArcGIS Pro che memorizza le risorse e i file derivati che appartengono ad una singola raccolta di immagini. [26]

Prima di avviare il processamento, dalla scheda **Analysis**, cliccando su **Environments**, è stato modificato il parametro **Parallel Processing Factor** al fine di accelerare la fase di allineamento dei fotogrammi ed è stato settato al 100%.

Dalla scheda **Imagery**, nel gruppo **Ortho Mapping**, si clicca sul menu a tendina **New Workspace** selezionando **New Workspace**. Nella finestra **Workspace Configuration**, viene inserito il nome del progetto, mentre dal menu a tendina **Type** si seleziona **Aerial - Digital**. Infine, come **Basemap** viene scelto **Topographic**. [26] (**Error! Reference source not found.**)

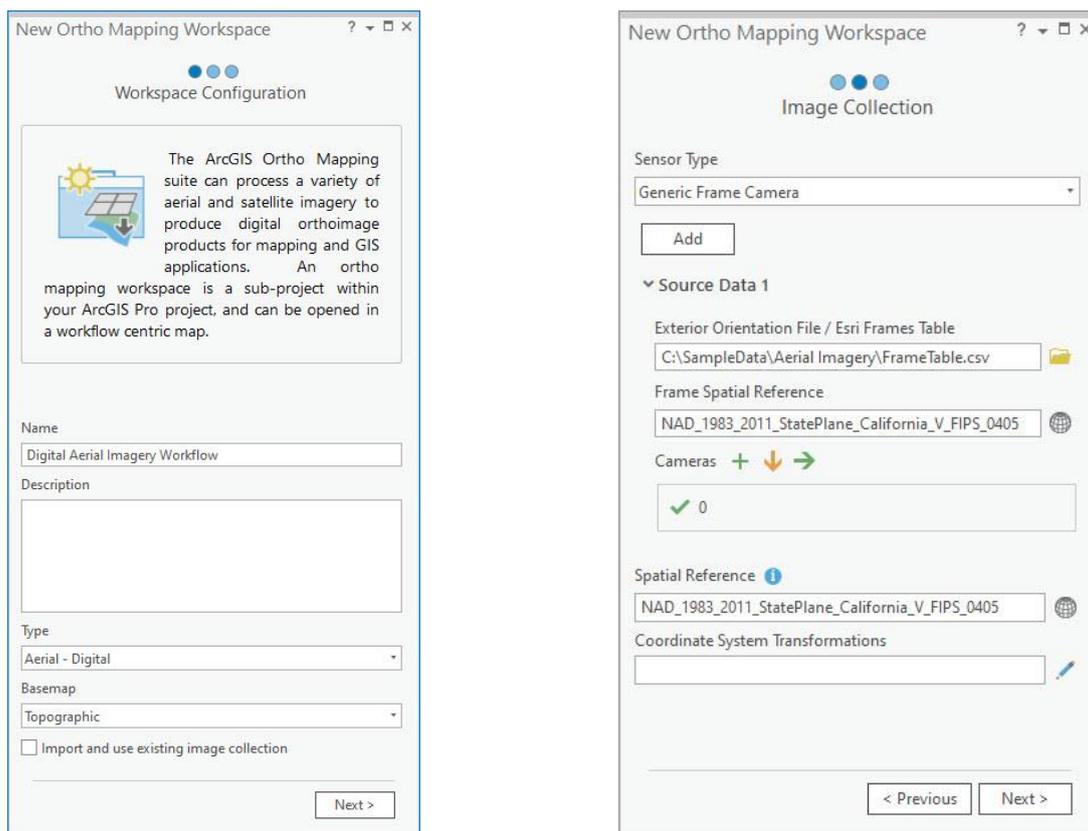


Figura 49 ArcGIS Pro – step#1: Creazione Workspace (sinistra); Import tabelle per l'orientamento esterno ed interno (destra) [26]

Nella finestra **Image Collection**, in **Exterior Orientation File / Esri Frames Table**, è stato caricato il file dei riferimenti esterni come da Tabella 12 indicata al punto precedente. Questa tabella specifica i parametri utilizzati per il calcolo dell'orientamento esterno (EO) del dataset. Nel processo di allineamento del blocco, questi valori approssimativi vengono perfezionati per ottenere una maggiore precisione. [26]

Tramite la casella **Cameras** vengono invece importati i parametri relativi alla fotocamera, come riportati in Tabella 13. Queste sono le informazioni indispensabili per l'orientamento interno (IO). [26] (**Error! Reference source not found.**)

È fondamentale assicurarsi che il riferimento spaziale e il modello della fotocamera siano corretti. La proiezione predefinita per l'area di lavoro è definita in base al dataset di immagini: questa proiezione deve corrispondere alle coordinate utilizzate nella tabella dei frame e determina il riferimento spaziale per la generazione dei prodotti orto-referenziati, inclusi l'ortomosaico e il DEM. [26]

Nella terza schermata si può scegliere come fonte dell'**Elevation Source**, "Average Elevation from DEM" derivata da un servizio internet, oppure un raster DEM di riferimento per l'area di interesse. In alternativa si può imputare manualmente una **Constant Elevation** dal menu a tendina (Figura 50). [26]

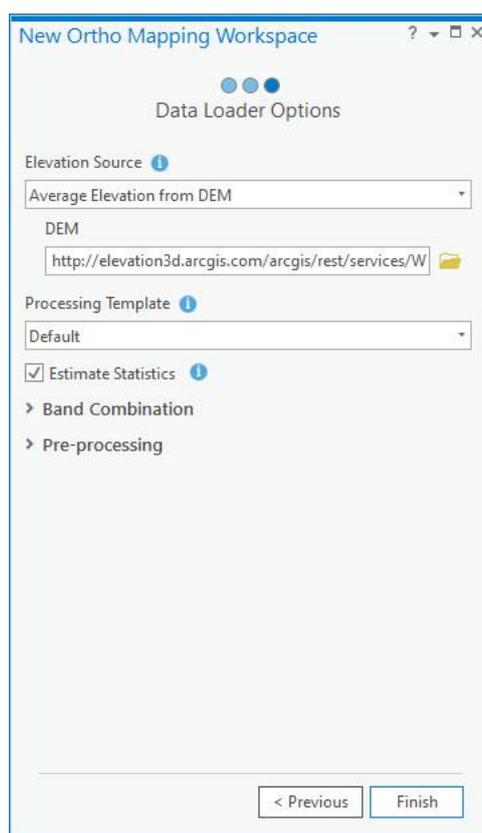


Figura 50 ArcGIS Pro - step#1: Caricamento dati DEM [26]

Una volta creato lo spazio lavoro, verranno visualizzate le immagini ed i relativi footprint. È stata aggiunta anche una categoria Ortho Mapping al riquadro **Contents**. I dati delle immagini di origine e i prodotti di orto-mappatura derivati saranno indicati qui. (Figura 51) [26]

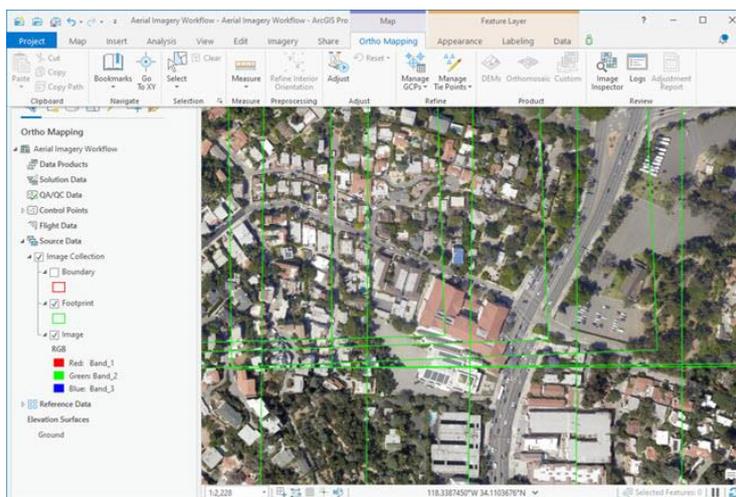


Figura 51 ArcGIS Pro – step#: Visualizzazione Area lavoro e Image Collection [26]

La visualizzazione iniziale delle immagini nell'area di lavoro conferma che tutte le immagini e i metadati necessari sono stati forniti per avviare l'area di lavoro. Le immagini non sono state regolate, quindi l'allineamento è solo approssimativo in questa fase e il mosaico potrebbe non apparire corretto. [26]

6.3.1.2 Allineamento del blocco (Block Adjustment)

Il passaggio successivo consiste nell'eseguire la regolazione del blocco dei fotogrammi utilizzando gli strumenti nei gruppi **Adjust** e **Refine**. La regolazione del blocco calcolerà prima i punti di collegamento, che sono punti comuni nelle aree di sovrapposizione dell'immagine. I punti di collegamento verranno quindi utilizzati per calcolare l'orientamento di ciascuna immagine, per l'appunto l'orientamento esterno.

Nella scheda Ortho Mapping, nel gruppo **Adjust**, è sufficiente eseguire il comando "Adjust". Dalla medesima schermata, è possibile scegliere di eseguire la calibrazione della fotocamera per calcolare e migliorare i parametri geometrici della fotocamera, determinando contemporaneamente l'orientamento dell'immagine e le coordinate del terreno dell'immagine. (Figura 52) [26]

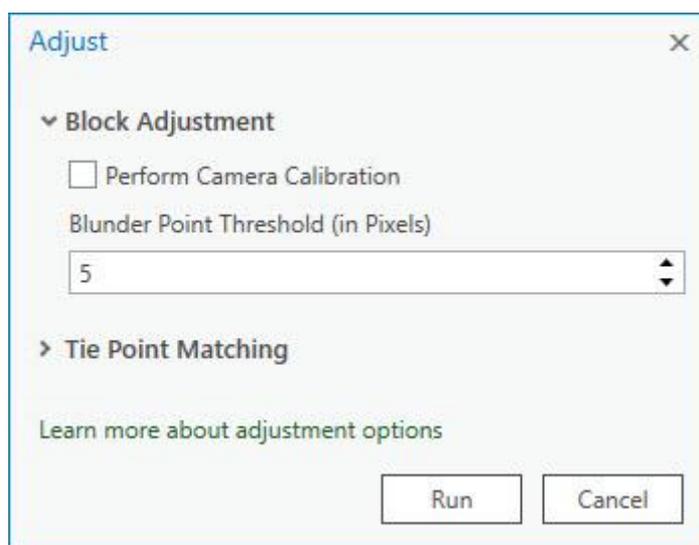


Figura 52 ArcGIS Pro - step#2: Esecuzione del Block Adjustment [26]

Dal gruppo **Refine** è possibile gestire i GCP nell'area di lavoro. L'importazione dei punti noti si effettua tramite il comando **Manage GCPs > Import GCPs** (Figura 53). Per questo passaggio, è necessario formattare adeguatamente il file csv contenente le informazioni salienti sui GCP.

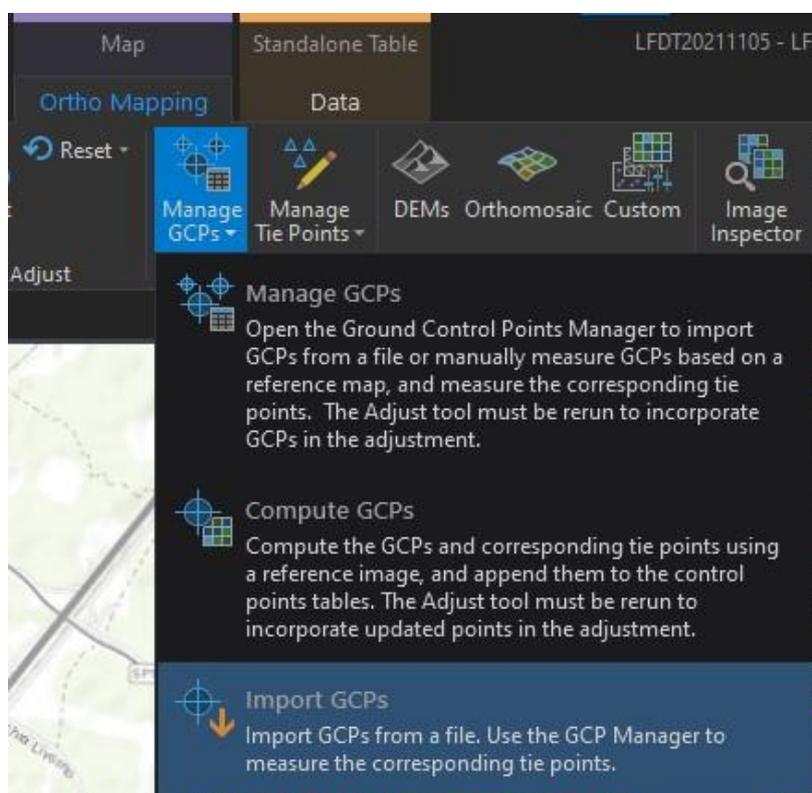


Figura 53 ArcGIS Pro - step#2: Importazione GCP

A questo, cliccando su **Manage GCPs** comparirà la schermata di gestione dei punti di controllo, dove è possibile affinare l'orientamento esterno delle immagini tramite la collimazione manuale. Nella colonna **Links** verrà indicato il numero di fotogrammi allineati con il GCP selezionato (Figura 54). Da questa schermata è anche possibile distinguere con un simbolo tra:

Ground Control Points ● Check points ▲

Label	# Links	X	Y	Z	XY Accuracy (m)	Z Accuracy (m)
● 124	24	427949,082	5014083,349	184,854	0,005	0,005
▲ 131	21	427256,811	5014456,953	189,797	0,005	0,005
▲ 132	17	426958,423	5014878,092	192,28	0,005	0,005
▲ 133	14	427341,669	5014764,546	190,291	0,005	0,005
▲ 141	17	428028,502	5015205,904	187,936	0,005	0,005
▲ 148	20	428566,629	5015026,997	183,887	0,005	0,005
▲ 161	13	427784,722	5015051,98	188,43	0,005	0,005
▲ 162	0	428011,471	5015207,553	187,834	0,005	0,005
▲ 163	0	428239,369	5014904,524	184,514	0,005	0,005
● 173	0	428120,373	5014351,515	183,163	0,005	0,005
▲ 174	0	427662,47	5014447,982	187,208	0,005	0,005
▲ 210	0	426292,286	5014117,416	193,119	0,005	0,005
▲ 211	0	427960,645	5013617,545	183,807	0,005	0,005
▲ 215	0	425978,715	5014773,144	201,188	0,005	0,005

Image

- + P0029700
- + P0029701
- + P0029702
- + P0029748
- + P0029749
- + P0029750
- + P0029845
- + P0029846
- + P0029847
- P0029989
- + P0029990
- + P0029991
- + P0029992
- + P0030037
- + P0030038
- + P0030039
- + P0030040

Adjust

Catalog Geoprocessing Symbology Export Raster Tie Point Editor GCP Manager

Figura 54 ArcGIS Pro - step#2: Riquadro di gestione dei GCP

In mappa sarà possibile distinguere tra i GCP collimati in base al colore del marker: **verde** per quelli già misurati, **rosso** per quelli ancora da misurare; i check point verranno simbolizzati con un triangolo **fucsia** (Figura 55).

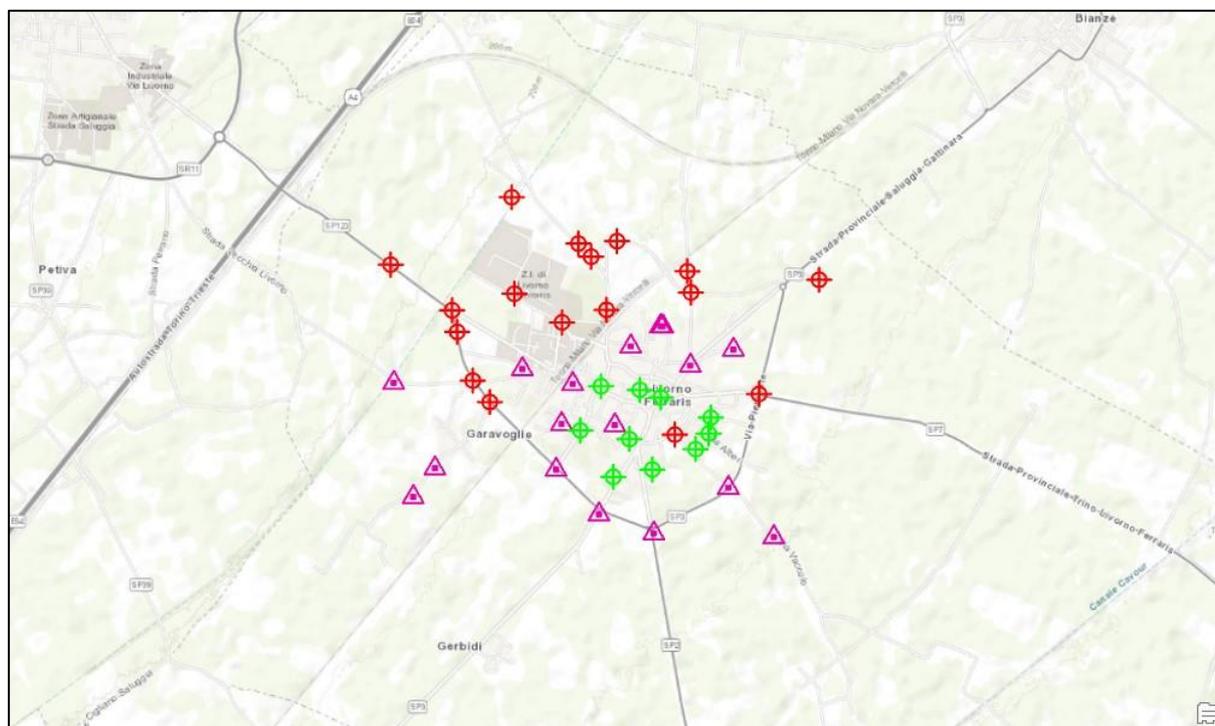


Figura 55 ArcGIS Pro - step#2: Individuazione in mappa di CP e GCP, collimati e non

Per affinare la precisione del modello, al termine della collimazione di tutti i punti noti, sarà necessario ripetere la procedura di **Adjust**

Completato l'allineamento, sulla TOC sarà possibile selezionare e accendere il layer "**Tie Points**" per visualizzare in mappa la distribuzione dei punti di collegamento appena creati (Figura 56). [26]

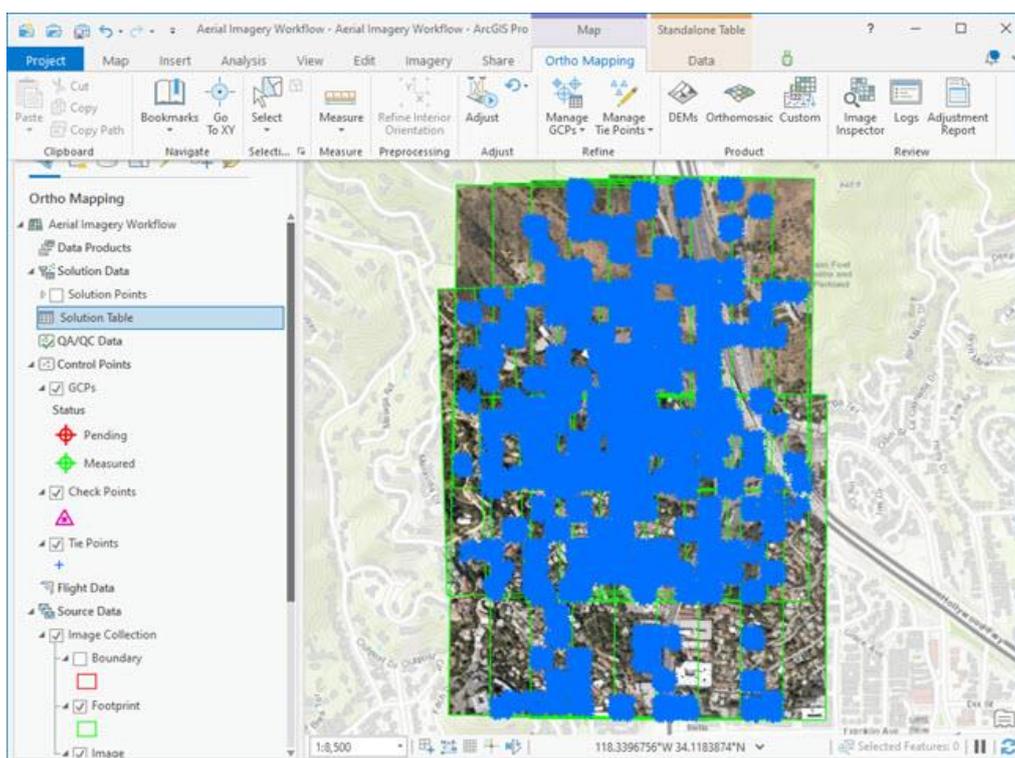


Figura 56 ArcGIS Pro – step#2: Distribuzione dei punti di collegamento (tie points) [26]

Dalla schermata del gruppo **Review**, indicazioni sui residui dei punti di collegamento ed una stima sull'accuratezza possono essere visualizzati accedendo al file di registro di processamento (**Logs**). Inoltre, è anche possibile generare un **Adjustment Report** che fornisce un registro della regolazione e le misure sulla qualità complessiva del processo. [26]

6.3.1.3 Generazione del modello digitale di elevazione (DEM)

Le coppie di immagini stereo di una raccolta di immagini vengono utilizzate per generare una nuvola di punti (punti 3D) che rappresenta le posizioni 3D per ciascuno dei punti di collegamento estratti dalle immagini per cui è possibile derivare i dati di elevazione. I dati di elevazione derivati possono essere un modello digitale del terreno (DTM), che include una stima della superficie del terreno, o un modello digitale della superficie (DSM), che include le elevazioni di alberi, edifici e altre caratteristiche fuori terra. [26]

Nel gruppo **Product**, selezionando **DEM**, si inizializza la procedura guidata di creazione del DEM. Nella finestra **Point Cloud Settings**, per **Matching Method**, è opportuno scegliere **Semiglobal Matching** dal menu a discesa: questo metodo viene in genere utilizzato per immagini di aree urbane e acquisisce informazioni più dettagliate sul terreno (Figura 57).

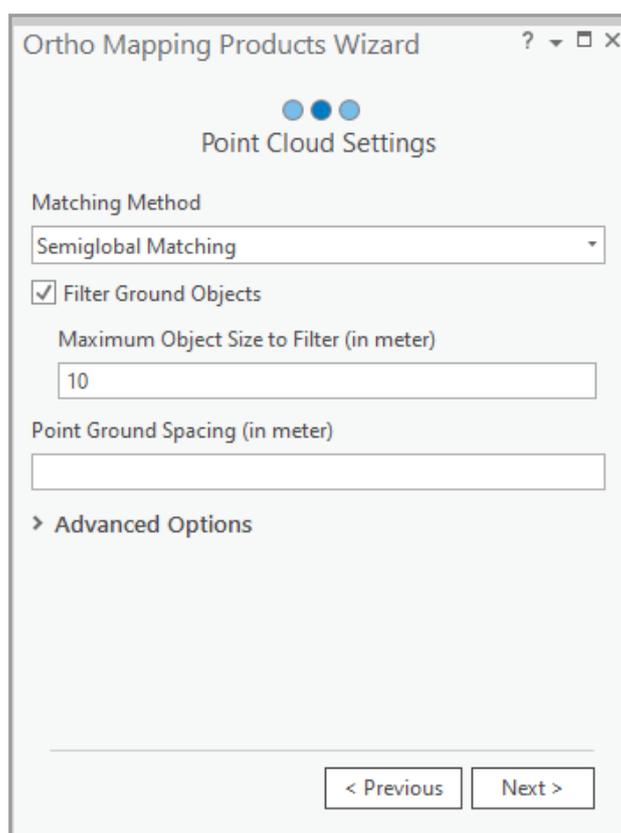


Figura 57 ArcGIS Pro – step#3. Procedura guidata creazione DEM [26]

Nella schermata **DEM Interpolation Settings**, scegliere nel menu a tendina **Surface Type** l'opzione **Digital Surface Model**. Per il parametro **Cell Size**, utilizzare il valore predefinito di 5x GSD. Questo determinerà la risoluzione del DSM (cinque volte la risoluzione del dataset). Questo processo richiederà del tempo per essere completato. [26]

6.3.1.4 Generazione di un ortomosaico

Lo step successivo consiste nella creazione dell'ortomosaico. Nella scheda Ortho Mapping, nel gruppo Product, cliccando su **Orthomosaic**, si avvia procedura guidata per la generazione dell'ortomosaico. [26]

Nella finestra **Orthorectification Settings**, alla voce **Elevation Source**, selezionare DSM: questo è il prodotto generato al punto precedente.

Nelle impostazioni di bilanciamento del colore, è opportuno togliere la spunta su **Select Mosaic Candidates**, lasciando invariate tutte le altre opzioni predefinite. (Figura 58) [26]

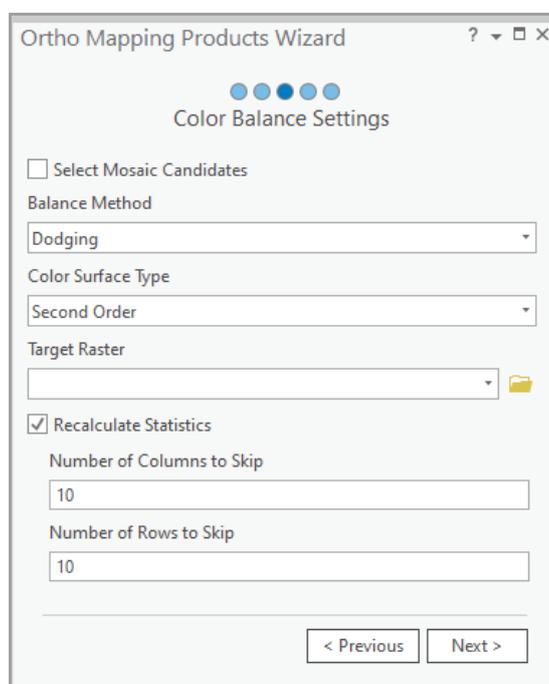


Figura 58 ArcGIS Pro – step#4: Impostazioni di bilanciamento del colore [26]

Nella schermata **Seamline Setting**, nel menu a discesa **Computation Method**, è opportuno selezionare **Voronoi**. Invece nella finestra **Orthomosaic Settings**, viene utilizzato il valore predefinito di **Pixel Size**. Questo determinerà la risoluzione finale dell'ortomosaico. Cliccando su **Finish** verrà avviato il processo finale di

generazione dell'ortomosaico che richiederà del tempo per essere completato.

[26]

6.3.2 Risultati del processamento

Il documento riportato di seguito è l'**Adjustment Report** creato da ArcGIS Pro al termine della procedura di Ortho Mapping del dataset in oggetto. Sinteticamente, il rapporto è suddiviso come di seguito riportato:

Titolo sezione	Pagina
Adjustment Summary	1
Summary of Tie Points	1
Summary of Solution Points	1
Tie Point Projection Error Per Image	2
Standard Deviation of Exterior Orientation	2
Camera Calibration	2
Image Positioning Deviations	2
Initial Image Positions and Adjusted Positions	2
Cross Matches	3
Overlap Map	4
Ground Control Points Summary	5
Ground Control Point Deviations	5
Initial GCP Positions and Adjusted GCP Positions	6
Ground Control Points Reprojection Residual	7
Check Point Deviations	10



Adjustment Report

Project Name: DTLF_2610_1253

Adjustment Summary

Project Name	DTLF_2610_1253
Report Time	2021-11-4 17:01:25
Number of Input Images	563
Number of Adjusted Images	563
Spatial Reference	WGS_1984_UTM_Zone_32N/VCS:WGS_1984
Number of Tie Points	966826
Number of Solution Points	144969
Mean Reprojection Error / Sigma Naught (Pixel)	0,27 / 0,30
Ground Resolution (m)	0,039
Adjustment Type	Frame
Ground Control Points Involved in Adjustment	Yes
Ground Control Point RMSE (m)	0,023, 0,011, 0,004
Check Point RMSE (m)	0,272, 0,101, 0,145

Summary of Tie Points

Min	751
Max	2646
Median	1717
Average	1717

Summary of Solution Points

2-Rays	11150
3-Rays	14062
4-Rays	13982
5-Rays	14338
6-Rays	15461
7-Rays	16313
8-Rays	17203
9-Rays	15621

04/11/2021

10-Rays	12747
11-Rays	8457
12-Rays	4200
13-Rays	1435

Tie Point Projection Error Per Image

Min (Pixel)	0,21 (P0029643)
Max (Pixel)	0,35 (P0029830)
Median (Pixel)	0,26
Average (Pixel)	0,27

Standard Deviation of Exterior Orientation

	X (m)	Y (m)	Z (m)	Omega (degree)	Phi (degree)	Kappa (degree)
Min	0,006	0,006	0,010	0,001	0,001	0,000
Max	0,014	0,013	0,019	0,001	0,001	0,000

Camera Calibration

Focal Length (mm)	Principal Point X (mm)	Principal Point Y (mm)	Distortion Parameters
51,655	0,223	0,024	0,000e+00, -2,103e-06, 3,672e-09, -1,578e-12, 4,053e-07, -1,751e-06

Principal point is a point on the image plane where a line from perspective center (camera lens), perpendicular to the image plane, intersects the image plane. X direction is parallel to the direction of image columns, and Y direction is parallel to the direction of rows. Position of Principal point is referenced to the physical center of image plane. Lens distortion parameters are defined by Brown-Conrady Model.

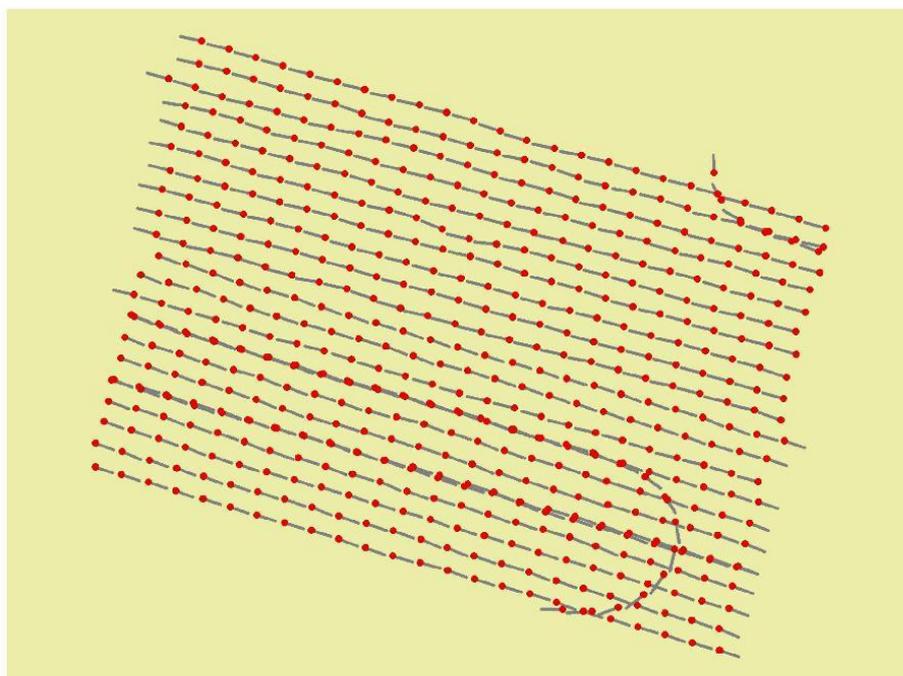
Image Positioning Deviations

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
Min	-41,256	-32,965	0,193
Max	60,747	28,172	12,453
Median	25,637	-8,584	4,659
Average	-0,850	-1,690	4,653

This table shows the image positioning change by adjustment if initial position information from GPS is available.

Initial Image Positions and Adjusted Positions

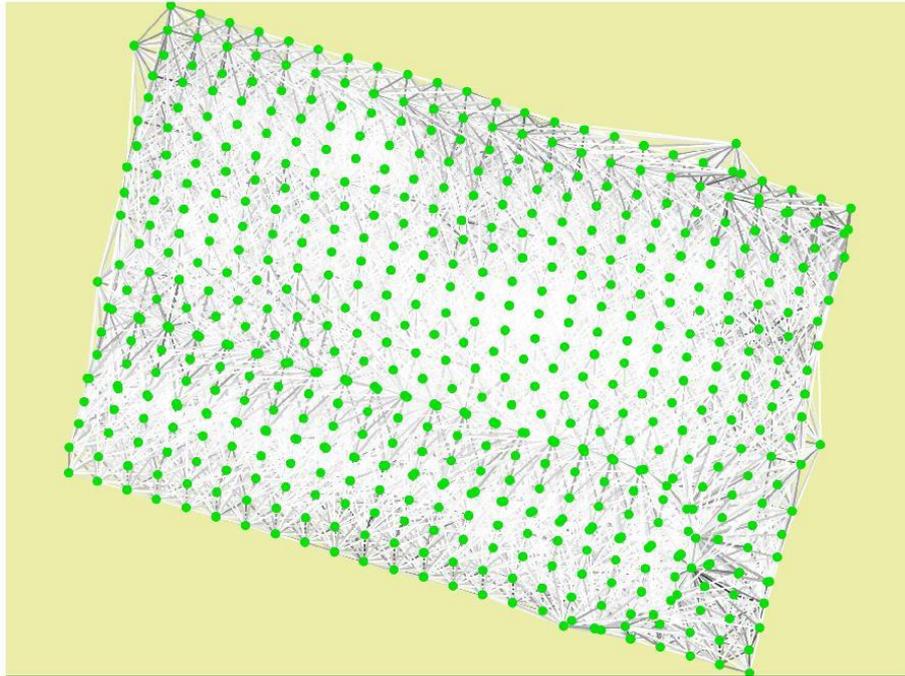
04/11/2021



Red points are initial position of images from GPS. Vectors in gray, exaggerated by 3X, indicate the positioning change by adjustment.

Cross Matches

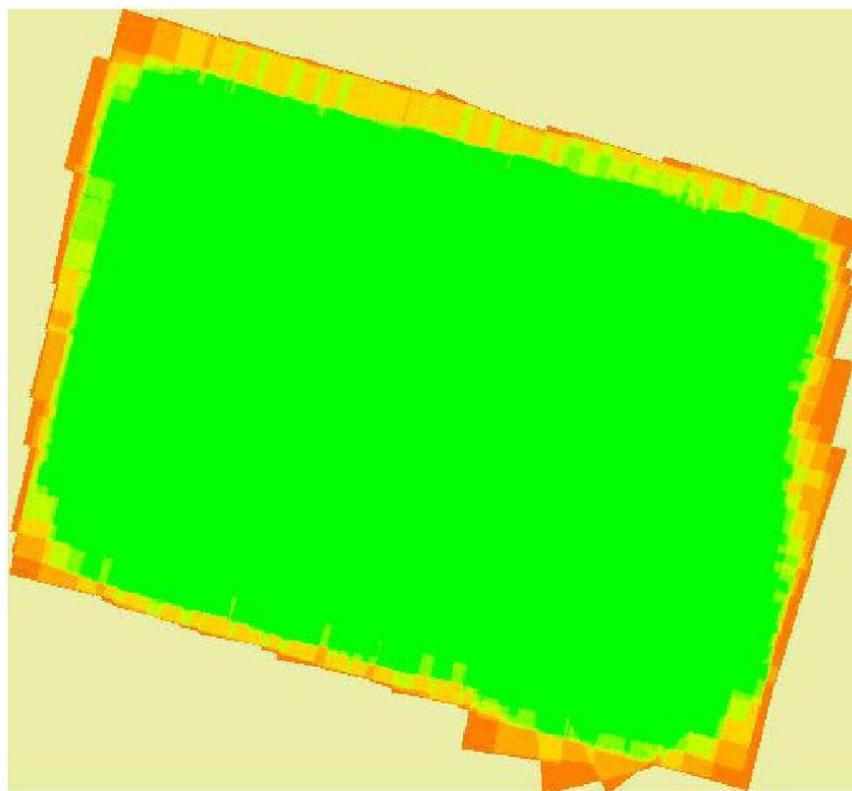
04/11/2021



Green points are image positions after bundle adjustment. A link between two images means tie points found between. Darker color of link means more tie points found.

Overlap Map





Maximum Overlap: 30; Minimum Overlap: 2

Ground Control Points Summary

Number of Input Ground Control Points	27
Minimum Number of Observations	2
Maximum Number of Observations	21
Average Number of Observations	13,2

Ground Control Point Deviations

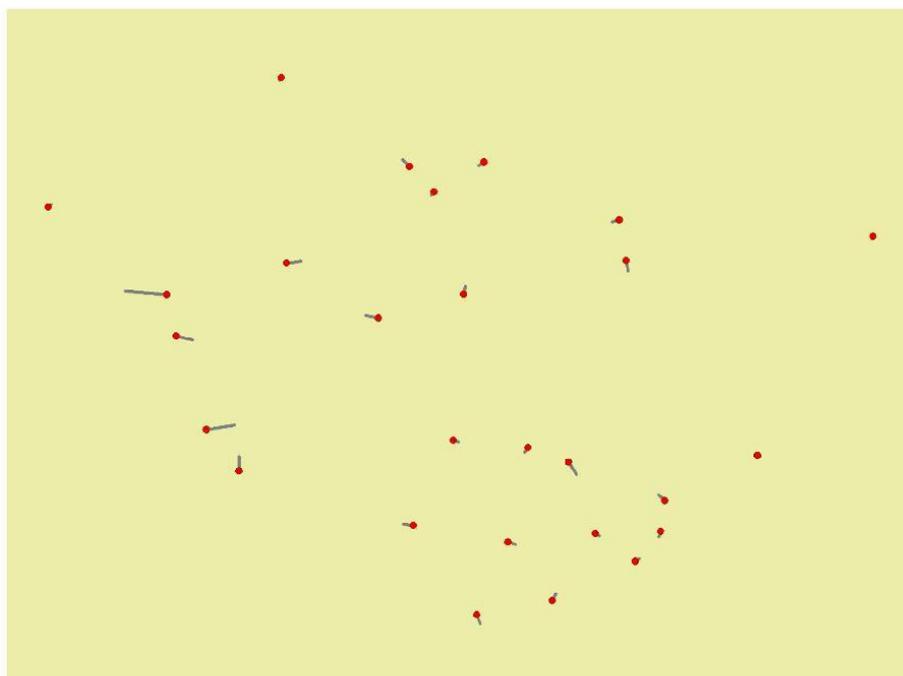
Point ID	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
101 (1732310)	0,008	0,005	0,000
102 (1732311)	-0,003	-0,011	0,000
105 (1732312)	0,010	-0,002	0,002
106 (1732313)	-0,020	0,003	-0,005
107 (1732314)	-0,007	-0,009	-0,004
108 (1732315)	0,016	-0,024	0,003
112 (1732316)	0,015	-0,004	-0,001

04/11/2021

Point ID	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
113 (1732317)	-0,012	0,012	0,000
123 (1732318)	0,006	-0,018	-0,000
124 (1732319)	0,007	0,014	0,006
173 (1732328)	0,008	-0,004	-0,002
235 (1732338)	-0,001	0,029	-0,007
238 (1732339)	0,031	-0,007	-0,005
242 (1732340)	0,005	0,006	0,000
243 (1732341)	-0,004	-0,004	-0,002
245 (1732342)	-0,010	-0,007	-0,005
246 (1732343)	-0,014	0,014	0,005
247 (1732344)	0,003	-0,020	-0,001
249 (1732345)	0,002	0,015	-0,001
250 (1732346)	-0,002	-0,004	-0,002
252 (1732347)	0,005	-0,001	0,003
255 (1732348)	-0,081	0,007	0,009
258 (1732349)	-0,025	0,005	0,002
259 (1732350)	0,028	0,004	0,002
260 (1732351)	-0,006	-0,006	0,001
265 (1732352)	-0,014	-0,004	0,001
267 (1732353)	0,055	0,009	0,001
RMSE	0,023	0,011	0,004
Min	-0,081	-0,024	-0,007
Max	0,055	0,029	0,009
Median	0,002	-0,002	0,000
Average	-0,000	-0,000	0,000

Initial GCP Positions and Adjusted GCP Positions

04/11/2021



Red points are initial position of GCPs. Vectors in gray, exaggerated by 2018X, indicate the positioning change by adjustment.

Ground Control Points Reprojection Residual

Point ID	Image ID	Image Name	Residual X (pixel)	Residual Y (pixel)
238	486	P0030105	-10,155	-4,148
249	470	P0030089	-6,780	-2,394
123	159	P0029778	-1,983	4,953
255	381	P0030000	0,064	-5,141
235	440	P0030059	3,130	3,972
235	487	P0030106	2,702	4,166
235	439	P0030058	2,587	4,123
235	542	P0030161	2,689	3,914
245	525	P0030144	3,487	-3,113
255	382	P0030001	0,881	-4,577
255	333	P0029952	0,824	-4,570
255	92	P0029711	1,217	-4,340
235	392	P0030011	2,452	3,758
247	272	P0029891	3,818	-2,089
255	335	P0029954	0,343	-4,206
123	400	P0030019	-3,824	1,583

04/11/2021

Point ID	Image ID	Image Name	Residual X (pixel)	Residual Y (pixel)
255	197	P0029816	-0,126	4,030
255	140	P0029759	0,494	-3,863
255	196	P0029815	0,211	3,785
235	247	P0029866	2,247	3,040
255	141	P0029760	1,202	-3,577
255	93	P0029712	1,388	-3,411
245	279	P0029898	1,997	-3,043
267	198	P0029817	1,147	-3,446
255	94	P0029713	1,502	-3,302
247	519	P0030138	3,473	-0,921
267	199	P0029818	1,641	-3,156
267	439	P0030058	1,058	-3,334
255	383	P0030002	0,911	-3,373
267	438	P0030057	0,955	-3,227
267	197	P0029816	0,736	-3,242
255	142	P0029761	1,025	-3,156
247	466	P0030085	2,972	-1,451
108	129	P0029748	1,915	2,617
123	353	P0029972	-0,040	-3,116
247	517	P0030136	-2,712	1,495
247	465	P0030084	-1,749	2,434
255	195	P0029814	-0,153	2,950
123	256	P0029875	1,196	-2,606
108	208	P0029827	-0,374	-2,650
238	335	P0029954	-2,474	1,009
123	257	P0029876	-2,634	-0,010
267	437	P0030056	0,722	-2,526
243	285	P0029904	1,936	-1,657
108	322	P0029941	0,737	2,435
267	486	P0030105	0,820	-2,393
123	64	P0029683	-0,630	-2,425
108	128	P0029747	2,014	1,429
267	150	P0029769	0,557	-2,365
243	284	P0029903	2,277	0,769
267	44	P0029663	-1,791	-1,453
267	149	P0029768	0,356	-2,273
267	43	P0029662	-1,103	2,015
235	152	P0029771	0,243	-2,224

04/11/2021

Point ID	Image ID	Image Name	Residual X (pixel)	Residual Y (pixel)
247	518	P0030137	2,216	0,271
238	195	P0029814	0,918	-2,000
235	41	P0029660	-0,438	2,117
238	196	P0029815	0,928	-1,946
267	151	P0029770	0,794	-1,968
250	267	P0029886	2,106	0,172
267	389	P0030008	0,905	-1,898
238	382	P0030001	-0,421	2,057
112	447	P0030066	-0,970	-1,827
246	182	P0029801	-1,144	-1,710
235	42	P0029661	-0,451	2,006
247	274	P0029893	0,627	1,939
247	225	P0029844	1,519	-1,356
246	471	P0030090	-1,337	-1,533
235	489	P0030108	0,557	-1,903
267	42	P0029661	-1,282	1,414
247	510	P0030129	1,305	1,391
123	352	P0029971	-0,011	-1,891
235	151	P0029770	-0,263	-1,847
245	523	P0030142	-0,036	1,864
124	114	P0029733	1,849	-0,148
238	141	P0029760	-0,381	1,807
259	476	P0030095	-0,040	1,843
265	511	P0030130	1,504	1,037
124	354	P0029973	1,768	-0,447
238	381	P0030000	-0,902	1,565
267	539	P0030158	1,127	-1,411
235	543	P0030162	0,329	-1,767
102	554	P0030173	1,079	1,430
258	86	P0029705	-0,386	-1,728
123	63	P0029682	-0,911	-1,516
108	209	P0029828	-0,792	-1,567
108	497	P0030116	-1,029	-1,396
259	428	P0030047	-0,404	1,653
250	266	P0029885	1,464	-0,862
108	127	P0029746	1,662	0,265
102	451	P0030070	0,895	1,421
123	158	P0029777	-0,448	1,605

04/11/2021

Point ID	Image ID	Image Name	Residual X (pixel)	Residual Y (pixel)
123	111	P0029730	-1,500	-0,698
238	334	P0029953	-0,508	1,568
265	176	P0029795	-0,399	-1,576
108	320	P0029939	1,493	0,627
259	379	P0029998	-1,011	1,237
246	525	P0030144	-0,607	-1,463
259	475	P0030094	-0,091	1,575
238	333	P0029952	-0,734	1,383

Check Point Deviations

Point ID	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
131 (1732320)	0,060	0,027	-0,020
132 (1732321)	0,011	-0,027	0,006
133 (1732322)	-0,005	0,020	-0,016
141 (1732323)	0,007	-0,033	0,087
148 (1732324)	-0,021	-0,134	0,055
161 (1732325)	-0,046	0,014	-0,007
162 (1732326)	-0,042	0,007	0,062
163 (1732327)	-0,053	0,016	0,071
174 (1732329)	0,011	0,029	-0,080
210 (1732330)	-0,188	-0,020	-0,284
211 (1732331)	0,154	0,030	-0,161
215 (1732332)	0,087	-0,013	-0,021
216 (1732333)	1,072	0,381	-0,420
220 (1732334)	-0,008	0,031	-0,189
221 (1732335)	0,157	-0,005	-0,100
226 (1732336)	-0,004	0,007	-0,022
227 (1732337)	-0,048	-0,046	0,012
RMSE	0,272	0,101	0,145
Average	0,067	0,017	-0,061

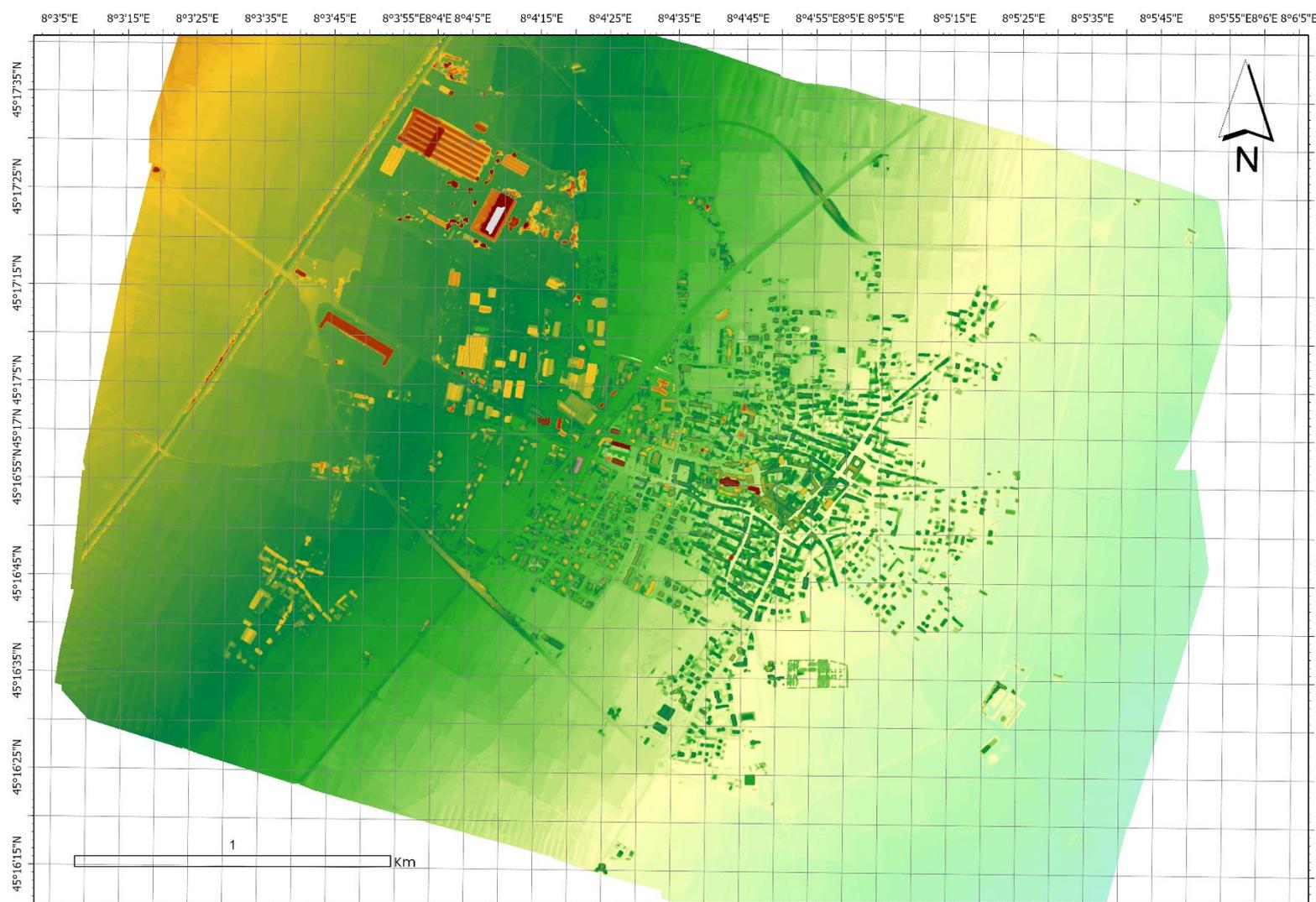
04/11/2021

6.3.3 DSM ed Ortomosaico

I raster degli output prodotti da ArcGIS Pro sono di seguito riportati con le rispettive caratteristiche.

Tabella 14 DSM prodotto da ArcGIS Pro: specifiche

Prodotto	Digital Surface Model (DSM)
Dimensione (pixel)	40358 x 36804
Risoluzione (cm/pix)	18.5
Sistema di coordinate	WGS 84 (EPSG: 4326)
GSD	0.185



Output 3 DSM generato da ArcGIS Pro

Tabella 15 Ortomosaico prodotto da ArcGIS Pro: specifiche

Prodotto	Ortomosaico
Dimensione (pixel)	102987 x 95842
Risoluzione (cm/pix)	3.70
Sistema di coordinate	WGS 84 (EPSG: 4326)
GSD	0.04



Output 4 Ortomosaico generato da ArcGIS Pro

6.4 PCI Geomatics Catalyst Professional

PCI Geomatics è la società sviluppatrice di Geomatica®, un software desktop completo e integrato che include strumenti per il telerilevamento, la fotogrammetria digitale, l'analisi geospaziale, la produzione di mappe, la mosaicatura delle immagini e altro ancora. [27] Il software Geomatica® è recentemente diventato CATALYST Professional®.

Di seguito viene descritto il procedimento utilizzato per la creazione del DSM e dell'ortofoto.

6.4.1 Workflow

Aperto il software **CATALYST Professional Toolbar**, si seleziona il tool **OrthoEngine** (Figura 59)



Figura 59 Catalyst Professional – step#1: Apertura Ortho Engine

6.4.1.1 Setup Informazioni sul Progetto (Project Information)

Per creare un progetto è necessario selezionare preventivamente un modello matematico, ossia di una relazione matematica utilizzata per correlare i pixel di un'immagine per correggere le posizioni sul terreno e tenere conto delle distorsioni note. Il modello matematico che viene scelto influisce direttamente sul risultato del progetto. [28]

Nel menu **File**, fare clic su **New**: si aprirà la finestra **Project Information** in cui è necessario digitare un nome file per il progetto in corso nella casella apposita. Il nome inserito apparirà sulla barra del titolo della finestra di OrthoEngine. Volendo, è possibile inserire in **Description** una breve descrizione del progetto che può aiutare a identificare l'oggetto e i contenuti del lavoro stesso. [28]

In **Math Modeling Method**, è opportuno scegliere **Aerial Photography**: si tratta di un modello matematico rigoroso che compensa le distorsioni note per calcolare la posizione e l'orientamento della fotocamera nel momento in cui è stata scattata l'immagine. [28]

Nell'area **Options**, in **Type**, si sceglie il tipo di fotocamera che corrisponde al dataset di immagini utilizzate. In questo caso, viene selezionato **Digital / UAV**, opzione idonea per immagini di frame generate da array di dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD). In **Exterior Orientation**, si sceglie l'origine dell'orientamento esterno (EO), ossia **Compute from GCPs and tie points** per utilizzare punti noti e le coordinate a terra (Figura 60). [28]

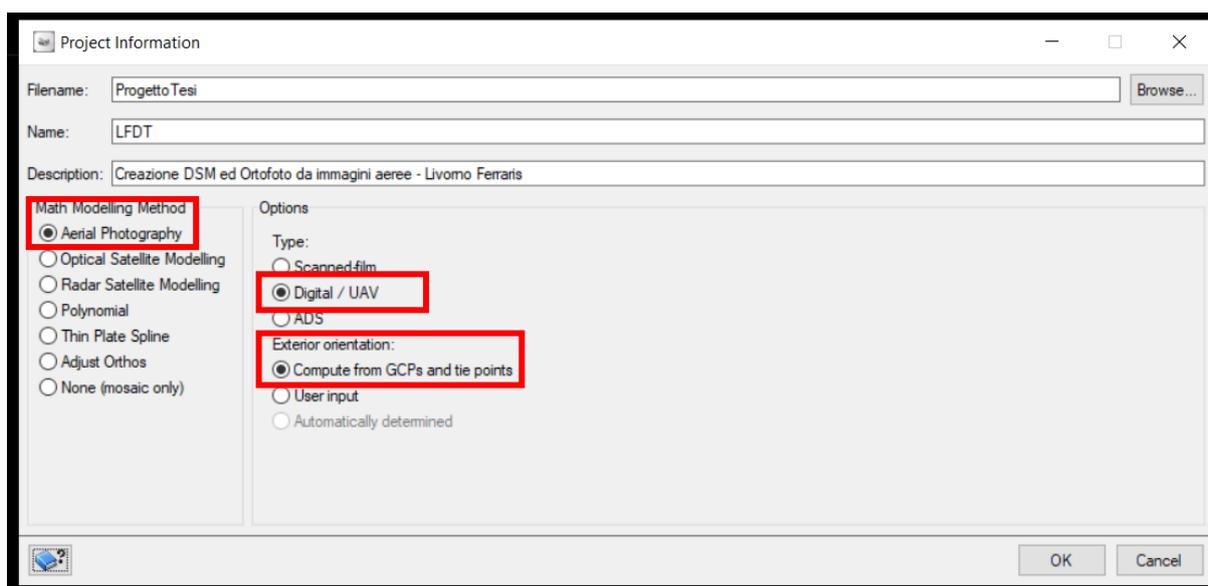


Figura 60 Catalyst Professional – step#: Set-up informazioni iniziali progetto

6.4.1.2 Calibrazione della fotocamera

Cliccando "OK" allo step precedente, si apre in automatico la schermata **Digital/UAV Camera-Calibration Information** (Figura 61) che consente il settaggio dei parametri per l'orientamento interno della fotocamera. È possibile caricare automaticamente i dati principali della camera, selezionando la voce **Image EXIF** ed importando un'immagine qualsiasi dal dataset a disposizione (Figura 62):

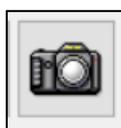


Figura 61 Catalyst Professional – step#2: Icona impostazioni parametri calibrazione fotocamera

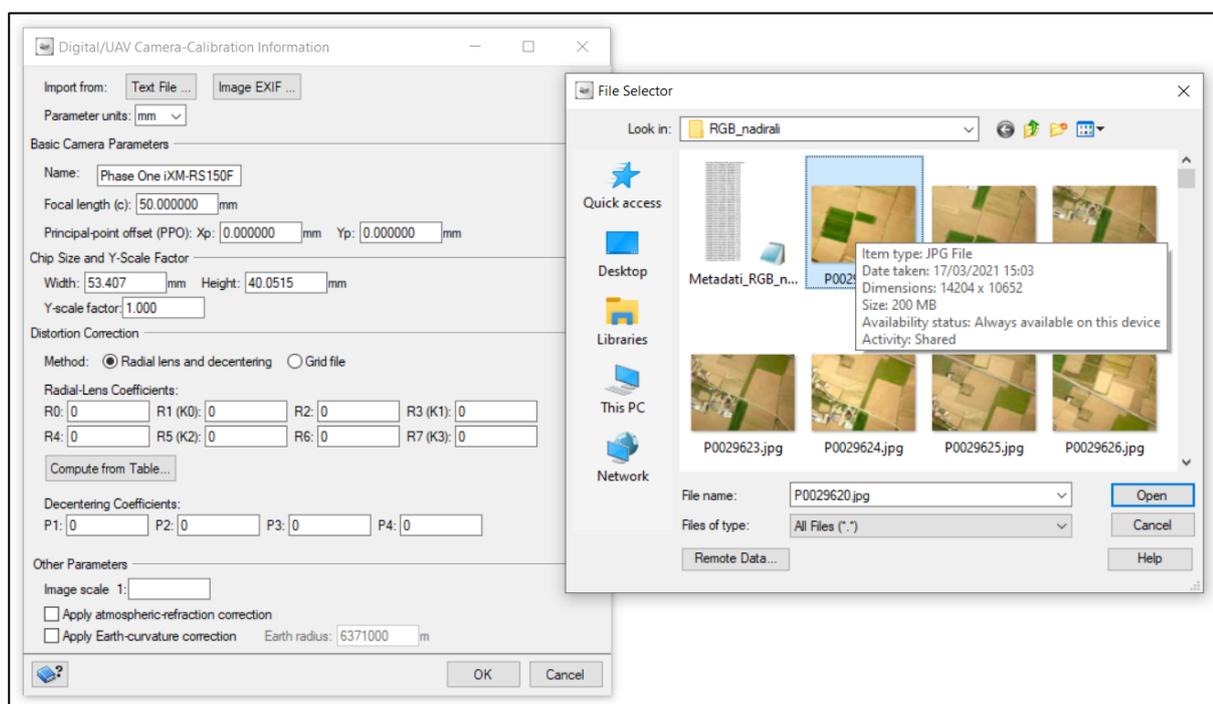


Figura 62 Catalyst Professional – step#2: Importazione parametri fotocamera

6.4.1.3 Impostazione sistema di riferimento

Inseriti i parametri di calibrazione della fotocamera, automaticamente si aprirà la schermata **Set Projection** (Figura 63)

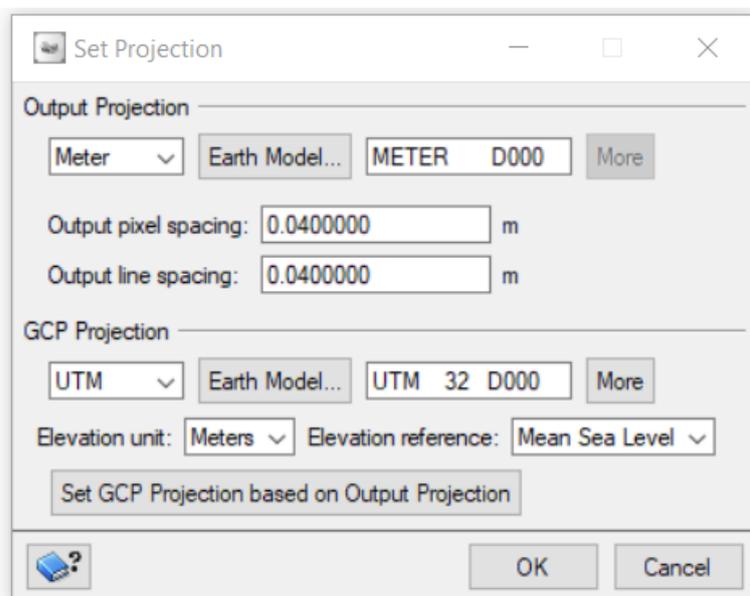


Figura 63 Catalyst Professional – step#3: Impostazione sistema di riferimento

in cui è necessario inserire: sistema di riferimento del progetto e dei GCP, nonché la GSD dell'immagine. Per il caso studio specifico sono stati impostati:

Tabella 16 Catalyst Professional – Valori impostati per sistema di riferimento

Output Projection:	WGS 84 (EPSG: 4326)
Output pixel / line spacing:	0.04 m
GCP Projection:	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG: 32632)

6.4.1.4 Caricamento immagini

Lo step successivo consiste nel caricamento delle immagini sul progetto. Dalla schermata principale di OrthoEngine, si seleziona dal menu a tendina, la voce **Data Input** (Figura 64):

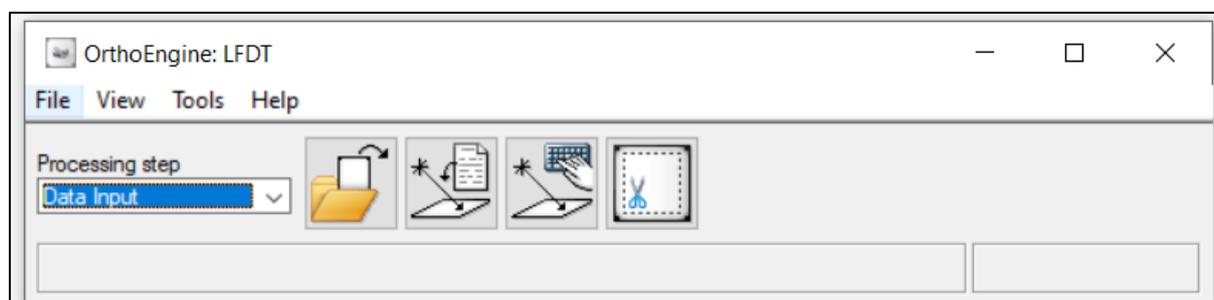


Figura 64 Catalyst Professional – step#4: Caricamento immagini



Cliccando sull'icona **Open a new or an existing image** () , è possibile selezionare la cartella in cui sono contenute le immagini da processare (**Error! Reference source not found.**).

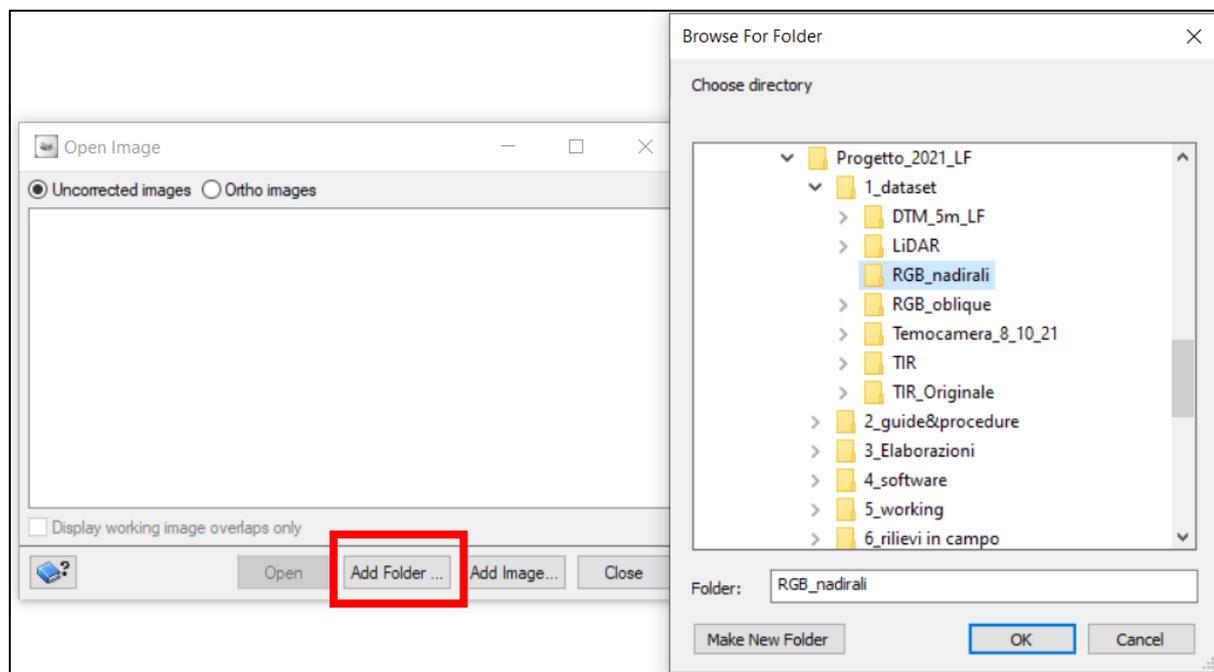


Figura 65 Catalyst Professional – step#4: selezione cartella immagini

A questo punto, è necessario fornire al software le informazioni riguardanti l'orientamento esterno del dataset, tramite l'icona **Import Exterior Orientation**



Data From Text File (). In fase preliminare, è stato opportunamente create un file di testo contenente i valori dei parametri X, Y e Z riferiti a tutti i 563 fotogrammi, come da esempio sottostante (Tabella 17):

Tabella 17 Catalyst Professional: esempio tabella dati di orientamento esterno

Label	X	Y	Z
P0029620.jpg	8.054279	45.276994	713
P0029621.jpg	8.055804	45.27669	707.79
P0029622.jpg	8.057389	45.276384	704.6

Completata l'operazione, la schermata di import apparirà come riportato in Figura 66:

Import Exterior Orientation Data From Text File

Projection

Output projection: UTM 32 D000

Input projection: UTM Earth Model... UTM 32 D000 More

Set Input Projection based on Output Projection

Input angle unit: Degrees Radians Grads DMS

EO vertical datum: MSL Ellipsoidal

File Information

File format: ImageID X Y Z

Accuracy: 0.01 eX 0.01 eY 0.01 eZ
1 eOmega 1 ePhi 10 eKappa

Text file: D:\PROGETTI\FD_LT\3_PCN\input\ext-ori.txt Browse

Flight line information

Flight line break angle (degrees): 22.5

Extracted Data

Image ID	X	Y	Z
P0029620	8.054279	45.276994	713.000000
P0029621	8.055804	45.276690	707.790000
P0029622	8.057389	45.276384	704.600000
P0029623	8.058990	45.276035	714.740000
P0029624	8.060586	45.275716	718.360000
P0029625	8.062166	45.275397	715.160000
P0029626	8.063751	45.275063	716.800000

Select All Select None Delete

Edit Selected Images

Rotate kappa (degrees): 90 180 -90

GPS/INS data for 563 photos are read in from file.

OK Cancel Import

Figura 66 Catylist Professional – step#4: Parametri per l'orientamento esterno importati

Premendo "OK", è possibile chiudere la schermata e passare al passaggio successivo.

6.4.1.5 Raccolta dei GCP/TP

Dalla toolbar principale di OrthoEngine, dal menu **Processing step**, si accede al pannello **GCP/TP Collection** (Figura 67).

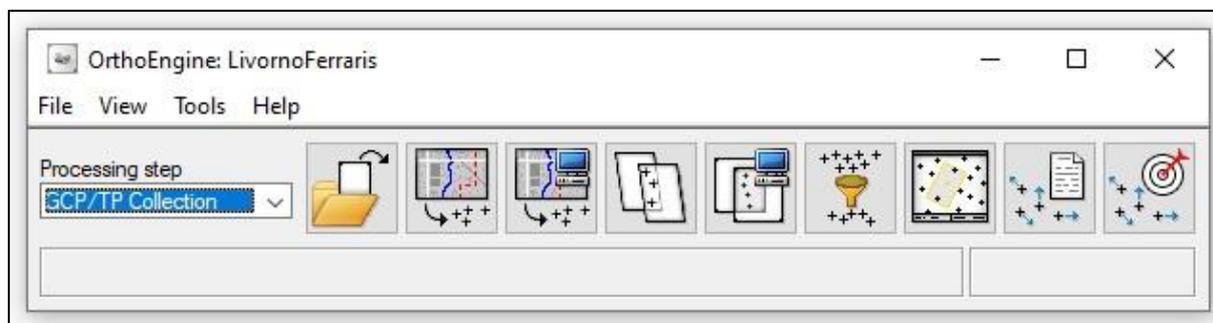


Figura 67 Catalyst Professional – step#5: Gestione GCP e tie points

Analogamente a come è stato fatto con gli altri software, con Catalyst Professional, è possibile importare e gestire manualmente i punti di controllo (GCP) e di conseguenza collimare anche quelli di collegamento (TP).

Nella fattispecie, la procedura di collimazione manuale GCP/TP prevede che vi sia almeno un punto collimato tra quelli noti per ogni singolo fotogramma: pertanto risulta non applicabile al dataset in oggetto.

Si è deciso quindi di procedere con la procedura automatica di acquisizione dei GCP (Figura 68) che prevede in input un'immagine di controllo georeferenziata (**Control source**) e un modello di elevazione digitale (**Elevation information**). Si è scelto utilizzare i prodotti di output, DSM e ortomosaico, ottenuti da Metashape.

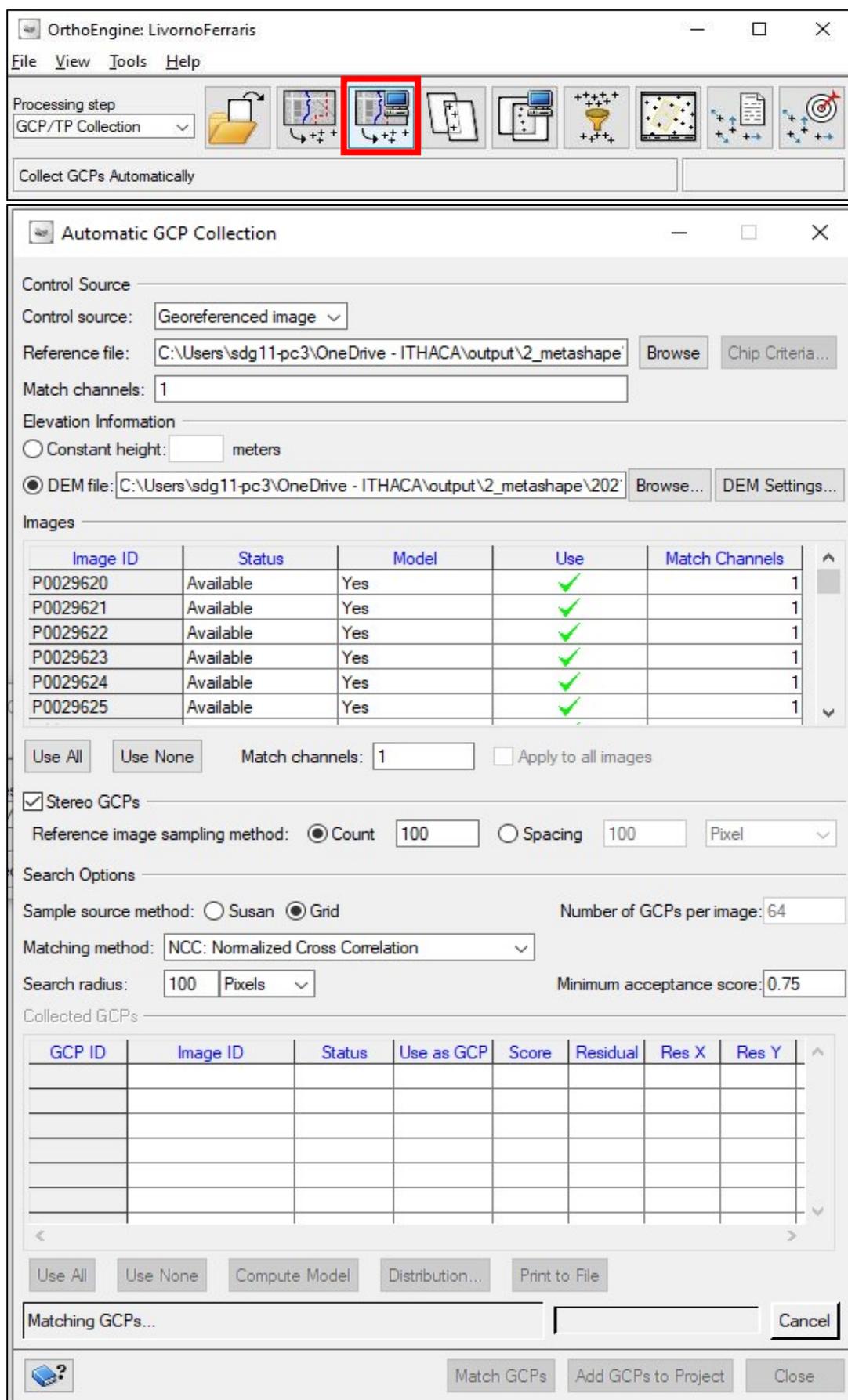


Figura 68 Catalyst Professional – step#5: procedura automatica di acquisizione GCP

Il passaggio successivo consiste nell'acquisizione automatica dei tie points (**Automatically Collect tie points**), impostando come **Matching method** dal menu di selezione evidenziato in Figura 69, il **FBM: Feature-based matching** e lasciando le altre impostazioni invariate.

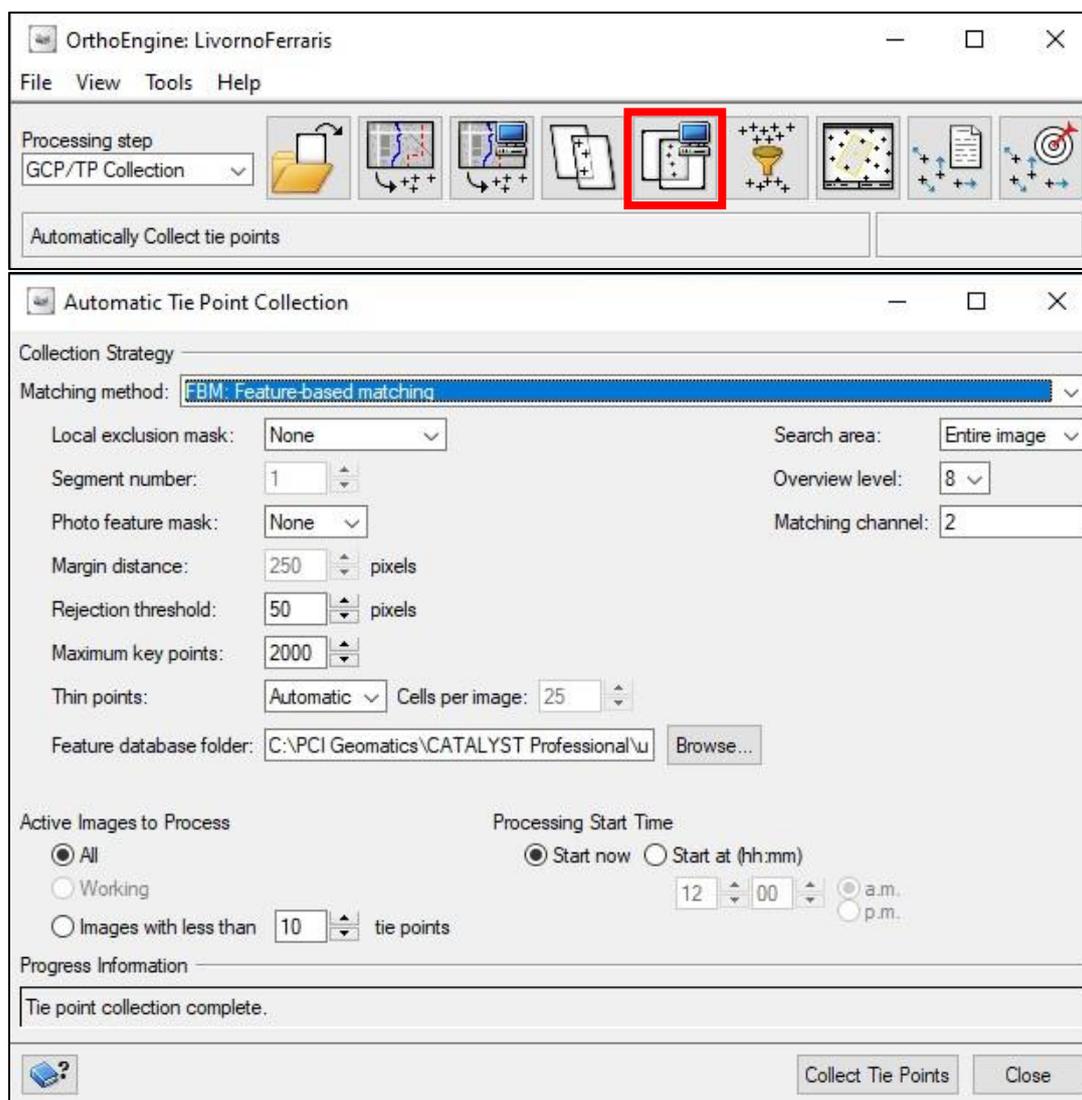
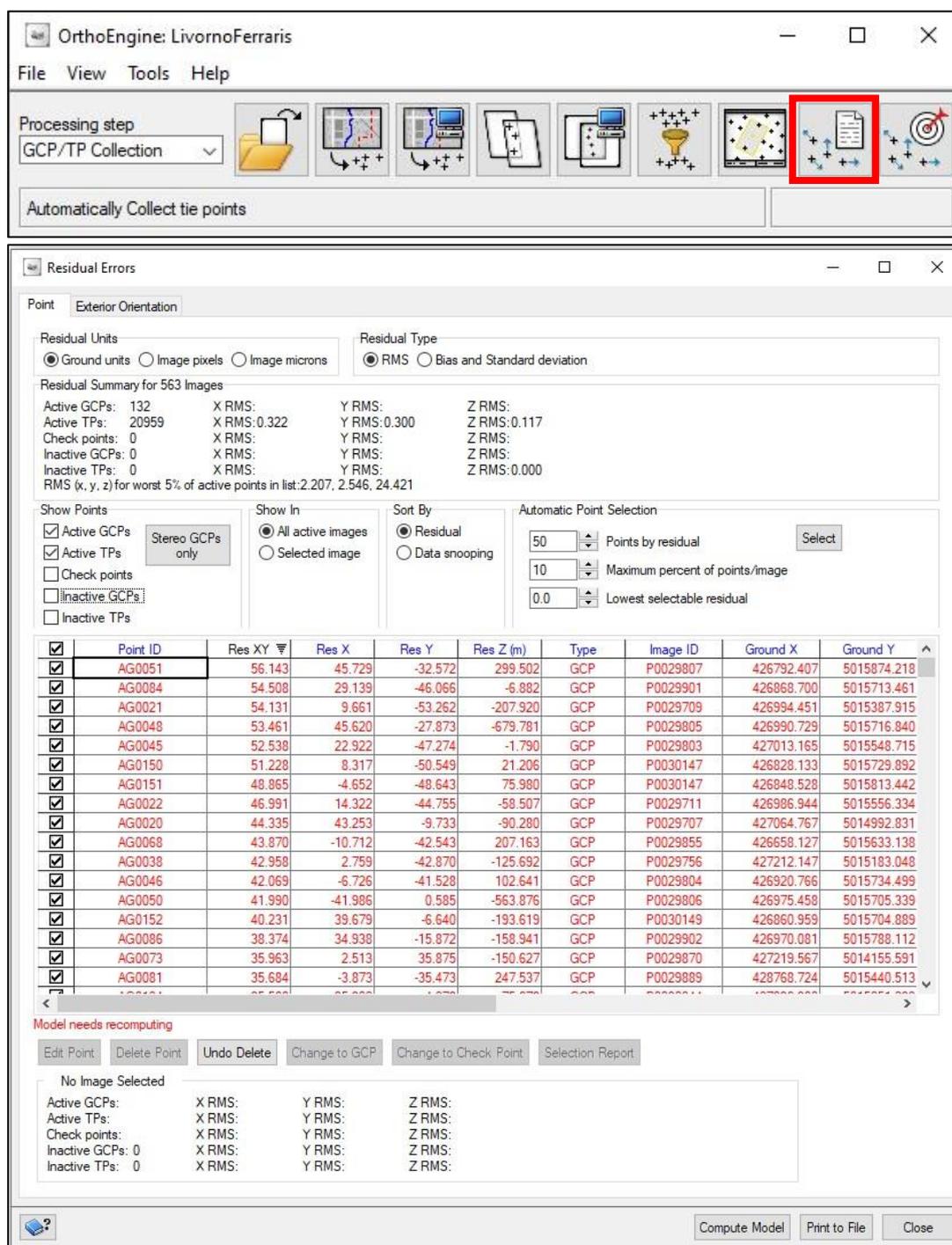


Figura 69 Catalyst Professional – step#5: acquisizione automatica TP

Al termine della procedura e prima di far girare il modello matematico scelto, è opportuno aprire la schermata **Residual Errors** (Figura 70) per verificare l'accuratezza dei GCP / TP acquisiti dal software.



OrthoEngine: LivornoFerraris

File View Tools Help

Processing step: GCP/TP Collection

Automatically Collect tie points

Residual Errors

Point: Exterior Orientation

Residual Units: Ground units Image pixels Image microns

Residual Type: RMS Bias and Standard deviation

Residual Summary for 563 Images

Active GCPs: 132	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Active TPs: 20959	X RMS: 0.322	Y RMS: 0.300	Z RMS: 0.117
Check points: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Inactive GCPs: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Inactive TPs: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS: 0.000

RMS (x, y, z) for worst 5% of active points in list: 2.207, 2.546, 24.421

Show Points: Active GCPs Active TPs Check points Inactive GCPs Inactive TPs

Show In: All active images Selected image

Sort By: Residual Data snooping

Automatic Point Selection: 50 Points by residual, 10 Maximum percent of points/image, 0.0 Lowest selectable residual

<input checked="" type="checkbox"/>	Point ID	Res XY	Res X	Res Y	Res Z (m)	Type	Image ID	Ground X	Ground Y
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0051	56.143	45.729	-32.572	299.502	GCP	P0029807	426792.407	5015874.218
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0084	54.508	29.139	-46.066	-6.882	GCP	P0029901	426868.700	5015713.461
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0021	54.131	9.661	-53.262	-207.920	GCP	P0029709	426994.451	5015387.915
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0048	53.461	45.620	-27.873	-679.781	GCP	P0029805	426990.729	5015716.840
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0045	52.538	22.922	-47.274	-1.790	GCP	P0029803	427013.165	5015548.715
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0150	51.228	8.317	-50.549	21.206	GCP	P0030147	426828.133	5015729.892
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0151	48.865	-4.652	-48.643	75.900	GCP	P0030147	426848.528	5015813.442
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0022	46.991	14.322	-44.755	-58.507	GCP	P0029711	426986.944	5015556.334
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0020	44.335	43.253	-9.733	-90.280	GCP	P0029707	427064.767	5014992.831
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0068	43.870	-10.712	-42.543	207.163	GCP	P0029855	426658.127	5015633.138
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0038	42.958	2.759	-42.870	-125.692	GCP	P0029756	427212.147	5015183.048
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0046	42.069	-6.726	-41.528	102.641	GCP	P0029804	426920.766	5015734.499
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0050	41.990	-41.986	0.585	-563.876	GCP	P0029806	426975.458	5015705.339
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0152	40.231	39.679	-6.640	-193.619	GCP	P0030149	426860.959	5015704.889
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0086	38.374	34.938	-15.872	-158.941	GCP	P0029902	426970.081	5015788.112
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0073	35.963	2.513	35.875	-150.627	GCP	P0029870	427219.567	5014155.591
<input checked="" type="checkbox"/>	AG0081	35.684	-3.873	-35.473	247.537	GCP	P0029889	428768.724	5015440.513

Model needs recomputing

Edit Point Delete Point Undo Delete Change to GCP Change to Check Point Selection Report

No Image Selected

Active GCPs:	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Active TPs:	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Check points:	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Inactive GCPs: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Inactive TPs: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:

Compute Model Print to File Close

Figura 70 Catalyst Professional - step#5: Controllo degli errori residui su GCP/TP

Sono stati quindi rimossi i tie point aventi un elevato errore residuo, fino ad ottenere un RMSE su X e Y, di circa 0,04 m. Bisogna, tuttavia, fare attenzione a non rimuovere un numero eccessivo di GCP, altrimenti non sarà possibile eseguire il calcolo del modello matematico:

6.4.1.6 Calcolo del modello

La fase successiva del processamento consiste nel calcolo del modello in funzione dei parametri raccolti durante il passaggio precedente. Accedendo alla schermata principale di OrthoEngine, si seleziona **Model Calculations** e si avvia la procedura che consente l'allineamento in sequenza del dataset di immagini (**Performing bundle adjustment**), come mostrato in Figura 71:

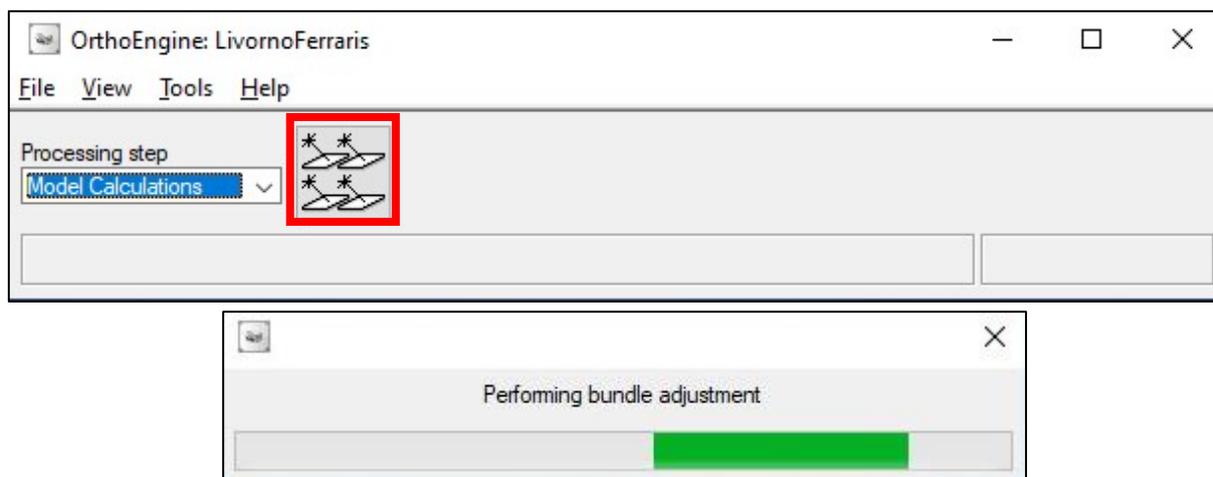


Figura 71 Catalyst Professional – step#6: Calcolo del modello matematico

Terminato questo passaggio la fase successiva consiste nella creazione del modello di elevazione digitale

6.4.1.7 Creazione DEM da coppie di immagini epipolari

In OrthoEngine è possibile creare il DEM utilizzando diversi metodi. Quelli principali sono:

- 1) Uso dei GCP, TP o punti di corrispondenza dell'elevazione.** OrthoEngine utilizza la soluzione del modello matematico (orientamento esterno noto) e le posizioni dei pixel e delle linee dei punti in comune nelle immagini sovrapposte per generare un modello di elevazione digitale (DEM), che viene salvato come file PCIDSK (.pix). Le elevazioni sono calcolate dalla parallasse tra i corrispondenti punti di controllo a terra (GCP), punti di

collegamento e punti di corrispondenza dell'elevazione nelle immagini.
[28]

- 2) Costruire un modello di elevazione digitale da una coppia di immagini epipolari (stereo).** Le immagini epipolari sono coppie stereo che vengono riproiettate in modo che le due immagini di partenza, abbiano un orientamento comune e le caratteristiche di corrispondenza tra le immagini appaiano lungo un asse x comune (Figura 72).

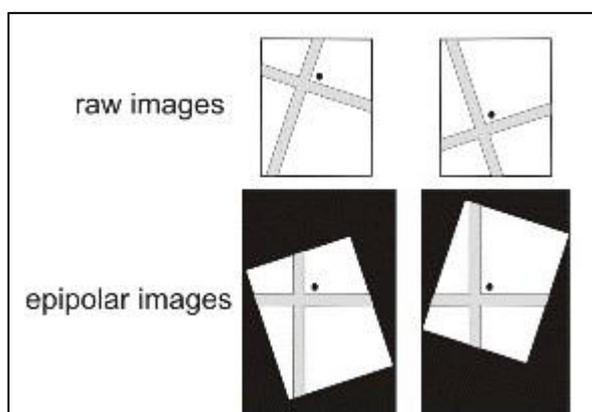


Figura 72 Catalyst Professional - Confronto tra immagini grezze e immagini epipolari [28]

L'utilizzo di immagini epipolari aumenta la velocità del processo di correlazione e riduce la possibilità di corrispondenze errate. OrthoEngine utilizza la correlazione dell'immagine per estrarre i pixel corrispondenti nelle due immagini e quindi utilizza la geometria del sensore dal modello matematico calcolato per calcolare le posizioni x , y e z (Figura 73). [28]

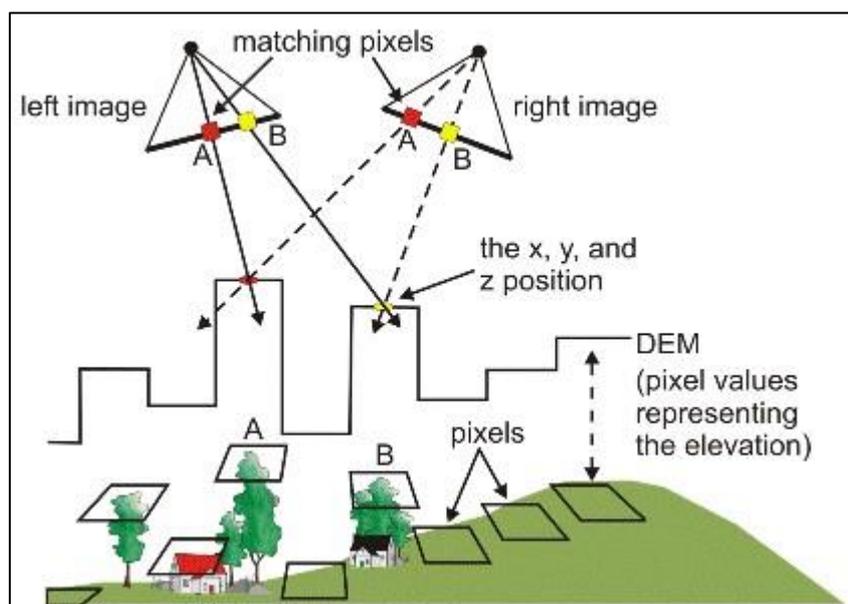


Figura 73 Catalyst Professional - Creare il DEM da una coppia di immagini epipolari [28]

Per la presente trattazione, si è scelto di creare il DEM utilizzando le coppie di immagini stereo.

Dal menu "Processing step" di OrthoEngine si seleziona **DEM From Stereo**: il primo step consiste nella creazione delle stereo-coppie. Cliccando su **Create Epipolar Images** (Figura 74), si accede alla relativa schermata dove bisogna impostare: la cartella di lavoro (**DEM working folder**) e la modalità di selezione delle epipolari (**Epipolar selection**).

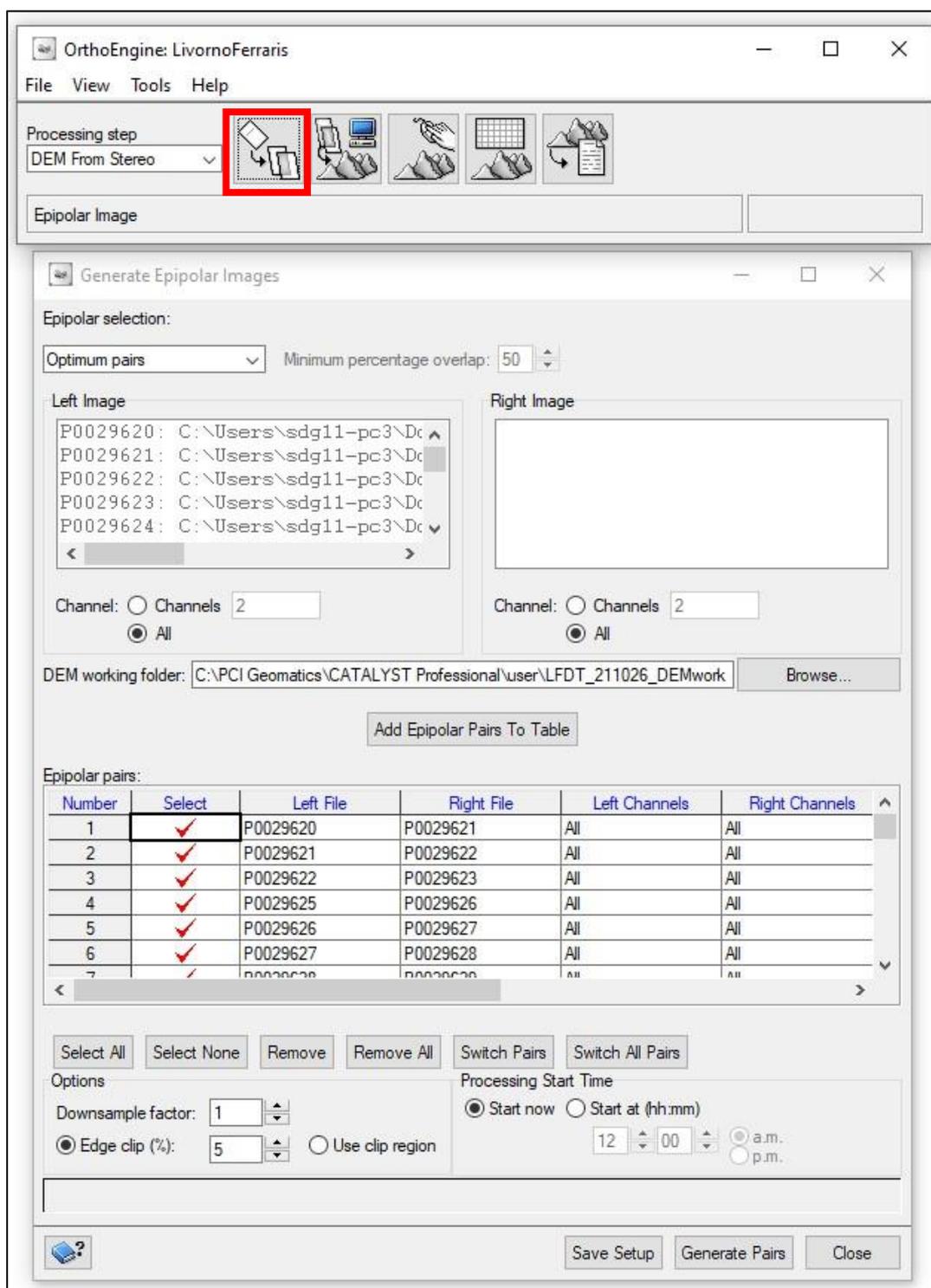


Figura 74 Catalyst Professional – step#7: Schermata creazione immagini epipolari

Per quest'ultimo parametro è selezionata la voce **Optimum pairs**: prima che le coppie vengano selezionate per l'elaborazione, questo metodo distribuisce le immagini su linee di volo contigue e prende in considerazione solo le coppie di immagini della stessa linea di volo, per eliminare le sovrapposizioni laterali. Il

metodo di selezione ottimale è destinato esclusivamente all'elaborazione di immagini aeree, dove il concetto di linee di volo è ben definito. [28].

Create le stereo coppie, lo step successivo consente l'estrazione automatica del modello digitale di elevazione. Cliccando su **Automatic DEM Extraction** (Figura 75), si apre la relativa schermata con i parametri da settare.

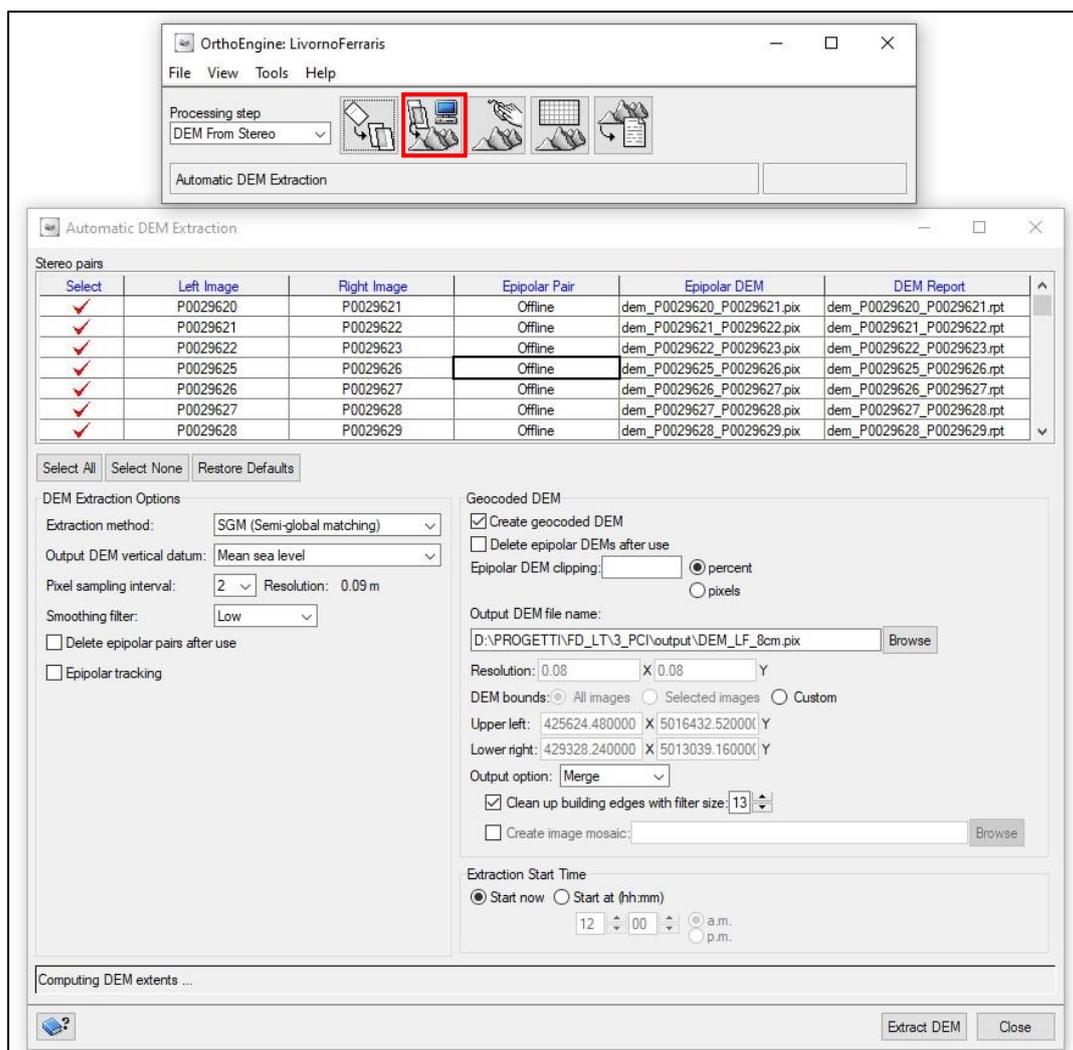


Figura 75 Catalyst Professional – step#7: Estrazione automatica del DEM

Si possono usare due metodi di estrazione del DEM:

- 1) **NCC (correlazione incrociata normalizzata)** produce risultati di qualità inferiore con più errori e meno dettagli, ma con tempi di elaborazione minimi. [28]

- 2) **SGM (corrispondenza semi-globale)** produce risultati di qualità superiore con meno errori e maggiori dettagli, ma il tempo di elaborazione aumenta notevolmente. [28]

Per l'elaborazione in oggetto, è stato impostato il metodo SGM. Inoltre, è stata selezionata l'opzione per creare un DEM georeferenziato (**Geocoded DEM**), impostando una risoluzione spaziale di **0,08 m**, doppia rispetto al GSD delle immagini di partenza.

6.4.1.8 Generazione ortofoto

Ultimata la creazione del modello digitale del terreno, per poter generare l'ortomosaico, è necessario ortorettificare le immagini. Lo step successivo. Dal pannello dell'OrthoEngine si sceglie la voce **Ortho Generation** (Figura 76). All'apertura del pannello, è necessario selezionare dalla colonna di sinistra, tutte le immagini per spostarle nella colonna di destra. Si impostano i parametri del DEM, del formato del file di output, con relativa cartella di destinazione e la modalità di ricampionamento dei pixel e si avvia il processamento.

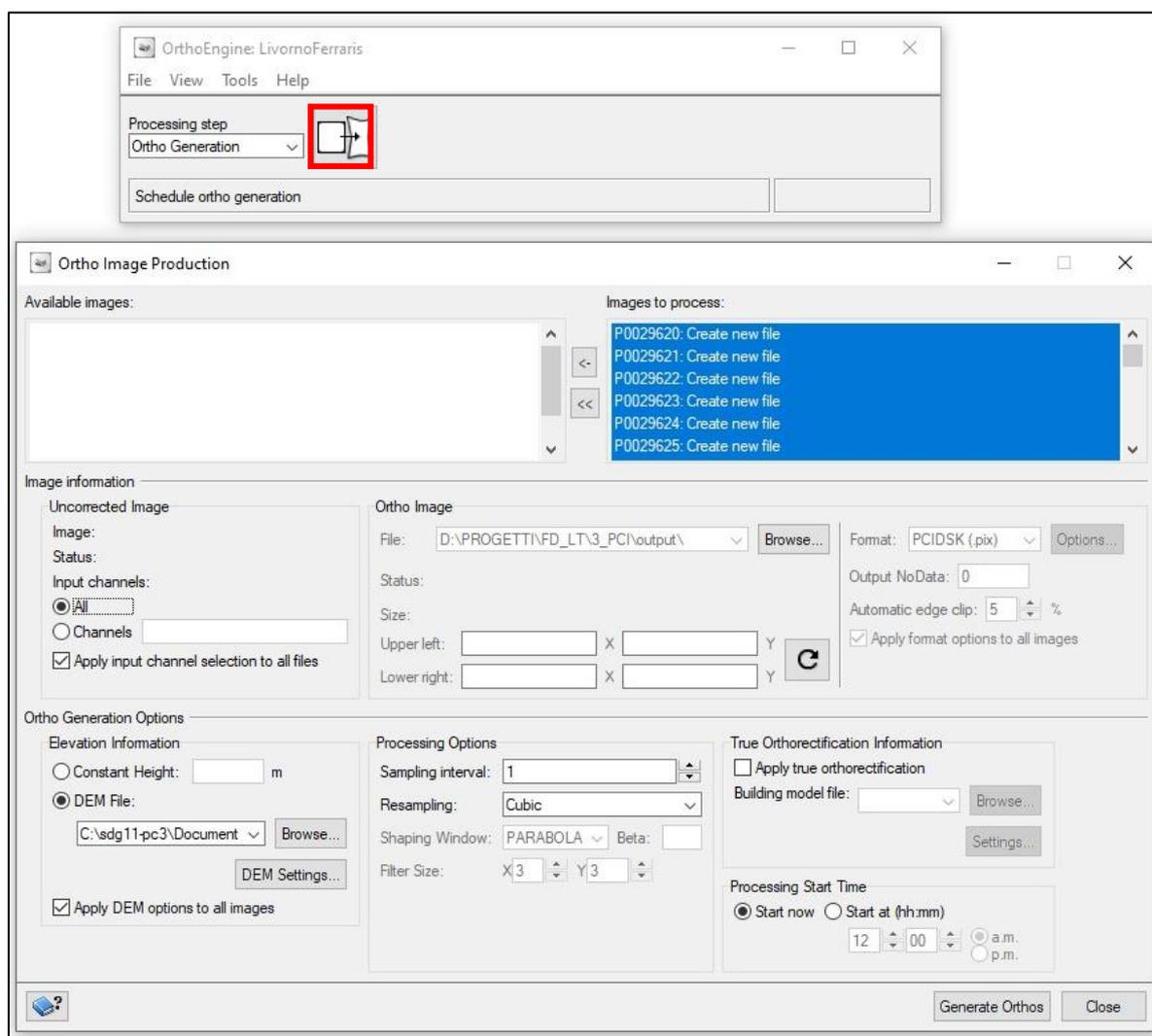


Figura 76 Catalyst Professional - step#8: Generazione ortofoto

L'ultima fase del lavoro consisterà nella creazione del mosaico delle ortofoto appena generate.

6.4.1.9 Mosaicatura

Cliccando su **Mosaic** comparirà a video la schermata del **Mosaic tool** di OrthoEngine (Figura 77) dove è possibile:

- Visualizzare l'anteprima del mosaico;
- Gestire le immagini sorgenti interessate dal processo di mosaicatura (le ortofoto dello step precedente);
- Impostare i parametri di esportazione del file dell'ortomosaico;

- Generare le **Cutlines**. Quest'ultime, dette anche "Seamlines" (linee di cucitura), identificano i tratti in cui vengono fatte combaciare due o più immagini adiacenti.

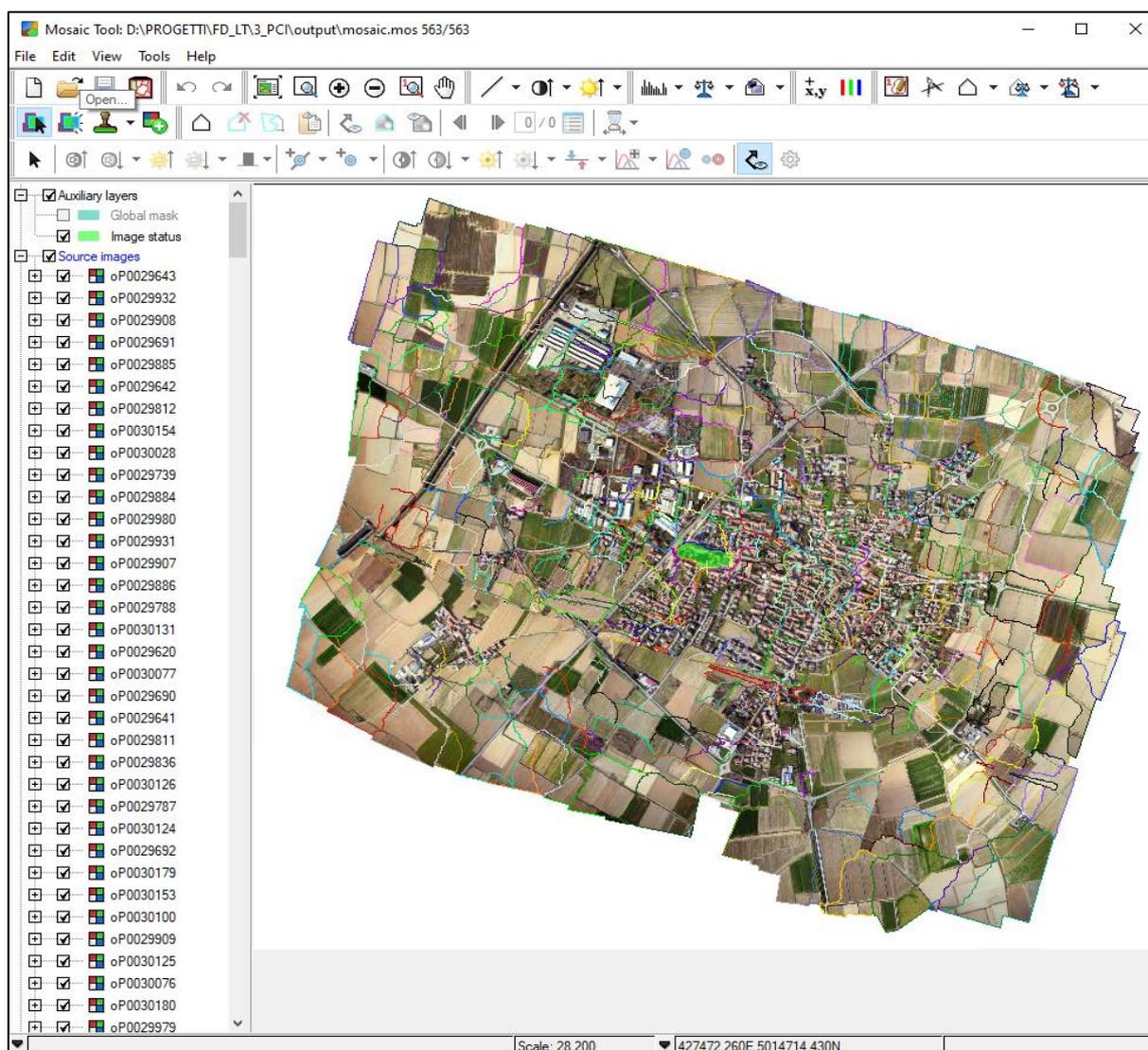


Figura 77 Catalyst Professional - step#9: Mosaic tool con Cutlines create

Per esportare il mosaico in un file, dal menu **Tools** è sufficiente selezionare la voce **Add to mosaic...** (Figura 78):

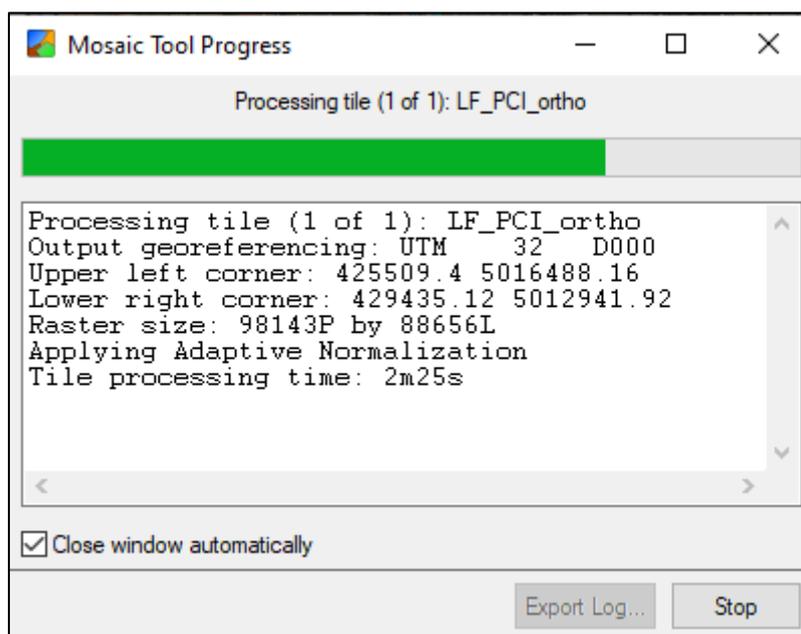


Figura 78 Catalyst Professional - step#9: Esportazione dell'ortomosaico

6.4.2 Risultati del processamento

Tra le opzioni disponibili nel menu a tendina del pannello principale di OrthoEngine, c'è la voce **Reports** che consente di esportare in un file sia il report del progetto (Figura 79) che i valori degli errori residui sui GCP/TP.

Nelle pagine successive, vengono riportati gli output dei due report estratti.

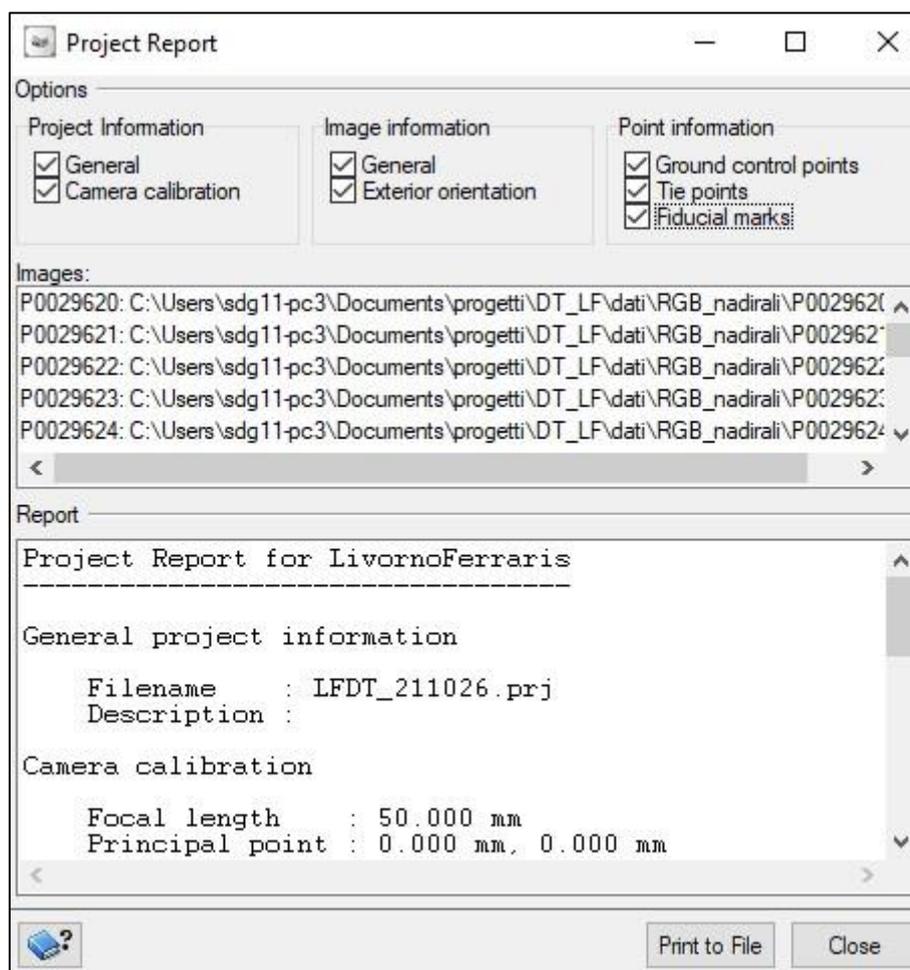


Figura 79 Catalyst Professional – Report del progetto

6.4.2.1 Report errori residui GCP / TP

Residual Error Report

Residual Units: Ground units

Residual Summary for 563 Images

Active GCPs:	132	X RMS:		Y RMS:		Z RMS:	
Check points	0	X RMS:		Y RMS:		Z RMS:	
Active TPs:	20959	X RMS:	0.322	Y RMS:	0.300	Z RMS:	0.117
Inactive GCPs:	0	X RMS:		Y RMS:		Z RMS:	
Inactive TPs:	0	X RMS:		Y RMS:		Z RMS:	

6.4.2.2 Report del progetto

Project Report for LivornoFerraris

General project information

Filename : LFDT_211026.prj
Description :

Camera calibration

Focal length : 50.000 mm
Principal point : 0.000 mm, 0.000 mm

Radial Lens Distortion R0 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R1 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R2 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R3 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R4 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R5 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R6 : 0.000000e+00
Radial Lens Distortion R7 : 0.000000e+00

Decentering Distortion P1 : 0.000000e+00
Decentering Distortion P2 : 0.000000e+00
Decentering Distortion P3 : 0.000000e+00
Decentering Distortion P4 : 0.000000e+00

Fiducial Type : Corner
Top left : -26.703 mm, 20.026 mm
Top right : 26.703 mm, 20.026 mm
Bottom right : 26.703 mm, -20.026 mm
Bottom left : -26.703 mm, -20.026 mm

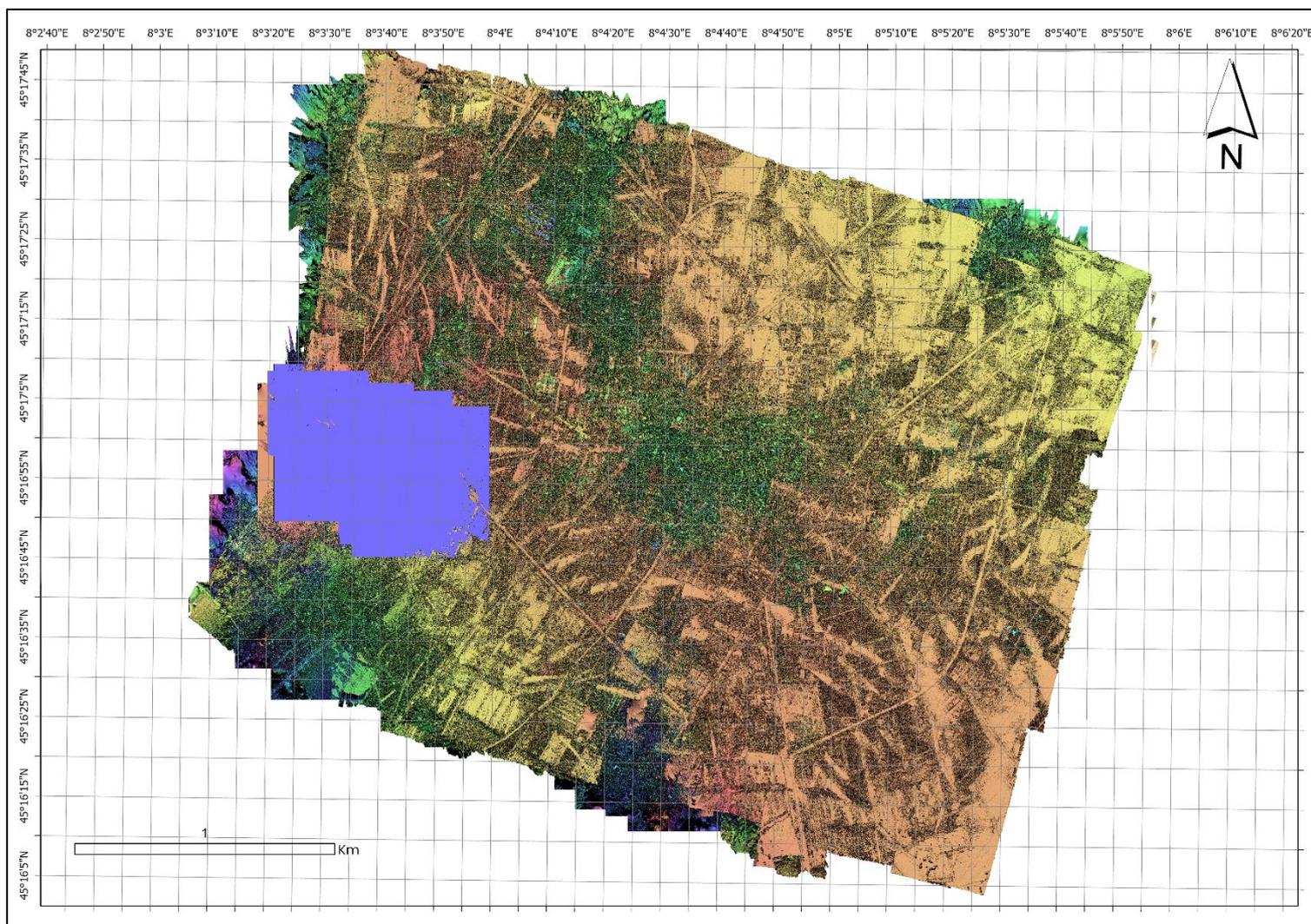
Scale : Unknown
Earth Radius : Not Defined

6.4.3 DSM ed Ortomosaico

Vengono riportati di seguito, gli output raster generati da Catalyst Professional con le relative caratteristiche (Tabella 18 e Tabella 19).

Tabella 18 DSM generato da Catalyst Professional: specifiche

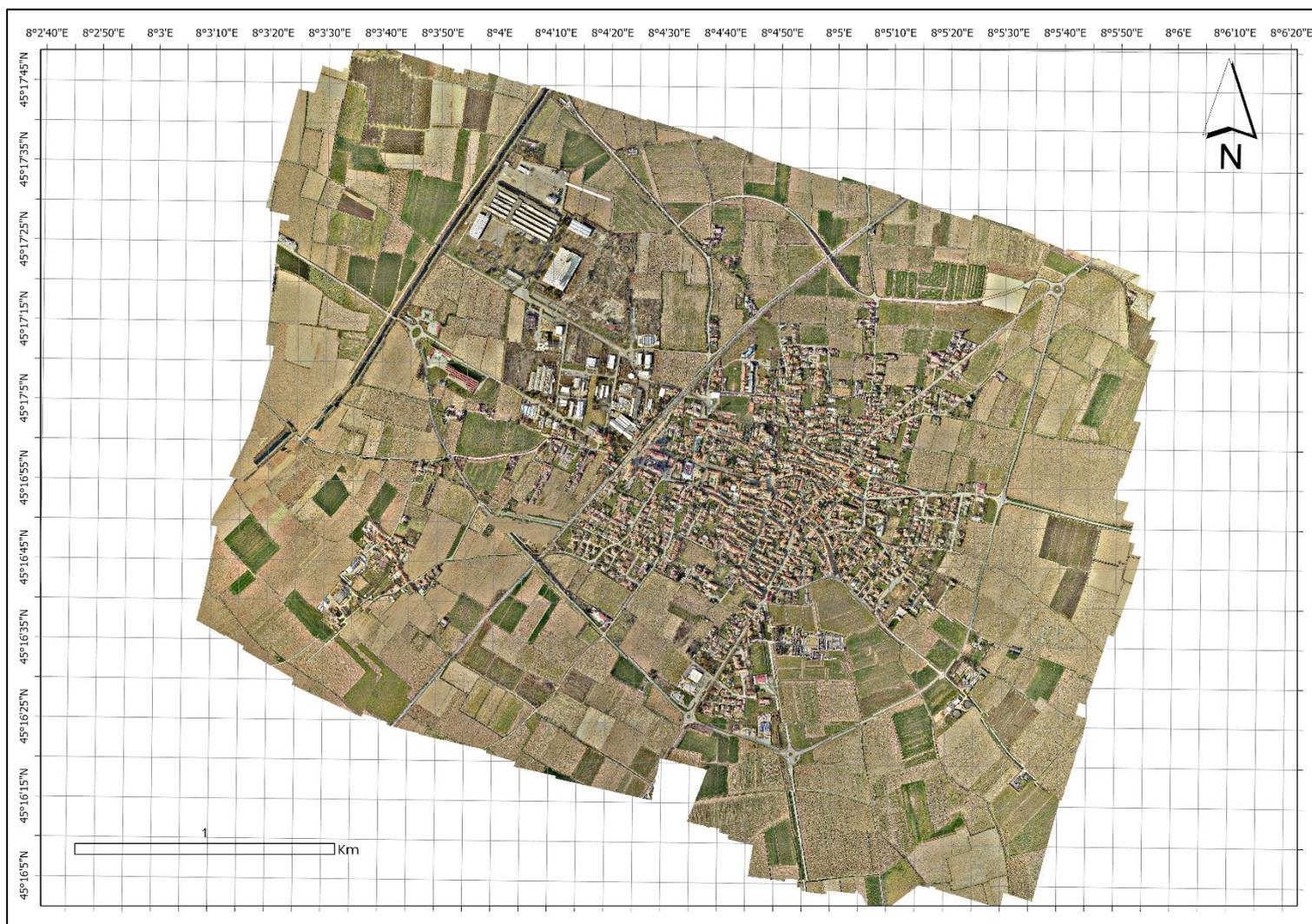
Prodotto	Digital Surface Model (DSM)
Dimensione (pixel)	46297 x 42417
Risoluzione (cm/pix)	8,00
Sistema di coordinate	WGS 84 / UTM 32 Zone N (EPSG: 32632)
GSD	0.08



Output 5 DSM generato da Catalyst Professional

Tabella 19 Ortomosaico generato da Catalyst Professional: specifiche

Prodotto	Ortomosaico RGB
Dimensione (pixel)	98143 x 88656
Risoluzione (cm/pix)	3,99
Sistema di coordinate	WGS 84 / UTM 32 Zone N (EPSG: 32632)
GSD	0.04



Output 6 Ortomosaico generato da Catalyst Professional

6.5 Pix4d™ PIX4Dmapper

L'ultimo applicativo utilizzato in questo studio è **PIX4Dmapper**: si tratta di un software avanzato di fotogrammetria, specializzato nella mappatura di immagini da drone. Analogamente agli altri programmi basati su algoritmi di Structure from Motion, è in grado di generare mappe e modelli tridimensionali, ortomosaici professionali, nuvole di punti, mappe di indici ed altri prodotti.

Pix4d ha come punto di forza quello di avere un'interfaccia di setup iniziale del progetto molto intuitiva: è possibile scegliere tra diversi template preimpostati, in base alla qualità e tipo di dataset a disposizione, al prodotto che si vuole ottenere o alla velocità di processamento.

I vari passaggi verranno meglio dettagliati nel paragrafo successivo.

6.5.1 Workflow

6.5.1.1 Impostazione nuovo progetto

Aperto la schermata principale di PIX4Dmapper, è necessaria come prima operazione, avviare la creazione guidata di un **Nuovo Progetto...** (Figura 80).

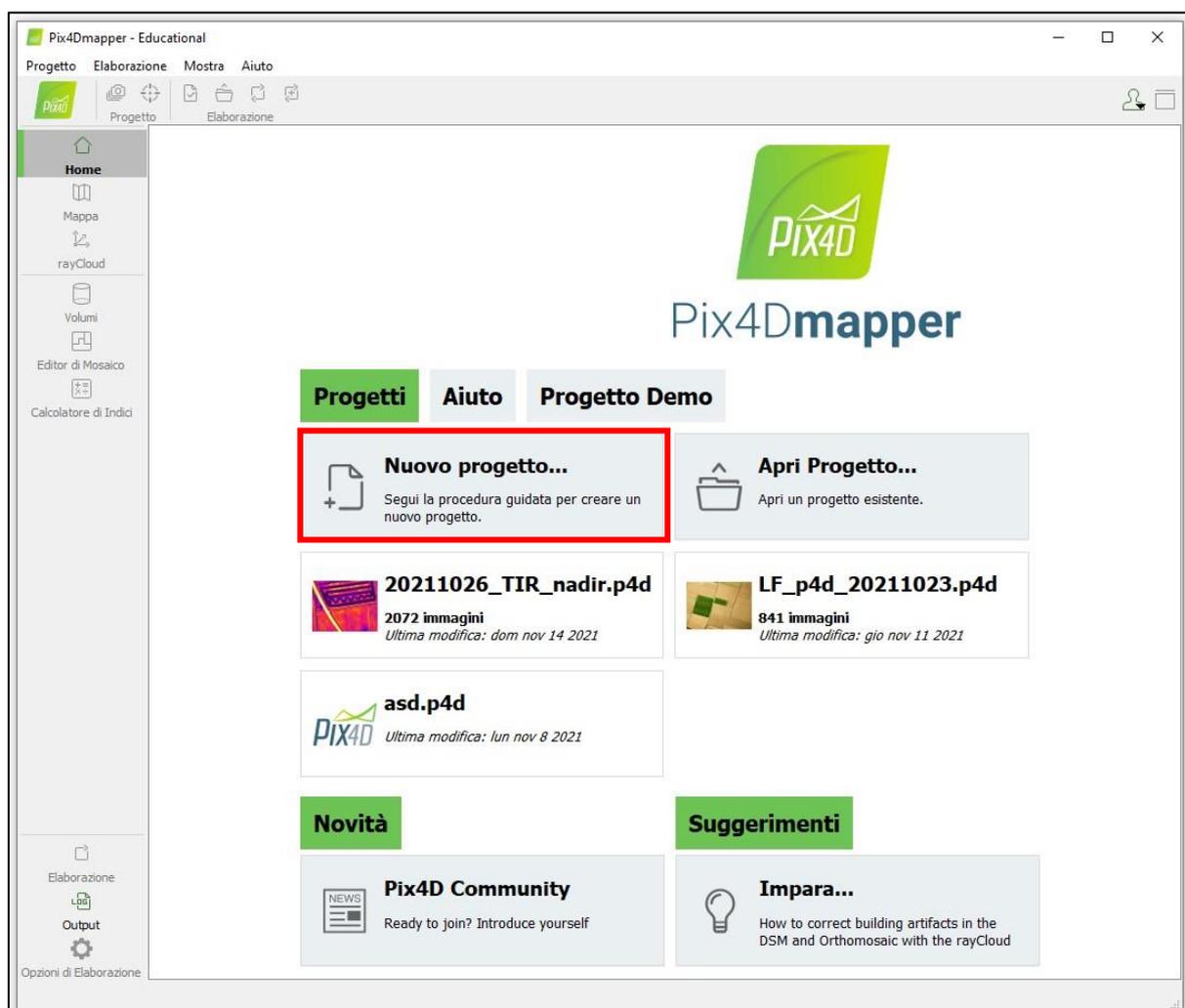


Figura 80 PIX4Dmapper – step#1: Creazione nuovo progetto

È necessario indicare il nome del progetto e scegliere la relativa cartella in cui il software salverà i file dell'elaborazione (Figura 81):

Figura 81 PIX4Dmapper – step#1: Selezione cartella predefinita e nome del progetto

Il riquadro successivo, **Selezione immagini**, permette di aggiungere al progetto la cartella contenente il dataset delle immagini (Figura 82)

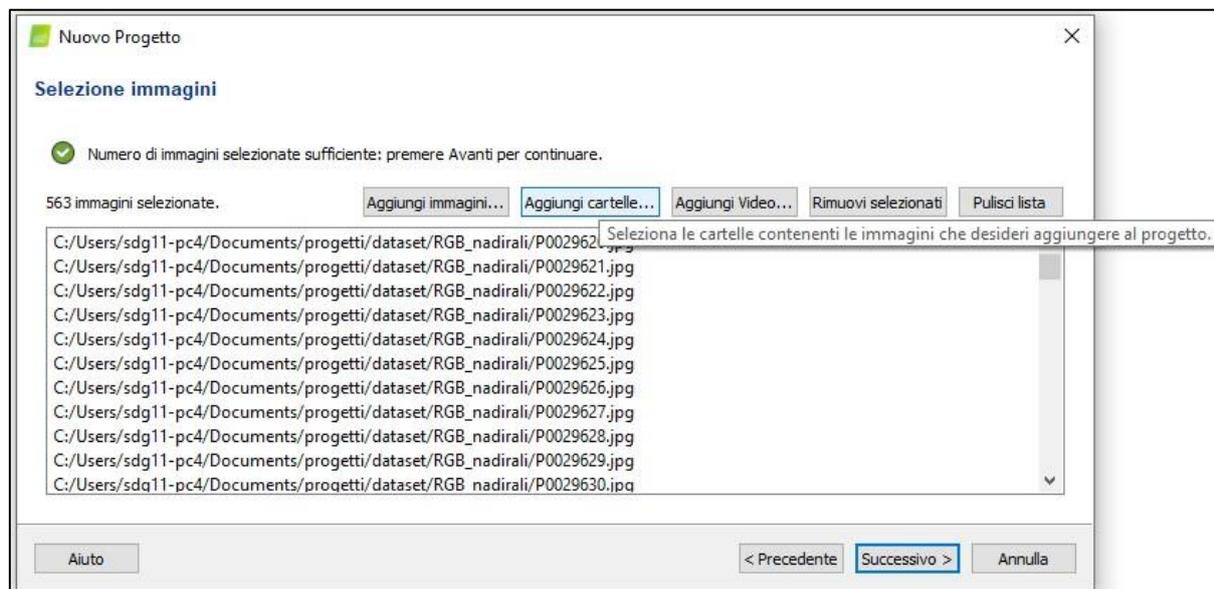


Figura 82 PIX4Dmapper – step#1: caricamento cartella immagini

Nella schermata seguente, **Proprietà di Immagine**, è necessario importare il **file di Geolocalizzazione** che dà le informazioni sull'orientamento esterno delle immagini (Figura 83): fondamentale scegliere opportunamente dal menu a tendina la corretta sequenza delle tre coordinate geografiche.

Inoltre, questo riquadro fornisce le informazioni relative al modello di fotocamera afferente al dataset di riferimento: tali dati vengono ricavati automaticamente dal software, tramite l'EXIF delle immagini.

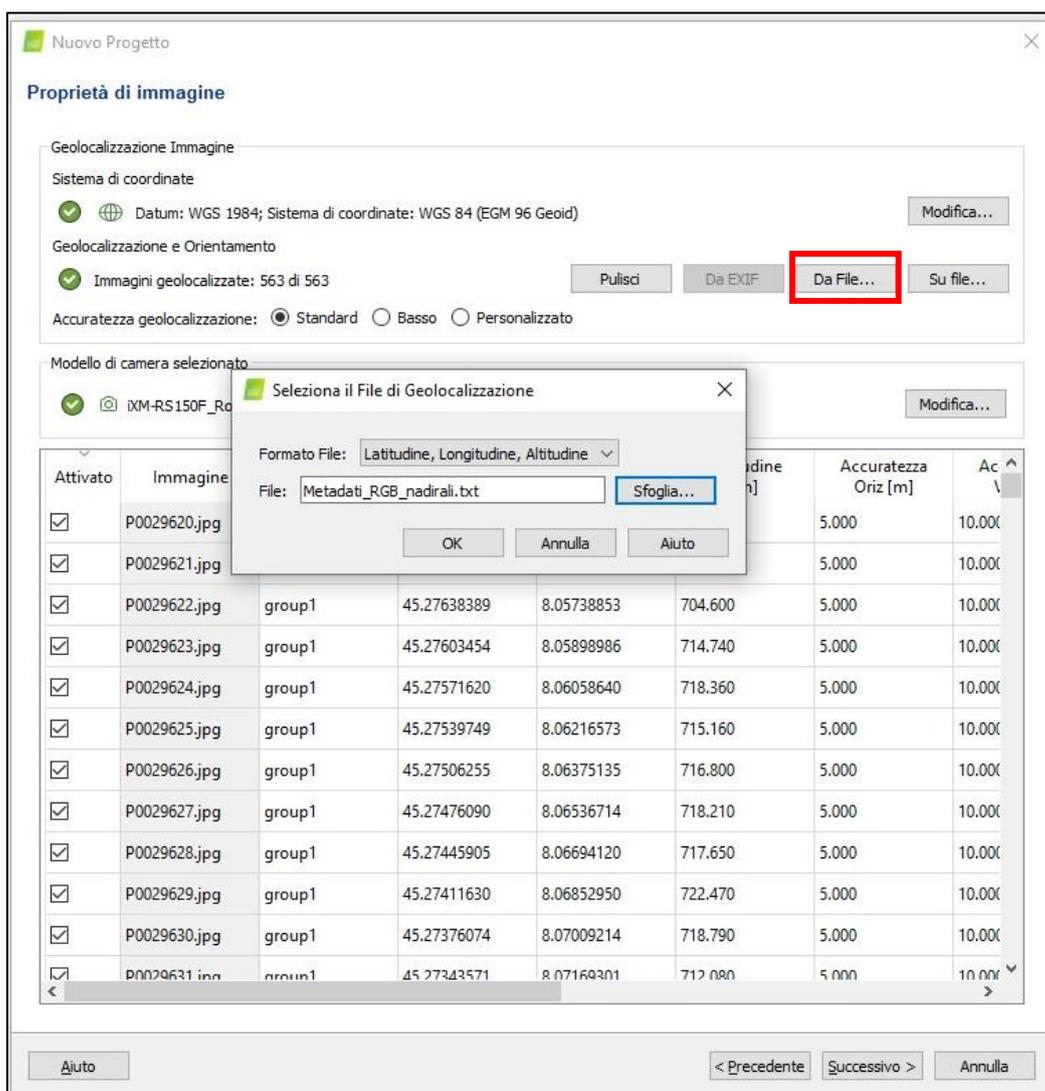


Figura 83 PIX4Dmapper - step#1: importazione dell'orientamento esterno delle immagini

Lo step successivo è la selezione del sistema di riferimento (Figura 84)

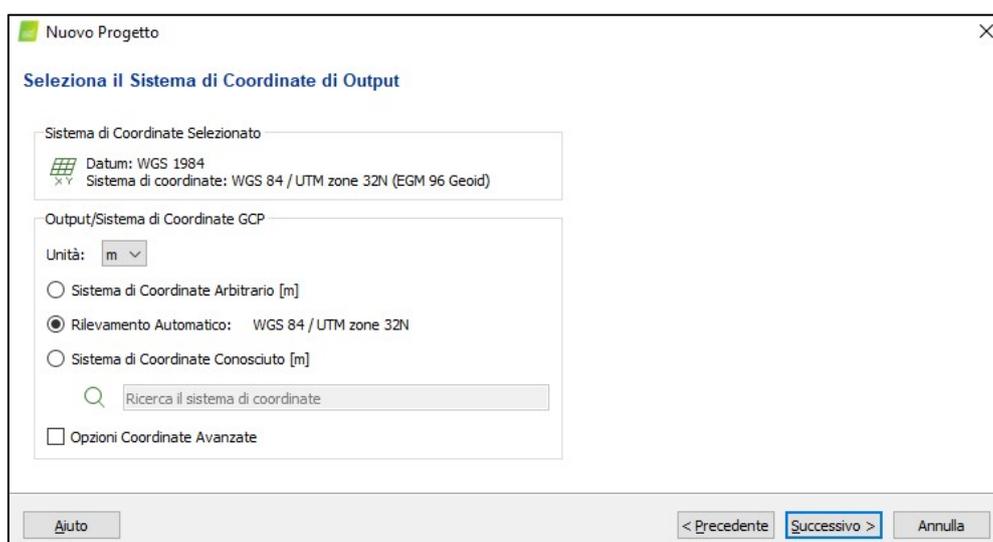


Figura 84 PIX4Dmapper - step#1: Selezione del sistema di coordinate

Infine, l'ultimo passaggio fornisce le **Opzioni di elaborazione del modello** (Figura 85): un elenco di template pre-impostati che consentono di scegliere in maniera rapida ed intuitiva il tipo di prodotto desiderato, in base alla qualità finale degli output ed ai tempi di elaborazione.

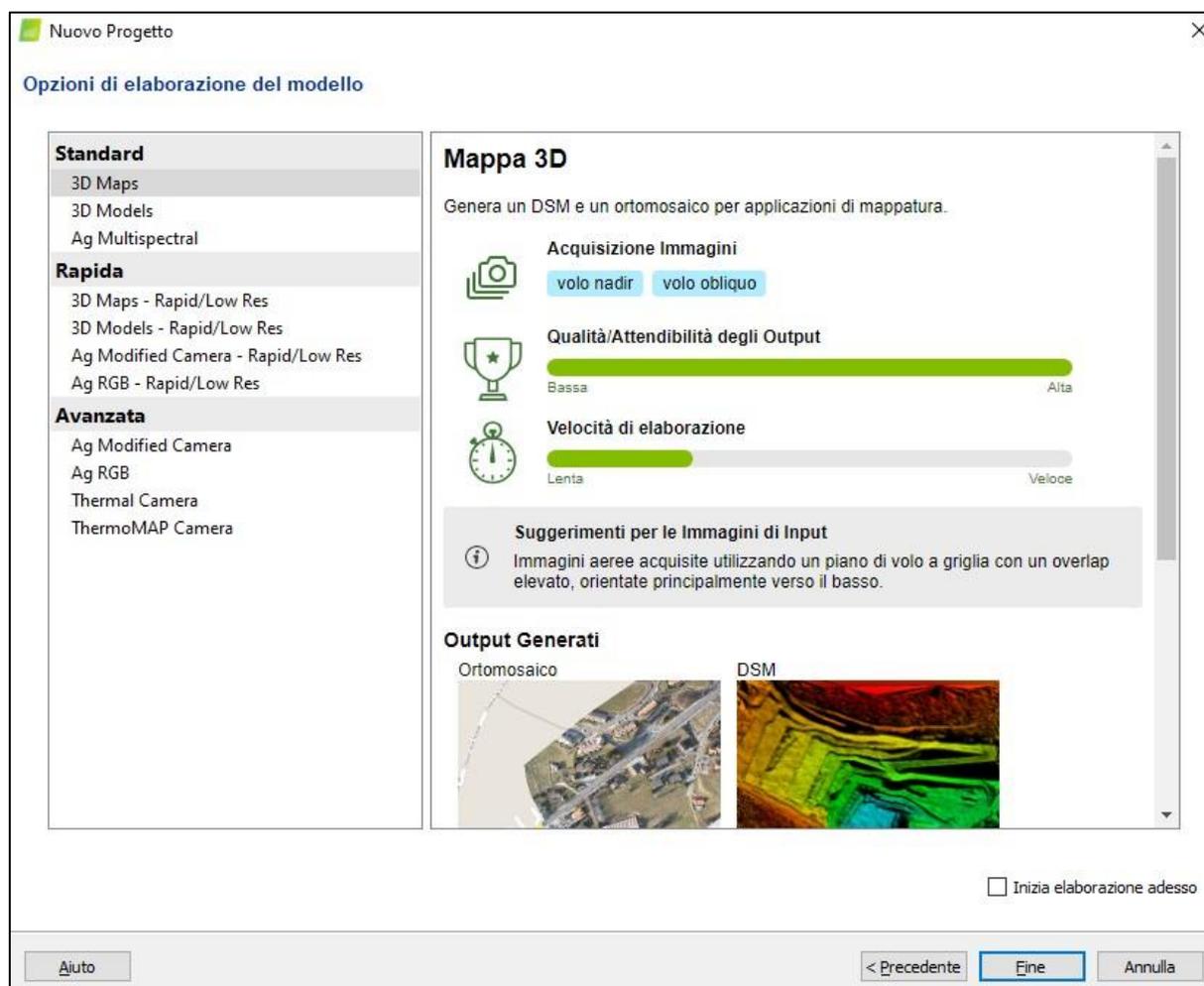


Figura 85 PIX4Dmapper - step#1: scelta del template di elaborazione

Nell'ambito di questa trattazione, è stato scelto il template "Standard" **3D Maps** che garantisce la creazione di DSM ed Ortomosaici ad altissima risoluzione, a discapito dei tempi di processamento.

Cliccando su **Fine** (Figura 85), la schermata principale mostrerà l'area di lavoro dove si evidenziano alcuni elementi peculiari (Figura 86):

- 1) I **punti di presa non allineati** rappresentati da pallini di colore rosso
- 2) Barra in alto con i gruppi: **Progetto, Elaborazione e Mostra**

- 3) Barra sulla parte in basso della schermata con lo stato delle tre fasi principali di processamento: **1. Elaborazione Iniziale**, **2. Nuvola di Punti e Mesh**, **3. DSM, Ortofoto e Indice**



Figura 86 PIX4Dmapper – step#: Area di lavoro iniziale

Si passa quindi al punto successivo del processamento con PIX4Dmapper.

6.5.1.2 Caricamento e gestione GCP

Dalla barra in alto, nella scheda **Progetto** si clicca sull'icona **Gestione GCP/MTP** (Ground Control Points / Manual Tie Points) come mostrato in Figura 87:

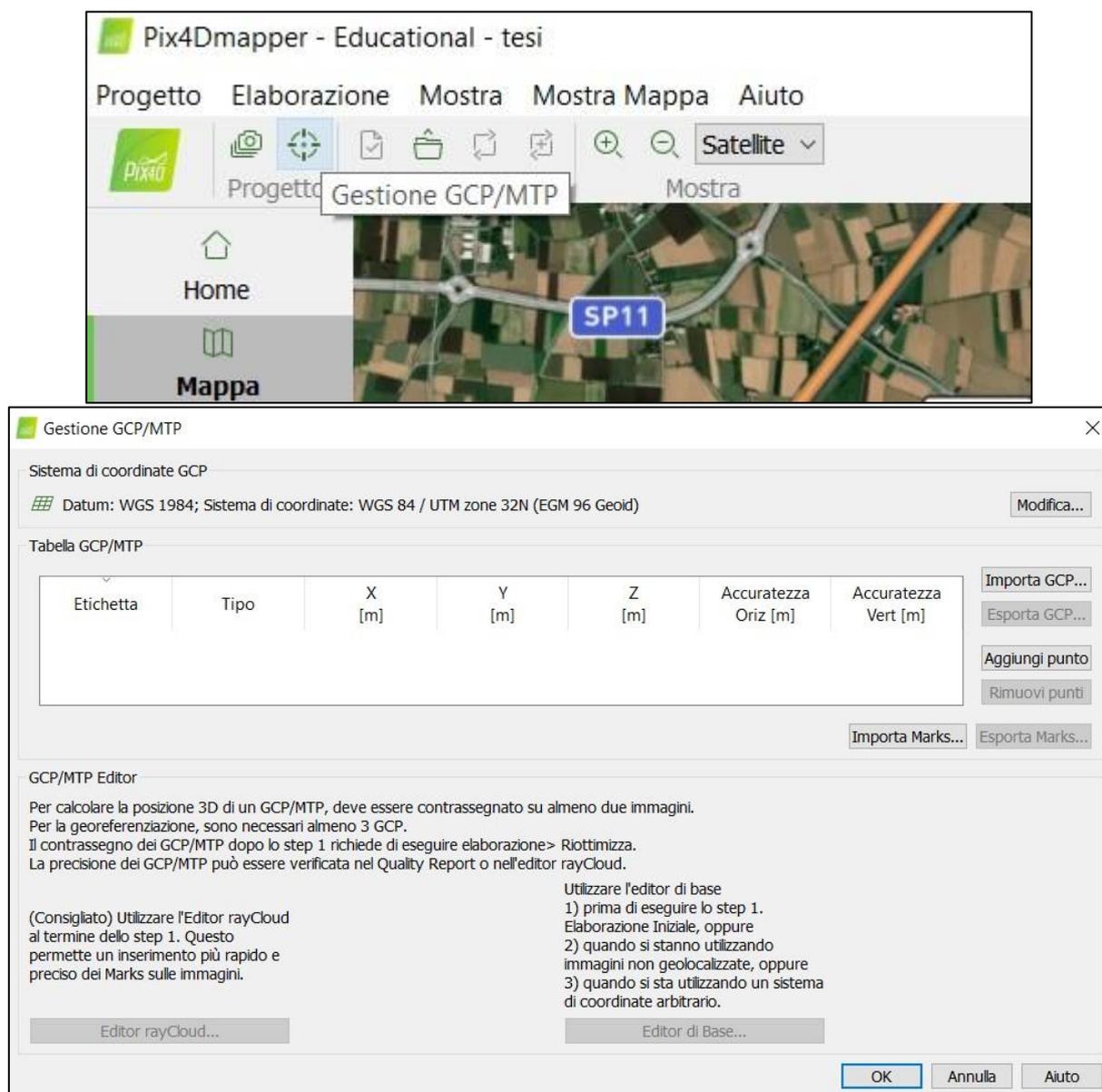


Figura 87 PIX4Dmapper - step#2: Caricamento ground control point

Tramite il comando **Importa GCP...** vengono caricate le coordinate in WGS84 UTM 32N dei 44 punti di controllo, appositamente salvate su un file csv preformattato (Figura 88):

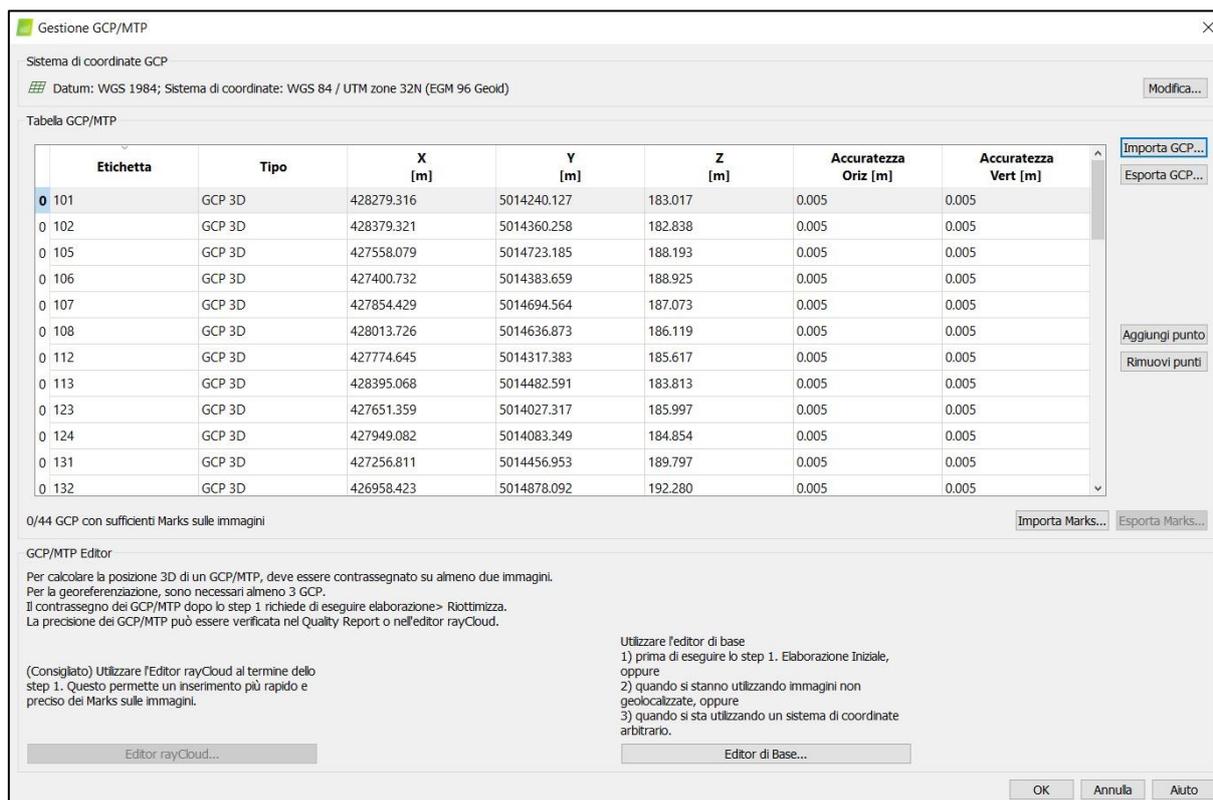


Figura 88 PIX4Dmapper - step#2: GCP caricati

Come suggerito nel riquadro GCP/MTP Editor [29]:

“Per calcolare la posizione 3D di un GCP/MTP, deve essere contrassegnato su almeno due immagini. Per la georeferenziazione, sono necessari almeno 3 GCP”

Quindi si passa alla fase di collimazione preliminare delle immagini.

6.5.1.3 Collimazione delle immagini

Dalla parte in basso a destra del riquadro “Gestione GCP/MTP”, si apre l'**Editor di base...** (Figura 89):

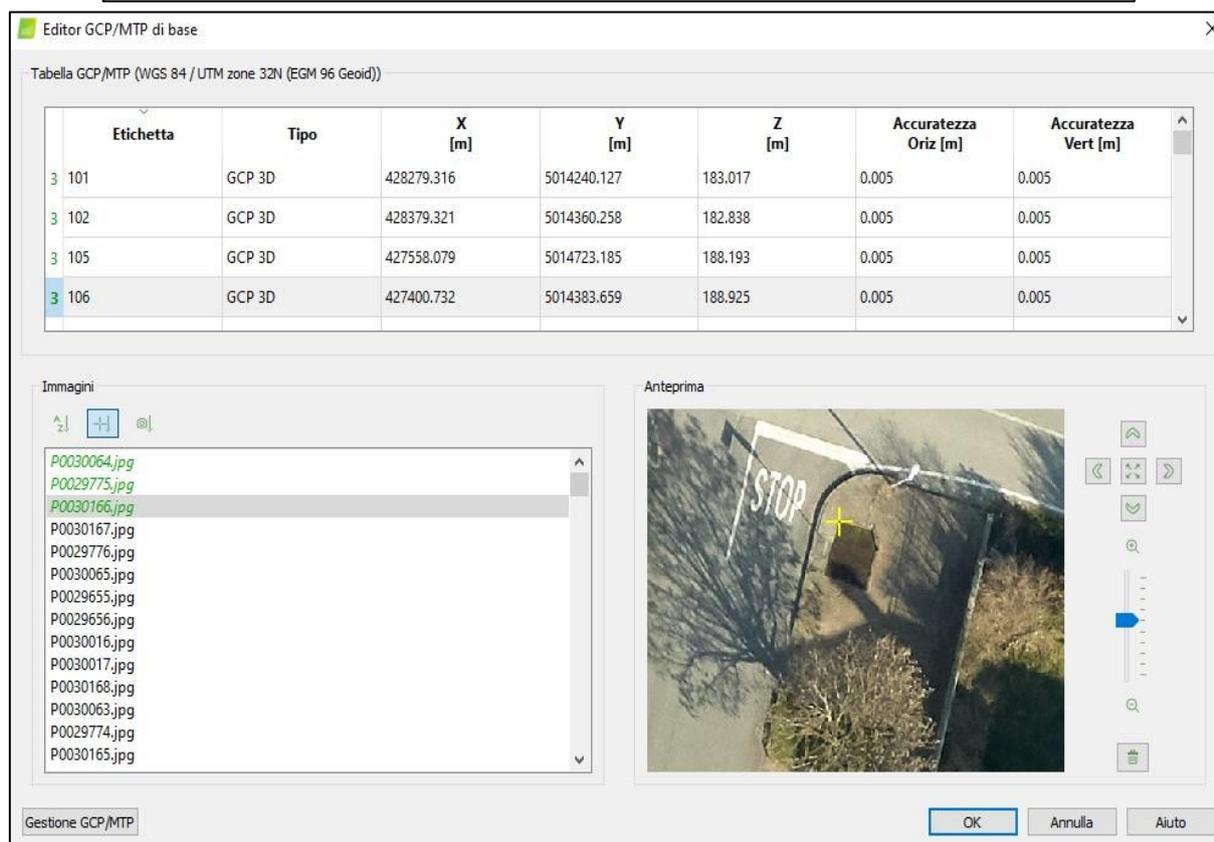
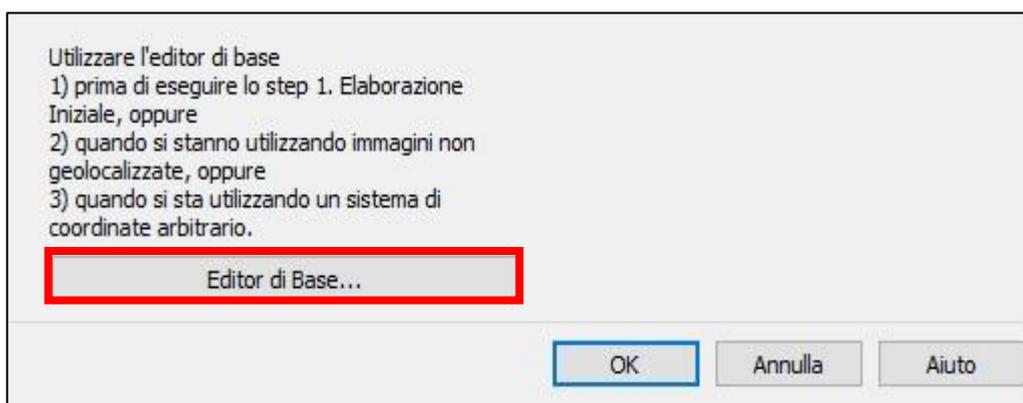


Figura 89 PIX4Dmapper - step#3: Collimazione immagini

Come suggerito dal software [29], per ogni GCP vengono collimate tre immagini. In un secondo momento, dopo aver effettuato l'allineamento iniziale, verrà affinata la precisione dei punti noti.

Completato il matching manuale, sulla "Mappa" verranno simbolizzati i GCP con delle crocette blu come mostrato in Figura 90.

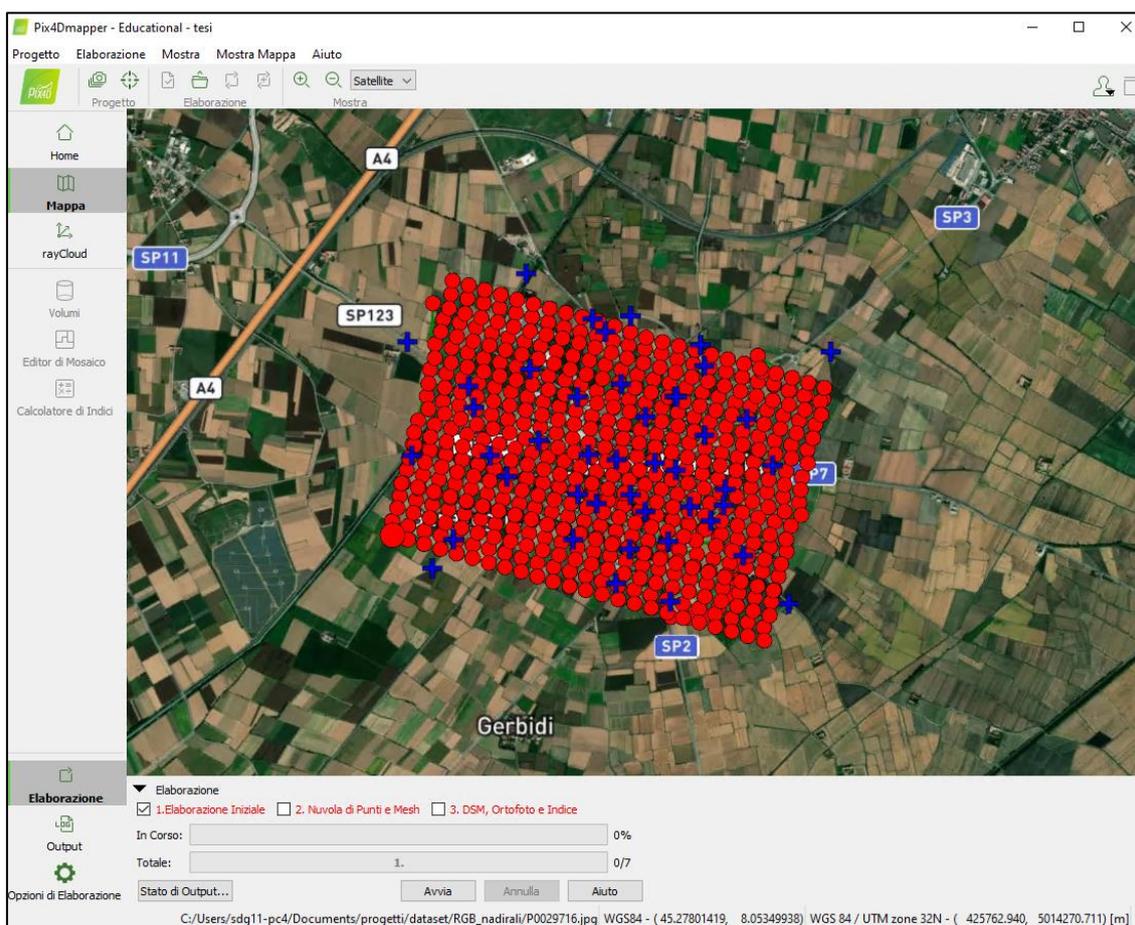


Figura 90 PIX4Dmapper – step#3: Individuazione dei GCP sul riquadro Mappa

Nel procedere con il passaggio successivo, è doveroso precisare che, a differenza degli altri programmi utilizzati, PIX4Dmapper dà la possibilità di eseguire l'intero processamento senza alcun intervento intermedio. Tuttavia, dovendo effettuare all'allineamento iniziale, in questa fase verranno rimosse le spunte sui successivi step di elaborazione: **2. Nuvola di Punti e Mesh** e **3. DSM, Ortofoto e Indice**.

6.5.1.4 Allineamento iniziale

Selezionando quindi **1. Elaborazione Iniziale**, il software inizia la fase di "Computing keypoints", evidenziata a schermo dal progressivo cambio di colore dei punti di presa da rosso a verde (Figura 91):

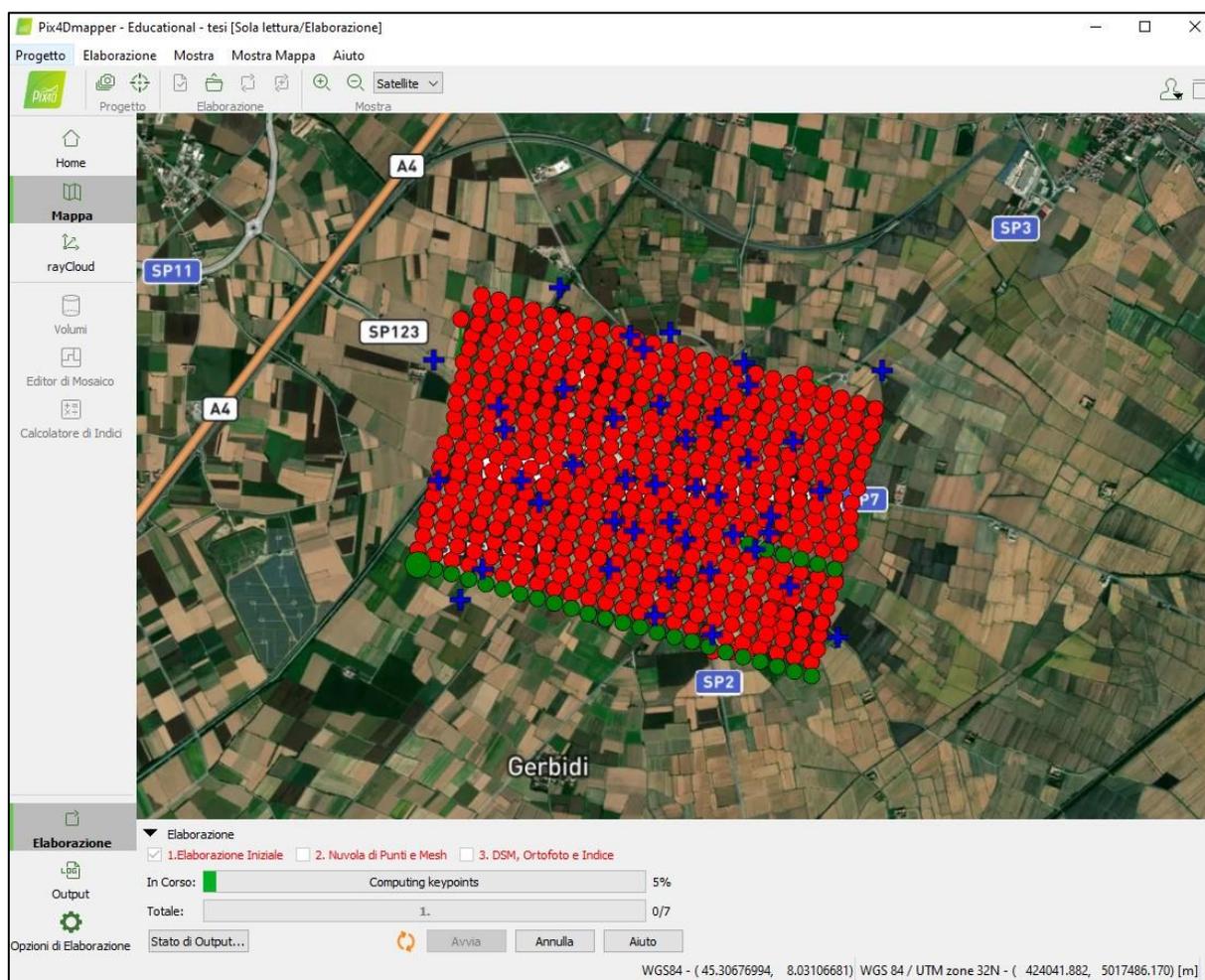


Figura 91 PIX4Dmapper - step#4: allineamento iniziale delle immagini

Dopo il calcolo dei keypoint, avviene la calibrazione della fotocamera (**Calibrate**) per ogni punto di presa, come mostrato in Figura 92:

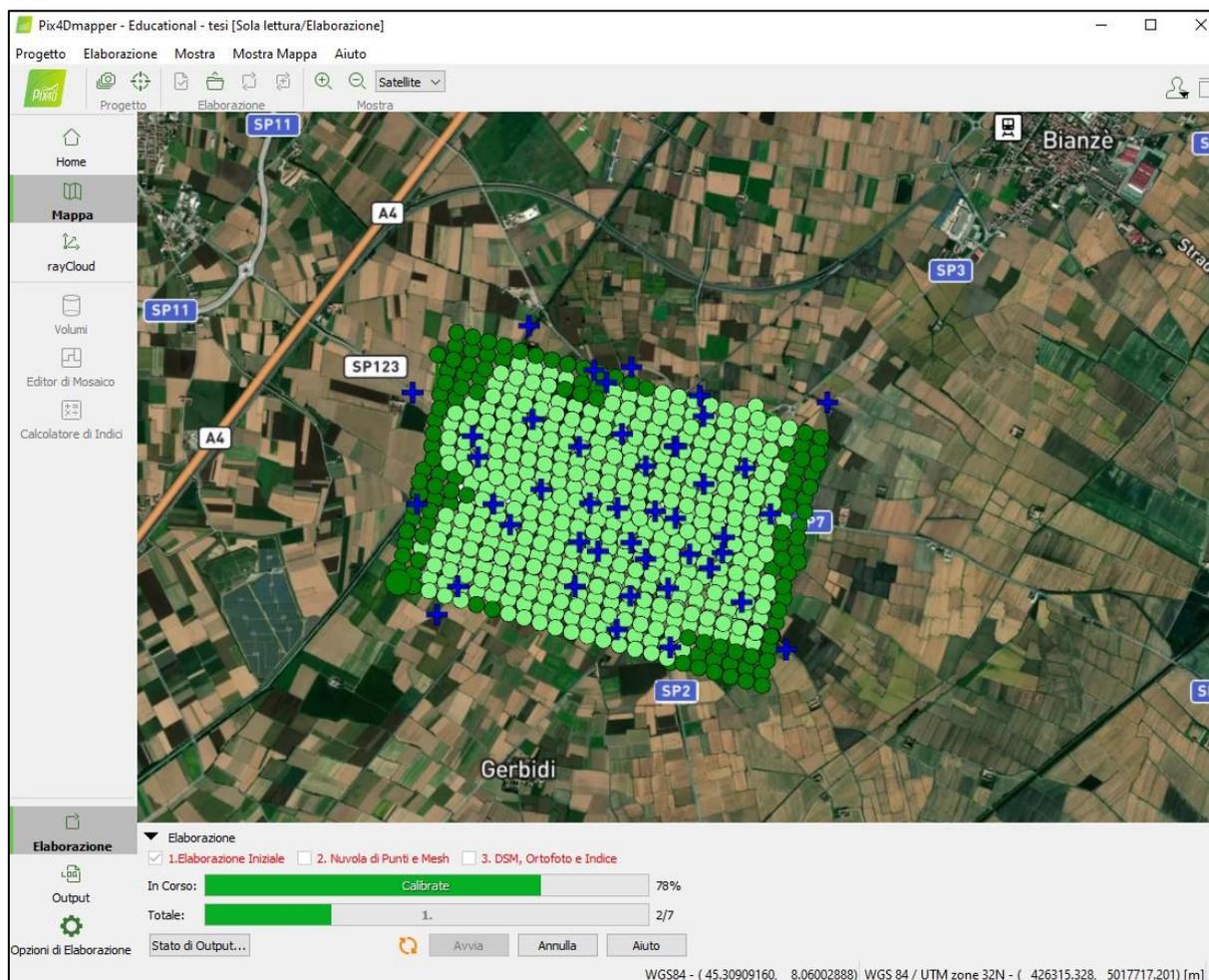


Figura 92 PIX4Dmapper – step#4: Calibrazione della fotocamera

Segue dall'ottimizzazione tramite georeferenziazione (**Optimizing with geoinformation**) – Figura 93:

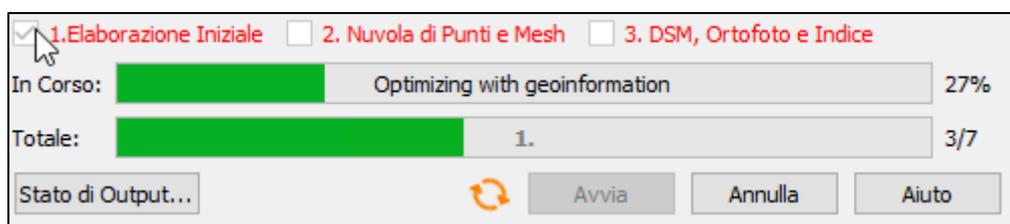


Figura 93 PIX4Dmapper – step#4: Ottimizzazione immagini con georeferenziazione

Il completamento di questa fase di elaborazione verrà confermato dalla barra di progresso al 100% e dalla scritta **1. Elaborazione Iniziale** in verde (Figura 94):

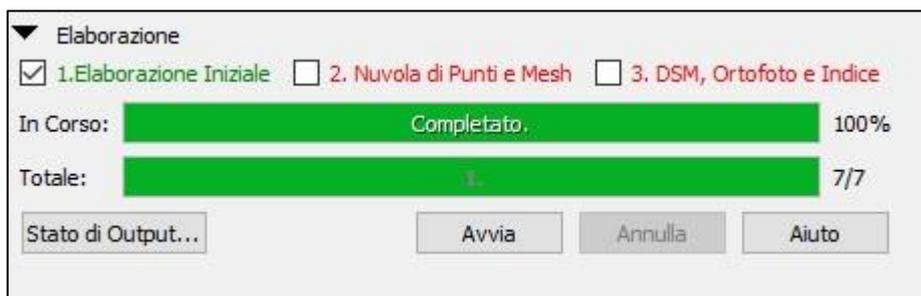


Figura 94 PIX4Dmapper - step#4: Completamento elaborazione iniziale

6.5.1.5 Affinamento allineamento immagini

Per poter ottenere dei prodotti qualitativamente attendibili, è necessario prima di procedere con la creazione della nuvola di punti, migliorare il matching tra i punti noti ed i tie point individuati dal software in seguito all'allineamento iniziale. Per fare ciò, dal pannello laterale sinistro, si accede alla funzione **rayCloud** (Figura 95) dove vengono mostrate:

- **Camere** – I punti di presa dei fotogrammi;
- **Raggi** – I collegamenti tra tie point ed immagini collimate;
- **Tie points** – L'elenco dei punti di controllo con il relativo numero di fotogrammi collimati.

Questi ultimi saranno quelli interessati dalla fase di affinamento.

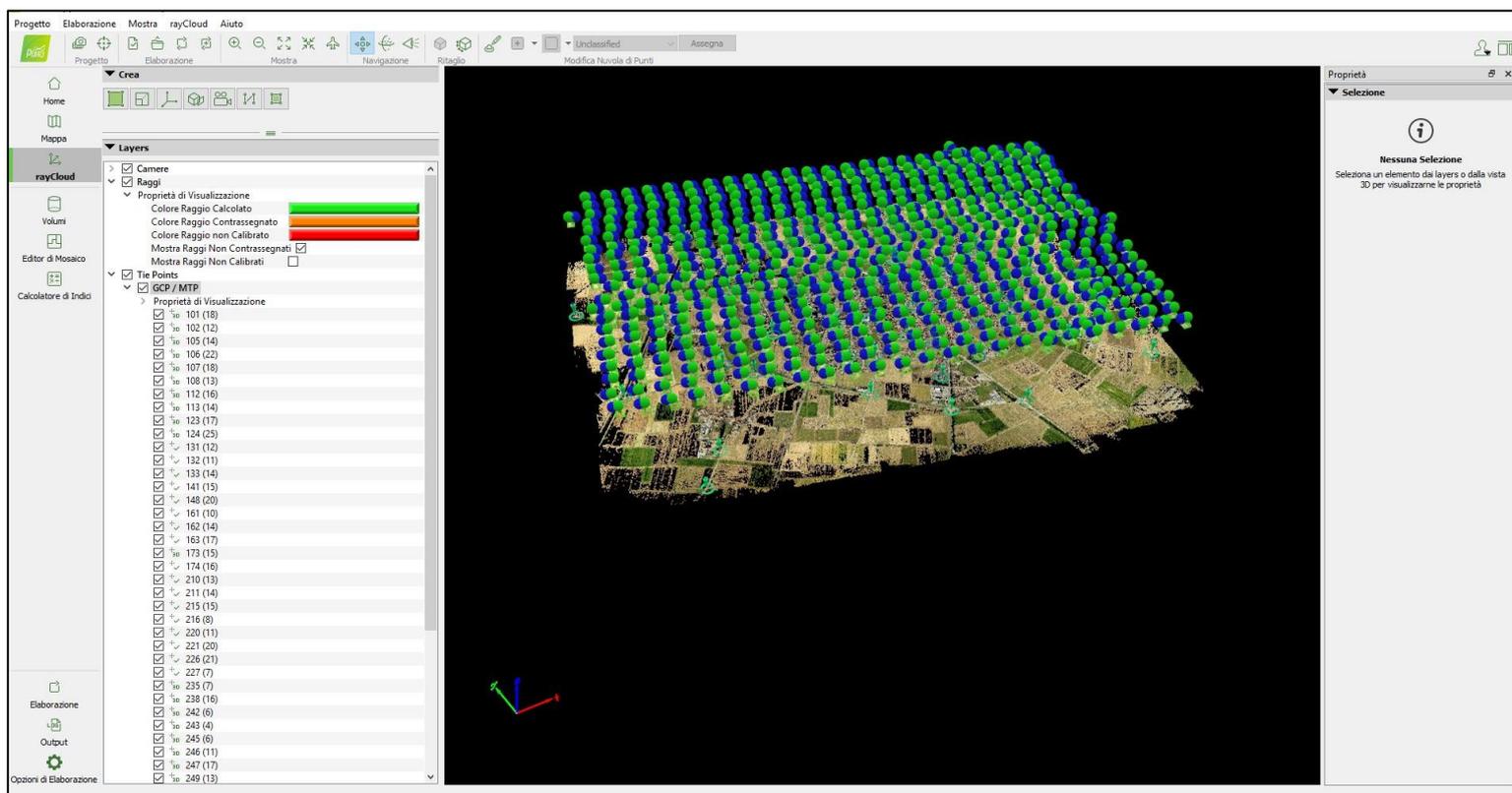


Figura 95 PIX4Dmapper - step#5: Affinamento delle collimazioni tramite rayCloud

Cliccando su uno dei GCP/MTP dall'elenco di sinistra, compariranno nel riquadro "Selezione" di destra, le informazioni relative al punto di controllo selezionato, tra cui (Figura 96):

- 1) Il tipo di GCP. Da questo menu a tendina è possibile indicare se si tratta di un punto noto o di un punto di controllo (check point);
- 2) Coordinate spaziali e relativa accuratezza;
- 3) Numero di immagini contrassegnate;
- 4) L'errore teorico e l'errore rispetto al posizionamento iniziale;
- 5) La posizione iniziale e quella calcolata dal software;
- 6) L'elenco delle immagini su cui è stata stimata la posizione del GCP.

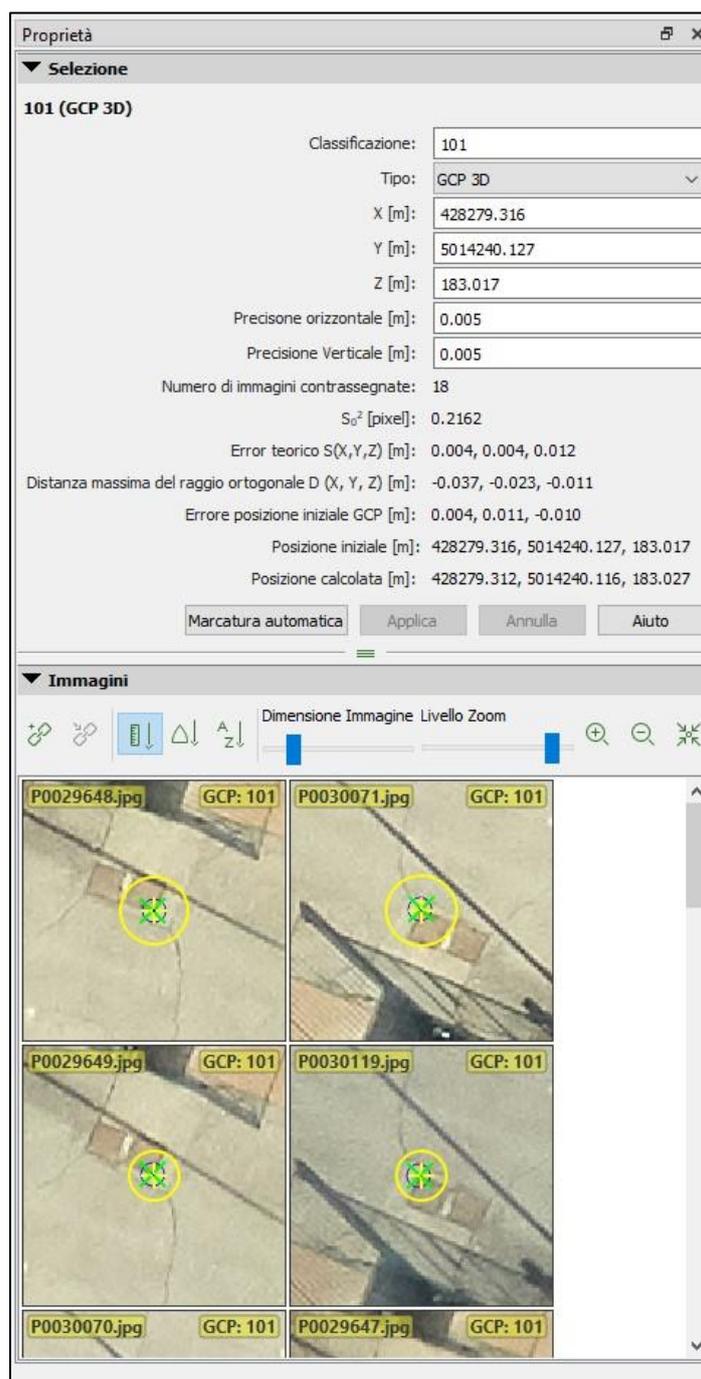


Figura 96 PIX4Dmapper – step#5: Selezione singolo GCP

Per affinare il risultato dell'allineamento iniziale, si può procedere manualmente marcando ulteriori fotogrammi come visto allo step precedente, oppure selezionando **Marcatura automatica** (Figura 97): questo comando consente di stimare automaticamente la posizione di ulteriori tie point sulla scorta del subset di fotogrammi relativi al GCP attivo.

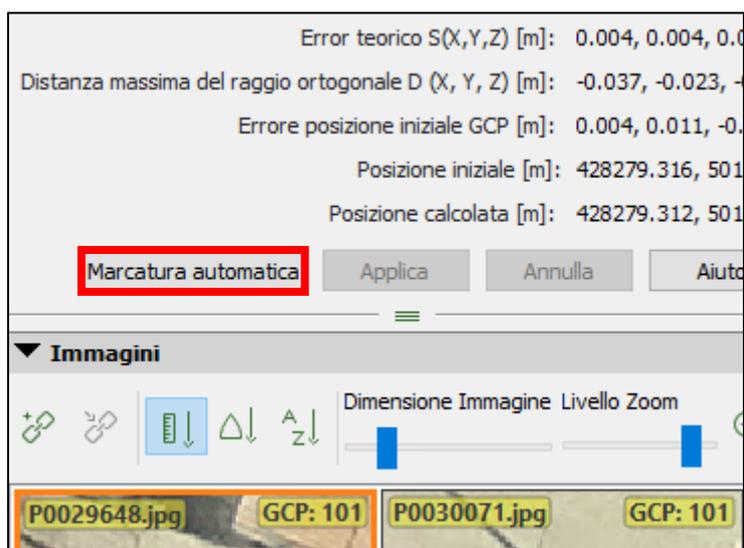


Figura 97 PIX4Dmapper - step#5: marcatura automatica dei GCP sulle immagini

È opportuno dopo aver eseguito la marcatura automatica, verificare visivamente il corretto allineamento del punto noto sulle immagini ed eventualmente correggerlo manualmente, come mostrato in Figura 98.



Figura 98 PIX4Dmapper - GCP 101 sull'immagine P0030119: elaborato da Marcatura automatica (a sinistra) e collimato manuale (a destra)

Parallelamente, è necessario verificare di volta in volta, l'entità dell'errore teorico e dell'errore rispetto alla posizione iniziale sul riquadro "Selezione" (Figura 99) per il GCP in esame.



Figura 99 PIX4Dmapper: controllo parametri GCP e relativi errori

Tanto più bassi saranno i valori di tali errori, migliore sarà il calcolo di trasformazione dell'algoritmo e di conseguenza, la qualità degli output.

Terminata la fase di affinamento tramite "rayCloud", viene lanciato nuovamente il comando **Elaborazione Iniziale** per consentire a PIX4Dmapper di riallineare le immagini utilizzando i parametri aggiornati.

Completata questa fase, è possibile ritornare sulla schermata "Mappa" per procedere con gli step successivi.

6.5.1.6 Generazione nuvola punti e prodotti finali

Come accennato in precedenza, PIX4Dmapper è strutturato per eseguire l'intero processo in un'unica sequenza. Avendo completato la fase iniziale di allineamento e collimazione delle immagini è possibile avviare le due rimanenti, selezionando opportunamente **2. Nuvola di Punti e Mesh** e **3. DSM, Ortofoto e Indice** come illustrato di seguito in Figura 100:



Figura 100 PIX4Dmapper - step#6: avvio step n.2 e n.3 del processamento

È evidente come sia possibile accorpate a questa elaborazione, l'esecuzione del secondo allineamento descritto al punto precedente. Si è scelto di procedere separatamente per valutare preventivamente l'entità complessiva degli errori di riproiezione: infatti PIX4Dmapper produce automaticamente il relativo report al termine di ogni singola fase.

Ultimo passaggio preliminare prima delle due elaborazioni successive, consiste nel poter controllare ed eventualmente modificare le **Opzioni di elaborazione** dal menu in basso a sinistra come mostrato in Figura 101.

È possibile tra le altre cose:

- 1) Scegliere la risoluzione del DSM e dell'ortomosaico;
- 2) Definire la densificazione della nuvola di punti
- 3) Impostare il numero massimo di risorse disponibili per l'elaborazione

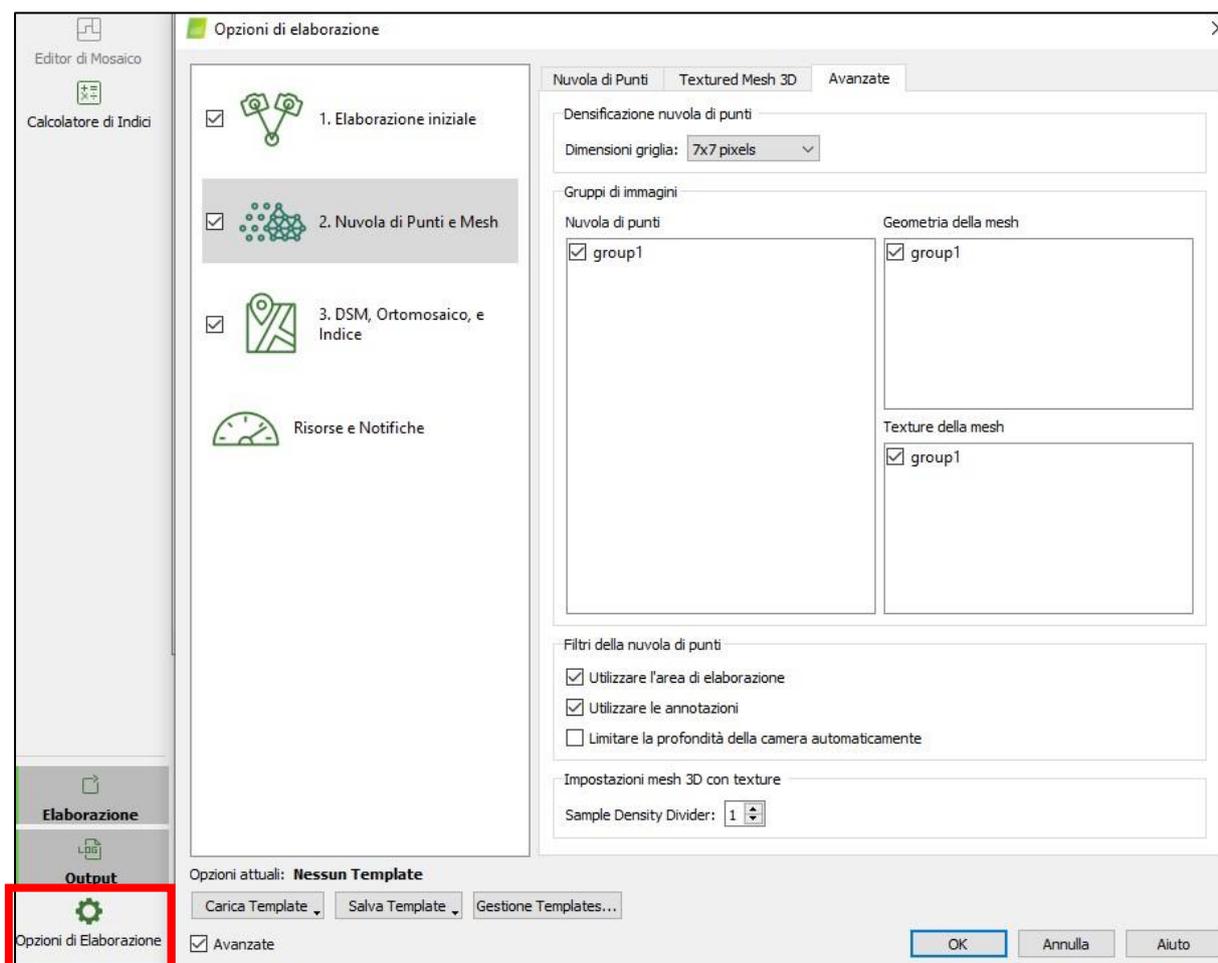


Figura 101 PIX4Dmapper - step#6: Opzioni di elaborazione

A questo punto, cliccando sul comando **Avvia** (Figura 102), si eseguono due step consecutivi del processamento che richiederanno una discreta quantità di tempo, in funzione della qualità richiesta.

Per la presente trattazione, questa fase ha richiesto circa 15 ore per il suo completamento (Figura 103). Nel successivo paragrafo verrà riportato il rapporto di fine processamento con informazioni più dettagliate.

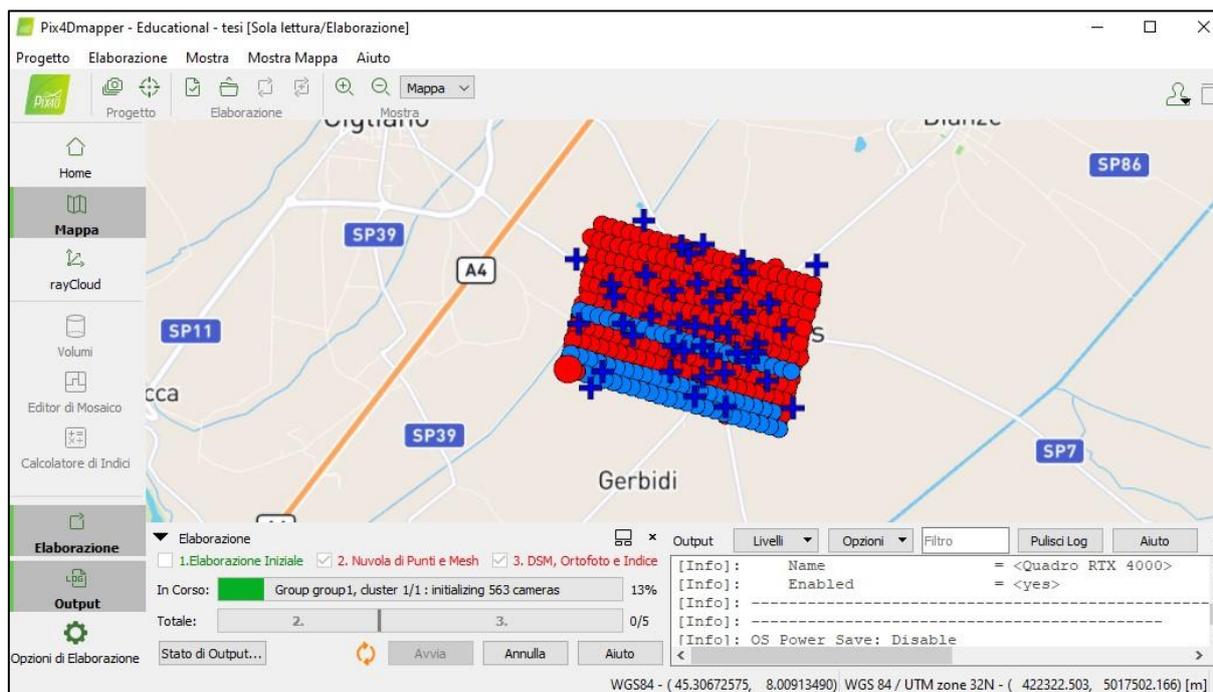


Figura 102 PIX4Dmapper – step#6: Avvio procedura di generazione nuvola di punti, creazione del DSM e dell'Ortomosaico

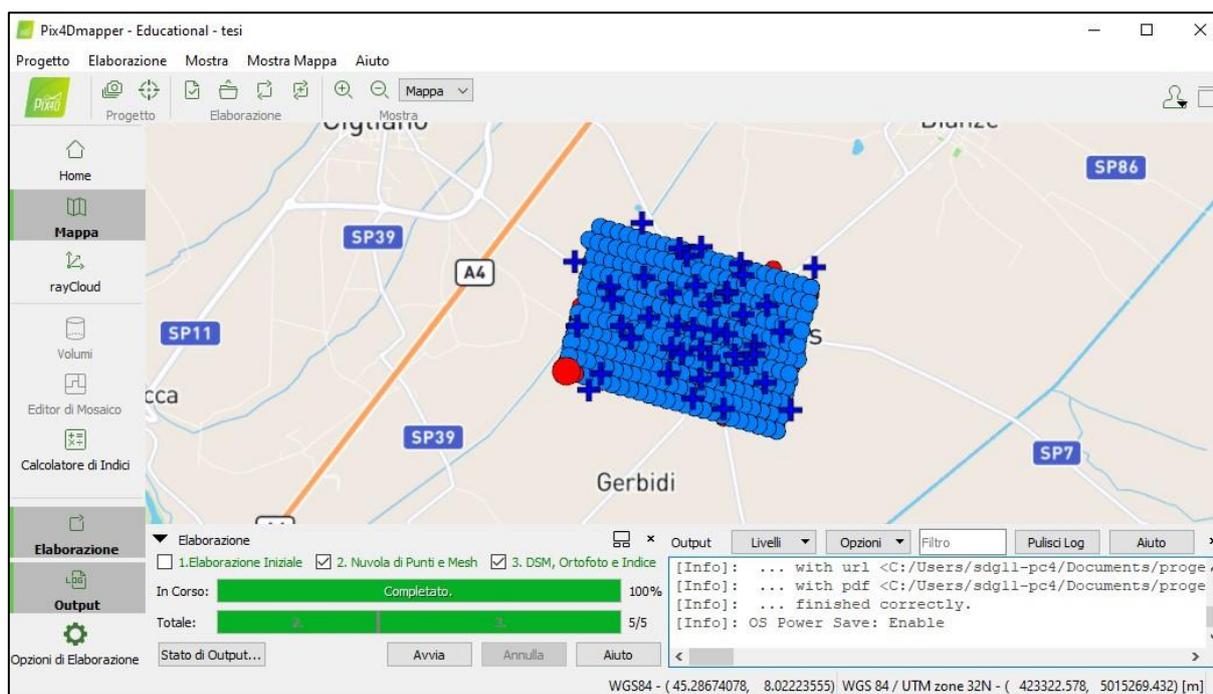


Figura 103 PIX4Dmapper – step#6: fine processamento

6.5.2 Risultati del processamento

PIX4Dmapper crea all'interno della cartella scelta come area di lavoro, quattro sottocartelle: una per ogni fase dell'elaborazione, più una quarta cartella temporanea (Figura 104). In aggiunta, salva automaticamente anche il file di log di tutto il processamento.

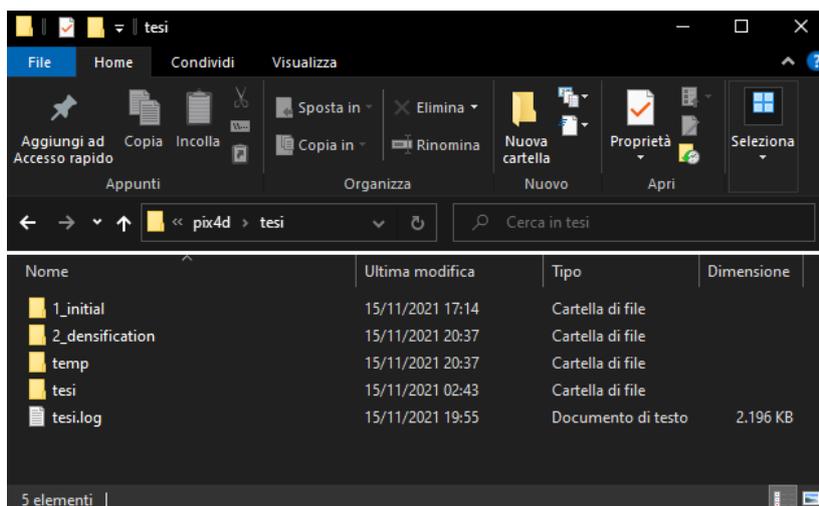


Figura 104 Cartella di lavoro tipica di PIX4Dmapper

Nella cartella denominata **1_initial** viene generato e salvato anche il **Quality report** di fine lavoro, come di seguito riportato:

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper version 4.6.4

! **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the QualityReport
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	LF_p4d_20211023
Processed	2021-11-10 19:44:27
Camera Model Name(s)	iXM-RS150F_RodenstockRS-50mm/Aerial_50.0_14204x10652 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.86 cm / 1.52 in
Area Covered	8.903 km ² / 890.3078 ha / 3.44 sq. mi. / 2201.1372 acres
Time for Initial Processing (without report)	24m:19s

Quality Check



? Images	median of 74177 keypoints per image	✓
? Dataset	563 out of 563 images calibrated (100%), 278 images disabled	✓
? Camera Optimization	3.38% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 22761.5 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	yes, 27 GCPs (27 3D), mean RMS error = 0.081 m	⚠

Preview

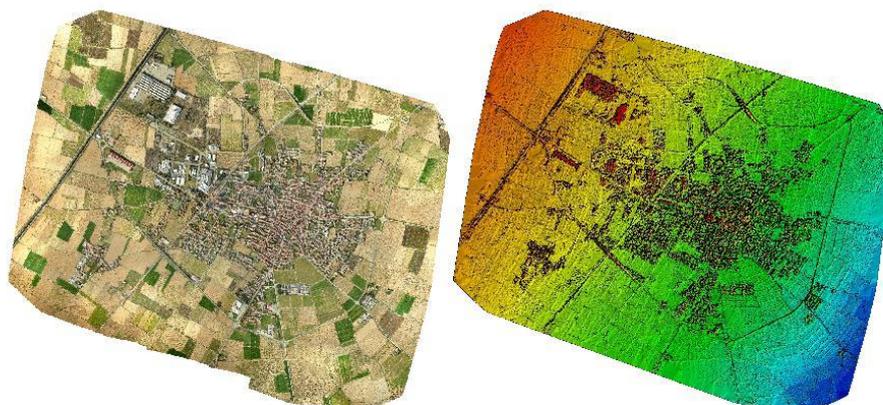


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	563 out of 841
Number of Geolocated Images	563 out of 841

Initial Image Positions

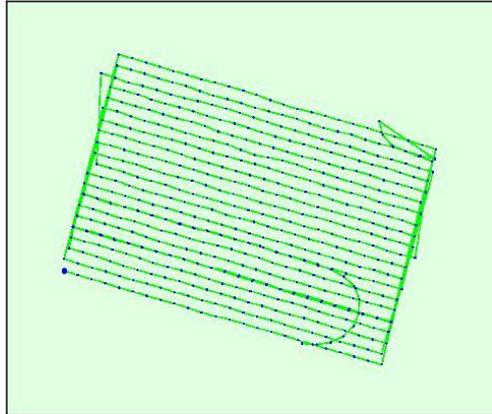
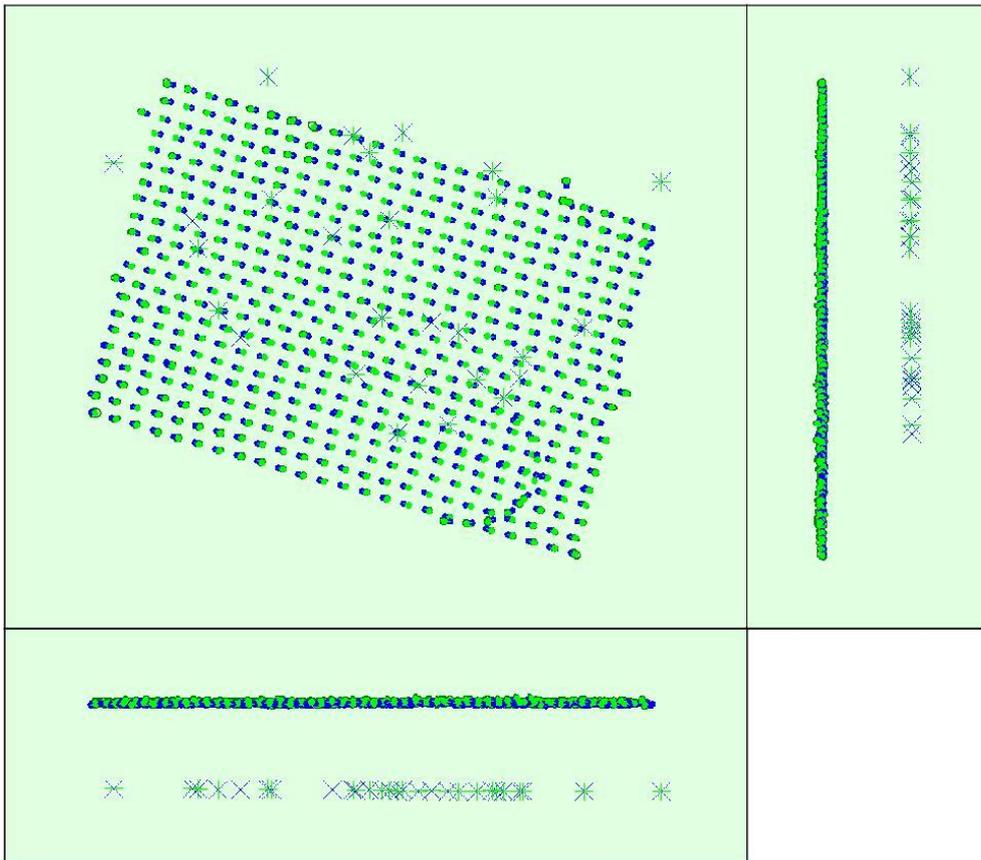


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 100x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

2 Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.174	0.150	0.242	0.015	0.018	0.004
Sigma	0.034	0.027	0.013	0.003	0.004	0.001

2 Overlap

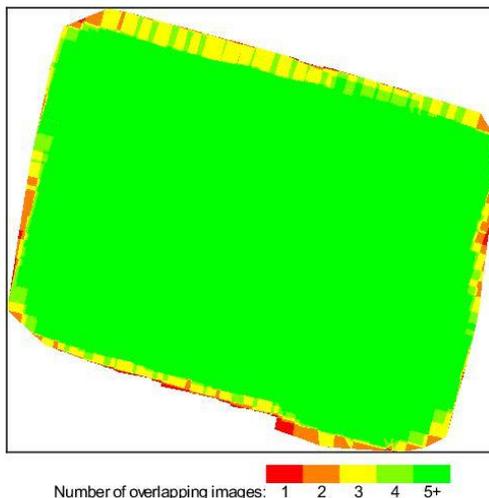


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

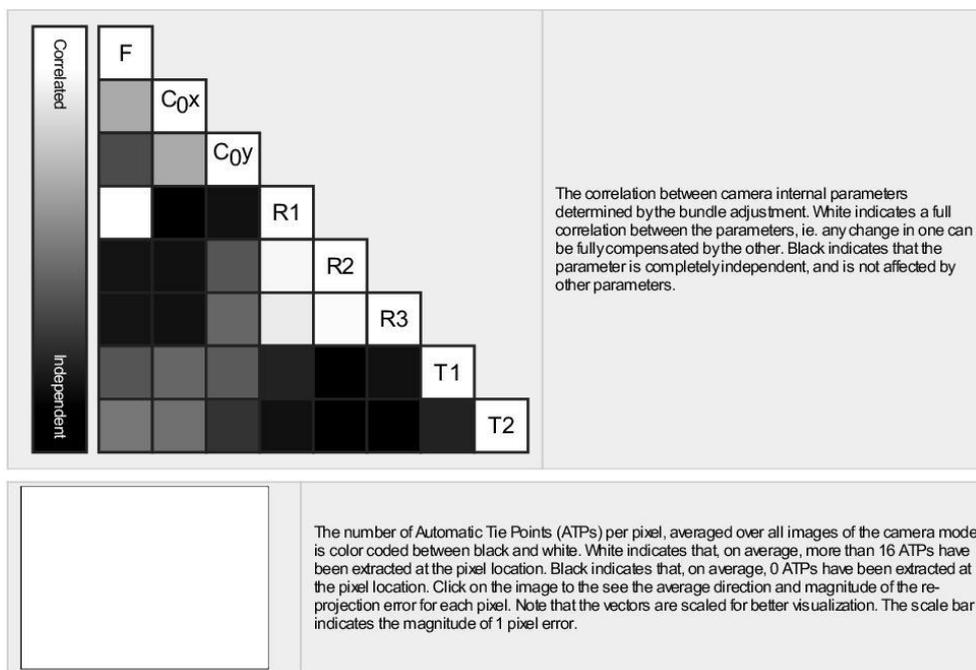
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	12913230
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	4466499
Mean Reprojection Error [pixels]	0.093

2 Internal Camera Parameters

iXM-RS150F_RodenstockRS-50mm/Aerial_50.0_14204x10652 (RGB). Sensor Dimensions: 53.407 [mm] x 40.052 [mm]

EXIF ID: iXM-RS150F_RodenstockRS-50mm/Aerial_50.0_14204x10652

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	13297.872 [pixel] 50.000 [mm]	7102.000 [pixel] 26.704 [mm]	5326.000 [pixel] 20.026 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	13748.398 [pixel] 51.694 [mm]	7160.193 [pixel] 26.922 [mm]	5317.784 [pixel] 19.995 [mm]	-0.006	0.030	-0.037	0.000	0.000
Uncertainties (Sigma)	6.082 [pixel] 0.023 [mm]	1.046 [pixel] 0.004 [mm]	1.051 [pixel] 0.004 [mm]	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	74177	22762
Min	35359	7308
Max	85666	36731
Mean	71227	22936

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	2633240
In 3 Images	948018
In 4 Images	390597
In 5 Images	200821
In 6 Images	117612
In 7 Images	66547
In 8 Images	40468
In 9 Images	26308
In 10 Images	15472
In 11 Images	9864
In 12 Images	6321
In 13 Images	4122
In 14 Images	2488
In 15 Images	1728
In 16 Images	1136
In 17 Images	631
In 18 Images	410
In 19 Images	301
In 20 Images	179
In 21 Images	109
In 22 Images	53

In 23 Images	45
In 24 Images	26
In 25 Images	2
In 26 Images	1

2D Keypoint Matches

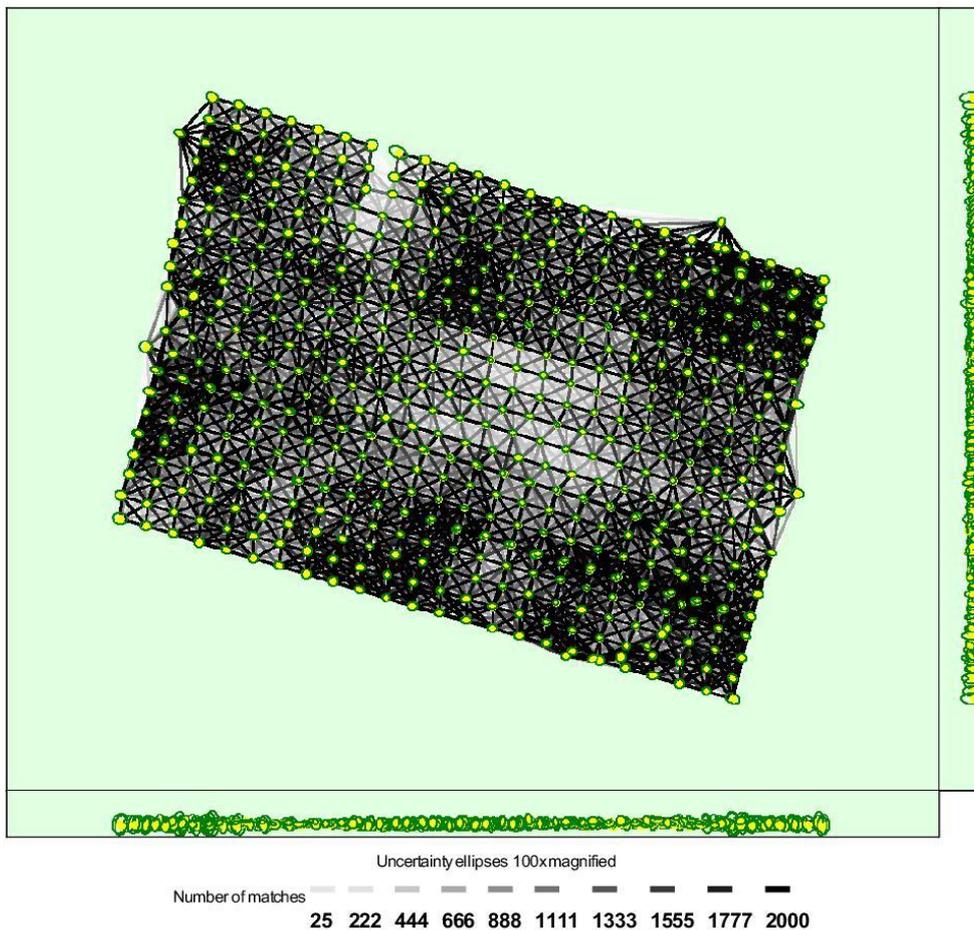


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.194	0.164	0.206	0.023	0.031	0.006
Sigma	0.031	0.028	0.100	0.007	0.011	0.002

Geolocation Details

 **Ground Control Points** 

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
101 (3D)	0.005/0.005	0.004	0.011	-0.010	0.540	18 / 18
102 (3D)	0.005/0.005	0.001	0.028	0.161	2.036	12 / 12
105 (3D)	0.005/0.005	0.006	0.005	0.068	0.608	14 / 14
106 (3D)	0.005/0.005	0.022	0.016	-0.246	1.949	21 / 22
107 (3D)	0.005/0.005	0.023	0.003	0.044	0.900	17 / 18
108 (3D)	0.005/0.005	-0.032	0.008	-0.040	0.960	12 / 13
112 (3D)	0.005/0.005	-0.012	0.024	0.011	1.171	16 / 16
113 (3D)	0.005/0.005	0.021	-0.023	-0.035	1.191	14 / 14
123 (3D)	0.005/0.005	0.007	0.023	0.038	1.002	17 / 17
124 (3D)	0.005/0.005	-0.014	-0.029	0.049	1.384	25 / 25
173 (3D)	0.005/0.005	-0.004	-0.041	-0.072	2.175	15 / 15
235 (3D)	0.005/0.005	0.003	-0.008	0.170	0.538	7 / 7
238 (3D)	0.005/0.005	-0.002	0.002	0.099	1.072	16 / 16
242 (3D)	0.005/0.005	0.010	-0.002	0.011	0.285	6 / 6
243 (3D)	0.005/0.005	-0.001	-0.017	0.041	1.051	4 / 4
245 (3D)	0.005/0.005	-0.005	-0.000	0.046	1.311	6 / 6
246 (3D)	0.005/0.005	0.006	-0.043	0.040	0.985	11 / 11
247 (3D)	0.005/0.005	-0.035	0.019	-0.016	0.748	17 / 17
249 (3D)	0.005/0.005	-0.370	-0.466	0.033	2.203	12 / 13
250 (3D)	0.005/0.005	0.009	0.023	-0.037	0.050	2 / 2
252 (3D)	0.005/0.005	-0.016	-0.005	-0.006	0.583	12 / 12
255 (3D)	0.005/0.005	-0.008	-0.009	-0.081	1.415	16 / 16
258 (3D)	0.005/0.005	-0.003	0.007	0.058	2.521	14 / 15
259 (3D)	0.005/0.005	0.008	-0.017	-0.115	2.946	15 / 15
260 (3D)	0.005/0.005	0.012	0.015	-0.034	0.879	9 / 9
265 (3D)	0.005/0.005	0.033	-0.004	-0.014	0.642	11 / 11
267 (3D)	0.005/0.005	-0.012	0.010	-0.088	2.202	20 / 20
Mean [m]		-0.013024	-0.017385	0.002707		
Sigma [m]		0.071683	0.089899	0.082508		
RMS Error [m]		0.072857	0.091565	0.082552		

0 out of 17 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
131		-0.0086	-0.0050	0.7636	0.6991	12 / 12
132		0.0601	0.0026	0.2932	0.5100	11 / 11
133		0.0674	-0.0153	0.3701	0.8166	14 / 14
141		-0.0039	-0.0540	-0.0918	0.6678	15 / 15
148		0.0471	0.0657	0.2430	1.2393	20 / 20
161		0.0150	-0.0090	-0.0631	0.7401	10 / 10
162		0.0552	-0.0628	-1.0273	5.4654	14 / 14
163		0.0264	-0.0320	-0.0749	0.5230	17 / 17
174		0.0117	-0.0260	0.3521	0.6189	16 / 16
210		0.2922	0.1415	1.0208	1.4691	13 / 13
211		-0.0050	0.0099	-0.2205	0.7609	14 / 14
215		0.0609	0.0286	0.2867	0.5460	15 / 15
216		-0.8998	-0.2774	0.4365	0.3976	8 / 8
220		0.0730	-0.0337	0.2630	1.0590	11 / 11
221		-0.1017	0.0234	0.6606	0.9439	20 / 20
226		-0.0002	-0.0096	-0.0637	0.7240	21 / 21
227		0.0077	0.0356	-0.4837	1.1106	7 / 7
Mean [m]		-0.017784	-0.012797	0.156740		
Sigma [m]		0.233085	0.080930	0.469787		
RMS Error [m]		0.233762	0.081935	0.495245		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

🔍 Absolute Geolocation Variance



Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-150.00	0.00	0.00	0.00
-150.00	-120.00	0.00	0.00	0.00
-120.00	-90.00	0.00	0.00	0.00
-90.00	-60.00	0.18	0.00	0.00
-60.00	-30.00	31.44	0.00	0.00
-30.00	0.00	19.18	48.31	49.56
0.00	30.00	5.68	51.51	50.44
30.00	60.00	43.52	0.18	0.00
60.00	90.00	0.00	0.00	0.00
90.00	120.00	0.00	0.00	0.00
120.00	150.00	0.00	0.00	0.00
150.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		0.919407	1.677649	-4.966773
Sigma [m]		31.088171	9.769595	1.570125
RMS Error [m]		31.101763	9.912592	5.209043

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	0.919407	1.677649	-4.966773

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

🔍 Relative Geolocation Variance



Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	99.82	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	50.000000	50.000000	100.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Initial Processing Details



System Information



Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) W-2223 CPU @ 3.60GHz RAM: 128GB GPU: unknown graphics card (Driver: unknown)
Operating System	Windows 10 Pro for Workstations, 64-bit

Coordinate Systems



Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 32N (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 32N (EGM96 Geoid)

Processing Options



Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 0.5
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, no

Point Cloud Densification details



Processing Options



Image Scale	multiscale, 1/4 (Quarter image size, Fast)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: yes
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	02h:33m:14s
Time for Point Cloud Classification	24m:54s
Time for 3D Textured Mesh Generation	04h:10m:14s

Results



Number of Generated Tiles	6
Number of 3D Densified Points	116952924
Average Density (per m ³)	15.72

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (3.86 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: yes
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (3.86 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	02h:45m:00s
Time for Orthomosaic Generation	10h:11m:17s
Time for DTM Generation	01h:46m:07s

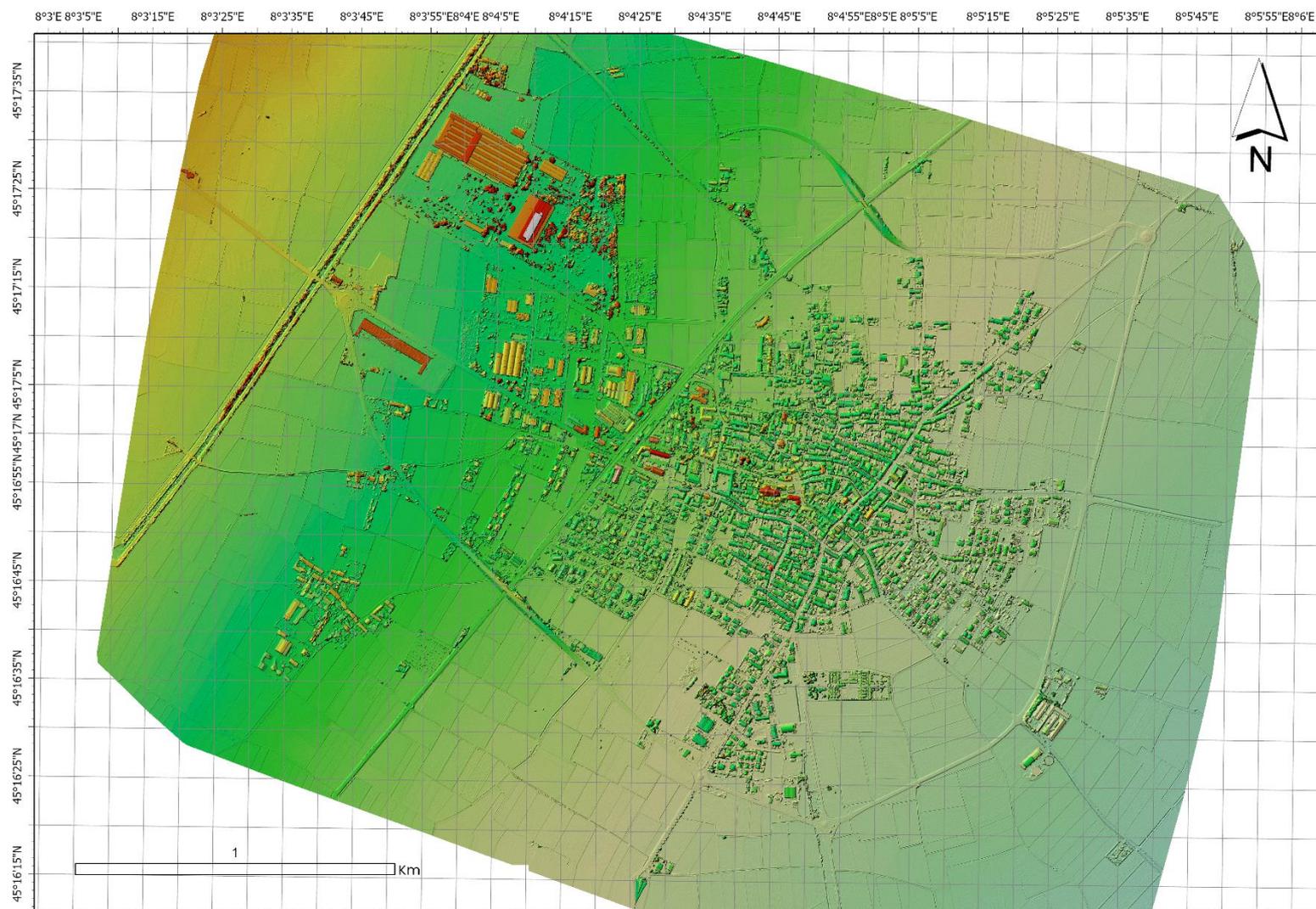
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

6.5.2.1 DSM ed Ortomosaico

Gli output prodotti da PIX4Dmapper vengono di seguito riportati, con annesse le rispettive tabelle descrittive (Tabella 20 e Tabella 21).

Tabella 20 DSM generato da PIX4Dmapper: specifiche

Prodotto	Digital Surface Model (DSM)
Dimensione (pixel)	94336 x 85906
Risoluzione (cm/pix)	3.86
Sistema di coordinate	WGS 84 / UTM 32 Zone N (EPSG: 32632)
GSD	0.0386



Output 7 DSM generato da PIX4Dmapper

Tabella 21 Ortomosaico generato da PIX4Dmapper: specifiche

Prodotto	Ortomosaico
Dimensione (pixel)	94336 x 85906
Risoluzione (cm/pix)	3.86
Sistema di coordinate	WGS 84 / UTM 32 Zone N (EPSG: 32632)
GSD	0.0386



Output 8 Ortomosaico generato da PIX4Dmapper

7 Benchmarking

7.1 Ortorettifica

L'ortorettifica è un processo che corregge molti artefatti relativi alle immagini tele-rilevate finalizzato alla produzione di ortofoto accurate. Le ortofoto possono quindi essere elaborate in termini di bilanciamento del colore e collimazione dei bordi per produrre un ortomosaico uniforme. [30]

Nello specifico, l'ortorettifica si riferisce alla rimozione delle imprecisioni geometriche indotte dalla piattaforma di acquisizione, dal sensore e, in particolare, dal dislocamento del terreno che portano ad avere immagini distorte. Esistono due tipi principali di distorsioni:

Distorsione radiometrica — La traduzione imprecisa dei valori di riflettanza del suolo in valori di grigio o numeri digitali (DN) nell'immagine. L'errore radiometrico è causato dall'azimut e dall'elevazione del sole, dalle condizioni atmosferiche e dai limiti del sensore. [30]

Distorsione geometrica — La traduzione imprecisa di scala e posizione nell'immagine. L'errore geometrico è causato dallo spostamento del terreno, dalla curvatura della Terra, dalle proiezioni prospettiche e dalla strumentazione. [30]

Per il benchmarking è stata eseguita un'**analisi geometrica** ed un'**analisi altimetrica** dei DSM e delle ortofoto prodotte dai vari software, calcolando l'RMSE e la deviazione standard.

L'**RMSE** ("**root-mean-square error**" - la radice quadrata dell'errore quadratico medio), è uno stimatore che misura le differenze tra i valori (campioni o valori della popolazione) previsti dal modello ($Predicted_i$) ed i valori osservati ($Actual_i$):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Predicted_i - Actual_i)^2}{N}} \quad (4)$$

L'RMSE è calcolato come radice **dell'Errore quadratico medio (MSE)** che fornisce una stima sulla qualità dello stimatore utilizzato, essendo calcolato come somma della varianza e del quadrato della sua distorsione:

$$MSE(\hat{\theta}) = Var(\hat{\theta}) + (Bias(\hat{\theta}, \theta))^2 \quad (5)$$

Dove $\hat{\theta}$ è uno stimatore del parametro stimato θ e $Bias$ rappresenta la sua distorsione.

La **deviazione standard** (o **scarto quadratico medio**) è un indice di dispersione statistico che consente di stimare la variabilità di una popolazione di dati o di una variabile casuale:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (6)$$

7.2 Analisi geometrica

Per effettuare l'analisi geometrica, sono state prese in esame le **coordinate ortometriche planari** (latitudine e longitudine) dei **17 check point**. Si ricorda che quelle ricavate dal sistema GPS / GNSS con correzione RTK durante l'appoggio in campo, sono **coordinate ellissoidiche** proiettate sul sistema di riferimento **WGS84 / UTM32 Nord**. In Tabella 22 vengono riportate i valori di latitudine e longitudine dei check point:

Tabella 22 Check point: latitudine e longitudine in WGS84/UTM32 Nord

Nome check point	Latitudine [m]	Longitudine [m]
131	5014456.953	427256.811
132	5014878.092	426958.423
133	5014764.546	427341.669
141	5015205.904	428028.502
148	5015026.997	428566.629
161	5015051.98	427784.722
162	5015207.553	428011.471
163	5014904.524	428239.369
174	5014447.982	427662.47
210	5014117.416	426292.286
211	5013617.545	427960.645
215	5014773.144	425978.715
216	5013896.737	426127.063
220	5013763.684	427542.193
221	5014106.754	427215.148
226	5013967.362	428527.93
227	5013589.341	428874.786

Per effettuare il confronto, sono stati estrapolati dai relativi report di processamento, i valori delle coordinate risultanti dall'elaborazione dei software e sono stati confrontati con le coordinate di riferimento. Conseguentemente, sono stati calcolati per ogni coordinata: lo **scarto quadratico medio (MSE)**, la **radice quadrata dell'errore quadratico medio (RMSE)** e la **deviazione standard** dello scarto quadratico medio.

Da un'analisi qualitativa preliminare, i risultati ottenuti con Catalyst Professional sono stati scartati in via preliminare in quanto non soddisfacenti. Di seguito sono riportate due tabelle che raggruppano i valori di longitudine (Tabella 23) e latitudine (Tabella 24):

Tabella 23 Confronto valori di Longitudine

Check point	Longitudine GNSS / RTK [m]	Longitudine Metashape [m]	Longitudine ArcGIS Pro [m]	Longitudine Pix4d [m]
131	427256.811	427256.815	427256.871	427256.802
132	426958.423	426958.387	426958.434	426958.483
133	427341.669	427341.643	427341.664	427341.736

Check point	Longitudine GNSS / RTK [m]	Longitudine Metashape [m]	Longitudine ArcGIS Pro [m]	Longitudine Pix4d [m]
141	428028.502	428028.481	428028.509	428028.498
148	428566.629	428566.620	428566.608	428566.676
161	427784.722	427784.649	427784.676	427784.737
162	428011.471	428011.394	428011.429	428011.526
163	428239.369	428239.323	428239.316	428239.395
174	427662.470	427662.469	427662.481	427662.482
210	426292.286	426292.169	426292.098	426292.578
211	427960.645	427960.673	427960.799	427960.640
215	425978.715	425978.691	425978.802	425978.776
216	426127.063	426127.245	426128.135	426126.163
220	427542.193	427542.193	427542.185	427542.266
221	427215.148	427215.193	427215.305	427215.046
226	428527.930	428527.926	428527.926	428527.930
227	428874.786	428874.794	428874.738	428874.794

Tabella 24 Confronto valori di Latitudine

Check point	Latitudine GNSS / RTK [m]	Latitudine Metashape [m]	Latitudine ArcGIS Pro [m]	Latitudine Pix4d [m]
131	5014456.953	5014456.950	5014456.980	5014456.948
132	5014878.092	5014878.086	5014878.065	5014878.095
133	5014764.546	5014764.549	5014764.566	5014764.531
141	5015205.904	5015205.927	5015205.871	5015205.850
148	5015026.997	5015026.961	5015026.863	5015027.063
161	5015051.980	5015051.959	5015051.994	5015051.971
162	5015207.553	5015207.567	5015207.560	5015207.490
163	5014904.524	5014904.554	5014904.540	5014904.492
174	5014447.982	5014447.955	5014448.011	5014447.956
210	5014117.416	5014117.365	5014117.396	5014117.558
211	5013617.545	5013617.548	5013617.575	5013617.555
215	5014773.144	5014773.190	5014773.131	5014773.173
216	5013896.737	5013896.788	5013897.118	5013896.460
220	5013763.684	5013763.666	5013763.715	5013763.650
221	5014106.754	5014106.716	5014106.749	5014106.777
226	5013967.362	5013967.363	5013967.369	5013967.352
227	5013589.341	5013589.330	5013589.295	5013589.377

Lo step successivo è stato quello di calcolare gli stimatori statistici per valutare l'accuratezza geometrica, applicando le formule riportate all'inizio di questo paragrafo.

7.2.1 RMSE

Nella tabella sottostante, sono riportati i valori di RMSE ottenuti con i tre software (Metashape, ArcGIS Pro e Pix4d), per la longitudine e la latitudine (Tabella 25):

Tabella 25 RMSE Longitudine

Software	RMSE Longitudine [m]	RMSE Latitudine [m]
Metashape	0.062	0.028
ArcGIS Pro	0.272	0.101
Pix4D	0.234	0.082

7.2.2 MSE

In maniera analoga, la Tabella 26 **Error! Reference source not found.** riporta la misurazione dello scarto quadratico medio (MSE):

Tabella 26 Scarto quadratico medio per la Longitudine

Software	MSE Longitudine [m]	MSE Latitudine [m]
Metashape	0.041	0.022
ArcGIS Pro	0.116	0.049
Pix4D	0.102	0.049

7.2.3 Deviazione standard

L'ultimo stimatore calcolato è la deviazione standard (Tabella 27):

Tabella 27 Deviazione standard

Software	Deviazione standard Longitudine [m]	Deviazione standard Latitudine [m]
Metashape	0.064	0.029
ArcGIS Pro	0.271	0.102
Pix4D	0.240	0.083

7.3 Analisi altimetrica

Per l'analisi altimetrica, il parametro di riferimento è stato la **quota ortometrica H**. La quota presa in esame in questa trattazione è stata ricavata dall'**altezza ellissoidica h** misurata in campo dal ricevitore GPS. La Tabella 28 riporta i valori

di quota per ogni check point. Analogamente a quanto fatto sopra, a seguire vengono riportate le tabelle gli errori residui stimati sulle misurazioni, nell'ordine: RMSE (Tabella 29), MSE (Tabella 30) e deviazione standard (Tabella 31).

Tabella 28 Check point: quota ortometrica H

Nome check point	Quota ortometrica H [m]
131	189.797
132	192.280
133	190.291
141	187.936
148	183.887
161	188.430
162	187.834
163	184.514
174	187.208
210	193.119
211	183.807
215	201.188
216	193.431
220	185.940
221	189.089
226	182.318
227	179.867

7.3.1 RMSE

Tabella 29 Quota ortometrica H - RMSE

Software	RMSE Quota H [m]
Metashape	0.020
ArcGIS Pro	0.145
Pix4D	0.495

7.3.2 MSE

Tabella 30 Quota ortometrica H - MSE

Software	MSE Quota H [m]
Metashape	0.012
ArcGIS Pro	0.095
Pix4D	0.395

7.3.3 Deviazione standard

Tabella 31 Quota ortometrica H - Deviazione standard

Software	Deviazione standard Quota H [m]
Metashape	0.020
ArcGIS Pro	0.136
Pix4D	0.484

7.4 Considerazioni e tabella di confronto

Alla luce di quanto emerge dal punto precedente, risulta evidente come, in termini di accuratezza del dato, i risultati migliori sono stati ottenuti dal software Metashape.

Per avere un quadro completo del benchmark effettuato, è stata compilata una tabella comparativa contenente non solo i dati dell'accuratezza geometrica ed altimetrica, ma anche i parametri peculiari derivati dai rispettivi report di processamento dei tre software. Nello specifico, sono stati riportati i dati relativi a:

- 1) Sintesi analisi geometrica / altimetrica;
- 2) Allineamento iniziale:
 - a. Tempo totale di processamento;
 - b. Dimensione del file generato;
- 3) Creazione nuvola densa di punti:
 - a. tempo totale di processamento;
 - b. Dimensione del file generato;
- 4) Creazione DEM:
 - a. Tempo totale di processamento;
 - b. Dimensione del file generato;
- 5) Creazione Ortomosaico:

- Tempo totale di processamento;
- Dimensione del file generato;

Tabella 32 Tabella comparativa parametri di processamento

Parametro		Software		
		Metashape	ArcGIS Pro	Pix4D
RMSE	Longitudine [m]	0.149	0.272	0.234
	Latitudine [m]	0.057	0.101	0.082
	Quota H [m]	0.047	0.145	0.495
MSE	Longitudine [m]	0.080	0.116	0.102
	Latitudine [m]	0.043	0.049	0.049
	Quota H [m]	0.032	0.095	0.395
Dev. Standard	Longitudine [m]	0.153	0.116	0.102
	Latitudine [m]	0.057	0.049	0.049
	Quota H [m]	0.046	0.136	0.484
Allineamento iniziale	Tempo totale [dd:hh:mm:ss]	00:00:24:51	00:04:08:59	00:00:24:19
	Dimensioni file generato [GB]	0.527	-	4.13
Creazione nuvola densa di punti	Tempo totale [dd:hh:mm:ss]	00:06:24:00	00:04:09:07	00:02:33:14
	Dimensioni file generato [GB]	22.63	-	3.7
Generazione DSM	Tempo totale [dd:hh:mm:ss]	00:00:44:55	00:00:20:30	00:02:45:00
	Dimensioni file generato [GB]	5.10	5.55	8.75
Generazione Ortomosaico	Tempo totale [dd:hh:mm:ss]	00:08:54:00	00:02:57:53	00:10:11:17
	Dimensioni file generato [GB]	110.24	55.2	14.3
TEMPO DI ELABORAZIONE TOTALE [dd:hh:mm:ss]		00:16:27:46	00:11:36:29	00:15:53:50

Dalla Tabella 32 risulta evidente come a prodotti qualitativamente migliori in termini di accuratezza geometrica/altimetrica, corrispondono dei tempi complessivi di elaborazione maggiori. Mediamente, vi è anche una corrispondenza tra qualità del processamento e dimensione del file output generato. I valori più bassi calcolati in termini di RMSE e MSE sono stati ottenuti da Metashape, sia per l'accuratezza geometrica che per quella altimetrica: ciò vuol dire che in termini di valori assoluti, è il software che meglio calcola le distorsioni

spaziali durante il processo di ortorettifica. Invece in termini di deviazione standard, sia ArcGIS Pro che PIX4Dmapper hanno ottenuto prestazioni migliori a livello di accuratezza geometrica: questo vuol dire che hanno gestito meglio la variabilità del campione di dati. Mentre Metashape, che pure ha ottenuto la variabilità migliore in termini di accuratezza altimetrica, evidentemente non ha gestito in maniera altrettanto performante la dispersione dei dati geometrici.

Da quanto sopra esposto, è necessario quindi fare un'analisi preliminare costi/benefici, in virtù dello scopo del lavoro di modellazione tridimensionale e delle risorse tecniche a disposizione. Essendo uno degli obiettivi di tale studio, quello di elaborare un modello tridimensionale ad altissima risoluzione, si è deciso per utilizzare i dati prodotti dal software Metashape.

8 Creazione del modello tridimensionale

Come visto nel capitolo precedente, dal benchmarking effettuato, il software che ha restituito gli output con la migliore accuratezza è Agisoft Mestashape. Alla luce di ciò, si è deciso di generare il modello tridimensionale solido (texturizzato) utilizzando questo software.

Di seguito vengono descritti i passaggi utilizzati per la realizzazione del modello in oggetto.

8.1 Processamento immagini oblique

Come primo passaggio, è stato ripetuto il flusso di lavoro descritto sopra al paragrafo “Workflow” 6.2.1 utilizzando il dataset di **273 immagini ottiche oblique**. Tale scelta scaturisce dalla volontà di acquisire maggiori informazioni e quindi ottenere una migliore ricostruzione texturizzata sulle superfici verticali degli edifici. Dopo l’allineamento iniziale delle immagini, si è notato che alcuni punti d’appoggio non ricadono all’interno dell’aerea di proiezione dei fotogrammi del dataset, come mostrato in Figura 105. Si è deciso quindi di disabilitare i seguenti GCP: **210, 215, 216, 242, 243, 250 e 253**.

I punti noti rimanenti sono stati utilizzati tutti come punti di controllo, senza alcun punto di verifica (check point). Con queste impostazioni sono state processate consecutivamente una mappa di profondità e una nuvola densa ad alta risoluzione.

Marcatori	Stima Longitudine	Stima Latitudine	Stima Altitudine (m)	Precisione (m)	Errore (m)	Proiezioni	Errore (pix)
✓ 216	8.058197	45.274687	193.431000	0.005000		0	0.000
✓ 253	8.093558	45.289413	184.566000	0.005000		0	0.000
✓ 250	8.097395	45.289792	182.914000	0.005000		0	0.000
✓ 215	8.056175	45.282559	201.188000	0.005000		0	0.000
✓ 243	8.067432	45.295253	198.713000	0.005000		0	0.000
✓ 242	8.055742	45.290499	202.793000	0.005000		0	0.000
✓ 210	8.060270	45.276690	193.119000	0.005000		0	0.000

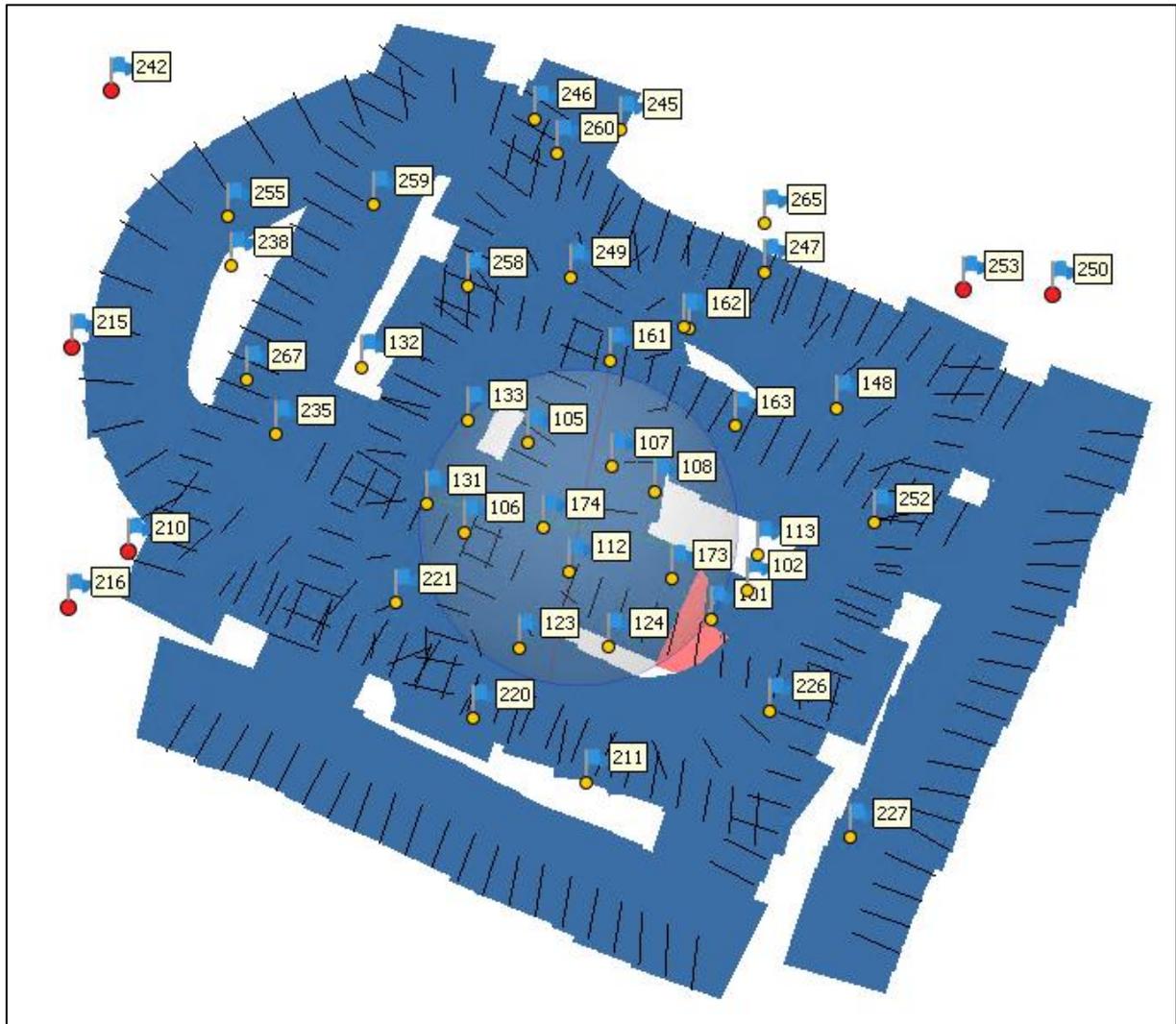


Figura 105 Punti di appoggio su immagini oblique: tabella di Reference (in alto); posizionamento in mappa rispetto ai fotogrammi proiettati (in basso)

La nuvola di punti appena creata è stata esportata nel formato *LAS*, funzionale alla successiva elaborazione tramite **Cloud Compare v.2.11.3**, software opensource per l'editing ed il processamento di nuvole di punti 3D e modelli mesh triangolari. [31]

8.2 Processamento nuvola punti LIDAR

Al paragrafo 4.2.2 è stata approfondita la trattazione in merito al telerilevamento con tecnologia laser tramite il dispositivo KAARTA e della successiva elaborazione tramite il software in dotazione, KAARTA Engine. Il risultato ottenuto è stata una nuvola da 241'787'510 punti, di seguito visualizzata su Cloud Compare (Figura 106), dove sono chiaramente distinguibili alcuni degli edifici del centro storico di Livorno Ferraris oggetto dell'acquisizione LIDAR.

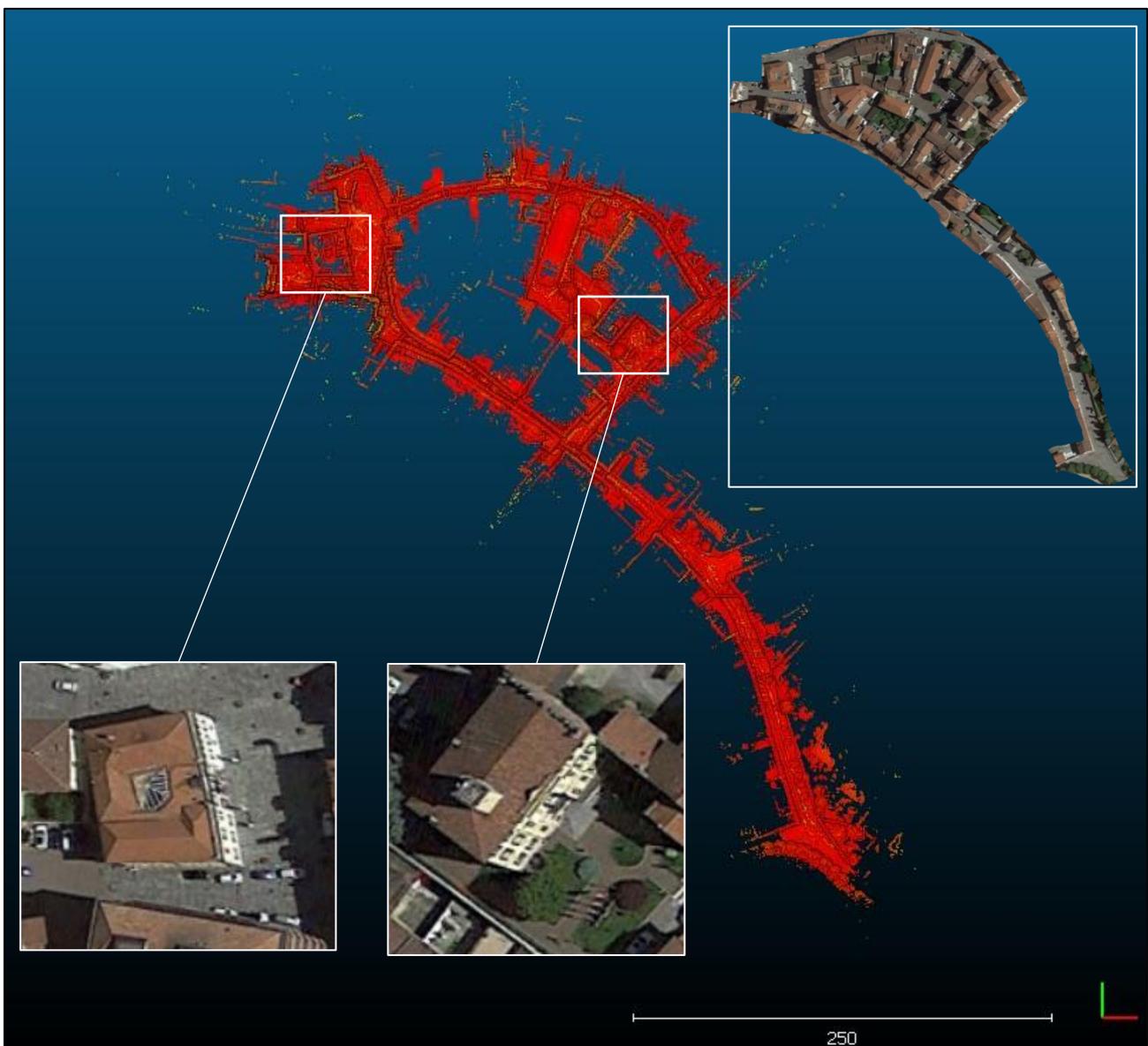


Figura 106 Individuazione sulla nuvola punti LIDAR in Cloud Compare del Palazzo G. Ferraris (riquadro sinistra) e del Municipio (riquadro destra)

Utilizzando alcuni degli strumenti a disposizione nella **Main toolbar** di Cloud Compare (Figura 107), è stato fatto un accurato lavoro di affinamento della nuvola 3D che ha visto ridurre di circa il 30% il numero di punti per un totale di 164'597'380. Il risultato finale è mostrato in (Figura 108)



Figura 107 CloudCompare: tool principali per l'editing delle nuvole di punti 3D



Figura 108 Nuvola punti LIDAR elaborata ed affinata

A questo punto sono stati importati su CloudCompare due subset delle altre due nuvole 3D ottenute dal processamento con Metashape, ottenute dall'elaborazione rispettivamente delle immagini ottiche nadirali e di quelle

oblique. È opportuno precisare che a differenza della nuvola ottenuta con il LIDAR, quelle generate con Metashape sono costituite da punti colorati in RGB, in quanto derivate dall'allineamento di immagini ottiche, come di seguito mostrato in Figura 109.

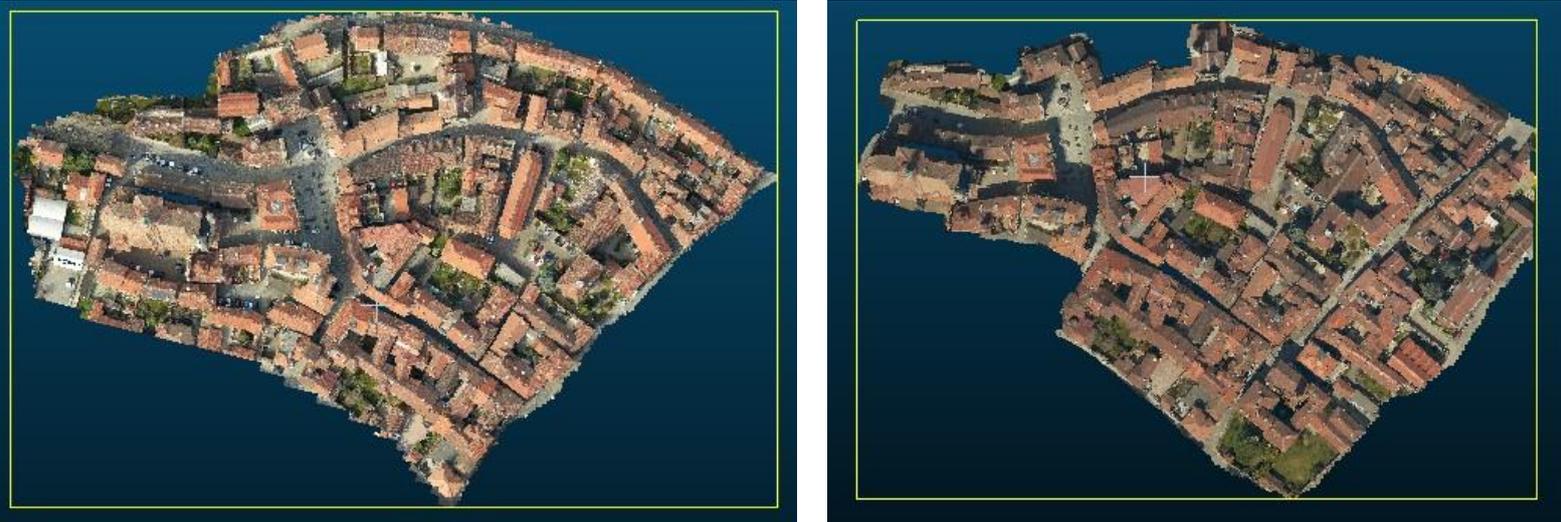


Figura 109 Nuvole punti 3D da Metashape ottenute dalle immagini ottiche (sinistra) e da immagini nadirali (destra)

Avendo caricato tutte e tre le nuvole sull'area di lavoro del software, la prima informazione rilevante da riportare consiste nella quantità totale di punti contenuti nelle rispettive nuvole (Tabella 33):

Tabella 33 Comparazione nuvole punti 3D

Tipo di nuvola punti	N. originario di punti	Totale punti processati
LIDAR	241'787'510	164'597'380
Metashape – nadirali	1'755'953'371	20'379'560
Metashape – oblique	453'406'787	16'945'486

La tecnologia LIDAR rappresenta allo stato dell'arte, la tecnica di telerilevamento tridimensionale più accurata in termini di quantità e qualità del dato ottenuto a parità di area di acquisizione. Invece la discrepanza numerica riscontrata tra le due nuvole Metashape è da imputare al numero complessivo di immagini elaborate in fase di processamento: 563 per quelle nadirali e 277 per le oblique.

8.3 Allineamento delle nuvole di punti

La fase successiva consiste nell'allineamento delle tre nuvole di punti. Infatti, come si può evincere dalle immagini di Figura 110, sia le due nuvole ottiche che quella LIDAR si trovano collocate diversamente nello spazio lavoro di CloudCompare.

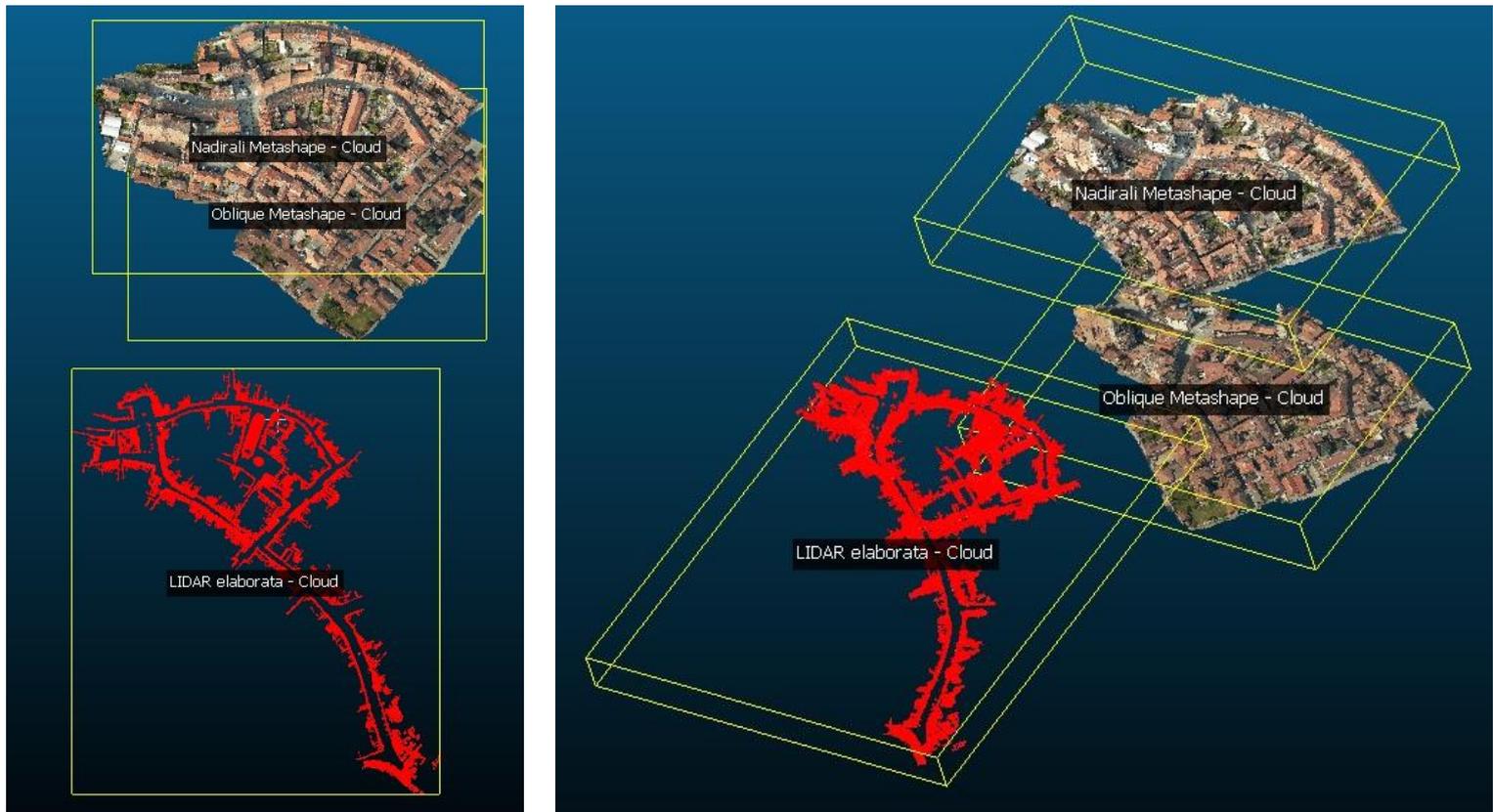


Figura 110 Posizionamento delle 3 nuvole sull'area lavoro di CloudCompare con vista dall'alto (sinistra) e prospettica (destra)

Per l'allineamento, si procede per step successivi utilizzando due nuvole di punti per volta. Si selezionano quindi le nuvole di punti derivate da Metashape e si avvia la procedura da **Tools > Registration > Align (points pairs picking)**  che consente la registrazione tra le due entità tramite l'individuazione di coppie di punti omologhi sulle due nuvole. Per fare ciò, è necessario in prima battuta selezionare quale delle due entità verrà utilizzata come riferimento (**reference**) e quale dev'essere allineata (**to align**). Fatto ciò, bisogna individuare

manualmente almeno 3 coppie omologhe di punti sulle due nuvole. In Figura III vengono mostrate le fasi dell'allineamento.

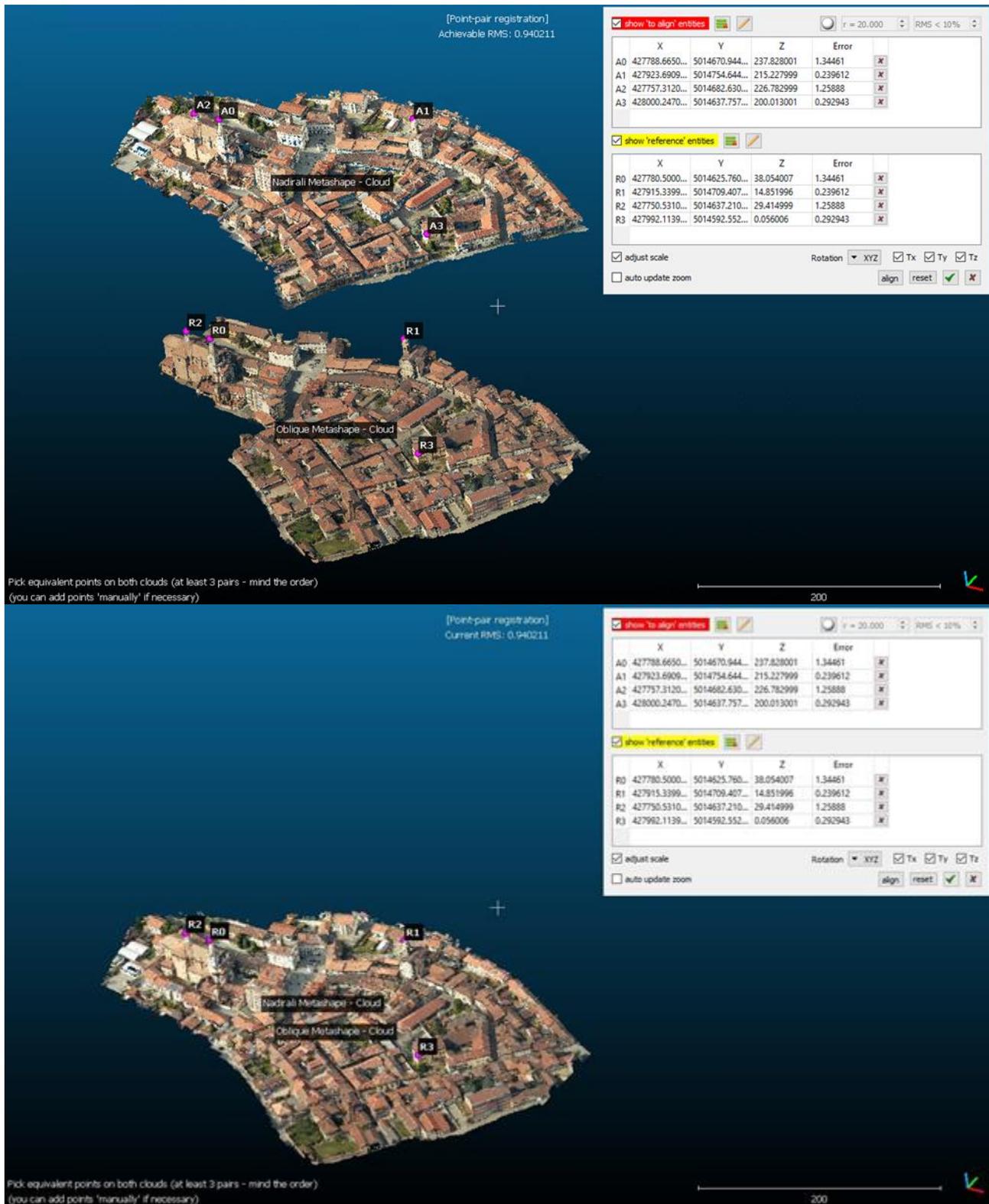


Figura III CloudCompare: registrazione di 4 coppie di punti (in alto) e risultato finale dell'allineamento (in basso)

Per affinare ulteriormente l'allineamento delle due entità appena registrate, si utilizza il comando **Tools > Registration > Fine registration (ICP)**. 

Analogamente al passaggio precedente, viene scelta la nuvola obliqua come entità di **reference**. Impostando invece il parametro **Final overlap** al 75%, l'algoritmo cercherà automaticamente coppie di punti omologhi tra le due entità che soddisfano tale condizione (Figura 112).

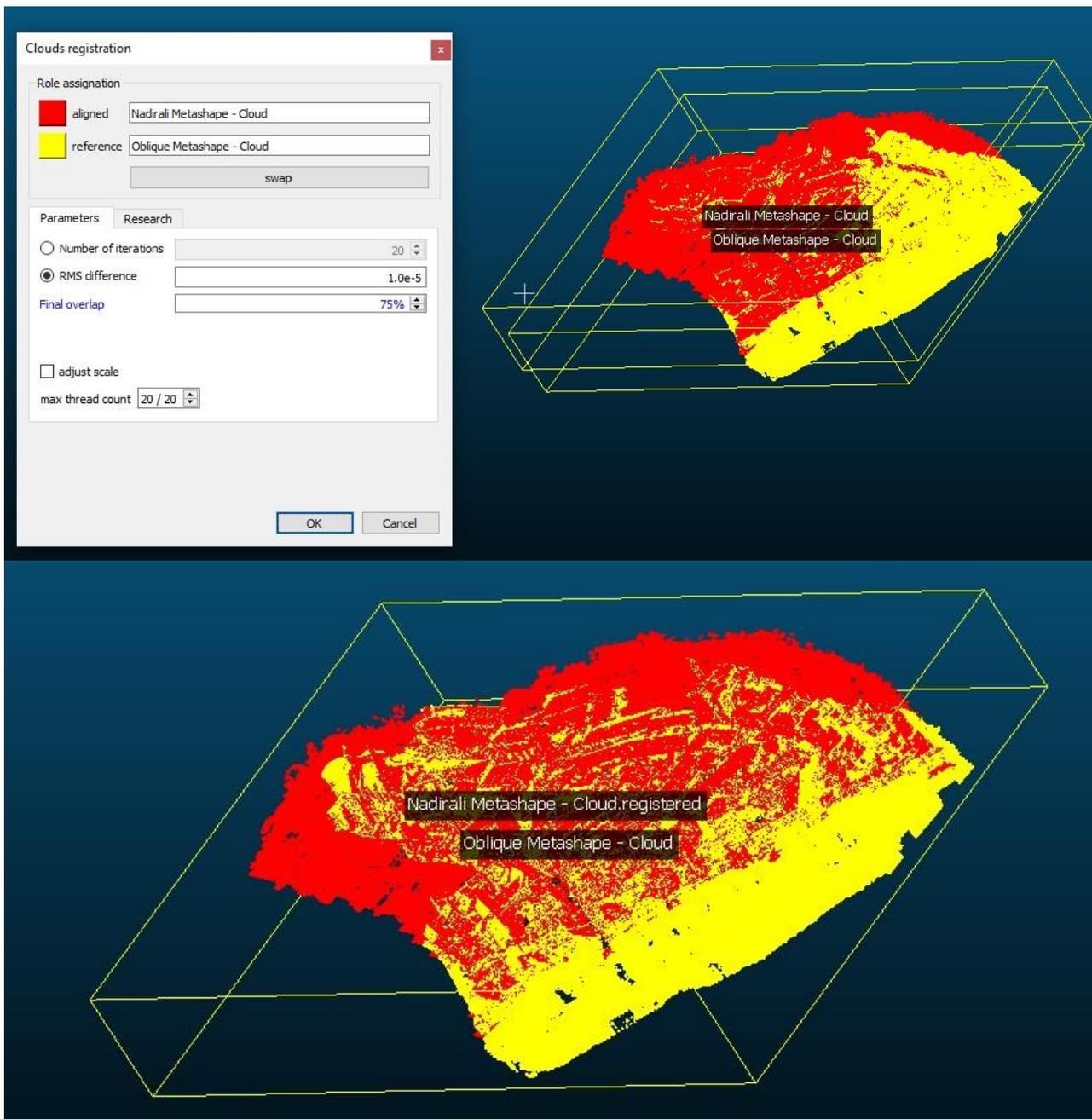


Figura 112 CloudCompare: esecuzione tool Fine Registration (in alto) e risultato dell'allineamento automatico (in basso)

Completato questo passaggio, è possibile unire le due nuvole di punti tramite il comando **Merge**  e quindi replicare le operazioni di allineamento appena descritte, tra la nuvola LIDAR e quella appena creata. In (Figura 113) una sequenza fotografica dei passaggi effettuati:

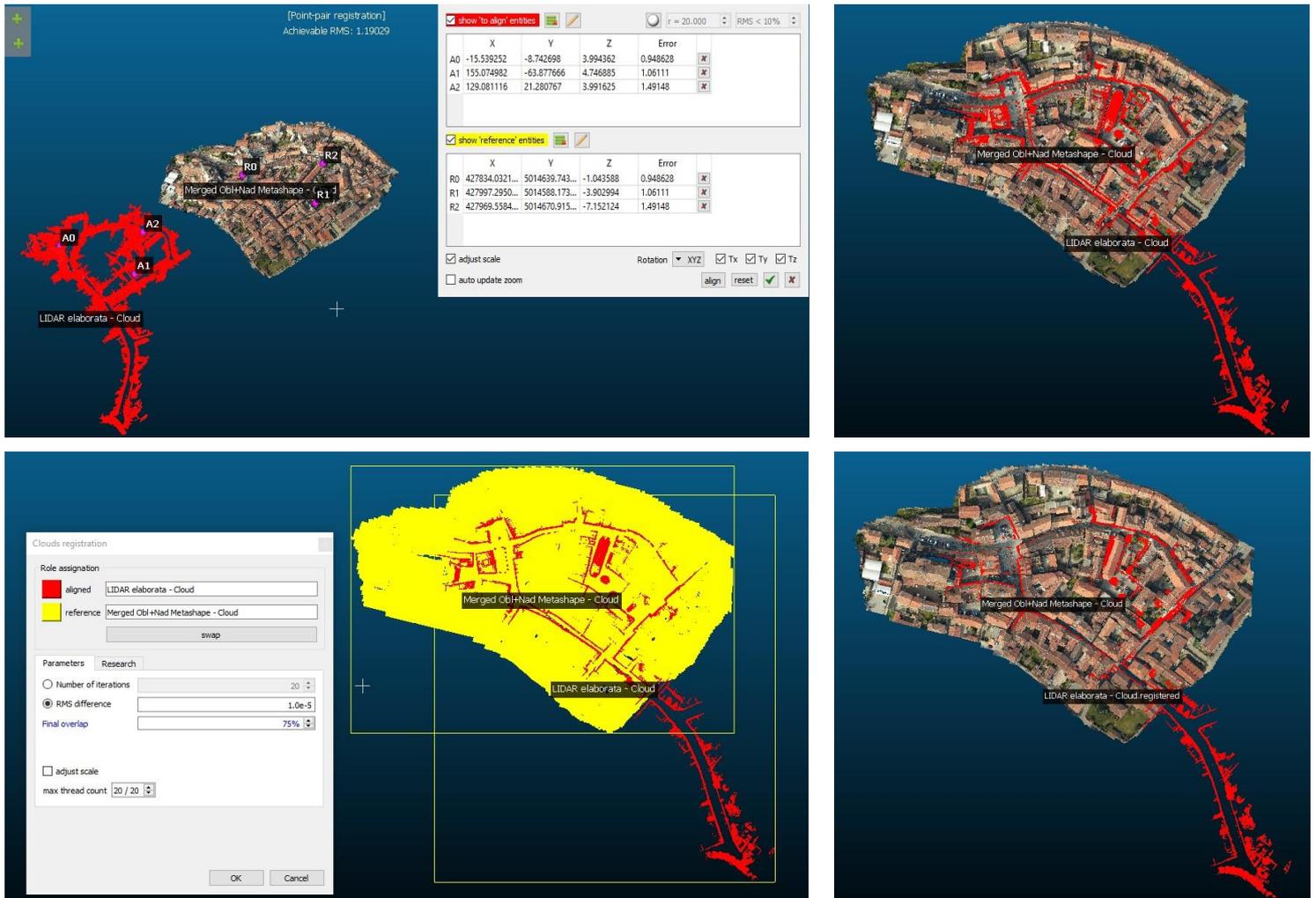


Figura 113 Processamento nuvola LIDAR + nuvola ottica: esecuzione funzione di Align (in alto a sinistra) e relativo output (in alto a destra); affinamento automatico tramite Fine Registration (in basso a sinistra) e risultato (in basso a destra)

8.4 Elaborazioni successive su nuvole punti

A questo punto è necessario rimuovere dalla nuvola di punti LIDAR, la parte a sud-est che non trova corrispondenza sull'altra nuvola. Si utilizza quindi il comando **Segment** che consente di segmentare la nuvola 3D in due o più sotto-entità come mostrato in (Figura 114):

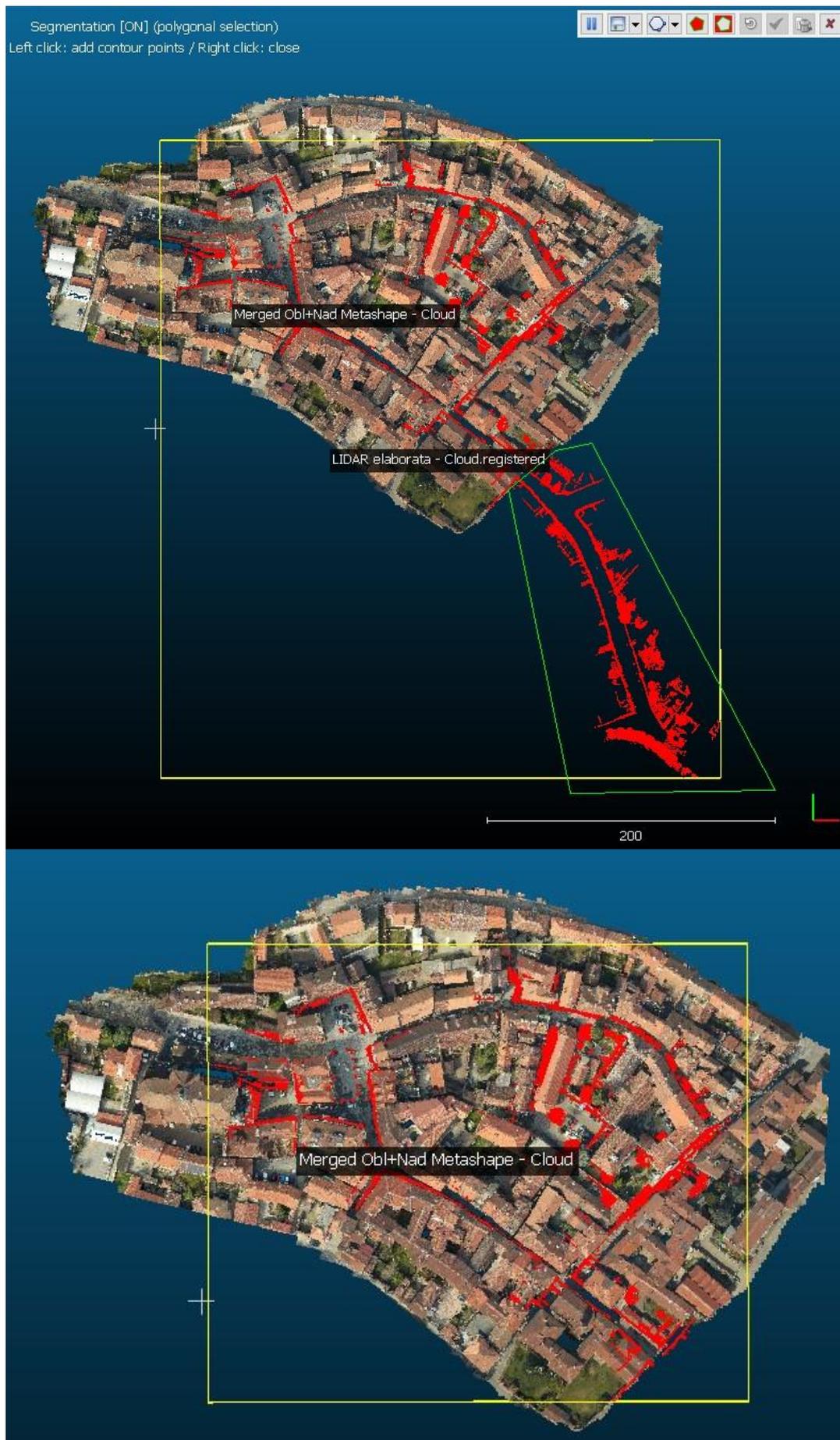


Figura 114 Segmentazione - in verde - della nuvola LIDAR (in alto) e risultato finale (in basso)

L'operazione successiva consiste nel colorare la nuvola LIDAR ricavando le informazioni colorimetriche dalla nuvola colorata ottenuta dalle immagini aeree. Selezionando le due entità 3D, si esegue il comando **Edit > Color > Interpolate from another entity** (Figura 115)

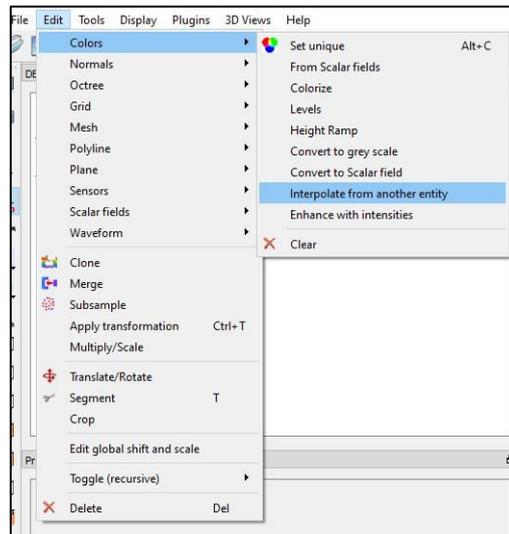


Figura 115 CloudCompare: colorazione nuvola LIDAR tramite comando "Interpolate"

Il cui risultato finale è riportato in Figura 116:

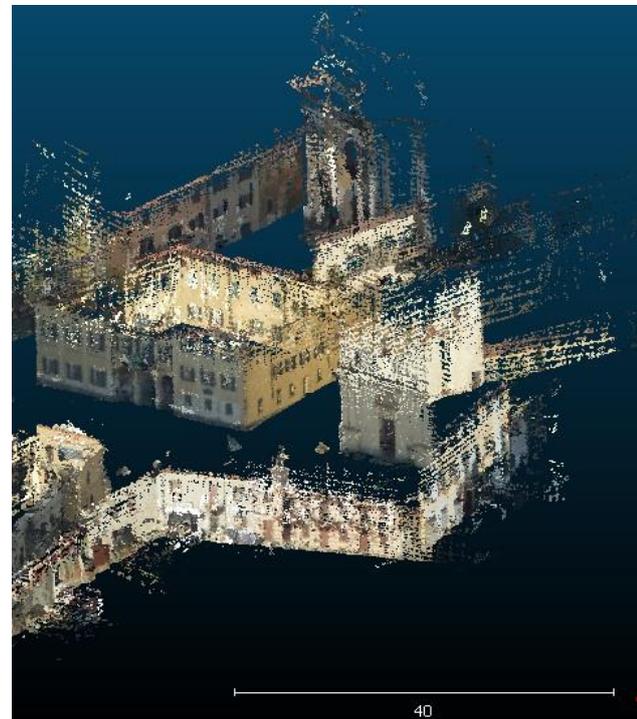
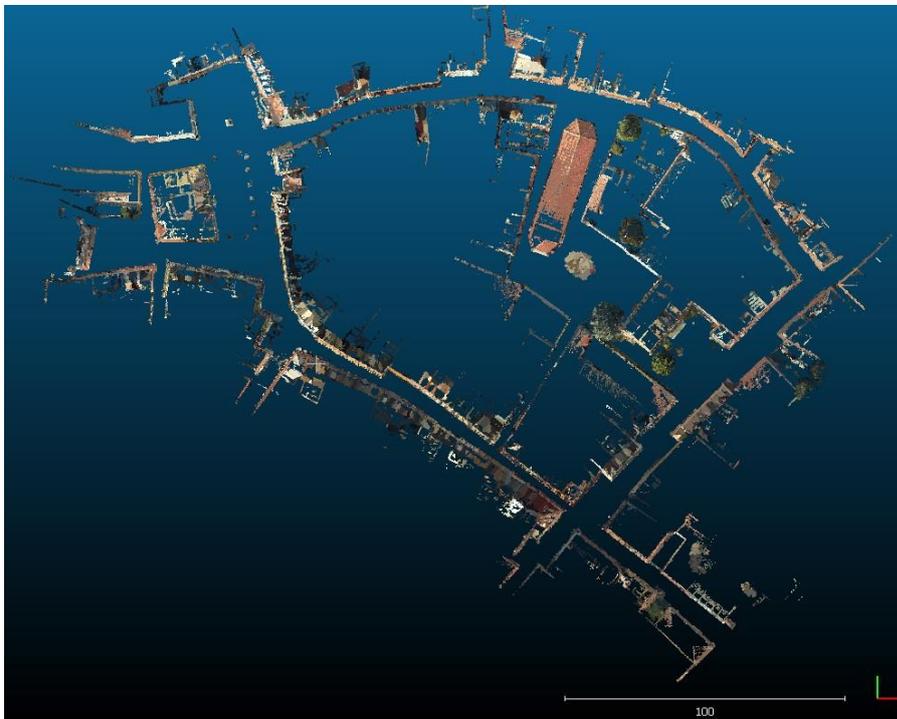


Figura 116 Nuvola LIDAR colorata: vista dall'alto (sinistra) e vista prospettica (destra), dettaglio Palazzo G. Ferraris

Completata la colorazione della nuvola LIDAR, l'ultimo passaggio prevede l'operazione definitiva di unione (**Merge**) delle due entità per ottenere l'output finale (Figura 117): una nuvola da 37'325'046 punti, proiettata in WGS84 / UTM 32N.



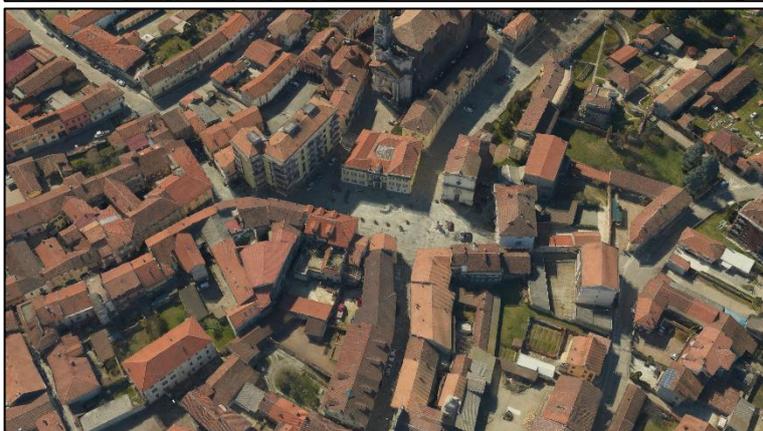
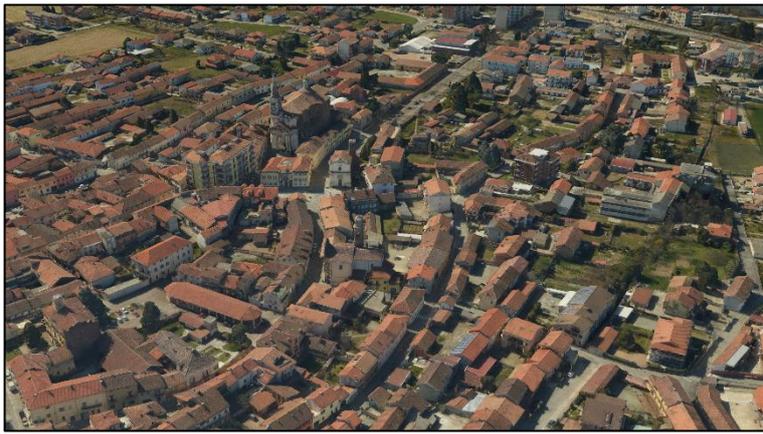
Figura 117 Nuvola di punti definitiva: vista laterale (in alto a sinistra), vista assometrica 1 (in alto a destra), vista assometrica 2 (in basso a destra) e vista dall'alto (in basso a sinistra)

8.5 Creazione modello texturizzato

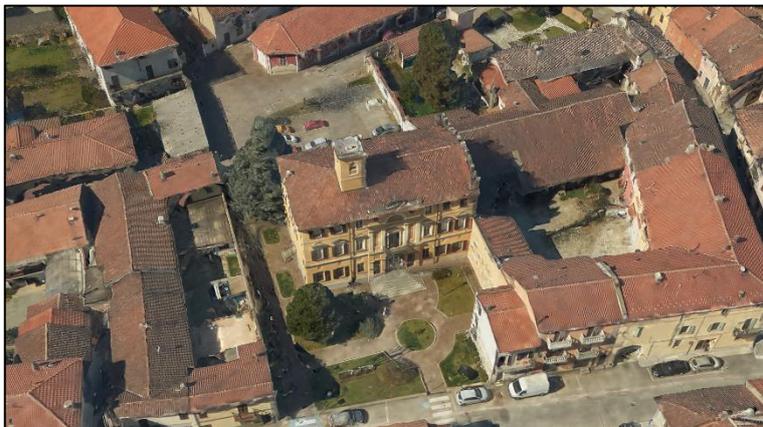
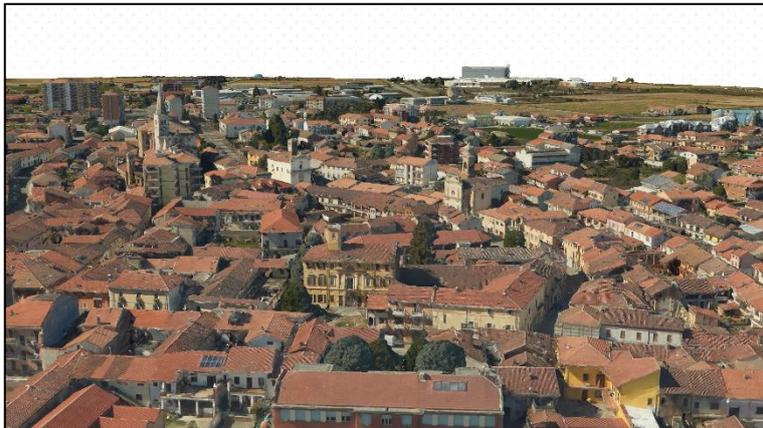
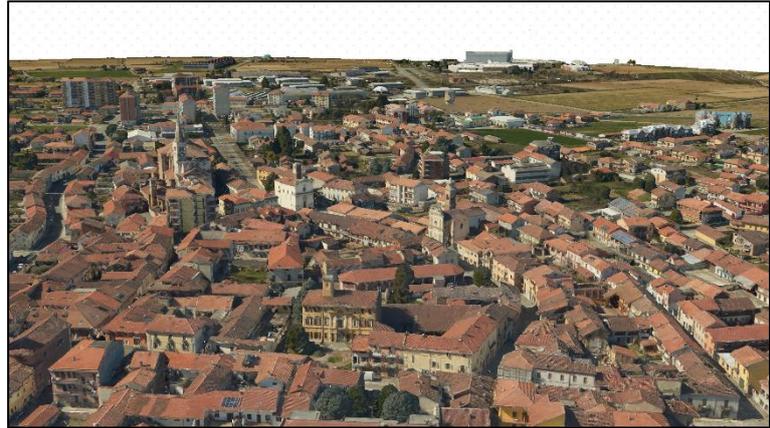
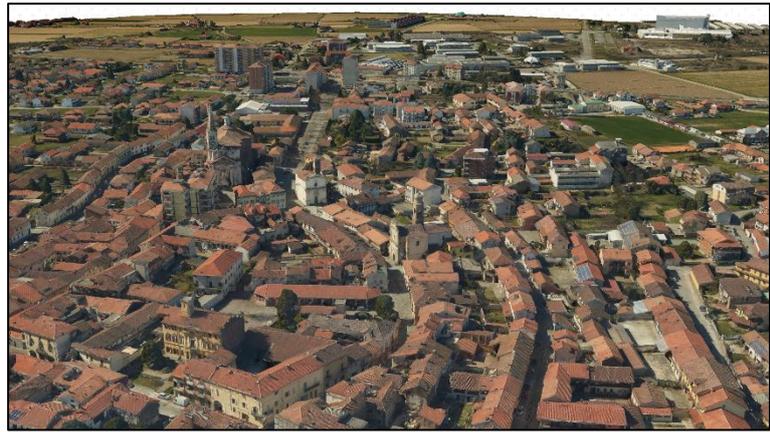
Completata la fase di elaborazione e affinamento della nuvola 3D con CloudCompare, si riprende l'utilizzo del software Metashape. Aprendo il progetto con cui sono state allineate le immagini, sia nadirali che oblique, e da cui sono state estratte le rispettive nuvole originarie, viene caricata sull'area di lavoro (**chuck**) la nuvola elaborata al paragrafo precedente tramite il comando **File > Import > Import points....** Quindi, dal menu **Workflow** di Metashape si seleziona

la voce **Build Tiled Model...** e si avvia la creazione del modello solido texturizzato. Tale procedura può richiedere parecchie ore, se non giorni, in base alla qualità prescelta per l'output dell'elaborazione. Nella sequenza di fotogrammi riportati di seguito, viene mostrata una breve panoramica dei risultati ottenuti. Il focus è stato effettuato su: il Palazzo Galileo Ferraris (Output 9), il Palazzo del Comune (Output 10) e un edificio pluripiano sito in Via Luigi Einaudi (Output 11).

Invece, nella sequenza riportata subito dopo, si vuole fare un confronto qualitativo tra una coppia di immagini ottiche iniziali (nadirali e oblique) e il corrispettivo risultato sul modello solido texturizzato. Anche in questo caso, sono stati considerati gli stessi tre edifici presi a campione. Anche in questo caso sono riportati nell'ordine: Palazzo G. Ferraris → Palazzo del Comune → Edificio Via L. Einaudi.



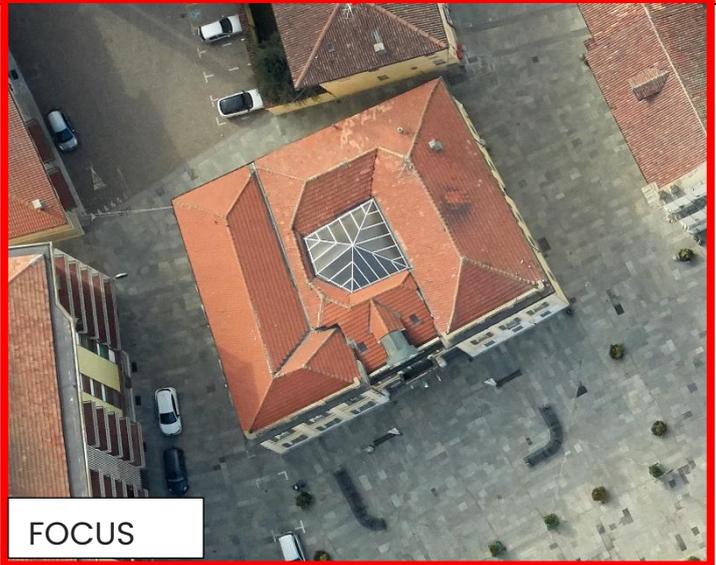
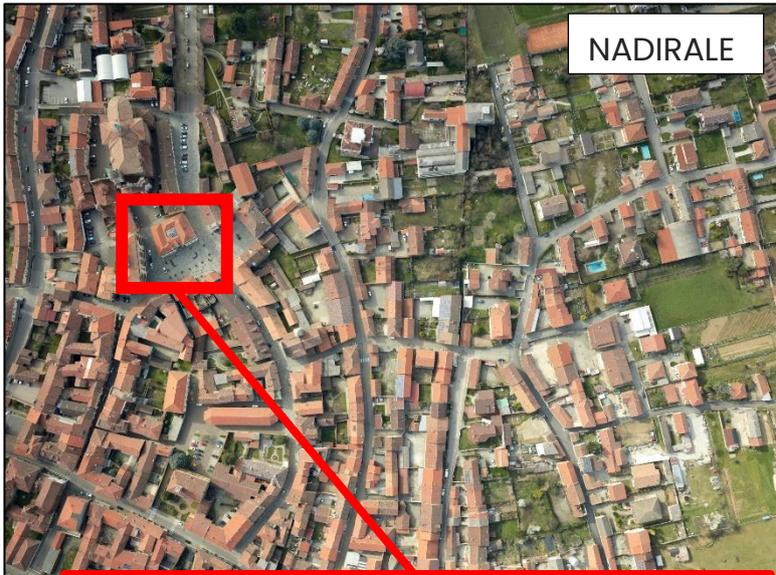
Output 9 Sequenza modello 3D texturizzato: focus su Palazzo G. Ferraris

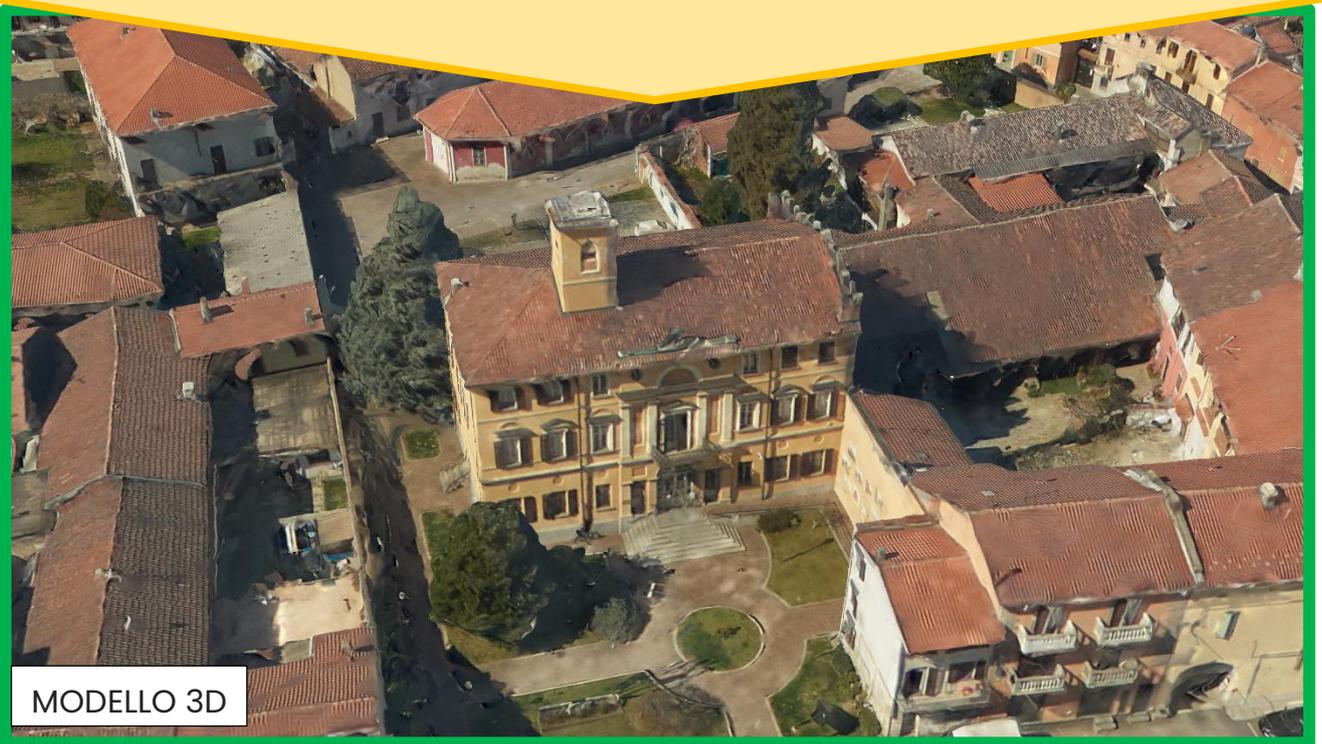
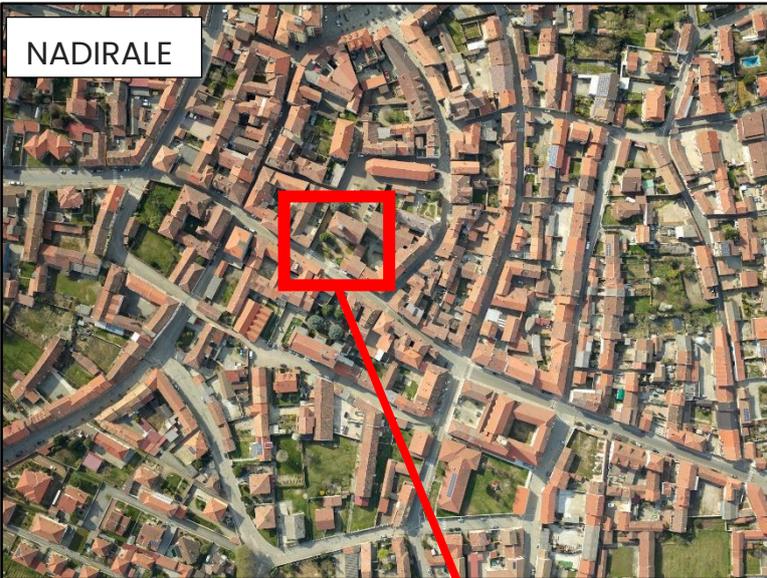


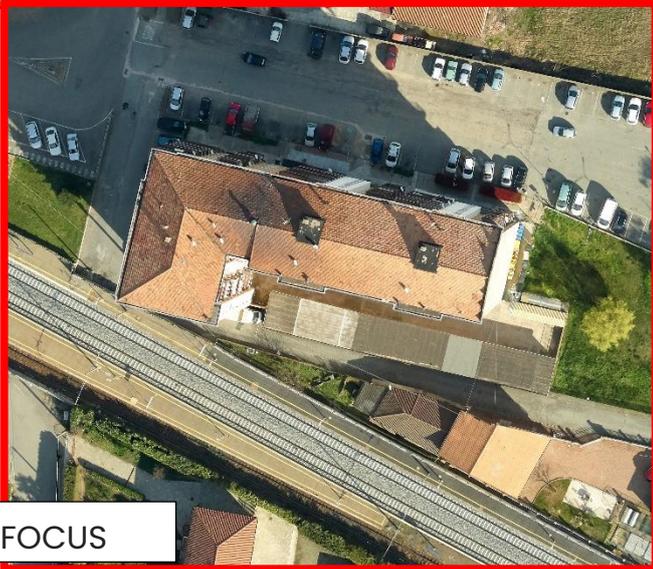
Output 10 Sequenza modello 3D texturizzato: focus su Palazzo del Comune



Output 11 Sequenza modello 3D texturizzato: focus su edificio pluripiano di Via L. Einaudi







8.6 Dal modello texturizzato a quello vettoriale

Richiamando il paragrafo 2.2, un Digital Twin rappresenta un modello di informazioni di uso generale che consente di utilizzare ambienti 3D virtuali per attività di analisi sofisticate in diversi domini applicativi.

In questo contesto, il modello tridimensionale texturizzato rappresenta l'**involucro** ad altissima definizione del Digital Twin in grado di caratterizzare geometricamente e graficamente la morfologia del tessuto urbano. Tuttavia, per poter essere usato propriamente, il modello deve necessariamente dotarsi di una **struttura adeguata e funzionale** a contenere le informazioni geospaziali caratteristiche di ogni elemento presente nel contesto urbano, provenienti dai diversi asset.

Per tale motivo, il passaggio successivo consisterà nella generazione di un modello 3D vettoriale.

8.7 Creazione del modello 3D vettoriale (3Dfier)

Per creare il modello vettoriale è stato utilizzato il programma open-source **3dfier**, sviluppato dal gruppo di ricerca olandese della **DUT (Delft University of Technology)**, specializzato nell'implementazione di sistemi per la modellazione 3D delle città, degli edifici e del paesaggio. [32]

3dfier è in grado di generare automaticamente modelli urbani 3D partendo da un dataset geografico 2D e da una nuvola di punti per estrarre le feature bidimensionali (Figura 118).

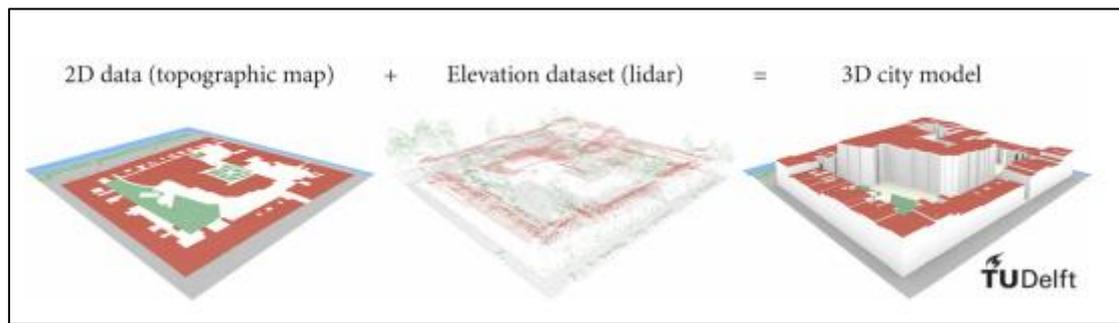


Figura 118 Panoramica di funzionamento di 3dfier [33]

Il dataset 3D risultante è semanticamente scomposto/etichettato in base ai poligoni di input che insieme formano una o molte superfici scevre da errori dovuti ad esempio all'auto-intersezione dei poligoni. Come mostrato in Figura 119, ognuna delle classi di cui sono composti i poligoni 2D in input, vengono mappate dal software in categorie specifiche: [33]

- *Terrain* (terreno);
- *Forest* (vegetazione);
- *Water* (idrografia);
- *Road* (strade);
- *Building* (edifici);
- *Bridge/Overpass* (ponti/cavalcavia);
- *Separation* (muri e staccionate)

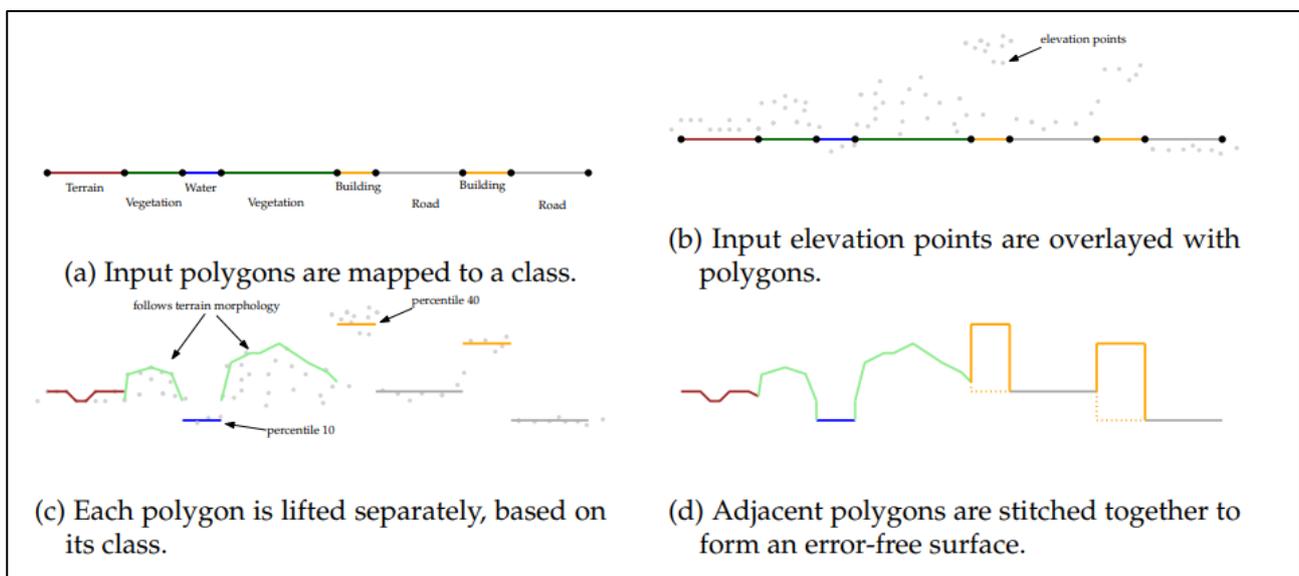


Figura 119 3dfier. visualizzazione descrittiva del processo di ricostruzione [33]

I vantaggi di 3dfier sono la velocità di esecuzione, l'output in più formati (ad esempio CityJSON) e la coerenza topologica. [34] Di seguito un esempio di output (Figura 120)

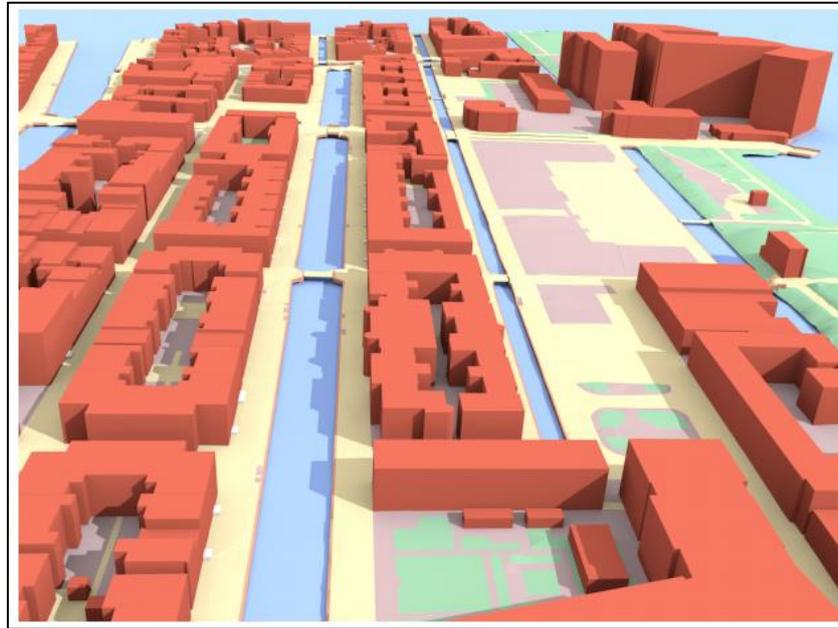


Figura 120 3dfier. esempio di output per la città di Leiden in Olanda [33]

8.8 Elaborazione con 3Dfier

Per utilizzare il software è necessario operare da riga di comando (CLI) e compilare un file *YAML* di input: tale file permette di gestire la topologia dei poligoni di partenza con la classificazione automatica fatta da 3dfier. Questa parte è fondamentale, in quanto un errata compilazione del file *yaml* può compromettere la corretta esecuzione del programma.

Come specificato nella pagina web ufficiale del software [35], è possibile configurare ed eseguire 3dfier su ambiente Windows, Linux e macOS. In questo caso, è stata utilizzata una macchina con sistema operativo **Ubuntu 20.04 LTS**.

Come dataset 2D di partenza, sono stati utilizzati i dati geo-topografici estratti dal database **BDTRE** del **Geoportale Piemonte** [36]. Nello specifico, sono stati utilizzati **21 vettoriali poligonali** in formato **ESRI shapefile** che sono stati raggruppati seguendo la categorizzazione di 3dfier. Le classi ed il relativo numero di vettoriali sono stati: **Building – 7 vettoriali, Water – 3 vettoriali, Terrain – 3 vettoriali, Forest – 5 vettoriali, Road – 3 vettoriali**. In fase di preparazione del dataset, su ArcGIS Pro è stata creato un subset dei 21 dati vettoriali, definendo un'area di interesse ed utilizzando il tool **Clip (Analyst Tools)** come mostrato in (Figura 121)

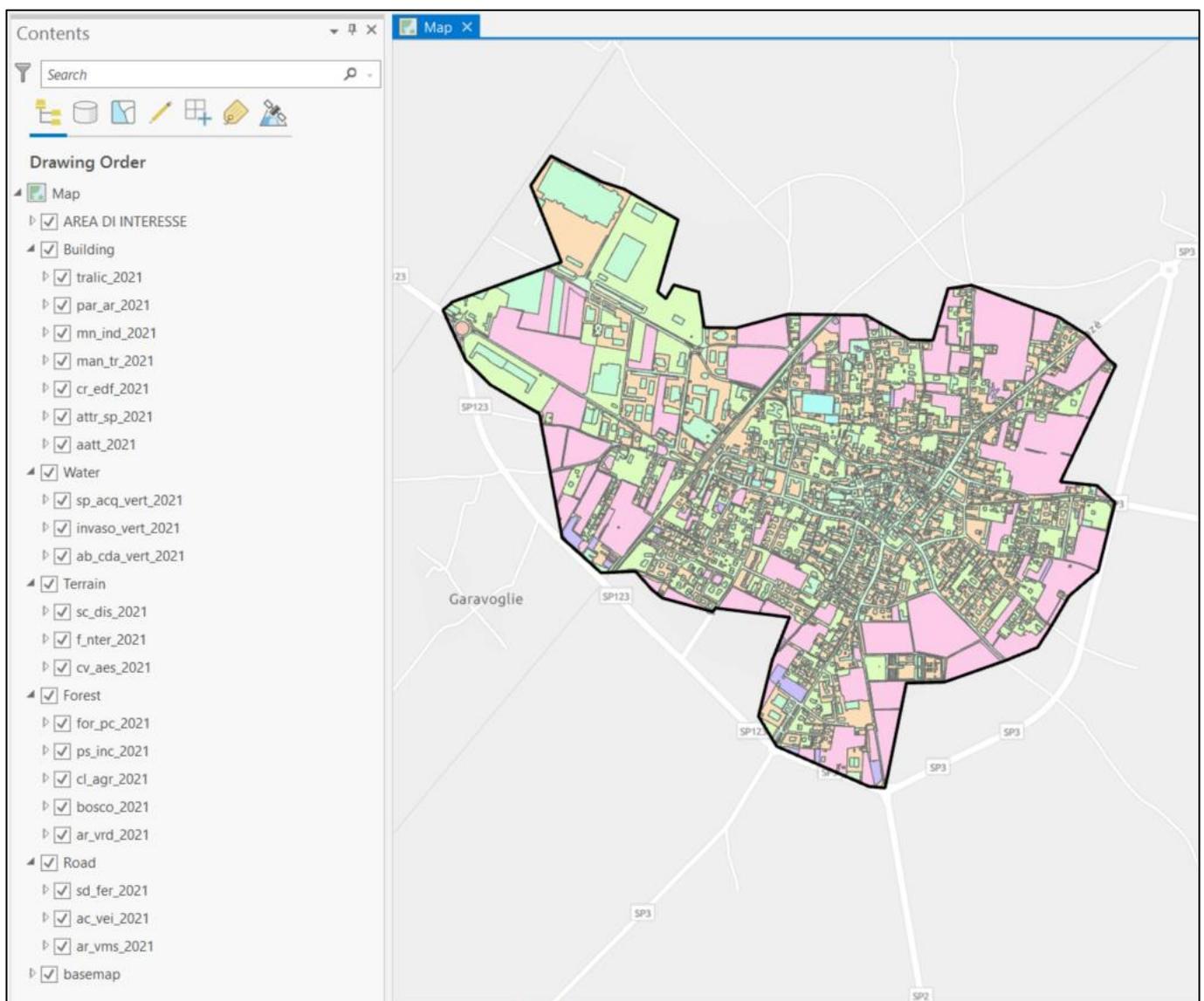


Figura 121 Preparazione dataset per 3dfier

Con le informazioni del dataset sopra indicate, è stato scrupolosamente compilato il file *YAML* che è stato verificato tramite un analizzatore (**parser**) online di codice.

Si riportano di seguito le righe codice utilizzate per compilare il file *yml*:

```

input_polygons:
  - datasets:
    - ./lfdt/cr_edf_2021.shp
    - ./lfdt/aatt_2021.shp
    - ./lfdt/attr_sp_2021.shp
    - ./lfdt/man_tr_2021.shp
    - ./lfdt/mn_ind_2021.shp
    - ./lfdt/par_ar_2021.shp
    - ./lfdt/tralic_2021.shp
    uniqueid: UUID
    lifting: Building
  - datasets:
    - ./lfdt/ac_vei_2021.shp
    - ./lfdt/ar_vms_2021.shp
    - ./lfdt/sd_fer_2021.shp
    uniqueid: UUID
    lifting: Road
  - datasets:
    - ./lfdt/f_nter_2021.shp
    - ./lfdt/sc_dis_2021.shp
    - ./lfdt/cv_aes_2021.shp
    uniqueid: UUID
    lifting: Terrain
  - datasets:
    - ./lfdt/ar_vrd_2021.shp
    - ./lfdt/bosco_2021.shp
    - ./lfdt/cl_agr_2021.shp
    - ./lfdt/for_pc_2021.shp
    - ./lfdt/ps_inc_2021.shp
    uniqueid: UUID
    lifting: Forest
  - datasets:
    - ./lfdt/invaso_vert_2021.shp
    - ./lfdt/sp_acq_vert_2021.shp
    - ./lfdt/ab_cda_vert_2021.shp
    uniqueid: UUID
    lifting: Water

lifting_options:
  Building:
    lod: 1
    floor: true
    inner_walls: true

```

```

triangulate: false
ground:
  height: percentile-10
  use_LAS_classes:
    - 2
    - 9
roof:
  height: percentile-90
  use_LAS_classes:
    - 0
    - 1
    - 6
Terrain:
  simplification: 0
  simplification_tinsimp: 0.1
  use_LAS_classes:
    - 2
    - 9
Forest:
  simplification: 0
  simplification_tinsimp: 0.1
  use_LAS_classes:
    - 2
    - 9
Water:
  height: percentile-10
  use_LAS_classes:
    - 2
    - 9
Road:
  height: percentile-50
  use_LAS_classes:
    - 2
    - 11
Separation:
  height: percentile-80
  use_LAS_classes:
    - 2
    - 9
    - 17
# Bridge\Overpass:
#   height: percentile-50
#   use_LAS_classes:
#     - 2
#     - 26

input_elevation:
  - datasets:
    - ./input/pointcloud_nad_Metashape_tot.las
#   omit_LAS_classes:
#     - 0 # Never classified
#     - 1 # Unclassified

```

```
thinning: 10
```

```
options:
  building_radius_vertex_elevation: 3.0
  radius_vertex_elevation: 1.0
  threshold_jump_edges: 0.5
```

Alcune precisazioni sul file di configurazione: il simbolo di “cancellato” (#) sta ad indicare che la riga cui è anteposto, è una stringa di commento e non verrà eseguita dall’algoritmo. Nel caso specifico è stata bypassata la parte di codice relativa alla codifica dei “Bridge/Overpass”, assenti nel subset di dati usati per questa elaborazione. È stata esclusa anche la parte di codice relativa alla classificazione della nuvola di punti: al momento dell’esecuzione, l’entità utilizzata era priva di tali informazioni.

Inoltre, si è deciso di non modificare i valori numerici già presenti all’interno del file yml, come ad esempio:

```
building_radius_vertex_elevation: 3.0
radius_vertex_elevation: 1.0
threshold_jump_edges: 0.5
```

Che definisce i parametri con cui l’algoritmo seleziona le feature relative agli edifici e ne fa l’interpolazione con la nuvola di punti.

Avendo preparato i file in input, configurato l’ambiente operativo, è stato lanciato 3dfier da terminale, eseguendo la riga di comando: **3dfier** **ldft.yml** **-OBJ** **output/DigTwin_LF2.obj**

Dove:

- **3dfier**: lancia il comando di esecuzione del software;
- **ldft.yml**: è il nome del file yml di input;
- **-OBJ output/DigTwin_LF2.obj**: indica il nome e la cartella di destinazione dell’output. Come specificato dalla documentazione

ufficiale disponibile [35], è possibile generare l'output in diversi formati. In questo caso è stato scelto il tipo *obj*.

Di seguito si riporta la schermata di esecuzione del programma (Figura 122):

```
sdg11-pc2@sdg11-pc2:~/LAsTools/build/3dfier/example_data$ 3dfier lfdt.yml --OBJ output/DigTwin_LF2.obj
3dfier Copyright (C) 2015-2020 3D geoinformation research group, TU Delft
This program comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
This is free software, and you are welcome to redistribute it
under certain conditions; for details run 3dfier with the '--license' option.

Config file is valid.
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/cr_edf_2021.shp
Using all polygons in layer 'cr_edf_2021'.
  Layer: cr_edf_2021
  (2,393 features --> Building)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/aatt_2021.shp
Using all polygons in layer 'aatt_2021'.
  Layer: aatt_2021
  (319 features --> Building)
  Split 6 MultiPolygon(s) into 13 Polygon(s)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/attr_sp_2021.shp
Using all polygons in layer 'attr_sp_2021'.
  Layer: attr_sp_2021
  (13 features --> Building)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/man_tr_2021.shp
Using all polygons in layer 'man_tr_2021'.
  Layer: man_tr_2021
  (28 features --> Building)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/mn_ind_2021.shp
Using all polygons in layer 'mn_ind_2021'.
  Layer: mn_ind_2021
  (10 features --> Building)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/par_ar_2021.shp
Using all polygons in layer 'par_ar_2021'.
  Layer: par_ar_2021
  (1 features --> Building)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/tralic_2021.shp
Using all polygons in layer 'tralic_2021'.
  Layer: tralic_2021
  (44 features --> Building)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/ac_vei_2021.shp
Using all polygons in layer 'ac_vei_2021'.
  Layer: ac_vei_2021
  (84 features --> Road)
  Split 1 MultiPolygon(s) into 2 Polygon(s)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/ar_vms_2021.shp
Using all polygons in layer 'ar_vms_2021'.
  Layer: ar_vms_2021
  (3 features --> Road)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/sd_fer_2021.shp
Using all polygons in layer 'sd_fer_2021'.
  Layer: sd_fer_2021
  (1 features --> Road)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAsTools/build/3dfier/example_data/lfdt/f_nter_2021.shp
Using all polygons in layer 'f_nter_2021'.
  Layer: f_nter_2021
  (17 features --> Terrain)
  Split 2 MultiPolygon(s) into 4 Polygon(s)
```

```

Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/sc_dis_2021.shp
Using all polygons in layer 'sc_dis_2021'.
  Layer: sc_dis_2021
  (0 features --> Terrain)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/cv_aes_2021.shp
Using all polygons in layer 'cv_aes_2021'.
  Layer: cv_aes_2021
  (0 features --> Terrain)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/ar_vrd_2021.shp
Using all polygons in layer 'ar_vrd_2021'.
  Split 9 MultiPolygon(s) into 19 Polygon(s)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/bosco_2021.shp
Using all polygons in layer 'bosco_2021'.
  Layer: bosco_2021
  (21 features --> Forest)
Warning 1: Ring Self-intersection at or near point 427560.53450000007 5014014.9181999993 0
Geometry invalid: 9ff1be14-f294-46fc-ae3-75c9b75a2b3a
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/cl_agr_2021.shp
Using all polygons in layer 'cl_agr_2021'.
  Layer: cl_agr_2021
  (76 features --> Forest)
  Split 6 MultiPolygon(s) into 16 Polygon(s)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/for_pc_2021.shp
Using all polygons in layer 'for_pc_2021'.
  Layer: for_pc_2021
  (0 features --> Forest)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/ps_inc_2021.shp
Using all polygons in layer 'ps_inc_2021'.
  Layer: ps_inc_2021
  (9 features --> Forest)
  Split 2 MultiPolygon(s) into 4 Polygon(s)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/invaso_vert_2021.shp
Using all polygons in layer 'invaso_vert_2021'.
  Layer: invaso_vert_2021
  (0 features --> Water)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/sp_acq_vert_2021.shp
Using all polygons in layer 'sp_acq_vert_2021'.
  Layer: sp_acq_vert_2021
  (0 features --> Water)
Reading input dataset: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/lfdt/ab_cda_vert_2021.shp
Using all polygons in layer 'ab_cda_vert_2021'.
  Layer: ab_cda_vert_2021
  (0 features --> Water)

Total # of polygons: 3,203
Constructing the R-tree... done.
Spatial extent: (425,116,598, 5,010,439.901) (428,756,444, 5,017,760.178)
Reading LAS/LAZ file: /home/sdg11-pc2/LAStools/build/3dfier/example_data/input/pointcloud_nad_Metashape_tot.las
(1,755,953,371.000 points in the file)
(skipping every 10.000th points, thus 175,595,337.000 are used)
(omitting LAS classes: 0.000 1.000 )
[=====] 100.000%
All points read in 107 seconds || 00:01:47
3dfying all input polygons...
===== /LIFTING =====
===== LIFTING/ =====
===== /ADJACENT FEATURES =====
===== ADJACENT FEATURES/ =====
===== /STITCHING =====
===== STITCHING/ =====
===== /BOWTIES =====
===== BOWTIES/ =====
===== /VERTICAL WALLS =====
===== VERTICAL WALLS/ =====
Lifting, stitching and vertical walls done in 3 seconds || 00:00:03
===== /CDT =====
===== CDT/ =====
CDT created in 0 seconds || 00:00:00
...3dfying done.
OBJ output: output/DigTwin_LF2.obj
Features written in 0 seconds || 00:00:00
Successfully terminated in 111 seconds || 00:01:51
sdg11-pc2@sdg11-pc2:~/LAStools/build/3dfier/example_data$

```

Figura 122 3dfier: esecuzione del software per la creazione del modello vettoriale

8.9 Considerazioni

È interessante notare come, malgrado la nuvola di punti utilizzata avesse una dimensione di 47,4 GB, 3dfier ha effettuato l'elaborazione del modello in meno di due minuti (111 secondi).

Trattandosi di una prima elaborazione, è doveroso precisare che è necessario prevedere ulteriori reiterazioni del processo al fine di definire la configurazione ottimale dei parametri di input. Capire cosa succede variando i valori che in prima battuta, solo rimasti invariati. L'output generato, benché allo stato grezzo, rende molto l'idea sulle capacità del software e la sua versatilità nel generare modelli 3D vettoriali. In Figura 123 e Figura 124 sono riportate due immagini del modello ottenuto con l'elaborazione sopra descritta:

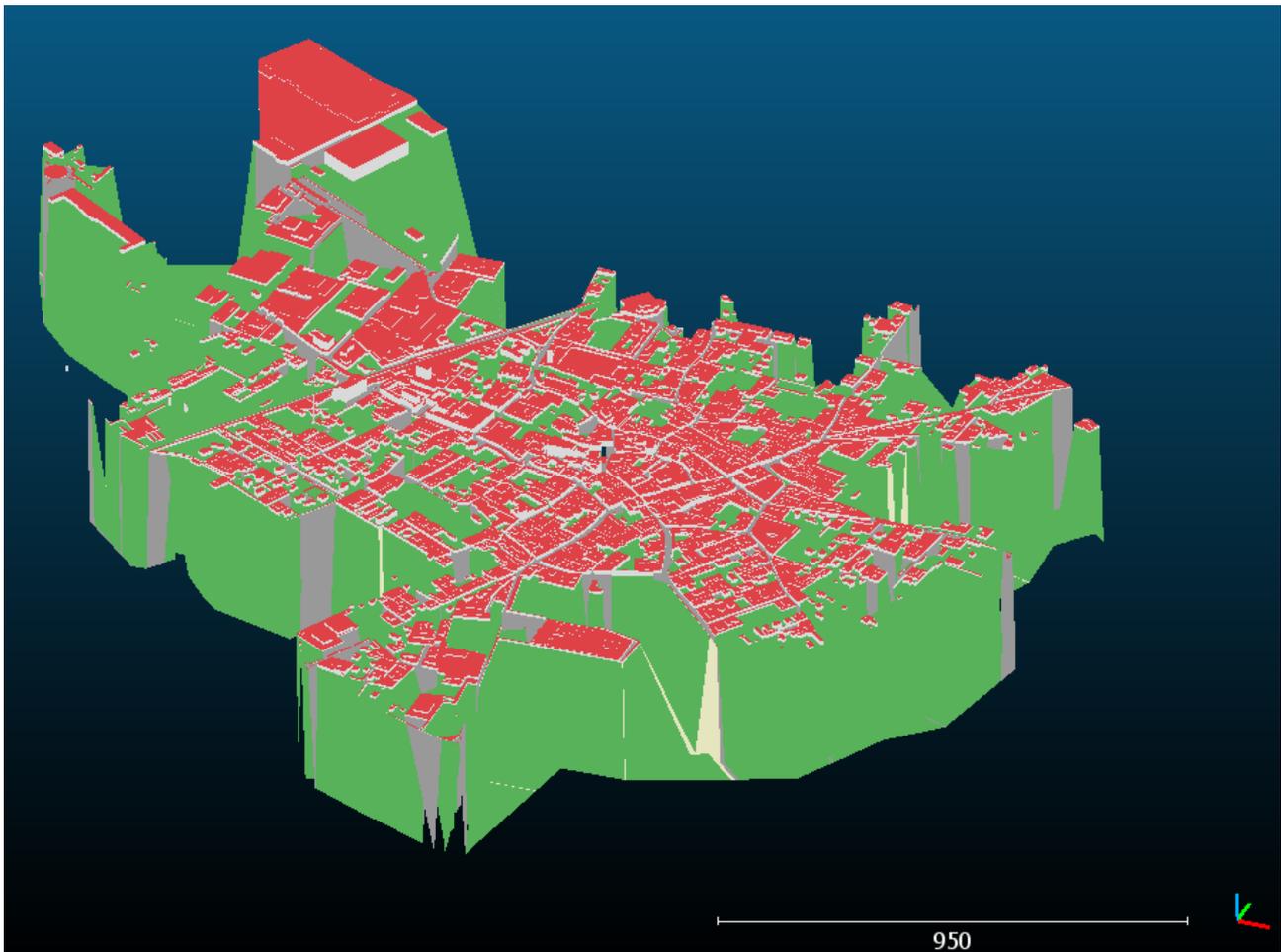


Figura 123 3dfier: modello vettoriale 3D di Livorno Ferraris



Figura 124 Dettaglio del modello 3D vettoriale: Palazzo G. Ferraris e Municipio

Da una prima analisi puramente qualitativa, è evidente che il modello ha un largo margine di miglioramento. Alcuni punti non sono stati classificati correttamente come ad esempio l'area verde antistante il Municipio che invece è stata interpretata dal software come "Building". Inoltre, in diversi tratti, la classe "Terrain" (in **verde**) viene confusa con quella "Street" (in **grigio**)

Malgrado ciò, da una vista di insieme del modello vettoriale, si può affermare che il risultato è complessivamente soddisfacente.

9 Applicazioni

La presente trattazione vuole dimostrare come il modello tridimensionale ad altissima risoluzione possa costituire l'elemento cardine per la realizzazione di una piattaforma digitale, interattiva e "multi-purpose": uno strumento in continuo aggiornamento in grado di recepire, integrare ed implementare i dati provenienti da fonti diversificate.

Il modello 3D diventa quindi a tutti gli effetti un **Urban Digital Twin**: una piattaforma che collega i dati dell'Internet of Things (IoT), le letture dei sensori, i dati aperti o qualsiasi altra fonte di dati in un sistema interconnesso che consente alle città di studiare il livello di prestazioni e la sostenibilità di qualsiasi ambiente costruito o potenziale progetto (Figura 125). [37]



Figura 125 Esempio progettuale di un Urban Digital Twin [37]

Per comprendere meglio gli ambiti di applicazione del Digital Twin urbano, è stata realizzata un'infografica allo scopo di esemplificare le potenzialità e le capacità del modello di interconnettere le aree tematiche cruciali per lo sviluppo delle moderne smart city.



Sinteticamente:

- Pianificazione urbanistica integrata:
 - Visualizzazione, consultazione, aggiornamento e notifica variazione sui dati;
 - Progettazione edilizia;
- Efficientamento energetico:
 - Classificazione energetica,
 - identificazione di pannelli solari;
 - Gestione linee elettriche;
 - Impianti di riscaldamento;
- Protezione civile e sicurezza pubblica:
 - Analisi di rischio ambientale;
 - monitoraggio della qualità, velocità e livello delle acque
 - Monitoraggio;
 - modellazione (simulazione con modelli di rischio);
- Tecnologia:
 - Raccolta dei dati
 - Elaborazione;
 - Rappresentazione smart data.

Quelle sopra riportate sono solo alcuni degli aspetti e delle tematiche che confluiscono nel digital twin.

Per dare un riscontro pratico dell'applicazione del modello digitale, di seguito vengono approfonditi gli aspetti legati all'efficientamento energetico degli edifici ed all'analisi della radiazione solare sull'area urbana del territorio di Livorno Ferraris, passando attraverso il calcolo dell'**irradiazione incidente** e del **potenziale fotovoltaico**.

9.1 L'irraggiamento solare

Con **radiazione solare** si intende il trasporto di energia irradiata nello spazio tramite le onde elettromagnetiche. Il 99% della radiazione solare ha una lunghezza d'onda compresa tra 0,15 e 4 μm , ed un picco di intensità a circa 0,5 μm . Lo spettro del visibile è compreso tra 0,4 e 0,74 μm mentre a sinistra ed a destra di tale fascia si trovano rispettivamente le zone dell'ultravioletto e dell'infrarosso. [38]

La quantità media di energia solare che incide ortogonalmente, nell'unità di tempo, su una superficie unitaria posta al di fuori dell'atmosfera, prende il nome di **costante solare** ed assume il valore medio di 1367 W/m^2 . L'intensità dell'irraggiamento solare si attenua nel passaggio attraverso l'atmosfera: una parte di radiazione viene riflessa verso lo spazio, una parte è diffusa in tutte le direzioni dalle molecole dei gas atmosferici e dal vapore acqueo, una parte viene assorbita dalle molecole dell'atmosfera e da queste riemessa come radiazione infrarossa (Figura 126 Irraggiamento solare: componenti della radiazione nell'atmosfera). [38]

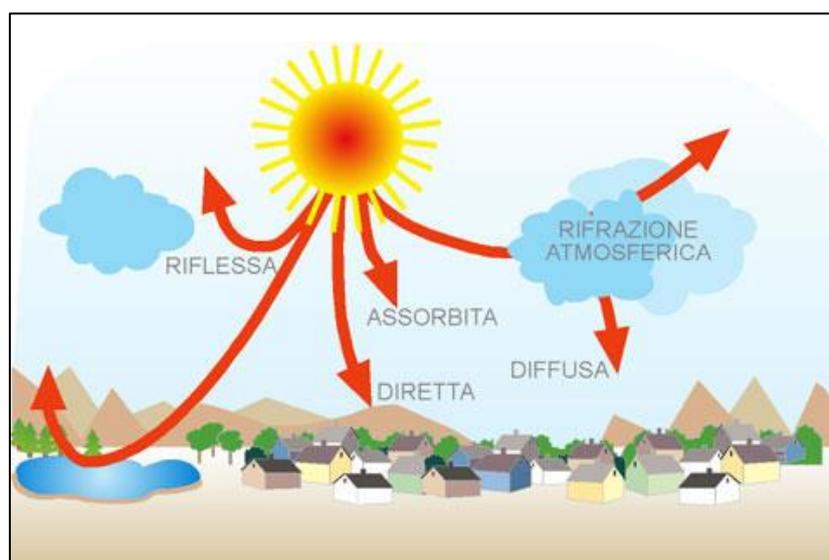


Figura 126 Irraggiamento solare: componenti della radiazione nell'atmosfera [39]

L'assorbimento e la diffusione atmosferica hanno l'effetto di ridurre l'intensità della radiazione su tutte le lunghezze d'onda; un'ulteriore riduzione si ha poi in corrispondenza alle lunghezze d'onda caratteristiche dei diversi gas e vapori presenti nell'atmosfera. La parte di irraggiamento che raggiunge direttamente il suolo costituisce la **radiazione diretta** mentre la parte rimanente costituisce la **radiazione diffusa**. A queste va infine aggiunta la **radiazione riflessa** o **albedo**, che rappresenta la percentuale di radiazione diretta e diffusa che viene riflessa dal suolo o dalle superfici circostanti sulla superficie considerata. [38]

9.2 Calcolo dell'insolazione: operazioni preliminari

Per effettuare il calcolo della radiazione solare, è stato utilizzato il Tool **Area Solar Radiation (Spatial Analyst)** di ArcGIS Pro che calcola l'insolazione sulla base dei metodi applicati dall'algoritmo di **viewshed emisferico** sviluppato da Rich et al. [40] e ulteriormente sviluppato da Fu e Rich. [41] [42] [43] [44]

La quantità totale di radiazione calcolata per una particolare località o area è indicata come radiazione globale. Il calcolo della radiazione solare incidente globale, somma della diretta più la diffusa, viene ripetuto per ogni posizione caratteristica o per ogni posizione sulla superficie topografica, producendo mappe di insolazione per un'intera area geografica. [45]

Generalmente, la radiazione riflessa generalmente costituisce solo una piccola percentuale della radiazione totale, ad eccezione di luoghi circondati da superfici altamente riflettenti come il manto nevoso. Gli strumenti integrati nello Spatial Analyst di ArcGIS Pro non includono la radiazione riflessa nel calcolo della radiazione totale. Pertanto, la radiazione totale viene calcolata come la somma della radiazione diretta e diffusa. [46]

Il tool di ArcGIS Pro per il calcolo dell'irraggiamento prevede quattro passaggi:

- 1) Il calcolo di un **viewshed emisferico** verso l'alto basato sulla topografia.
- 2) Sovrapposizione del viewshed sulla **SunMap** del sole diretto per stimare la radiazione diretta.
- 3) Sovrapposizione del viewshed su una **SkyMap** del cielo per stimare la radiazione diffusa.
- 4) Ripetizione del processo per ogni località di interesse per produrre una mappa dell'insolazione.

Poiché la radiazione può essere fortemente influenzata dalla topografia e dalle caratteristiche della superficie, un componente chiave dell'algoritmo di calcolo richiede la generazione di una vista emisferica rivolta verso l'alto per ogni posizione nel modello digitale di elevazione.

I punti di vista emisferici sono simili alle fotografie emisferiche **"fisheye"** (Figura 127) rivolte verso l'alto, che osservano l'intero cielo dal terreno, in modo simile alla vista in un planetario. La quantità di cielo visibile gioca un ruolo importante nell'insolazione di un luogo: un sensore situato in un campo aperto ha un'insolazione maggiore rispetto a un sensore situato in un canyon profondo.

[46]



Figura 127 Fotografia emisferica "fisheye" [46]

9.2.1 Elaborazione del viewshed emisferico

I **viewshed** sono una rappresentazione raster dell'intero cielo che è visibile o ostruito quando viene visualizzato da una particolare posizione o luogo d'interesse. Un campo visivo viene calcolato cercando in un numero specificato di direzioni intorno a una posizione di interesse e determinando l'angolo massimo di ostruzione del cielo o angolo dell'orizzonte. [46]

Ad ogni cella raster del viewshed viene assegnato un valore che corrisponde al fatto che la direzione del cielo sia visibile o ostruita. Le posizioni delle celle di output (riga e colonna) corrispondono all'angolo zenitale θ (angolo relativo dritto verso l'alto) e all'angolo azimutale α (angolo relativo al nord) nell'emisfero delle direzioni. [46]

La Figura 128 di seguito, mostra il calcolo di un viewshed per la cella di un DEM: gli angoli dell'orizzonte vengono calcolati lungo un numero specificato di direzioni e utilizzati per creare una rappresentazione emisferica del cielo. Il viewshed risultante caratterizza se le direzioni del cielo sono visibili (mostrate in bianco) o ostruite (mostrate in grigio). Il viewshed è mostrato sovrapposto a una fotografia emisferica per dimostrare la teoria.

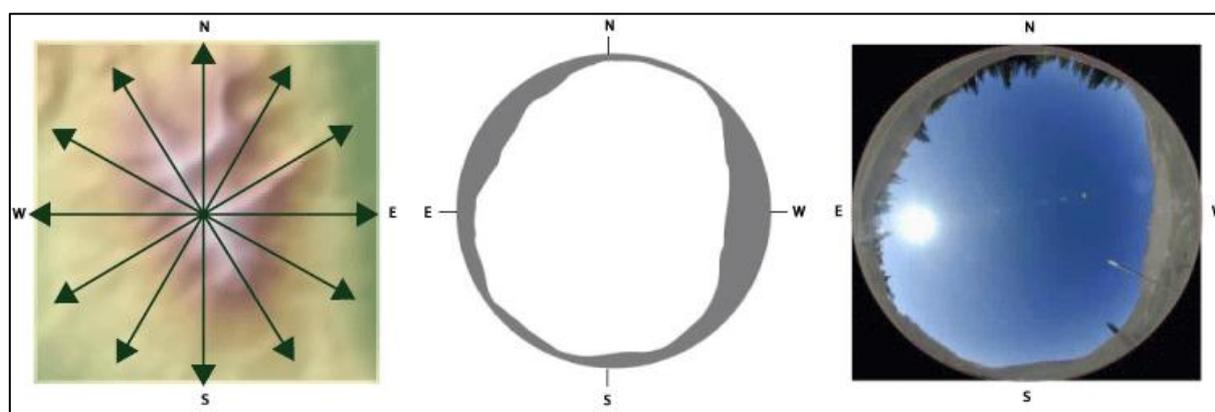


Figura 128 Illustrazione degli angoli orizzontali (sinistra), dell'area di visualizzazione risultante (centro) e dell'area di visualizzazione mappata sulla vista del cielo (destra) [46]

9.2.2 Creazione della SunMap

La radiazione solare diretta proveniente da ciascuna direzione del cielo viene calcolata utilizzando una mappa solare nella stessa proiezione emisferica del campo visivo. Una **SunMap** è una rappresentazione raster che mostra la traccia del sole, o posizione apparente del sole, al variare delle ore del giorno e dei giorni dell'anno (Figura 129).

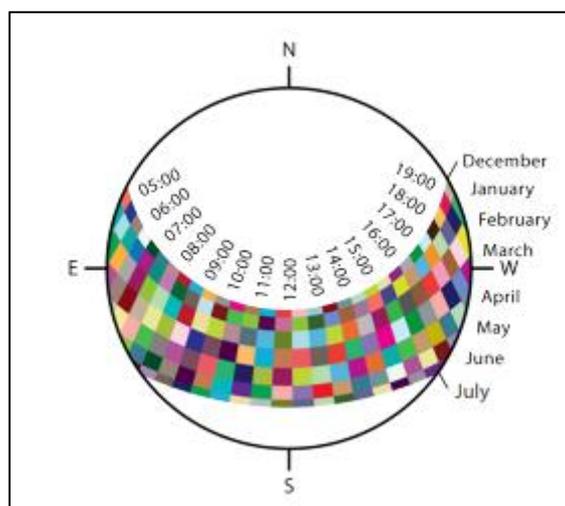


Figura 129 Esempio di SunMap

La mappa solare è costituita da settori discreti definiti dalla posizione del sole a particolari intervalli durante il giorno (ore) e il periodo dell'anno (giorni o mesi). La traccia solare viene calcolata in base alla latitudine dell'area di studio e alla configurazione temporale che definisce i settori della mappa solare. Per ogni settore della mappa solare viene specificato un valore di identificazione univoco, insieme al suo centroide zenitale e all'angolo azimutale. L'irraggiamento solare proveniente da ciascun settore viene calcolato separatamente e il campo visivo viene sovrapposto alla mappa solare per il calcolo dell'irraggiamento diretto. [46]

9.2.3 Calcolo della SkyMap

La radiazione diffusa ha origine da tutte le direzioni del cielo a causa della diffusione dei componenti atmosferici (nuvole, pulviscolo, particelle, etc.). Per

calcolare la radiazione diffusa per una particolare posizione, viene creata una **SkyMap** per rappresentare una vista emisferica dell'intero cielo diviso in una serie di settori di cielo definiti da angoli di zenit e azimuth (Figura 130).

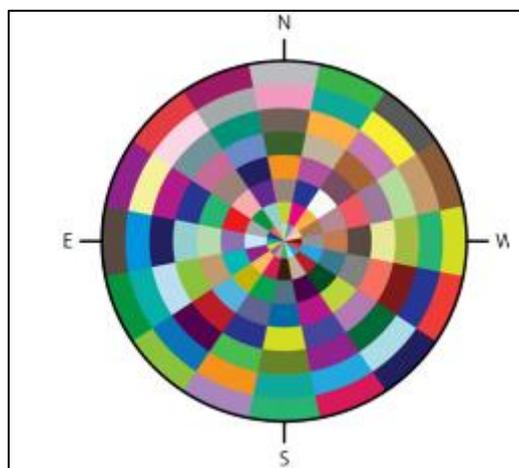


Figura 130 Esempio di SkyMap

A ciascun settore viene assegnato un valore identificativo univoco, insieme allo zenit del centroide e agli angoli di azimuth. La radiazione diffusa viene calcolata per ogni settore del cielo in base alla direzione (zenit e azimuth). [46]

9.2.4 Sovrapposizione viewshed con SunMap e SkyMap

Durante il calcolo dell'insolazione, il raster dell'area di visualizzazione viene sovrapposto ai raster della mappa del sole e del cielo per calcolare la radiazione diffusa e diretta ricevuta da ciascuna direzione del cielo. La proporzione dell'area del cielo visibile in ciascun settore viene calcolata dividendo il numero di celle non ostruite per il numero totale di celle in ciascun settore. Si tiene conto dei settori di cielo parzialmente ostruiti. [46]

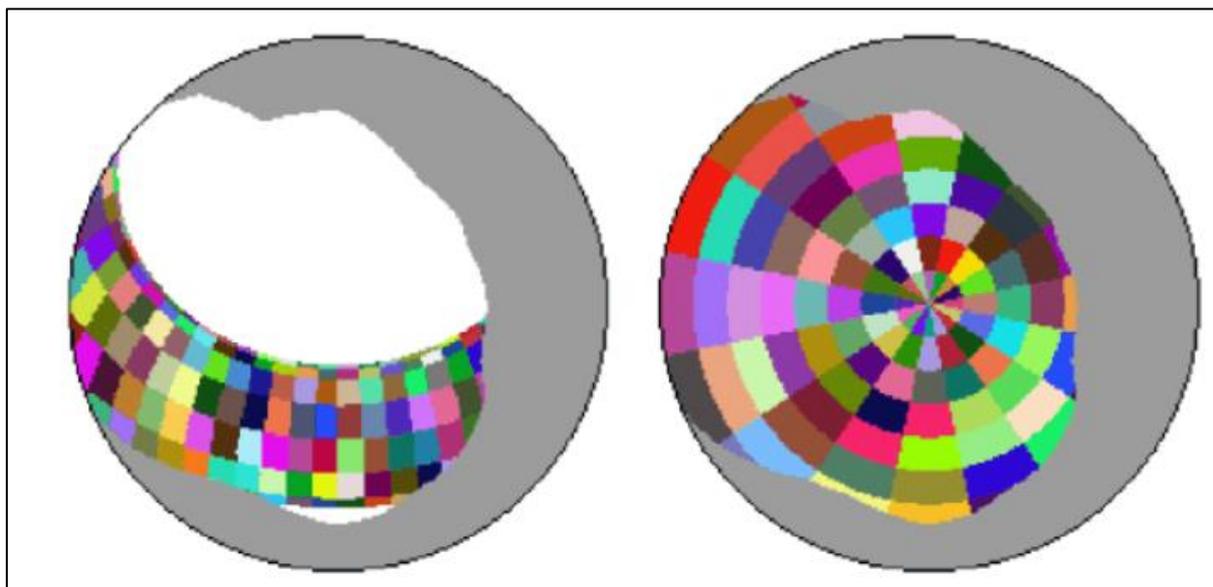


Figura 131 Esempio di sovrapposizioni della viewshed con la SunMap (sinistra) e con la SkyMap (destra)

In Figura 131 illustra la sovrapposizione di un riquadro di visualizzazione su una mappa del sole e una mappa del cielo. Il grigio rappresenta le direzioni del cielo ostruite. La radiazione solare è calcolata sommando l'insolazione diretta e diffusa proveniente dalle direzioni del cielo non ostruito [46]

9.2.5 Equazioni della radiazione solare

La quantità totale di radiazione calcolata per una particolare località o area è indicata come **radiazione globale**. Il calcolo dell'insolazione diretta, diffusa e globale viene ripetuto per ogni posizione caratteristica o per ogni posizione sulla superficie topografica, producendo mappe di insolazione per un'intera area geografica.

La radiazione globale **Global_{tot}** è calcolata come la somma della radiazione diretta **Dir_{tot}** e di quella diffusa **Dif_{tot}**, rispettivamente di tutti i settori della SunMap della SkyMap.

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (7)$$

L'insolazione diretta totale **Dir_{tot}** per una data località è data dalla somma dell'insolazione diretta **Dir_{θ,α}** di tutti i settori della SunMap:

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,\alpha} \quad (8)$$

L'**insolazione diretta** $Dir_{\theta,\alpha}$ dal settore della SunMap, con un baricentro all'**angolo zenitale** (θ) e all'**angolo azimutale** (α), viene calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{Const} * \beta^{m(\theta)} * SunDur_{\theta,\alpha} * SunGap_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (9)$$

Dove:

- **S_{const}** è il flusso solare all'esterno dell'atmosfera alla distanza media terra-sole, nota come **costante solare**. Il valore della costante solare utilizzata nell'analisi è di 1367 W/m², in linea con quanto indicato dal WRC – World Radiation Center.
- β è la **trasmissività dell'atmosfera** media su tutte le lunghezze d'onda, per il percorso più breve in direzione dello zenit.
- **m(θ)** indica la **lunghezza relativa del percorso ottico**, misurata come una proporzione relativa alla lunghezza del percorso zenitale.
- **SunDur _{θ,α}** è la durata temporale rappresentata dal settore del cielo. Per la maggior parte dei settori, è uguale all'intervallo di giorni moltiplicato per l'intervallo di ore. Per i settori parziali, quelli vicino all'orizzonte, la durata viene calcolata utilizzando la geometria sferica.
- **SunGap _{θ,α}** rappresenta la **Gap fraction** per il settore della mappa solare.
- **AngIn _{θ,α}** – L'angolo di incidenza tra il baricentro del settore del cielo e l'asse normale alla superficie.

Per ogni settore di cielo viene calcolata la **radiazione diffusa** al suo baricentro (**Dif**), integrata nell'intervallo di tempo, e corretta per la "Gap fraction" e l'angolo di incidenza utilizzando la seguente equazione:

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyGap_{\theta,\alpha} * Weight_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (10)$$

Dove:

- R_{gib} è la radiazione normale globale (vedi equazione 6 sotto).
- P_{dif} indica la proporzione del normale flusso di radiazione globale che viene diffusa. In genere è circa 0,2 per condizioni di cielo molto sereno e 0,7 per condizioni di cielo molto nuvoloso.
- **Dur** è l'intervallo di tempo per l'analisi.
- **SkyGap** $_{\theta,\alpha}$ rappresenta la Gap fraction (proporzione del cielo visibile) per il settore del cielo.
- **Weight** $_{\theta,\alpha}$ indica la proporzione di radiazione diffusa originata in un dato settore del cielo rispetto a tutti i settori.
- **AngIn** $_{\theta,\alpha}$ – L'angolo di incidenza tra il baricentro del settore del cielo e la superficie intercettante.

La radiazione solare diffusa totale per la posizione (**Dif_{tot}**) è calcolata come la somma della radiazione solare diffusa (**Dif**) da tutti i settori della SkyMap:

$$Dif_{tot} = \Sigma Dif_{\theta,\alpha} \quad (11)$$

[45]

9.3 Calcolo dell'irradiazione solare incidente

Su ArcGIS Pro, tramite il comando **Find Tools** in **Geoprocessing**, si apre il tool **Area Solar Radiation**. In Figura 132 viene esemplificato il pannello iniziale di configurazione dei parametri necessari per il calcolo della radiazione solare.

Geoprocessing ▾ □ ×

Area Solar Radiation ⊕

Parameters Environments ?

* **Input raster**
 📁

* **Output global radiation raster**
 📁

Latitude

Sky size / Resolution

Time configuration ▾

Year

Start day 🕒

End day 🕒

Day interval

Hour interval

Create outputs for each interval

▼ **Topographic parameters**

Z factor

Slope and aspect input type
 ▾

Calculation directions

▼ **Radiation parameters**

Zenith divisions

Azimuth divisions

Diffuse model type
 ▾

Diffuse proportion

Transmittivity

▼ **Optional outputs**

Output direct radiation raster
 📁

Output diffuse radiation raster
 📁

Output direct duration raster
 📁

▶ Run ▾

Figura 132 ArcGIS Pro: pannello del tool Area Solar Radiation

Di seguito vengo dettagliati i parametri utilizzati per i diversi campi del tool:

- 1) **Input Raster:** è stato utilizzato il file raster del DSM estratto con Metashape, avente un GSD di 0,08m.
- 2) **Latitude:** Viene automaticamente calcolata direttamente dal raster DSM che è georeferenziato.
- 3) **Sky size / Resolution:** Indica la risoluzione o la “dimensione di cielo” per viewshed, SkyMap e SunMap. L’unità di misure è in celle. Il valore 200 è l’impostazione predefinita ed è sufficiente per interi DEM con intervalli di giorni ampi, maggiori di 14 giorni [47]
- 4) **Time configuration:** volendo ricavare l’irradiazione per tutto il 2021, è stata selezionata dal menu a tendina la voce **whole year with montly interval**.
- 5) **Hour interval:** il valore predefinito è di mezz’ora (0,5). In questo caso è stato impostato ad un’ora (1), selezionando l’opzione **create outputs for each interval** verranno calcolati più valori di radiazione per ogni intervallo di tempo durante l’intera configurazione temporale. Nel caso specifico, ciò consentirà di ottenere 12 raster, uno per ogni mese.
- 6) **Z factor:** Regola le unità di misura quando i valori di Z differiscono dalle unità X, Y del raster di input. In questo caso, X,Y e Z hanno le stesse unità di misura (metri), quindi il fattore Z viene posto uguale a 1. Questa è l’impostazione predefinita.
- 7) **Slope and aspect input type:** Specifica come verranno derivate le informazioni di pendenza e aspetto per l’analisi. Anche in questo caso viene utilizzata l’impostazione di default, ossia **From the input surface raster**.
- 8) **Calculation directions:** Il numero di direzioni azimutali che verranno utilizzate durante il calcolo dell’area di visualizzazione (viewshed). I valori validi devono essere multipli di 8 (8, 16, 24, 32 e così via). Il valore predefinito

è 32 direzioni, che è adeguato ad una topografia complessa. In questo caso, data la natura del DSM, viene impostato un valore di 16.

- 9) **Zenith divisions:** Il numero di divisioni zenitali che verranno utilizzate per creare settori di cielo nella SkyMap. I valori devono essere maggiori di zero e minori della metà del valore delle dimensioni del cielo.
- 10) **Azimuth divisions:** Il numero di divisioni azimutali che verranno utilizzate per creare i settori di cielo nella SkyMap. L'impostazione predefinita è otto divisioni rispetto al nord.
- 11) **Diffuse model type:** Specifica il tipo di modello di radiazione diffusa che verrà utilizzato. Dal menu a tendina, viene scelta l'opzione **Standard overcast sky** per applicare il modello standard di nuvolosità diffusa. Il flusso di radiazione diffusa in ingresso varia con l'angolo di zenit.
- 12) **Diffuse proportion:** Indica la proporzione del flusso normale di radiazione globale che viene diffusa. Il parametro accetta valori che vanno da 0 a 1, in base alle condizioni atmosferiche. Per condizioni di cielo generalmente sereno, il valore predefinito è 0,3 come per il caso oggetto di studio.
- 13) **Transmittivity:** La frazione di radiazione, stimata sulla media delle lunghezze d'onda complessive, che attraversa l'atmosfera. I valori vanno da 0 (nessuna trasmissione) a 1 (tutte le trasmissioni). In questo caso è plausibile lasciare il valore predefinito di 0,5 che si riferisce ad un cielo generalmente sereno.
- 14) **Output direct radiation raster**(facoltativo): Viene prodotto un raster che restituisce i valori di radiazione solare diretta in entrata per ogni cella del raster in Wh/m².
- 15) **Output diffuse radiation raster** (facoltativo): Il raster di output che rappresenta la radiazione solare diffusa in entrata per ciascuna posizione espressa in Wh/m².

16) Output direct duration raster (facoltativo): si può decidere di generare un raster che rappresenta la durata della radiazione solare diretta in entrata. L'unità di misura del prodotto generato è in ore (h).

L'output del processamento indicato nella casella **Output global radiation raster**: rappresenta la radiazione globale o la quantità totale di insolazione solare in entrata (diretta + diffusa) calcolata per ciascuna posizione della superficie del DSM. L'unità di misura del raster è Wh/m². [47]

Il risultato del processamento di ArcGIS Pro rappresentato è un raster composto da 12 bande, una per ogni mese dell'anno. Di seguito vengono mostrati i raster risultanti per i mesi di giugno (Figura 133) e dicembre (Figura 134). Le elaborazioni effettuate consentono di calcolare l'irraggiamento cumulato annuo, medio mensile e medio annuo. Considerata la risoluzione di 0,08m del DSM, si è deciso di eseguire le successive computazioni su un'area di interesse di circa 1,2 Km² che includesse, oltre al centro storico di Livorno Ferraris, anche una porzione rappresentativa del territorio comunale come mostrato in Figura 135.

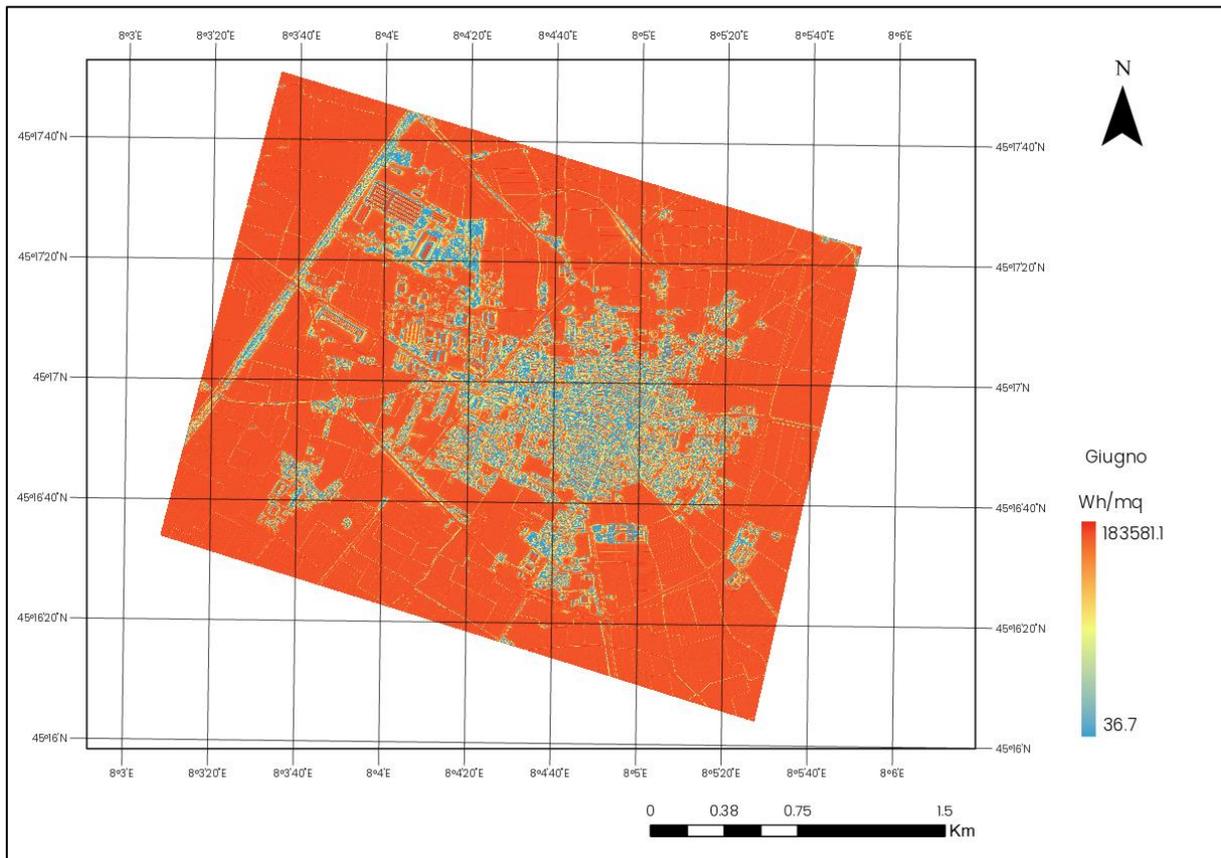


Figura 133 Elaborazione per il mese di giugno della radiazione solare normale

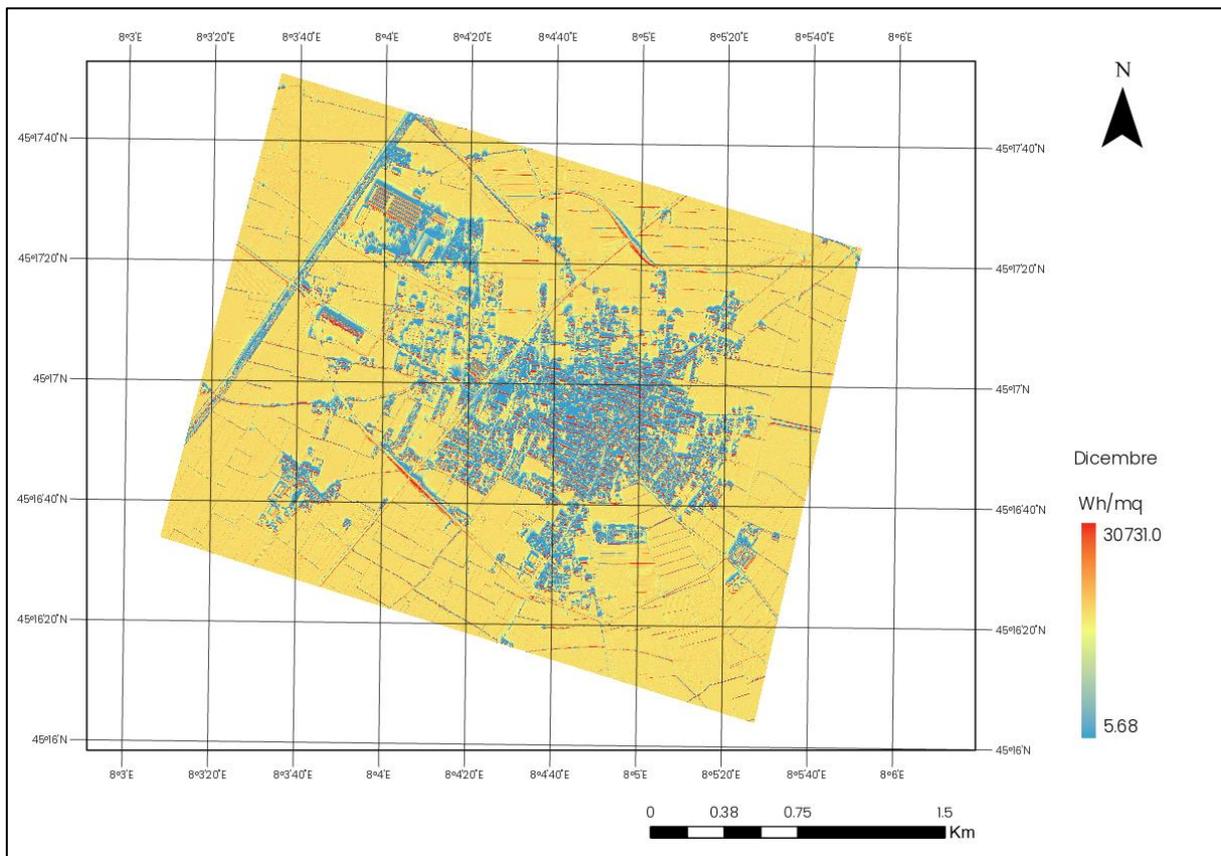


Figura 134 Elaborazione per il mese di dicembre della radiazione solare normale

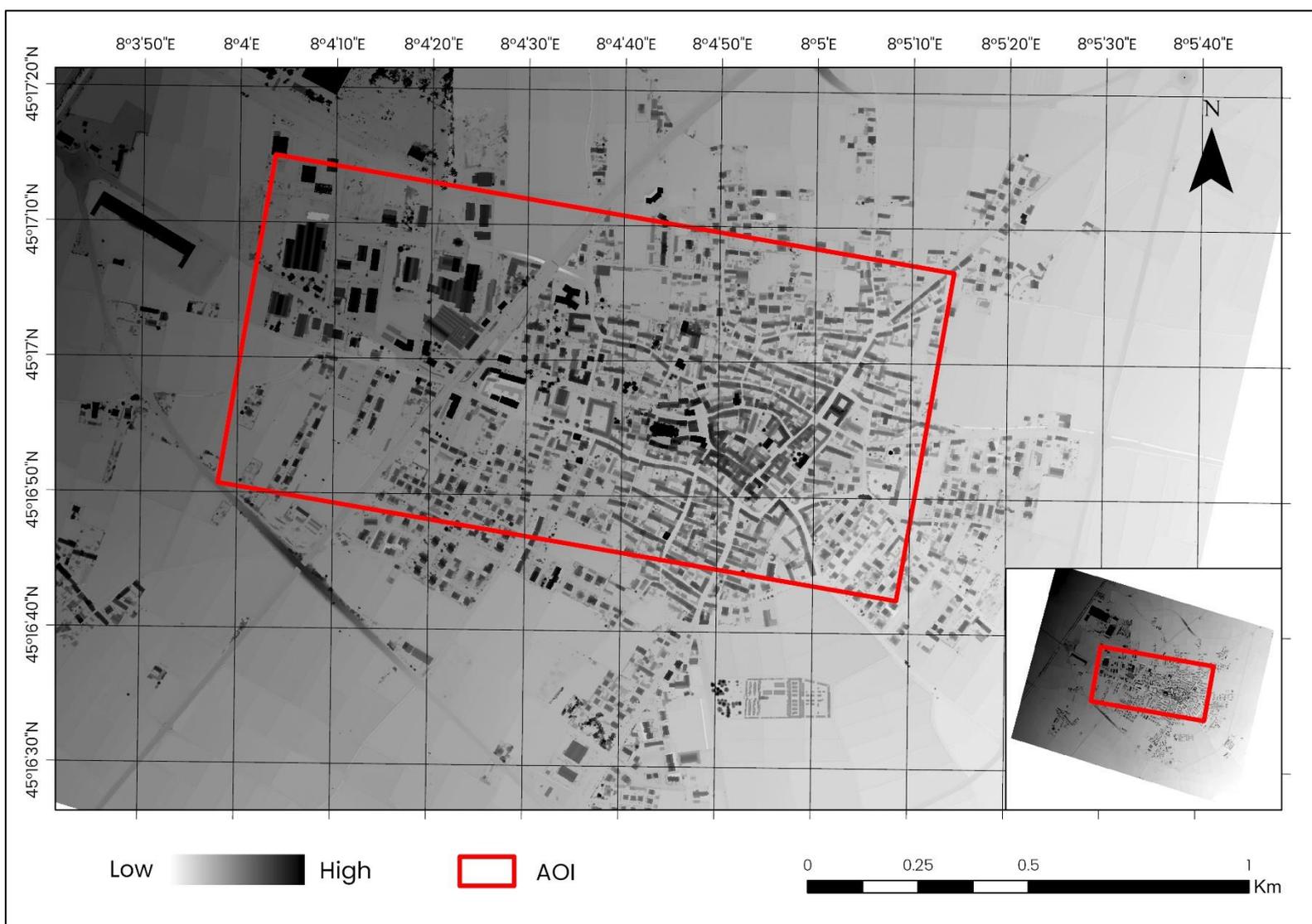


Figura 135 Area d'interesse scelta per il calcolo dell'irraggiamento solare

Il passaggio successivo prevede l'utilizzo del tool **Surface Parameters** (Figura 136) che consente di determinare i parametri di una superficie raster in termini di aspetto, pendenza e curvature. [48]

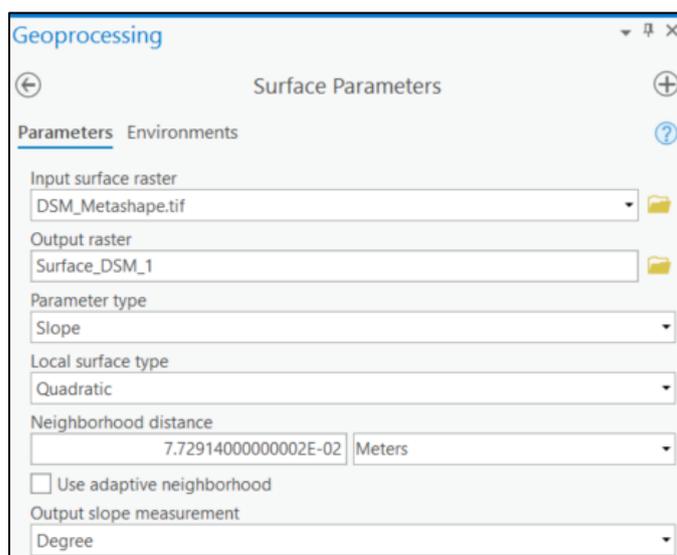


Figura 136 ArcGIS Pro: pannello del tool " Surface Parameters"

Inserendo in input il raster DSM dell'AOI e selezionando la funzione **Slope** nel menu a tendina *Parameter type*, l'output prodotto rappresenterà il tasso di variazione dell'elevazione per ciascuna cella del modello. L'intervallo di valori dall'uscita della pendenza dipende dal tipo di unità di misura. [48]

Il passaggio successivo consiste nell'utilizzo della funzione **Aspect** (Figura 137) il cui l'output identifica l'esposizione delle superfici inclinate rispetto ai principali punti cardinali. È espresso in gradi positivi da 0 a 360°, misurati in senso orario da nord. [48]

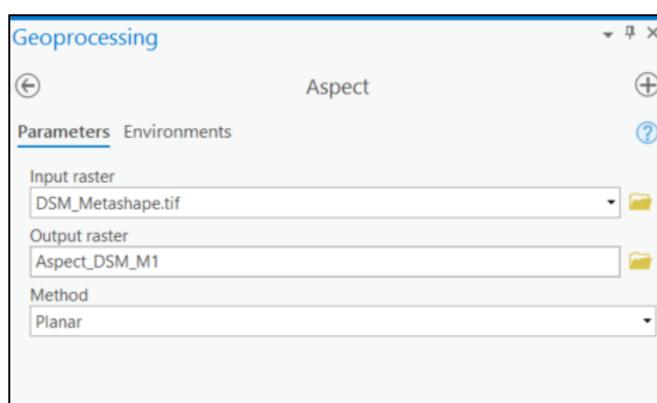


Figura 137 ArcGIS Pro: Esecuzione del tool Aspect

I processamenti sopra esplicitati hanno prodotto i rispettivi output che hanno permesso di approfondire l'analisi sull'irraggiamento solare per la zona di studio. Vengono quindi riportati di seguito:

- 1) DSM dell'AOI simbolizzato rispetto ai valori di altezze (Figura 138);
- 2) Raster ottenuto dall'analisi delle pendenze (Figura 139);
- 3) Esposizione delle superfici elaborate con il tool Aspect (Figura 140);
- 4) Gli output derivati di radiazione solare diffusa annua (Figura 141) e radiazione diretta annua (Figura 142);
- 5) La radiazione solare incidente totale annua (Figura 141);
- 6) Il raster con i valori di radiazione media giornaliera su base annua (Figura 144).

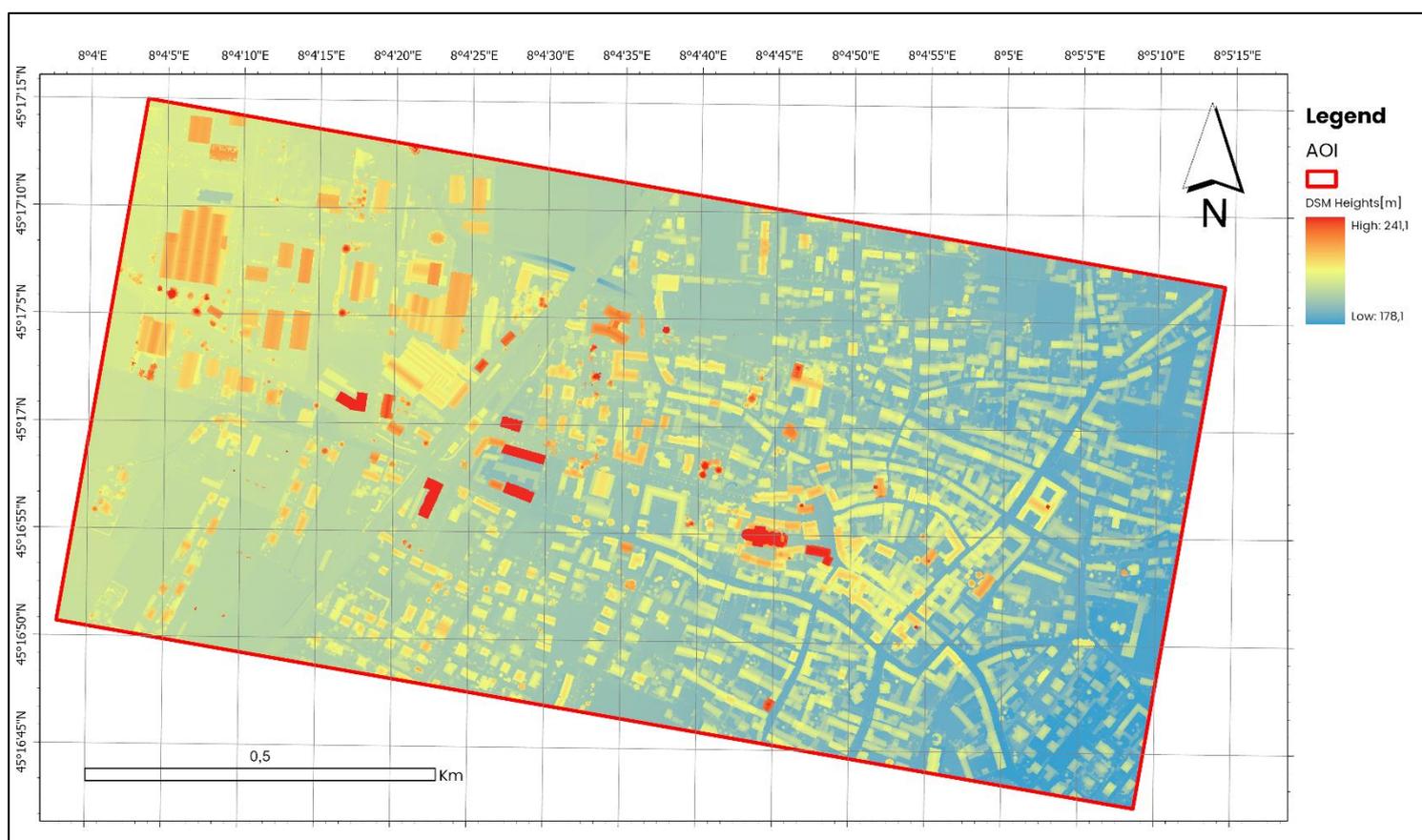


Figura 138 Valori delle altezze del DSM per l'area d'interesse



Figura 139 Risultato del tool Aspect con i valori di inclinazione in gradi

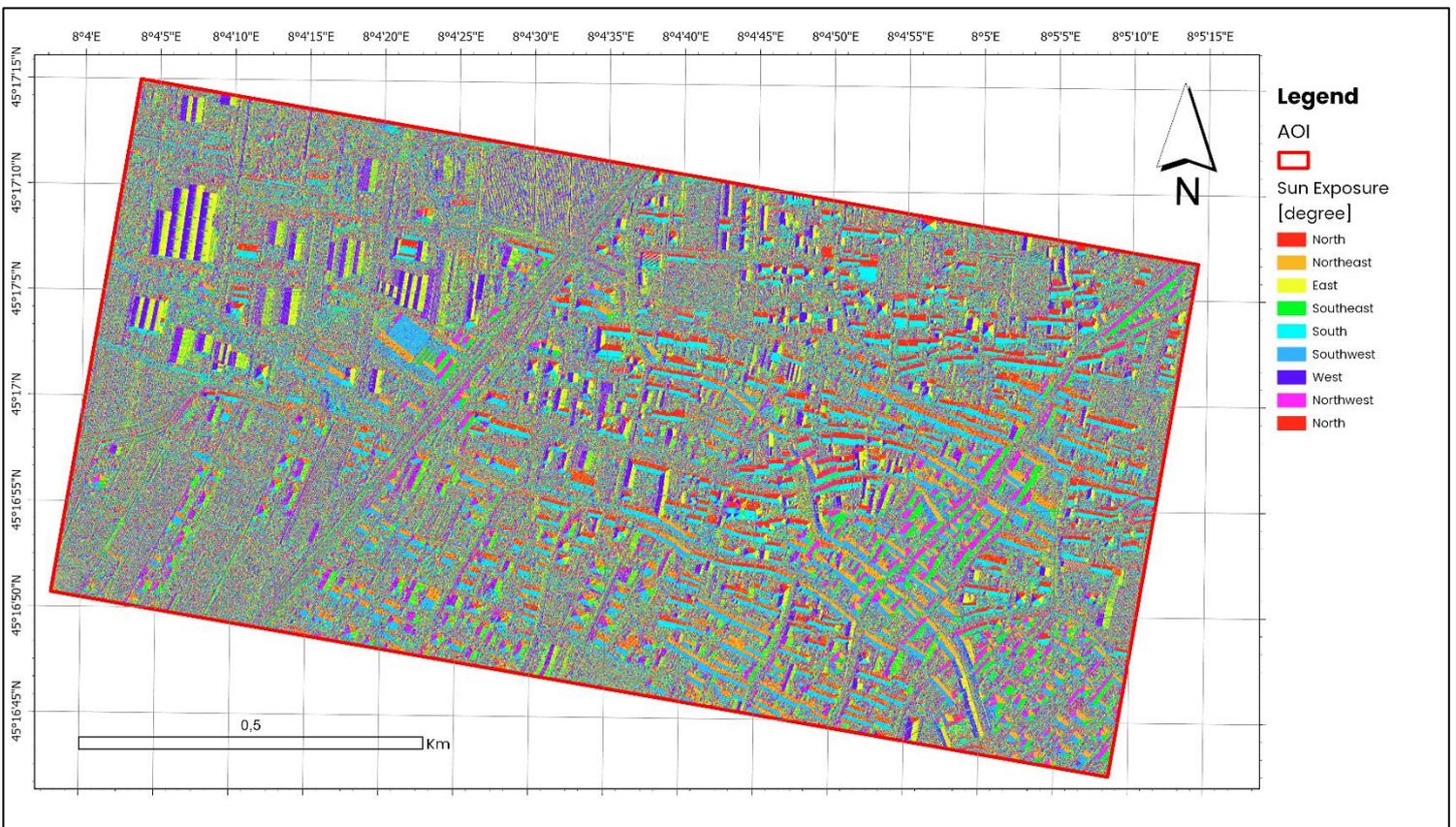


Figura 140 Orientamento delle superfici inclinate secondo i punti cardinali

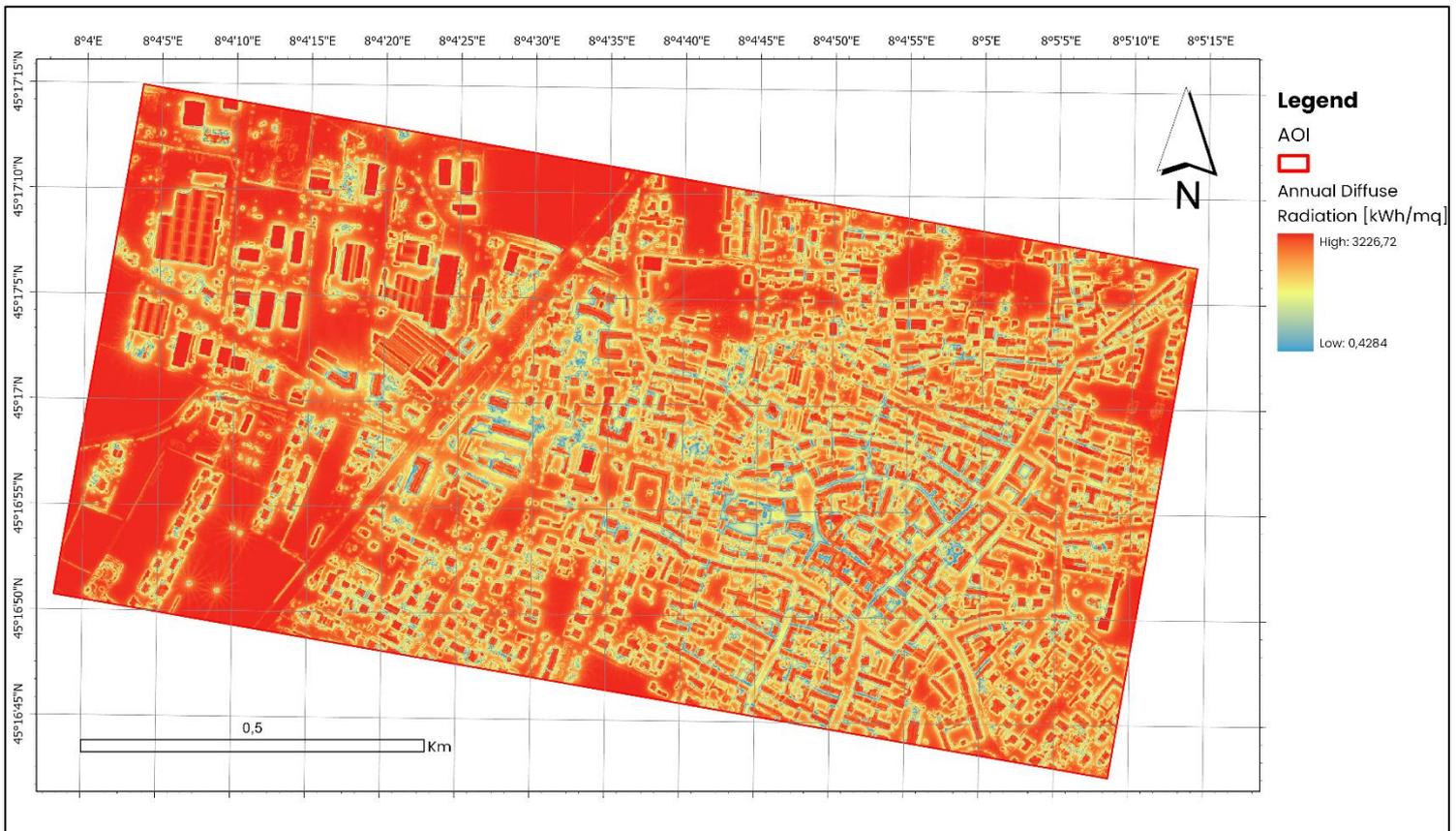


Figura 141 Valori relativi alla radiazione solare diffusa totale annua

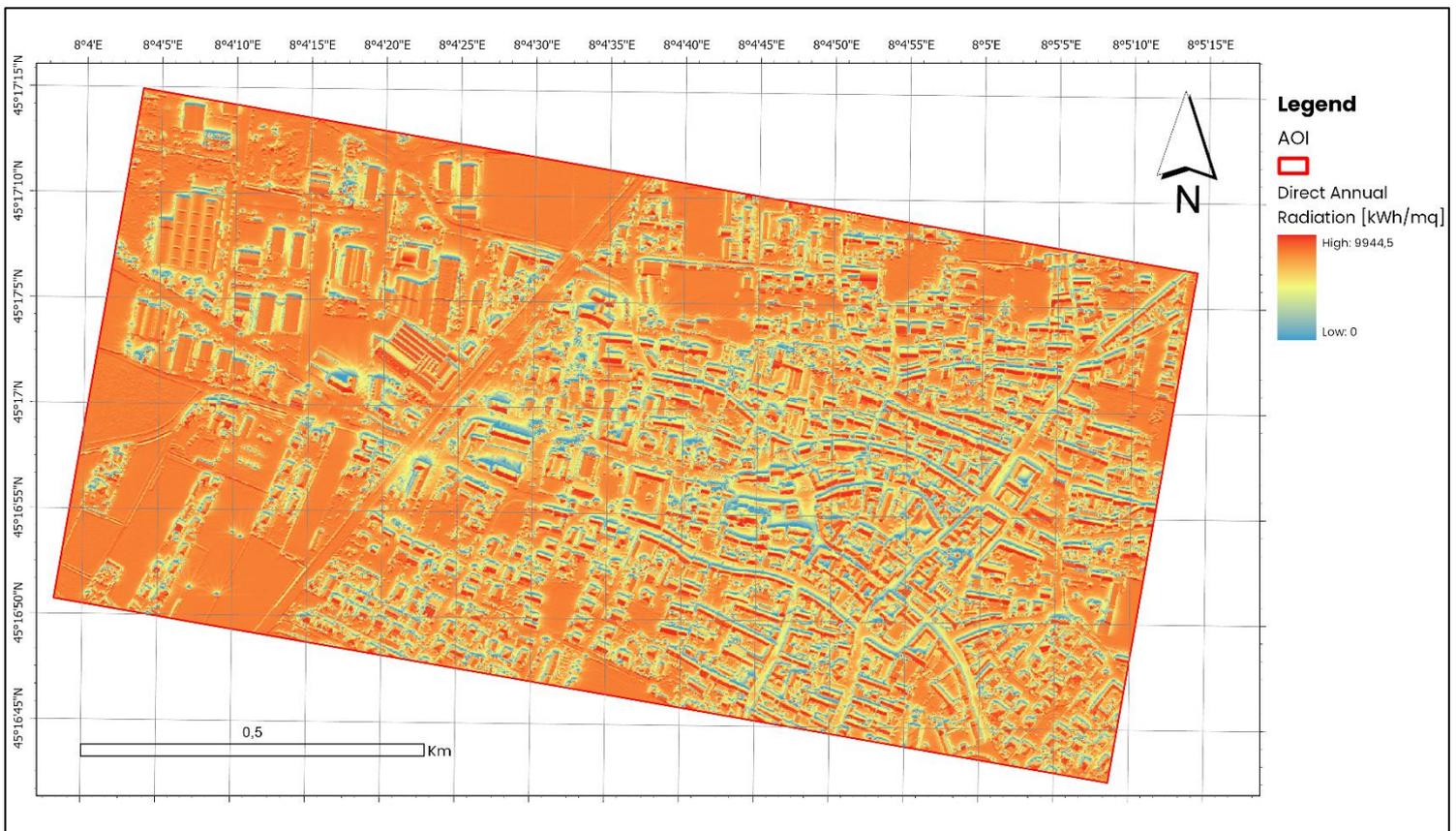


Figura 142 Andamento della radiazione solare diretta totale annua

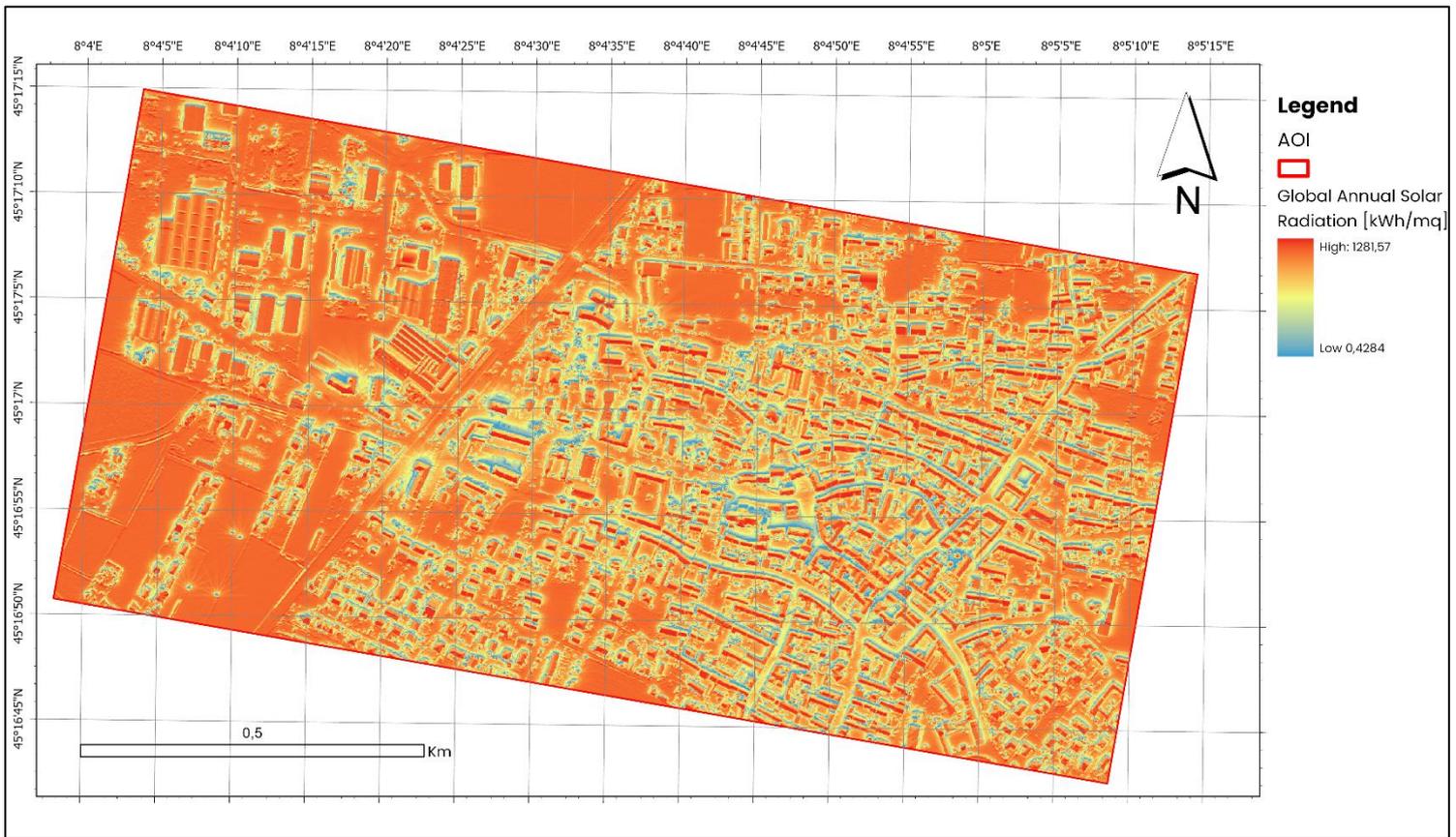


Figura 143 Risultato della radiazione solare incidente annua totale

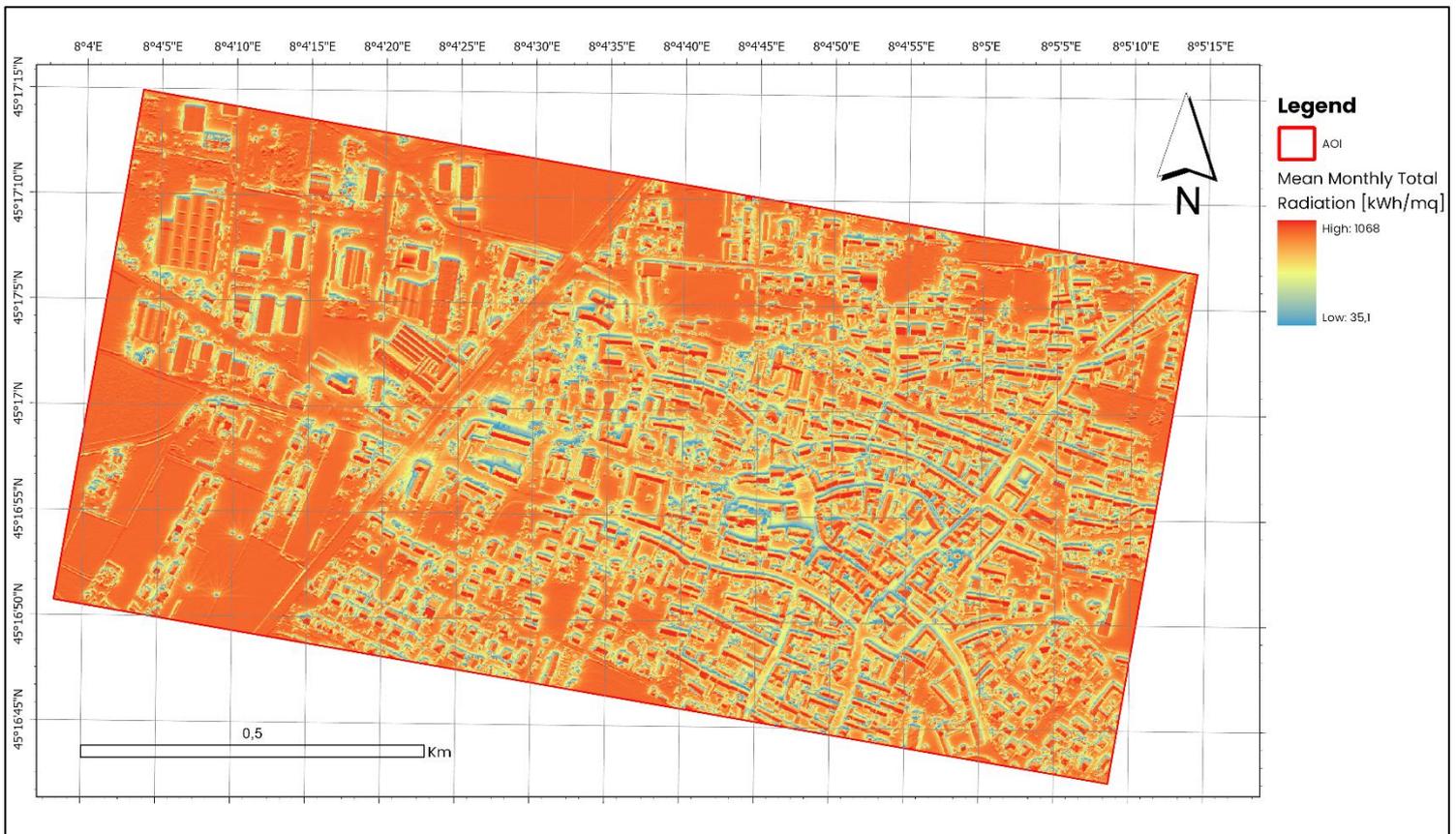


Figura 144 Elaborazione del valore medio giornaliero annuo dell'irraggiamento solare

L'**irraggiamento solare cumulato annuo** riportato in Figura 143 restituisce la quantità totale di energia solare incidente che colpisce la superficie terrestre nell'arco di un anno solare. Avendo ottenuto i valori mensili di radiazione incidente tramite l'elaborazione del tool **Area Solar Radiation**, l'irraggiamento totale è stato desunto sommando i 12 risultati e diviso per 1000 al fine di ottenere valori in kWh/m². Per l'area di interesse il range di radiazione incidente oscilla tra un minimo di 0,428 ad un massimo di 1281,57 kWh/m².

Un altro parametro molto importante da tenere in considerazione è il valore dell'**irraggiamento giornaliero medio mensile**: esprime la quantità media giornaliera di energia solare che irraggia un singolo mq di suolo. Il valore ottenuto varia da un massimo di 0,98 kWh/m² del mese di dicembre ad un massimo di 6,1 kWh/m² del mese di giugno, come riportato nelle due rappresentazioni sottostanti in Figura 145 e Figura 146.

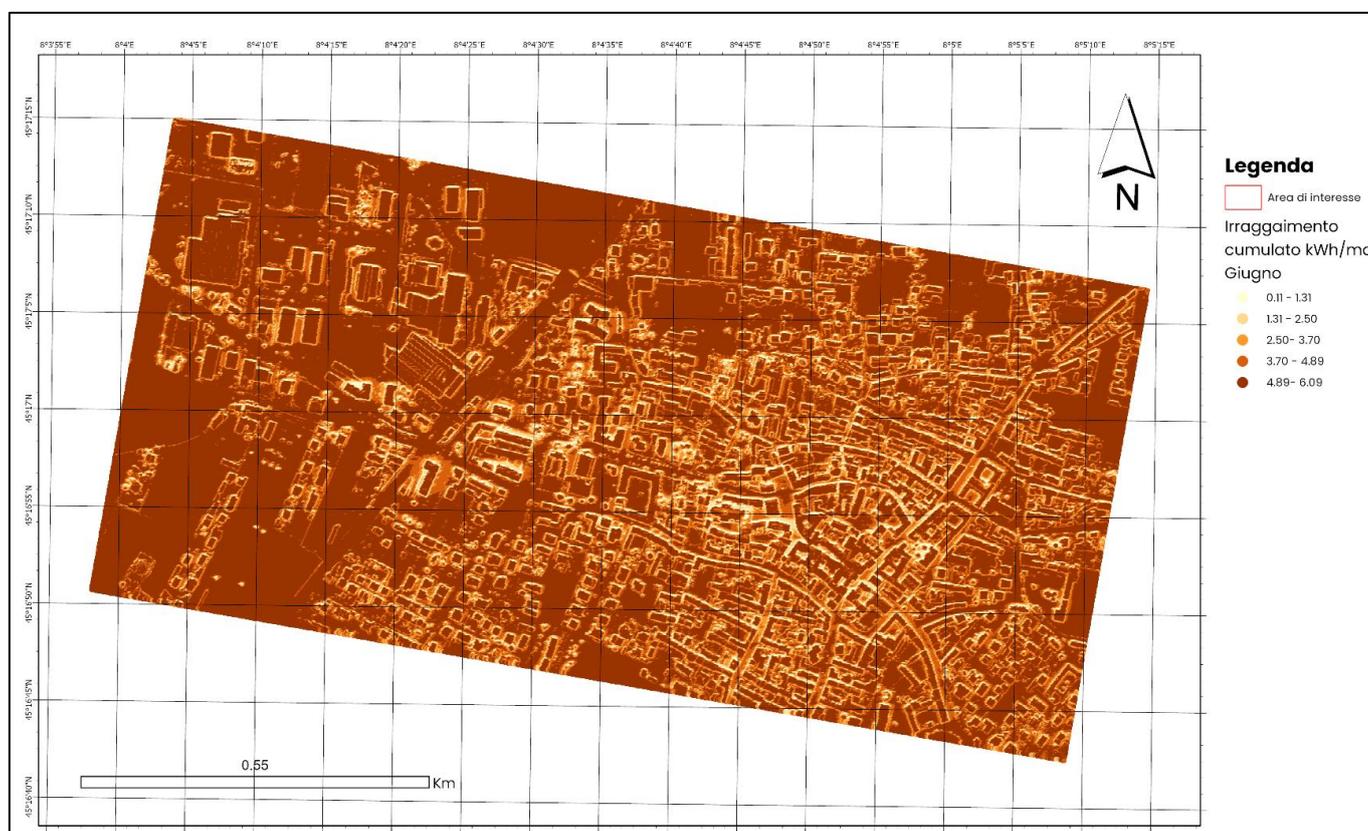


Figura 145 Irraggiamento cumulato mensile per il mese di giugno. Valori in kWh/m²

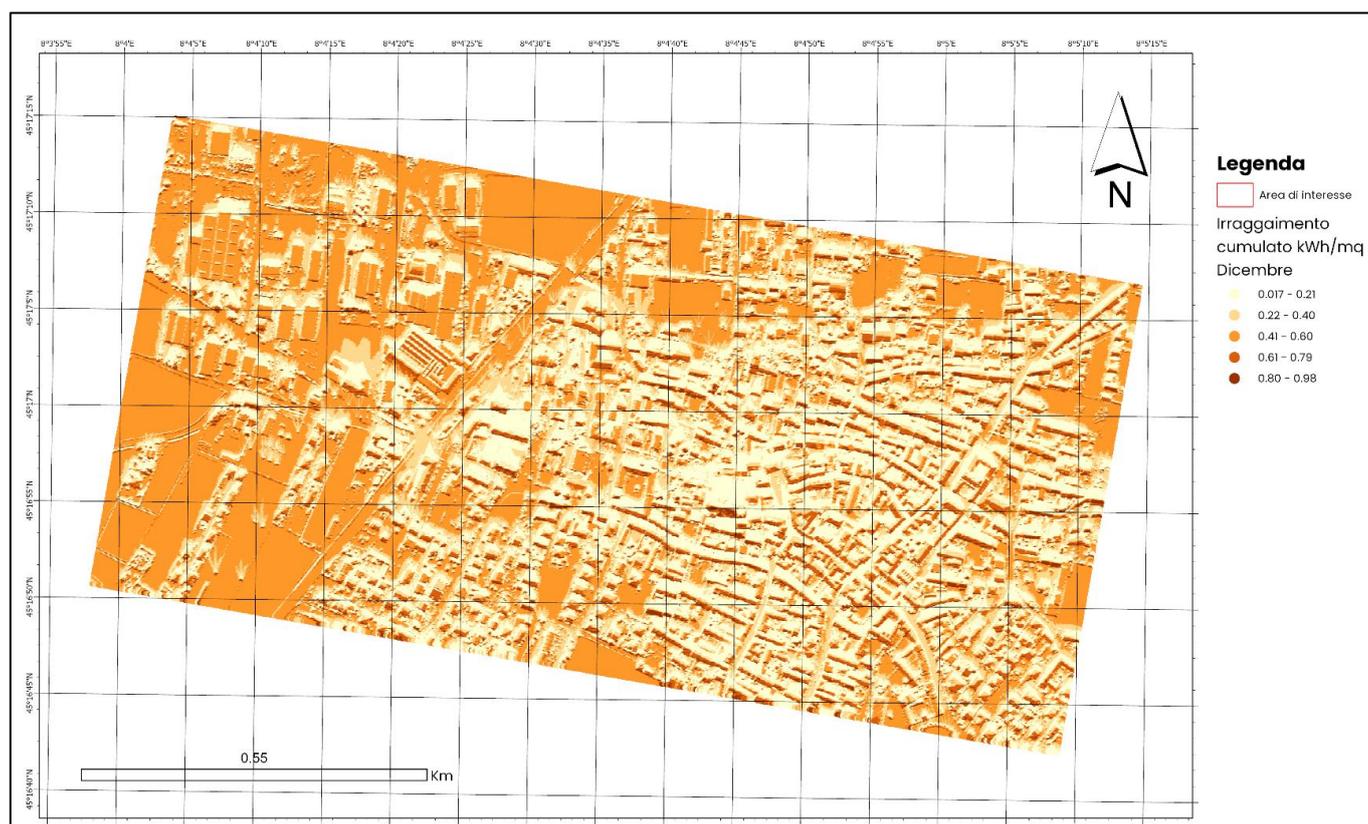


Figura 146 Irraggiamento cumulato mensile per il mese di dicembre. Valori espressi in kWh/m²

9.4 Calcolo del potenziale fotovoltaico

L'elaborazione dell'irraggiamento solare annuo consente di misurare il potenziale fotovoltaico e di conseguenza, calcolare l'energia fotovoltaica producibile da impianti installabili.

In prima analisi, assumendo un valore costante di efficienza η dei moduli fotovoltaici, si può calcolare la produzione elettrica (E) come:

$$E = \eta AH \text{ [kWh]} \quad (12)$$

Dove:

- 1) **A** è la superficie dei moduli FV;
- 2) **H** è il valore di insolazione annua totale, precedentemente calcolata, incidente sul piano del modulo

Questa semplice formulazione non considera tuttavia le perdite del sistema dovute a diversi fattori: effetti della temperatura, ombreggiamento, efficienza dell'inverter, perdite di carico della rete di trasporto (cavi), etc.

Per tener conto degli effetti delle perdite, si utilizza il parametro **Performance Ratio (PR)** che è definito come:

$$PR = \frac{E}{P_n} \frac{1000}{H} \quad (13)$$

In cui E/P_n rappresenta la **resa energetica del sistema (Y_f)** che a sua volta viene espressa come:

$$Y_f = \frac{E}{P_n} = PR \cdot Y_r = PR \frac{H}{G_{STC}} \left[\frac{kWh}{kWp} \right] \quad (14)$$

Dove H/G_{STC} indica la **resa di riferimento in condizioni standard (Y_r)**, mentre $G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$ esprime l'irraggiamento.

A questo punto, assumendo valori tipici di PR, la formulazione del potenziale fotovoltaico consente la stima di parametri numerici che si avvicinano alla produttività reale dell'impianto. [49]

Pertanto, l'equazione di riferimento diventa quella di seguito riportata che è nota come **Relazione di Suri** [50]:

$$E = PR \cdot \eta \cdot A \cdot H \text{ [kWh/a]} \quad (15)$$

Per conoscere la superficie fotovoltaica utile installabile, ipotizzando l'utilizzo di coperture inclinate, si predispone un dataset vettoriale originato dagli edifici presenti nell'area di interesse. Utilizzando la Base Dati Regionale BDTRE [51], sono stati prima estrapolati i footprint dei fabbricati. Per il calcolo della superficie fotovoltaica installabile, sono state considerate le seguenti tipologie di fabbricati

raggruppate per destinazione d'uso. In Figura 147 si riporta il grafico estrapolato da ArcGIS Pro:

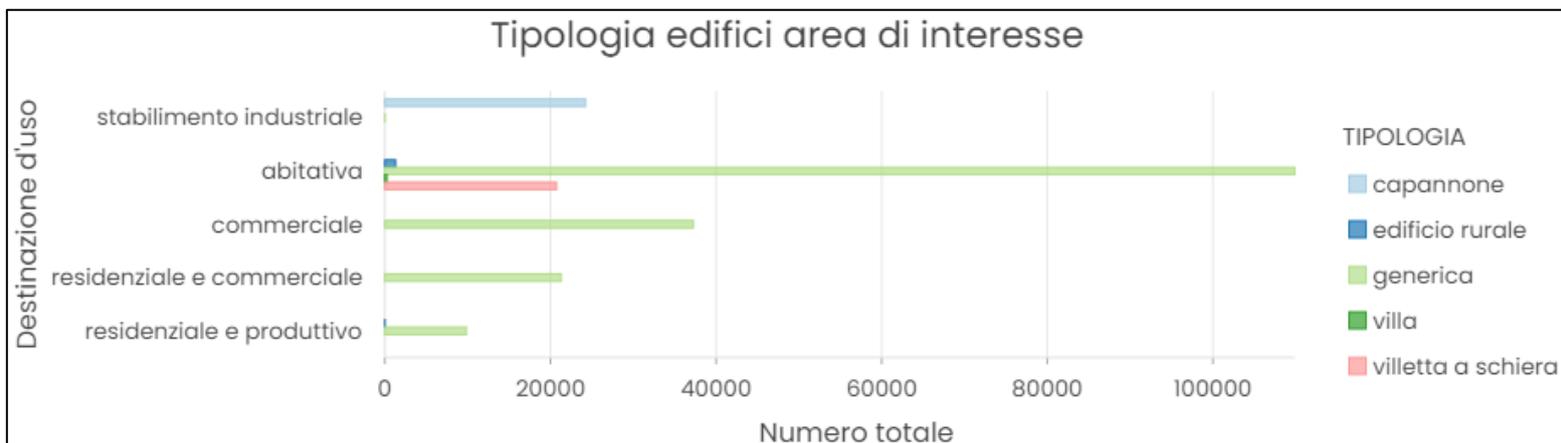


Figura 147 Potenziale fotovoltaico: edifici inclusi nel calcolo, raggruppati per destinazione d'uso

Successivamente si eseguono due processamenti per individuare le coperture migliori in termini di esposizione-irraggiamento. In (Figura 148) viene riportata l'esposizione delle coperture degli edifici all'interno dell'area di interesse, mentre in (Figura 149) vengono rappresentati i relativi valori di irraggiamento medio annuo.

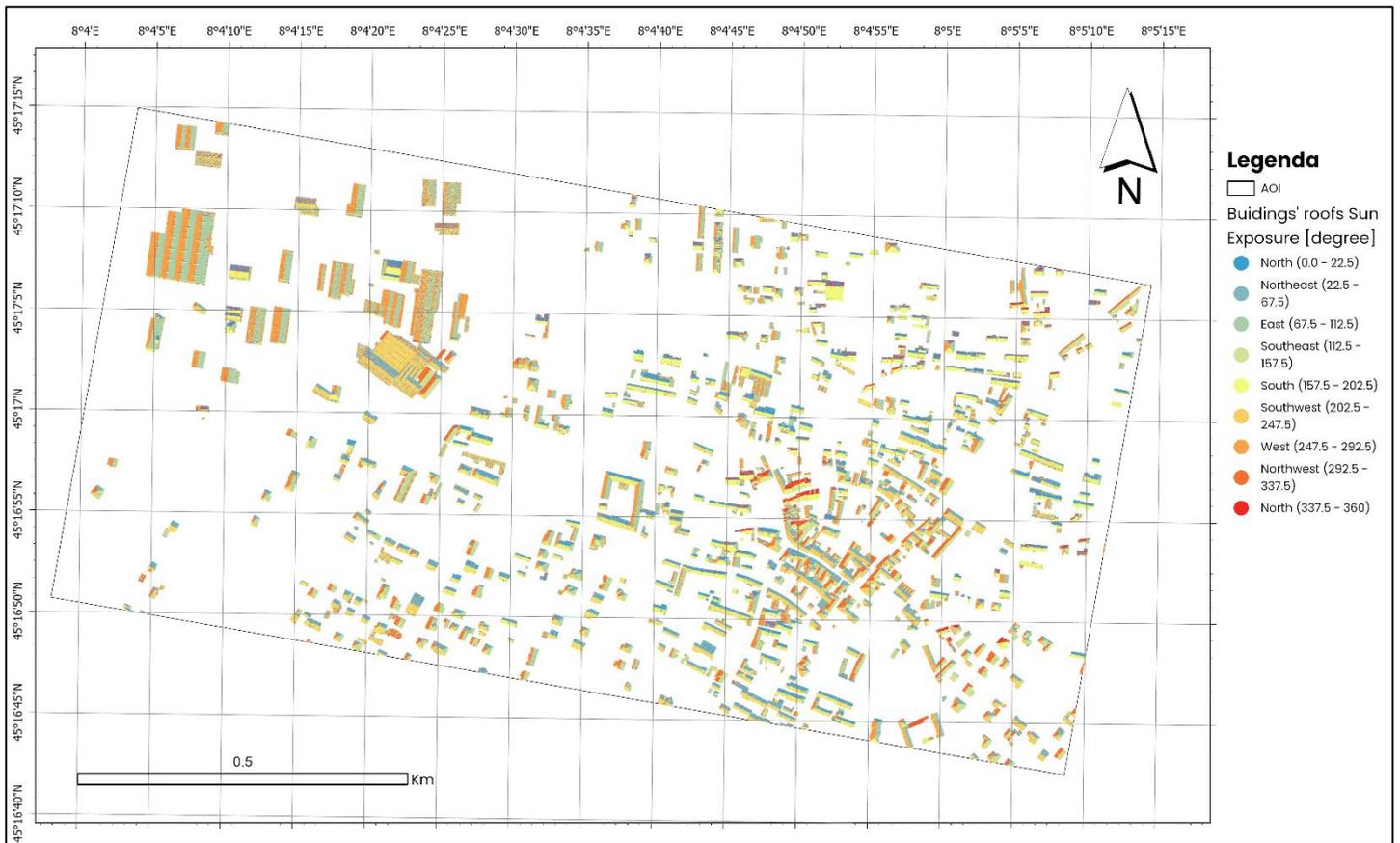


Figura 148 Orientamento delle coperture oblique degli edifici secondo i punti cardinali

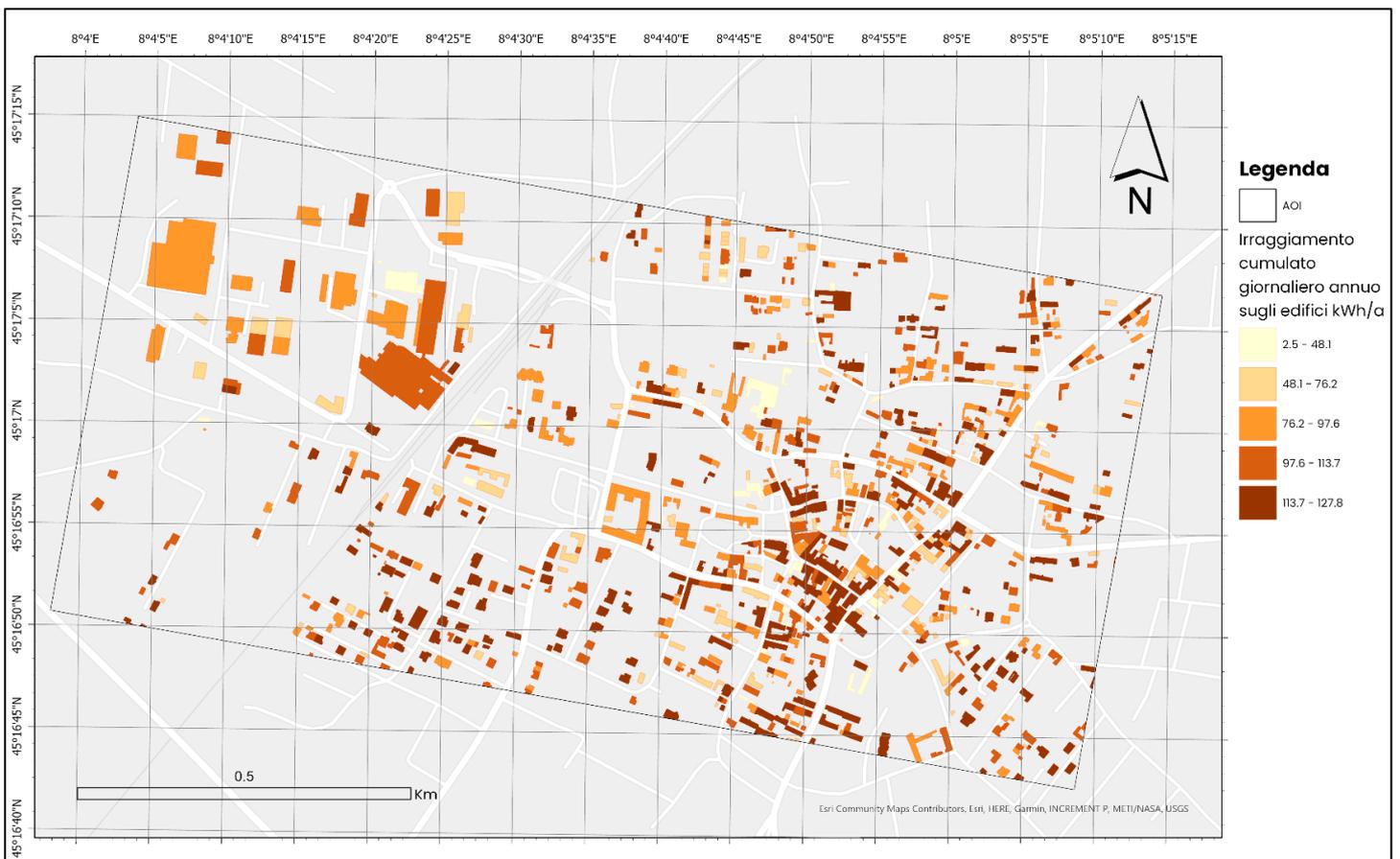


Figura 149 Elaborazione sugli edifici dell'area d'interesse per il potenziale Cumulato Giornaliero Medio Annuo in kWh/a

10 Conclusione e sviluppi futuri

Questo lavoro di tesi ha trattato la realizzazione di un modello tridimensionale ad altissima risoluzione, frutto dell'integrazione e parametrizzazione di un dataset eterogeneo composto da: immagini aeree ottiche (oblique e nadirali) e da una nuvola di punti LIDAR georeferenziata. Per poter affrontare l'analisi e le elaborazioni effettuate, è stata effettuata una campagna di **appoggi in campo** basata su **punti GNSS / RTK**, che si è svolta nel mese di giugno 2021. Ciò si è reso necessario in quanto, per le immagini aeree in dotazione, non erano disponibili a monte informazioni GPS dettagliate tali da consentire l'**orientamento esterno** dei fotogrammi.

A questa campagna, ha fatto seguito nel mese di ottobre 2021, un'ulteriore giornata di rilevamento in loco in cui, grazie all'impiego della tecnologia **laser scanner**, è stata acquisita una **nuvola di punti LIDAR**.

Lo scopo principale di questo studio è stato quello di indagare alcuni dei principali software di **Structure from Motion (SFM)** attualmente disponibili sul mercato (**Metashape, ArcGIS Pro, Catalyst Professional e PIX4Dmapper**), al fine di costruire un **benchmark** solido che tenesse conto sia dell'accuratezza geometrica ed altimetrica finale degli output generati (DSM e Ortomosaico), sia delle prestazioni e dei tempi di processamento del software stesso.

Il benchmark, condotto per tutti i programmi sulla medesima macchina sullo stesso campione di dati e con un workflow di processamento pressoché identico, mette in luce inoltre che, indipendentemente dal software utilizzato, a prodotti qualitativamente migliori in termini di accuratezza geometrica ed altimetrica, corrispondano dei tempi complessivi di elaborazione maggiori, in particolare per

la generazione della nuvola di punti. Dal confronto, il software che restituisce gli output con i migliori valori di accuratezza geometrica ed altimetrica è Agisoft Metashape.

Definito il software, il secondo step è consistito nella caratterizzazione del workflow necessario alla generazione di un Modello 3D texturizzato in colori reali capace di modellare pienamente e nel dettaglio tutti gli elementi urbani, con particolare riguardo alle facciate degli edifici. La peculiarità di tale studio consiste nell'unione di **tre differenti nuvole dense di punti**: due derivanti dal processamento di immagini aeree e una dall'acquisizione LIDAR del KAARTA, allo scopo di **incrementare la qualità finale del modello 3D**.

Affinato il modello definitivo, lo step successivo ha visto l'utilizzo del software **3Dfier**, con il quale è stato possibile realizzare una prima **vettorializzazione del modello 3D** ad un livello di dettaglio **LOD1.3**, fondamentale per la realizzazione di uno strumento in continuo aggiornamento, quale è il **Digital Twin urbano**, in grado di recepire, integrare ed implementare i dati provenienti da fonti diversificate.

In ultima istanza, il presente studio ha voluto dimostrare la concreta utilità ed efficienza del Modello 3D ad altissima risoluzione generato, soffermandosi sulle sue applicazioni in ambito urbano ed in particolare sull'efficientamento energetico, tematica di particolare interesse e attualmente molto dibattuta. È stata quindi effettuata un'**analisi sull'irraggiamento solare**, propedeutica al calcolo del **potenziale fotovoltaico** degli edifici ricadenti nel Comune di Livorno Ferraris. Tale studio certifica come l'utilizzo del modello digitale, costituisca uno strumento fondamentale nello sviluppo delle **politiche energetiche** e della **pianificazione urbanistica** per il governo del territorio.

Alla luce di quanto emerso dal presente lavoro di ricerca, si può sicuramente affermare che i software attualmente in commercio permettono di realizzare un modello solido e meticolosamente accurato “gemello” digitale della realtà urbana, strumento fondamentale a servizio della comunità e delle amministrazioni locali nei settori della cartografia, della prevenzione del rischio, del monitoraggio ambientale e della pianificazione territoriale.

Il prosieguo di questo lavoro verterà dunque sul miglioramento e popolamento del modello vettoriale 3D con dati geospaziali sia statici e che capaci di aggiornarsi in tempo reale attraverso le nuove tecnologie sensoristiche e IoT. Sarebbe inoltre interessante per il futuro, valutare la generazione di un modello tridimensionale a partire da un dataset di immagini e nuvole LiDAR entrambe acquisite da aereo per indagare nuovi contesti urbani.

11 Riferimenti

- [1] Wikipedia, «Modello 3D,» 02 Maggio 2021. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Modello_3D#Boundary-based_objects.
- [2] L. Zanotti, «Digital twin: cos'è e come funziona il modello del gemello digitale,» Luglio 2021. [Online]. Available: <https://www.digital4.biz/executive/digital-twin-cose-e-come-funziona-il-modello-del-gemello-digitale/>.
- [3] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, Jantien Stoter, «An improved LOD specification for 3D building models,» *Computers, Environment and Urban Systems*, pp. 25-37, Settembre 2016.
- [4] Wikipedia, «Geography Markup Language,» 02 Luglio 2021. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Geography_Markup_Language.
- [5] R. Carlucci, «L'Open Geospatial Consortium (OGC) ha approvato CityGML v3.0 per integrazione anche con il BIM,» 18 Ottobre 2021. [Online]. Available: <https://www.rivistageomedia.it/2021101817494/Dati-geografici/l-open-geospatial-consortium-ogc-ha-approvato-citygml-v3-0-per-integrazione-anche-con-il-bim>.
- [6] «Citygml Wiki,» 22 Febbraio 2017. [Online]. Available: www.citygmlwiki.org/index.php?title=Citygml_Wiki.
- [7] A. Balocchi, «Digital twin e smart city, unione virtuosa per città intelligenti,» Ottobre 2019. [Online]. Available: <https://www.lumi4innovation.it/digital-twin-e-smart-city-per-citta-intelligenti/>.
- [8] Trinity College Dublin, "A digital twin smart city for citizen feedback," Marzo 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/348382801_A_digital_twin_smart_city_for_citizen_feedback.
- [9] S. Farruggia, «"Urban Digital Twin": alfabetizzazione spaziale e competenze geo-digitali per vivere le città del futuro,» Aprile 2021. [Online]. Available: <https://www.agendadigitale.eu/smart-city/urban-digital-twin-alfabetizzazione-spaziale-e-competenze-geo-digitali-per-vivere-le-citta-del-futuro/>.
- [10] D. Maune, «Digital Elevation Model (DEM) Whitepaper NRCS High Resolution Elevation Data,» p. 120, 2011.
- [11] S. Kakoli, «DSM extraction and evaluation from Cartosat-1 stereo data for Bhopal city, Madhya Pradesh,» *International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 4, Issue 5, May 2014*, pp. 4-8, 2014.
- [12] M. Roggero, *Cartografia*, 2014.

- [13] D. Maune, «Digital Elevation Model (DEM) Whitepaper NRCS High Resolution Elevation Data’,» p. 120, 2011.
- [14] A. Marzocca, «Principi del rilievo fotogrammetrico - Principi della fotogrammetria,» [Online]. Available: http://rilievo.stereofot.it/studenti/aa04/Marzocca/fotog/f_principi.htm.
- [15] Paolo Rossi, Paolo Corradeghini, «Fotogrammetria con Photoscan,» 15 Dicembre 2017. [Online]. Available: <https://3dmetrica.it/fotogrammetria-con-photoscan/>.
- [16] V. A. Girelli, *TECNICHE DIGITALI PER IL RILIEVO, LA MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE E LA RAPPRESENTAZIONE NEL CAMPO DEI BENI CULTURALI*, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- [17] M. Pinto, *Rilievo Fotogrammetrico da drone per la generazione di modelli termici di porzioni di territorio*, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2016.
- [18] E. Barone, «L’orientamento interno in fotogrammetria,» 01 Agosto 2019. [Online]. Available: <https://dronetopoprogram.it/lorientamento-interno-in-fotogrammetria/>.
- [19] E. Barone, «L’orientamento esterno in fotogrammetria,» 03 Marzo 2020. [Online]. Available: <https://dronetopoprogram.it/lorientamento-esterno-in-fotogrammetria/>.
- [20] Digisky, «About us,» 2021. [Online]. Available: <https://www.digisky.it/about-us/>.
- [21] Wikipedia, «Lidar,» 3 Agosto 2021. [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Lidar>.
- [22] KAARTA, «STENCIL 2: COMPACT AND VERSATILE MOBILE MAPPING SOLUTION,» KAARTA, 2021. [Online]. Available: <https://www.kaarta.com/products/stencil-2-for-rapid-long-range-mobile-mapping/#First>. [Consultato il giorno 15 Novembre 2021].
- [23] Paolo Corradeghini, Paolo Rossi, «Fotogrammetria con Photoscan parte 6 – Creazione della nuvola di punti densa,» 29 Maggio 2018. [Online]. Available: <https://3dmetrica.it/photoscan-creazione-nuvola-densa/>.
- [24] Agisoft, «Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition, Version 1.7,» 2021. [Online]. Available: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf. [Consultato il giorno 05 Novembre 2021].
- [25] Esri, «ArcGIS Pro,» 05 Febbraio 2021. [Online]. Available: <https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-pro/overview>.
- [26] ArcGIS, «Imagery Workflow - Create Digital Aerial Imagery Products ArcGIS Pro,» Esri - Environmental Systems Research Institute, Inc., 2021. [Online]. Available: <https://doc.arcgis.com/en/imagery/workflows/tutorials/create-aerial-imagery-products-ortho-mapping.htm>. [Consultato il giorno 05 Novembre 2021].
- [27] Esri, «Esri Partners - PCI Geomatics Enterprises Inc,» Esri Inc., 2021. [Online]. Available: <https://www.esri.com/partners/pci-geomatrics-enterp-a2T70000000TNb8EAG>. [Consultato il giorno 05 Novembre 2021].
- [28] PCI, *CATALYST Professional Help*, Markham: PCI Geomatics Enterprises, Inc.®, 2021.

- [29] Pix4dmapper, «GCP/MTP Editor - Fase di gestione GCP/MTP,» Pix4d, 2021.
- [30] ESRI, «Introduction to ortho mapping,» ESRI, Inc., 2021. [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/introduction-to-ortho-mapping.htm>. [Consultato il giorno 05 Novembre 2021].
- [31] CloudCompare, «CloudCompare Version 2.6.1 - User Manual,» Febbraio 2015. [Online]. Available: <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>. [Consultato il giorno 22 Novembre 2021].
- [32] 3. geoinformation, «About,» TUDelft, 2021. [Online]. Available: <https://3d.bk.tudelft.nl/about/>. [Consultato il giorno 23 Novembre 2021].
- [33] Hugo Ledoux, Filip Biljecki, Balázs Dukai, Kavisha Kumar, Ravi Peters, Jantien Stoter, Tom Commandeur, «3dfier: automatic reconstruction of 3D city models,» *JOSS - The Journal of Open Source Software*, 2021.
- [34] U. A. Lab, «New paper: 3dfier: automatic reconstruction of 3D city models | Urban Analytics Lab | Singapore,» NUS - National University of Singapore, 28 Gennaio 2021. [Online]. Available: <https://ual.sg/post/2021/01/28/new-paper-3dfier-automatic-reconstruction-of-3d-city-models/>. [Consultato il giorno 23 Novembre 2021].
- [35] 3. g. group, «The open-source tool for creation of 3D models | 3dfier Recreating your environment,» TUDELFT - Delft University of Technology, 23 Novembre 2021. [Online]. Available: <http://tudelft3d.github.io/3dfier/index.html>. [Consultato il giorno 25 Novembre 2021].
- [36] «Geoportale Piemonte,» Regione Piemonte, 2021. [Online]. Available: <http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/?sezione=catalogo>. [Consultato il giorno 22 Novembre 2021].
- [37] SmartCitiesWorld, «Digital twin technology aims to put sustainability at the heart of smart cities,» 17 Aprile 2019. [Online]. Available: <https://www.smartcitiesworld.net/news/digital-twin-technology-aims-to-put-sustainability-at-the-heart-of-smart-cities-4088>. [Consultato il giorno 16 Novembre 2021].
- [38] ACCA-Software, «Impianti solari - Teoria,» [Online]. Available: http://download.acca.it/BibLus-net/VecchiAllegatiBiblus/Approfondimenti_Tecnici/Impianti_Solari_Teoria_64.pdf. [Consultato il giorno 17 Novembre 2021].
- [39] Casasoleil, «IRRAGGIAMENTO,» [Online]. Available: [view-source:https://www.casasoleil.it/irraggiamento.htm](https://www.casasoleil.it/irraggiamento.htm). [Consultato il giorno 17 Novembre 2021].
- [40] Paul M. Ritch, R. Dubayah, W. A. Hetrick, S. C. Saving, «Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology,» *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, pp. 524-526, 1994.

- [41] Pinde Fu, Paul M. Rich, *A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology. Ph.D. Thesis*, Lawrence, Kansas: Department of Geography, University of Kansas, 2000.
- [42] Pinde Fu, Paul M. Rich, *The Solar Analyst 1.0 Manual*, USA: Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), 200.
- [43] Pinde Fu, Paul M. Rich, «"A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry."» *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 25-35, 2002.
- [44] Paul M. Rich, Pinde Fu, «"Topoclimatic Habitat Models."» in *Proceedings of the Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling.*, 2000.
- [45] ArcGIS-Pro, «How solar radiation is calculated,» ESRI, 2021. [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-solar-radiation-is-calculated.htm>. [Consultato il giorno 18 Novembre 2021].
- [46] ArcGIS-Pro, «Modelin solar radiation,» ESRI, 2021. [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>. [Consultato il giorno 18 Novembre 2021].
- [47] ArcGIS-Pro, «Area Solar Radiation (Spatial Analyst) - ArcGIS Pro | Documentation,» 2021. [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/area-solar-radiation.htm>. [Consultato il giorno 18 Novembre 2021].
- [48] ArcGIS-Pro, «Surface Parameters (Spatial Analyst) - ArcGIS Pro | Documentation,» ESRI, 2021. [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/surface-parameters.htm>. [Consultato il giorno 19 Novembre 2021].
- [49] David Moser, Matteo Del Buono, Wolfram Sparber, Roberto Vaccaro, Daniele Vettorato, «Il potenziale fotovoltaico dell'Alto Adige - Uso intelligente degli spazi,» EURAC, Bolzano.
- [50] Marcel Suri, Thomas A. Huld, Ewan D. Dunlop, Heinz A. Ossenbrik, «"Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries",» *Solar Energy* 81, pp. 1295-1305, 2007.
- [51] BDTRE, «Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti piemontesi,» Regione Piemonte, 2021. [Online]. Available: <https://www.geoportale.piemonte.it/cms/bdtre/bdtre-2>. [Consultato il giorno 2021 Novembre 20].
- [53] Wikipedia, «Città intelligente,» 14 Luglio 2021. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Citt%C3%A0_intelligente#cite_ref-3.
- [54] M. Castells, *La città delle reti*, Venezia: Marsilio, 2004.

12 Tabella delle Figure

<i>Figura 1 Esempio di LOD a 16 livelli [3].....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2 Immagine tratta dall'articolo: "A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback." [8].....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3 Schema concettuale del Digital Twin per la Smart City [9].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 L'ellissoide matematico da cui si fa riferimento alle coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e da cui le altezze ellissoidi sono rilevate dal GPS [12]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 Ellissoide geocentrico, geoide e superficie terrestre a confronto [13].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6 Ellissoide, altezza geoide ed elevazione a confronto [13].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 7 Trasposizione da immagine originale a immagine raster.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8 Gradazione di grigio a 8bit: DN compreso tra 0 e 255 (da nero a bianco)</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9 Schema orientamento interno della camera [18].....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10 Orientamento relativo: esempio di blocco fotogrammetrico [19].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11 Inquadramento territorio Livorno Ferraris.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 12 Mosaico (a sinistra) e copertura del volo nadirale (a destra) delle immagini ottiche</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13 Sistema aereo integrato PhaseOne (in alto a sinistra); Camera PhaseOne iXM-RS150F (in alto a destra); Lente Rodenstock RS-50mm (in basso) - © Copyright 2020 Phase One A/S.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 14 Residui di immagine per la iXM-RS150F, Rodenstock RS-50mm/Aerial (50mm).....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15 Dotazione per il rilievo laser scanning: (in alto a sinistra) KAARTA® Stencil 2 con tablet per controllo remoto - © KAARTA, 2021; (in alto a destra) LIDAR Velodyne Puck LITE - © Velodyne LiDAR, 2021; (in basso) Ricevitore GPS EMLID Reach RS2 –© EMLID, 2021.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16 LIDAR + GPS montati su struttura mobile.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17 Kaarta® Engine: infografica algoritmo – © KAARTA, 2021</i>	<i>39</i>
<i>Figura 18 Esecuzione algoritmo Kaarta® Engine direttamente da dispositivo Stencil.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 19 Nuvola di punti LIDAR: particolare.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 20 Ortofoto con risoluzione 10cm.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 21 Individuazione con ArcGIS di GCP e CP</i>	<i>43</i>
<i>Figura 22 Esempio scheda monografica</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23 Dispositivo Trimble TSC3 (a sinistra) e Stazione GNSS/RTK (a destra).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24 Confronto GCP/CP con monografia (sinistra) – Posizione non collimata del punto (centro) – Collimazione del punto sul fotogramma (destra)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 25 DSM prodotto da immagini nadirali ottiche</i>	<i>50</i>
<i>Figura 26 Ortofoto RGB da immagini nadirali ottiche</i>	<i>51</i>
<i>Figura 27 Texture 3D del modello digitale.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 28 Agisoft © Metashape: interfaccia grafica</i>	<i>53</i>
<i>Figura 29 Metashape: menù workflow.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 30 Metashape - step #1: caricamento immagini sul workspace.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 31 Metashape - step #1: modalità upload foto</i>	<i>55</i>

Figura 32 Metashape - step #2: Allineamento immagini.....	55
Figura 33 Metashape - step#2: Import file con dati GPS	56
Figura 34 Metashape - step#2: caricamento file CSV	56
Figura 35 Metashape - step#2: Align Photos	57
Figura 36 Metashape - step#2: fotogrammi allineati	57
Figura 37 Metashape - step#2: Nuvola sparsa di punti	58
Figura 38 Metashape - step#3: Caricamento GCP e CP	59
Figura 39 Metashape - step#3: GCP e CP distribuiti sul modello	59
Figura 40 Metashape - step#3: Filtraggio foto da collimare	59
Figura 41 Metashape - Step#3: fotogrammi con marker non collimati.....	60
Figura 42 Metashape - step#3: Marker collimati su diversi fotogrammi	61
Figura 43 Metashape - step#3: Tabella dei GCP con indicazioni dell'errore e del numero di proiezioni.....	61
Figura 44 Metashape - step#5: Build Dense Cloud e settaggio qualità	63
Figura 45 Metashape - step#6: Generazione del DEM e relative impostazioni	64
Figura 46 Metashape - step#7: Creazione ortomosaico	65
Figura 47 Metashape - output: esempio di modello mesh a bassa risoluzione	66
Figura 48 Metashape - output: Tiled model da immagini RGB oblique	66
Figura 49 ArcGIS Pro - step#1: Creazione Workspace (sinistra); Import tabelle per l'orientamento esterno ed interno (destra) [26]	83
Figura 50 ArcGIS Pro - step#1: Caricamento dati DEM [26].....	84
Figura 51 ArcGIS Pro - step#1: Visualizzazione Area lavoro e Image Collection [26].....	85
Figura 52 ArcGIS Pro - step#2: Esecuzione del Block Adjustment [26].....	86
Figura 53 ArcGIS Pro - step#2: Importazione GCP	86
Figura 54 ArcGIS Pro - step#2: Riquadro di gestione dei GCP	87
Figura 55 ArcGIS Pro - step#2: Individuazione in mappa di CP e GCP, collimati e non	88
Figura 56 ArcGIS Pro - step#2: Distribuzione dei punti di collegamento (tie points) [26]	89
Figura 57 ArcGIS Pro - step#3. Procedura guidata creazione DEM [26]	90
Figura 58 ArcGIS Pro - step#4: Impostazioni di bilanciamento del colore [26]	91
Figura 59 Catalyst Professional – step#1: Apertura Ortho Engine.....	105
Figura 60 Catalyst Professional - step#1: Set-up informazioni iniziali progetto	106
Figura 61 Catalyst Professional – step#2: Icona impostazioni parametri calibrazione fotocamera	107
Figura 62 Catalyst Professional - step#2: Importazione parametri fotocamera.....	107
Figura 63 Catalyst Professional – step#3: Impostazione sistema di riferimento	108
Figura 64 Catalyst Professional – step#4: Caricamento immagini	108
Figura 65 Catalyst Professional – step#4: selezione cartella immagini	109
Figura 66 Catalyst Professional – step#4: Parametri per l'orientamento esterno importati.....	110
Figura 67 Catalyst Professional – step#5: Gestione GCP e tie points.....	111
Figura 68 Catalyst Professional – step#5: procedura automatica di acquisizione GCP	112
Figura 69 Catalyst Professional – step#5: acquisizione automatica TP	113
Figura 70 Catalyst Professional - step#5: Controllo degli errori residui su GCP/TP	114

Figura 71 Catalyst Professional – step#6: Calcolo del modello matematico	115
Figura 72 Catalyst Professional - Confronto tra immagini grezze e immagini epipolari [28]	116
Figura 73 Catalyst Professional - Creare il DEM da una coppia di immagini epipolari [28].....	117
Figura 74 Catalyst Professional – step#7: Schermata creazione immagini epipolari	118
Figura 75 Catalyst Professional – step#7: Estrazione automatica del DEM	119
Figura 76 Catalyst Professional - step#8: Generazione ortofoto	121
Figura 77 Catalyst Professional - step#9: Mosaic tool con Cutlines create.....	122
Figura 78 Catalyst Professional - step#9: Esportazione dell'ortomosaico	123
Figura 79 Catalyst Professional - Report del progetto	124
Figura 80 PIX4Dmapper - step#1: Creazione nuovo progetto.....	129
Figura 81 PIX4Dmapper - step#1: Selezione cartella predefinita e nome del progetto	129
Figura 82 PIX4Dmapper - step#1: caricamento cartella immagini	130
Figura 83 PIX4Dmapper - step#1: importazione dell'orientamento esterno delle immagini.....	131
Figura 84 PIX4Dmapper - step#1: Selezione del sistema di coordinate	131
Figura 85 PIX4Dmapper - step#1: scelta del template di elaborazione	132
Figura 86 PIX4Dmapper - step#1: Area di lavoro iniziale.....	133
Figura 87 PIX4Dmapper - step#2: Caricamento ground control point.....	134
Figura 88 PIX4Dmapper - step#2: GCP caricati.....	135
Figura 89 PIX4Dmapper - step#3: Collimazione immagini.....	136
Figura 90 PIX4Dmapper - step#3: Individuazione dei GCP sul riquadro Mappa	137
Figura 91 PIX4Dmapper - step#4: allineamento iniziale delle immagini	138
Figura 92 PIX4Dmapper - step#4: Calibrazione della fotocamera	139
Figura 93 PIX4Dmapper - step#4: Ottimizzazione immagini con georeferenziazione	139
Figura 94 PIX4Dmapper - step#4: Completamento elaborazione iniziale	140
Figura 95 PIX4Dmapper - step#5: Affinamento delle collimazioni tramite rayCloud	141
Figura 96 PIX4Dmapper - step#5: Selezione singolo GCP	142
Figura 97 PIX4Dmapper - step#5: marcatura automatica dei GCP sulle immagini	143
Figura 98 PIX4Dmapper - GCP 101 sull'immagine P0030119: elaborato da Marcatura automatica (a sinistra) e collimato manuale (a destra).....	143
Figura 99 PIX4Dmapper: controllo parametri GCP e relativi errori	144
Figura 100 PIX4Dmapper - step#6: avvio step n.2 e n.3 del processamento	144
Figura 101 PIX4Dmapper - step#6: Opzioni di elaborazione.....	146
Figura 102 PIX4Dmapper - step#6: Avvio procedura di generazione nuvola di punti, creazione del DSM e dell Ortomosaico	147
Figura 103 PIX4Dmapper - step#6: fine processamento.....	147
Figura 104 Cartella di lavoro tipica di PIX4Dmapper	148
Figura 105 Punti di appoggio su immagini oblique: tabella di Reference (in alto); posizionamento in mappa rispetto ai fotogrammi proiettati (in basso)	170
Figura 106 Individuazione sulla nuvola punti LIDAR in Cloud Compare del Palazzo G. Ferraris (riquadro sinistra) e del Municipio (riquadro destra).....	171

Figura 107 CloudCompare: tool principali per l'editing delle nuvole di punti 3D.....	172
Figura 108 Nuvola punti LIDAR elaborata ed affinata.....	172
Figura 109 Nuvole punti 3D da Metashape ottenute dalle immagini ottiche (sinistra) e da immagini nadirali (destra)	173
Figura 110 Posizionamento delle 3 nuvole sull'area lavoro di CloudCompare con vista dall'alto (sinistra) e prospettica (destra)	174
Figura 111 CloudCompare: registrazione di 4 coppie di punti (in alto) e risultato finale dell'allineamento (in basso) ..	175
Figura 112 CloudCompare: esecuzione tool Fine Registration (in alto) e risultato dell'allineamento automatico (in basso).....	176
Figura 113 Processamento nuvola LIDAR + nuvola ottica: esecuzione funzione di Align (in alto a sinistra) e relativo output (in alto a destra); affinamento automatico tramite Fine Registration (in basso a sinistra) e risultato (in basso a destra).....	177
Figura 114 Segmentazione - in verde - della nuvola LIDAR (in alto) e risultato finale (in basso).....	178
Figura 115 CloudCompare: colorazione nuvola LIDAR tramite comando "Interpolate"	179
Figura 116 Nuvola LIDAR colorata: vista dall'alto (sinistra) e vista prospettica (destra), dettaglio Palazzo G. Ferraris	179
Figura 117 Nuvola di punti definitiva: vista laterale (in alto a sinistra), vista assonometrica 1 (in alto a destra), vista assonometrica 2 (in basso a destra) e vista dall'alto (in basso a sinistra).....	180
Figura 118 Panoramica di funzionamento di 3dfier [33]	189
Figura 119 3dfier: visualizzazione descrittiva del processo di ricostruzione [33].....	189
Figura 120 3dfier: esempio di output per la città di Leiden in Olanda [33]	190
Figura 121 Preparazione dataset per 3dfier	191
Figura 122 3dfier: esecuzione del software per la creazione del modello vettoriale	196
Figura 123 3dfier: modello vettoriale 3D di Livorno Ferraris	197
Figura 124 Dettaglio del modello 3D vettoriale: Palazzo G. Ferraris e Municipio	198
Figura 125 Esempio progettuale di un Urban Digital Twin [37]	199
Figura 126 Irraggiamento solare: componenti della radiazione nell'atmosfera [39]	203
Figura 127 Fotografia emisferica "fisheye" [46]	205
Figura 128 Illustrazione degli angoli orizzontali (sinistra), dell'area di visualizzazione risultante (centro) e dell'area di visualizzazione mappata sulla vista del cielo (destra) [46].....	206
Figura 129 Esempio di SunMap	207
Figura 130 Esempio di SkyMap	208
Figura 131 Esempio di sovrapposizioni della viewshed con la SunMap (sinistra) e con la SkyMap (destra)	209
Figura 132 ArcGIS Pro: pannello del tool Area Solar Radiation	212
Figura 133 Elaborazione per il mese di giugno della radiazione solare normale.....	216
Figura 134 Elaborazione per il mese di dicembre della radiazione solare normale.....	216
Figura 135 Area d'interesse scelta per il calcolo dell'irraggiamento solare	217
Figura 136 ArcGIS Pro: pannello del tool " Surface Parameters"	218
Figura 137 ArcGIS Pro: Esecuzione del tool Aspect.....	218
Figura 138 Valori delle altezze del DSM per l'area d'interesse	219
Figura 139 Risultato del tool Aspect con i valori di inclinazione in gradi.....	220
Figura 140 Orientamento delle superfici inclinate secondo i punti cardinali.....	220

<i>Figura 141 Valori relativi alla radiazione solare diffusa totale annua</i>	221
<i>Figura 142 Andamento della radiazione solare diretta totale annua</i>	221
<i>Figura 143 Risultato della radiazione solare incidente annua totale</i>	222
<i>Figura 144 Elaborazione del valore medio giornaliero annuo dell'irraggiamento solare</i>	222
<i>Figura 145 Irraggiamento cumulato mensile per il mese di giugno. Valori in kWh/m²</i>	223
<i>Figura 146 Irraggiamento cumulato mensile per il mese di dicembre. Valori espressi in kWh/m²</i>	224
<i>Figura 147 Potenziale fotovoltaico: edifici inclusi nel calcolo, raggruppati per destinazione d'uso</i>	226
<i>Figura 148 Orientamento delle coperture oblique degli edifici secondo i punti cardinali</i>	227
<i>Figura 149 Elaborazione sugli edifici dell'area d'interesse per il potenziale Cumulato Giornaliero Medio Annuo in kWh/a</i>	227

13 Tabella degli Output

<i>Output 1 DSM generato con Metashape</i>	78
<i>Output 2 Ortomosaico generato da Metashape</i>	79
<i>Output 3 DSM generato da ArcGIS Pro</i>	103
<i>Output 4 Ortomosaico generato da ArcGIS Pro</i>	104
<i>Output 5 DSM generato da Catalyst Professional</i>	126
<i>Output 6 Ortomosaico generato da Catalyst Professional</i>	127
<i>Output 7 DSM generato da PIX4Dmapper</i>	158
<i>Output 8 Ortomosaico generato da PIX4Dmapper</i>	159
<i>Output 9 Sequenza modello 3D texturizzato: focus su Palazzo G. Ferraris</i>	182
<i>Output 10 Sequenza modello 3D texturizzato: focus su Palazzo del Comune</i>	183
<i>Output 11 Sequenza modello 3D texturizzato: focus su edificio pluripiano di Via L. Einaudi</i>	184