POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Droni per il rilievo 3D dell'architettura

Un'applicazione sull'Istituto Comprensivo "C.Alvaro - P. Gobetti" di Torino

Relatore :

Prof.ssa Giulia Sammartano

Candidato :

Stoyan Todorov Kolunchev

Correlatore :

Prof. Filiberto Chiabrando

Settembre 2023

DRONI PER L'ARCHITETTURA

1. Storia del drone pag. 5

2. Termine drone pag. 23

2.1 Classificazione dei velivoli senza pilota pag. 29

2.2 Principi di volo pag. 37

2.3 Componenti dell'APR pag. 40

3. Sensori imaging pag. 47

3.1 Camere RGB pag. 48

3.2 Termocamere radiometriche pag. 56

3.3 Fotocamere a visione notturna pag. 58

3.4 Camere multispettrali pag. 59

3.5 Lidar _ sensore non imaging pag. 60

3.6 Sensori RTK e accessori pag. 61

4. Applicazioni mobile e software pag. 63

5. Normativa pag. 69

5.1 Nascita delle prime leggi pag. 70

6. Applicazioni del drone nell'ambito dell'architettura pag. 84

6.1 Applicazioni catastali pag. 85

6.2 Applicazione per la sicurezza nei cantieri pag. 91

6.3 Rilievo di aree colpite da calamità naturali pag. 98

6.4 Rilievo con drone con sensori RGB e termocamera per analisi del costruito storico pag. 103

6.5 Rilievo con drone munito di sensore Lidar per il monitoraggio di infrastrutture pag. 109

7. Fotogrammetria pag. 115

7.1 Definizioni e classificazioni pag. 116

7.2 Storia della fotogrammetria pag. 117

7.3 Principi geometrici pag. 118

7.4 Fasi del rilievo fotogrammetrico _ fotogrammetria digitale pag. 120

7.5 Fotogrammetria da UAV pag. 126

8. Rilievo Istituto Comprensivo “C. Alvaro -P. Gobetti” Torino pag. 131

8.1 Caso studio pag. 132

8.2 Piano di volo pag. 133

8.3 Fase di rilievo pag. 141

8.4 Elaborazione dati da UAV pag. 145

8.5 Elaborazione dati con software di fotogrammetria pag. 148

8.5.1 Elaborazione con Agisoft Metashape pag. 148

8.5.2 Elaborazione con DJI Terra pag. 164

9. Confronto tra i due metodi pag. 177

9.1 Analisi della nuvola di punti DJI Terra pag. 177

9.2 Analisi della nuvola di punti Agisoft Metashape pag. 183

9.3 Analisi dati Cloud Compare _ sezione trasversale e facciata fabbricato pag. 195

9.3.1 Confronto tra Metodo 1 (Agisoft Metashape) e Metodo 2 (DJI Terra) pag. 210

9.3.2 Analisi tra le nuvole _ Compute pag. 215

10. Capacità di estrarre superfici planari con Cyclone 3DR pag. 219

Conclusioni pag. 223

Ringraziamenti pag. 228

Definizioni, Enti e Bibliografia pag. 229

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa tesi è quello di applicare e validare una metodologia utile ad effettuare il rilievo di un edificio attraverso l'utilizzo del drone e la successiva elaborazione dei dati, acquisiti in software dedicati per la restituzione fotogrammetrica. La tesi è strutturata in una prima parte descrittiva, nella quale viene approfondito il significato della parola *drone,* dalla sua nascita in ambito militare al suo sviluppo in quello civile e vengono analizzate le sue applicazioni, utilizzando sensori aventi parametri e capacità di acquisizione dei dati differenti. Vengono analizzate la normativa a livello internazionale e nazionale e le certificazioni necessarie per l'esecuzione della missione di volo. In particolar modo viene descritta la tecnica del rilievo fotogrammetrico, la sua applicazione e le successive elaborazioni dei dati per la restituzione dei prodotti.

La seconda parte dell'elaborato si basa sull'utilizzo del drone in ambito cittadino per il rilievo dell'Istituto Comprensivo "C.Alvaro-P.Gobetti". Lo scopo è quello di confrontare due metodologie differenti che utilizzano software per l'elaborazione fotogrammetrica e la loro successiva comparazione per verificare la qualità dei prodotti ottenuti. I due metodi analizzati utilizzano i software Agisoft Metashape e DJI Terra. Pur mantenendo le stesse impostazioni di esportazione della nuvola di punti e dell'ortomosaico, i prodotti ottenuti avranno caratteristiche differenti, successivamente analizzate nel software di comparazione Cloud Compare. Un'analisi dettagliata viene eseguita su una sezione e sulla facciata del fabbricato, comparando la nuvola meno densa ottenuta con DJI TERRA alla nuvola di riferimento più densa, ottenuta con Agisoft Metashape. Dal confronto sono stati generati istogrammi utili per comparare la densità e la rumorosità delle nuvole, individuando come prodotto più dettagliato quello ottenuto con il software Agisoft Metashape. Viene condotta un'ulteriore analisi di estrapolazione delle superfici planari dalle due nuvole di punti, attraverso il riconoscimento automatico con il software Cyclone 3DR. Dai risultati ottenuti, vengono realizzate tre tabelle di valutazione personale delle due metodologie.

In conclusione, con l'impiego col drone è stato possibile acquisire dei dati del fabbricato in punti difficilmente accessibili e in tempistiche contenute, per ottenere nuvole di punti utili all'analisi della struttura.

1. STORIA DEL DRONE

L'utilizzo del termine drone e dello strumento in sé, ha preso sempre più velocità nell'ultimo decennio sia dal punto di vista ricreativo che professionale. Conosciuto prima come velivolo ad uso hobbistico ed attualmente come strumento di lavoro, il drone è un veicolo aereo senza pilota che trova sempre più applicazioni nel mondo lavorativo. A partire dall'ambito militare e arrivando a quello civile, è una realtà sempre più utilizzata nei diversi settori, dalla sorveglianza al monitoraggio di cantieri, dalle missioni di salvataggio alle ispezioni, dal trasporto alla realizzazione di costruzioni. Sta diventando uno degli strumenti fondamentali nell'ambito dell'architettura grazie ai numerosi vantaggi e alle possibili applicazioni. Prima però di analizzare il termine e le possibili applicazioni, è opportuno capire a quando risalgono le origini dei velivoli fino all'evoluzione odierna.

Le origini di questo velivolo non hanno riferimenti molto precisi anche se, le prime testimonianze risalgono a tribù antiche del continente asiatico, le quali realizzarono un aquilone capace di volare. Sulla base di questo aquilone, sono nati i sistemi di volo odierni.

Secondo l'articolo " Binary Oppostion of Levi-Strauss in The World's First Kite (Kaghati Roo Kolope) on Community in District of Muna " presentato durante la *2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Harare* tenutasi a Zimbabwe nel Dicembre del 2020, la nascita del primo aquilone va attribuita alla comunità indigena dei Muna dell'isola Muna Island in Indonesia. A testimonianza di ciò, sono proprio i disegni rappresentati sulle pareti delle grotte Kabori nell'isola di Muna risalenti tra il 9500 e il 9000 a.C., che raffigurano l'aquilone *Kaghati* realizzato in foglie di kolope, telaio in bambù e corda realizzata dalla fibra di ananas. Attualmente questa tipologia di aquilone viene tutt'ora realizzata dagli abitanti dell'isola di Muna, data la qualità dei materiali naturali e la capacità di volare grazie al suo peso contenuto.

Figura 1 (Pitture rupestri nell'Isola di Muna_Centro Studi Martini (2021) *Kites-Aquiloni e Culture in Volo Tra Arte e Scienza*, Mostra fotografica)

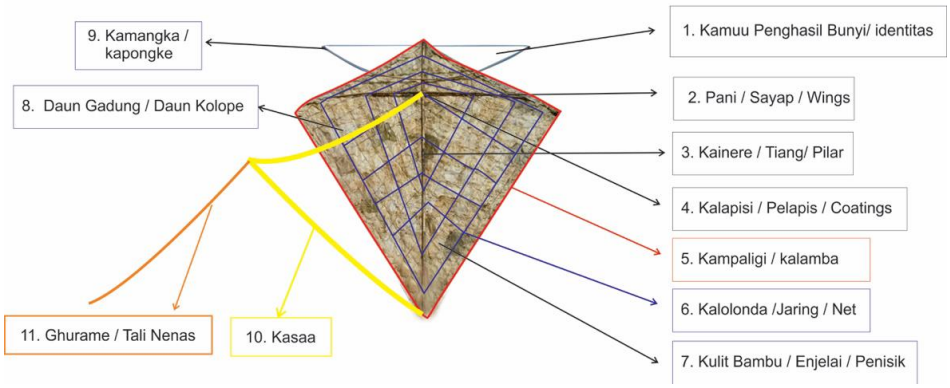


Figura 2 (Esempio di aquilone Kaghati Roo Kollope - Wa Ode Sifatu (2020) *Binary Oppostion of Levi-Strauss in The World's First Kite (Kaghati Roo Kolope) on Community in District of Muna_* 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Harare, Zimbabwe)

Altre testimonianze riportano la nascita dei primi sistemi di volo a più di 2500 anni fa in Cina e nell'antica Grecia[1].

Nel continente asiatico intorno al V secolo a.C., Mozi (conosciuto anche come Mo Di) e Lu Ban (conosciuto come Gongshu Ban) inventarono un aquilone realizzato da un telaio in bambù avvolto dalla seta. La forma inizialmente piatta e rettangolare, viene successivamente migliorata e impiegata per scopi scientifici quali misurazione di distanze, vento, segnalazione, comunicazione e in alcuni casi anche per provare a far volare l'uomo.

Per quanto riguarda il continente Europeo, nell'antica Grecia attorno al Quattrocento a.C., il filosofo e matematico della scuola pitagorica Archita di Taranto (in greco antico: Ἀρχύτας, Archýtas), affascinato dalla capacità di volo degli uccelli,attorno al 425 a.C. fece numerosi studi e tentativi, inventando la prima colomba meccanica capace di volare autonomamente.

Alcune delle descrizioni di questa macchina volante sono testimoniate da Aulo Gellio, scrittore e giurista Romano, nel suo testo Noctes Atticae (Le Notti Attiche).

Egli cita il filosofo Favorino, raccoglitore diligentissimo delle memorie antiche, che afferma come cosa sicurissima:

> *"Archita di Taranto, esperto, fra le altre cose, anche di meccanica, costruì una colomba di legno che volava; ma una volta che si fosse posata, non si rialzava più"*[2].

[1] Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. (2015) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles.* Dalamagkidis Konstantinos «Aviation History and Unmanned Flight». In, 57-81. Springer Science+Business Media Dordrecht

[2] https://www.bpp.it/Apulia/html/archivio/1986/III/art/R86III020.html

La colomba era costruita in legno e bilanciata con dei pesi, in modo da essere più stabile ed effettuare voli più lunghi. Infine per la propulsione, venne riempita con dell'aria compressa (più delle volte si usava il vapore) la quale, una volta rilasciata attraverso delle valvole, permise alla colomba di effettuare voli che ricoprivano la distanza di 200m.

Figura 3 (An artist's depiction of the flying pigeon, the first documented UAV)- Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. (2015) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dalamagkidis Konstantinos «Aviation History and Unmanned Flight». In, 57-81. Springer Science+Business Media Dordrecht

Attorno al III° secolo a.C. in Cina ci sono state rinvenute testimonianze sull'invenzione della lanterna, realizzata da un pallone di carta alla base del quale si trovava una fonte di calore capace di scaldare l'aria necessaria per farla volare.

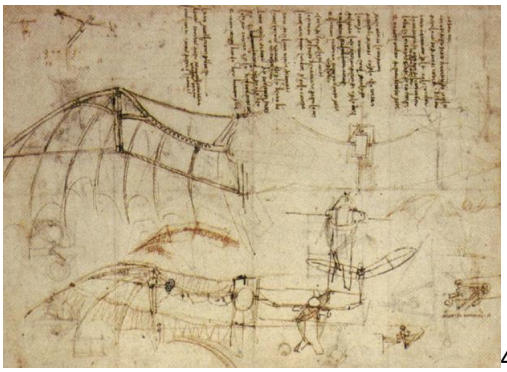
I numerosi tentativi di volo non ebbero grandi successi fino a quando, intorno al IV° secolo d.C., lo studio dei sistemi di volo portò alcuni sviluppi grazie anche all'invenzione del bamboo-copter composto da un'asticella e da un rotore capace di alzarsi in aria attraverso la rotazione dell'asticella stessa. Nel libro Baopuzi scritto dal Filosofo daoista Ge Hong attorno al 314 d.C. vengono menzionati alcuni dettagli riguardo ai veicoli volanti:

> *"Some have made flying cars [feiche 飛車] with wood from the inner part of the jujube tree, using ox-leather (straps) fastened to returning blades so as to set the machine in motion [huan jian yi yin chiji 環劍以引其機]. Others have had the idea of making five snakes, six dragons and three oxen, to meet the "hard wind" [gangfeng 罡風] and ride on it, not stopping until they have risen to a height of forty li. That region is called [Taiqing 太清] (the purest of empty space). There the [qi] is extremely hard, so much so that it can overcome (the strength of) human beings. As the Teacher says: "The kite (bird) flies higher and higher spirally, and then only needs to stretch*

its two wings, beating the air no more, in order to go forward by itself. This is because it starts gliding (lit. riding) on the 'hard wind' [gangqi 罡炁]. Take dragons, for example; when they first rise they go up using the clouds as steps, and after they have attained a height of forty li then they rush forward effortlessly (lit. automatically) (gliding)." This account comes from the adepts [xianren 仙人], and is handed down to ordinary people, but they are not likely to understand it".[3]

Questo, secondo alcuni scienziati, fu uno dei primi sistemi ad elica che servì per mettere alcune delle basi per la realizzazione dei sistemi di volo. Durante gli anni vi furono numerosi tentativi di realizzare sistemi di volo con strutture ad ali o a paracadute ma, tra tutti, l'idea di far volare l'uomo era quella che trovava maggior interesse. Alcune delle basi dei primi voli vennero citate attorno al 1250, quando Ruggero Bacone previde nel suo libro *De mirabili potestate artis et naturae (Secrets of Art and Nature)*, alcuni possibili design di palloni pieni con un etere non specificato e il primo ornitottero (aeromobile a superficie alare battente). Il tema del volo creò grande interesse fino quando, intorno alla fine del XV° secolo, Leonardo Da Vinci studiò i principi dell'aerodinamica, creando decine di disegni di meccanismi e di macchine in tutte le forme e dimensioni. Approfondì i suoi studi sul movimento degli uccelli in volo per tentare di svelare i segreti del volo e successivamente progettò alcuni ingegni, dalla "vite aerea" agli "ornitotteri" (Fig.4A e 4B). La prima, secondo i disegni di Da Vinci, doveva avere una struttura in legno dal diametro di 5m, una base alla quale è collegato un albero di trasmissione verticale sul quale è installata una struttura elicoidale in legno rivestita da tela di lino, rastremata verso l'alto. Alla base della struttura vi è una molla la quale, una volta caricata, doveva avere la forza necessaria per azionare l'albero di trasmissione e far innalzare la vite aerea, realizzando uno dei primi esempi di velivolo azionato da una molla. Affascinato dalle ali degli uccelli e dalla loro capacità di volare, fece numerosi tentativi di riproduzione, fino a realizzare un uccello per una produzione teatrale, capace di muovere le ali attraverso un meccanismo azionato durante la sua discesa lungo una corda, e un ornitottero. Quest'ultimo si basa sul modello delle ali di uccello, con possibilità di essere manovrate per permettere di volare. Nonostante i numerosi tentativi, gli ingegni avevano alcuni problemi riguardanti la struttura e altri riguardanti i principi della dinamica.

[3] https://students.com/Bamboo-copter


4A

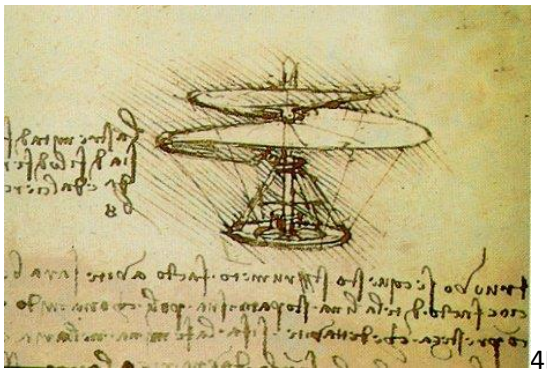

4B

Figura 4A e 4B (schizzi estrapolati dagli appunti di Leonardo Da Vinci)

Gli esperimenti condotti per far volare l'uomo e per la realizzazione di un mezzo autonomo capace di volare, non ebbero un grande successo, anche se vari tentativi vennero effettuati, ma con risultati non favorevoli. Nella metà del XVIII°, secolo lo scienziato Mikhail Lomonosov presentò un modello di birotore potenziato da una molla. La particolarità era il posizionamento delle eliche una al di sopra dell'altra con rotazione opposta tra le due. Nello stesso periodo i fratelli francesi Montgolfier, realizzarono un pallone capace di volare grazie all'aria calda contenuta all'interno di esso. Questo fu una delle prime macchine pilotate dall'uomo capaci di volare, usate principalmente per scopi di ricognizione e successivamente durante le battaglie.

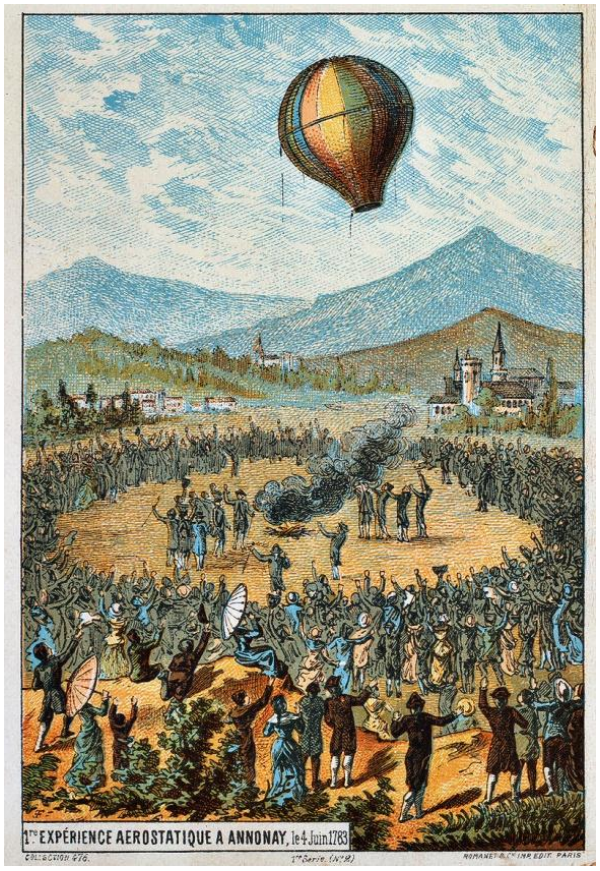


Figura 5 (Paris : Romanet & cie., imp. edit., [between 1890 and 1900]), Wikipedia

Nella seconda metà del 1849 il primo utilizzo documentato di aeromobili a pilotaggio remoto, avvenne durante la Guerra di Indipendenza Italiana, quando gli Austriaci usarono delle mongolfiere equipaggiate di esplosivo per bombardare Venezia[4]. Questo sistema funzionò, nonostante le problematiche riscontrate dall'impossibilità di manovrare e dalla presenza di raffiche di vento che, in alcuni casi, determinò il cambio di rotta e il ritorno sopra le linee austriache. Anche se fu uno dei primi casi documentati di utilizzo di aeromobile e pilotaggio remoto, tale velivolo non rientra in quella che oggi è la definizione di veicolo aereo senza equipaggi. Nonostante questi velivoli fossero utilizzati per scopi militari, vi fu interesse anche da parte di scienziati e fotografi per l'impiego in operazioni di analisi e documentazione.

Nel 1852 venne registrato il primo volo di un dirigibile, molto simile alle mongolfiere, di cui quello di Henri Giffard realizzato da un pallone riempito con dell'idrogeno e movimentato grazie a un motore alimentato a vapore.

6A

6B

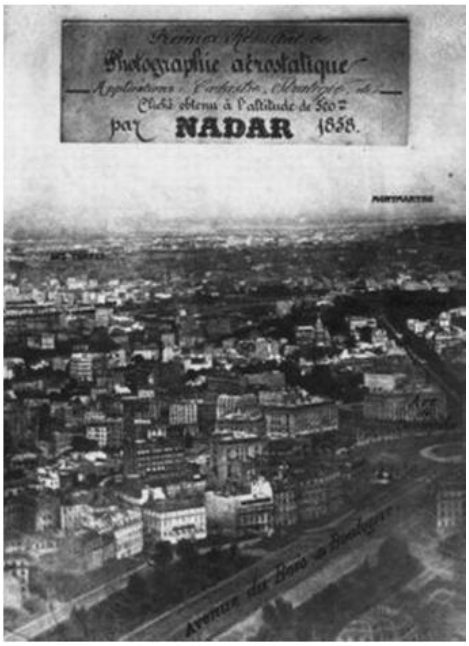
Figura 6A e 6B (esempio di bombardamento con mongolfiere _ *dispense Corso droni per il rilievo territoriale e architettonico , Chiabrando 2020-2021*) e **6B** (Dirigibile Giffard 1852)

L'impiego di quest'ultimo velivolo prese sempre più velocità per quanto riguarda l'ambito militare, in quanto garantì un una miglior manovrabilità grazie al motore e ai sistemi di controllo installati su di esso. Nell'ambito scientifico, uno dei primi impieghi a scopo documentaristico, di cui la nascita della fotografia aerea, va attribuito a Gaspard-Fèlix Tournachon, fotografo, caricaturista, giornalista, e pioniere del volo aerostatico francese, noto anche sotto lo pseudonimo di Nadar, nome dal quale successivamente prenderà spunto il tipo di presa Nadirale (o verticale) in cui l'asse del gruppo ottico è in posizione perpendicolare rispetto alla superficie terrestre.

La prima fotografia acquisita da Nadar risale al 1858 quando, attraverso l'utilizzo della mongolfiera, si fece sollevare ad un'altezza di 80m alle porte di Parigi e con la macchina fotografica fece le prime foto aeree (Fig.7A).

[4] Robinson R. (2017) *Droni nel cielo, Storia degli aeromobili a pilotaggio remoto*. Tricase (LE): Youcanprint Self-Pubblishing

Nel 1860 anche il fotografo James Wallace Black, sempre attraverso la mongolfiera, si fece sollevare in aria per scattare la prima foto aerea alla città di Boston (Fig.7B).



7A

7B

Figura 7A (La prima fotografia aerea di Nadar) e **7B** (La prima fotografia aerea di James Wallace Black)

Nel 1863 Gustave Ponton D'Amecourt utilizzò il termine *elicottero* per chiamare i suoi modelli di velivoli capaci di volare grazie alle eliche montate su un rotore movimentato da un motore a vapore. Per questo viene considerato l'inventore del termine, anche se il suo modello non era in grado di sollevarsi in aria. Qualche anno dopo, l'ingegnere Enrico Forlanini riuscì a far volare il primo elicottero nel 1877, utilizzando il motore a vapore. La fase iniziale in cui si trovava questo velivolo non portò al suo immediato impiego, in quanto la capacità di volo era limitata sia dal sistema di alimentazione che da quello di controllo.

La ricerca e il continuo sviluppo di queste macchine e la realizzazione di fotocamere sempre più compatte e leggere con parametri migliori, portò allo sviluppo di velivoli pilotati sempre più leggeri senza la presenza del pilota a bordo, capaci di volare per la realizzazione di fotografie e misurazione a seconda dell'ambito di applicazione.

Nel 1887 Douglas Archibald installò su un aquilone una fotocamera, realizzando uno dei primi velivoli di ricognizione. Lo stesso fece anche il fotografo francese Arthur Batut quando, a metà del 1888, realizzò una macchina fotografica con materiali più leggeri e la installò sull'aquilone. Con l'esito positivo di questi tentativi, l'impiego del velivolo senza pilota prese sempre più velocità anche in altri campi, consentendo di migliorare sempre di più la forma, la manovrabilità e anche di garantire l'impiego per la realizzazione di misurazioni in ambito militare per l'utilizzo a scopo di ricognizione.

Nel 1896 il famoso inventore della dinamite Alfred Nobel realizzò un razzo con una fotocamera installata, capace di volare senza la presenza del pilota a bordo e atterrare attraverso un sistema di paracadute.

Nonostante i numerosi tentativi, la ricerca di un velivolo capace di rimanere in volo, si spostava sempre di più sulla struttura degli aerei e sulla possibilità di operare da remoto. Le sperimentazioni portarono ad ulteriori sviluppi grazie a Ernest Wilson e C.J. Evans, i quali brevettarono nel 1897 una torpedo e una barca radiocomandata. L'anno successivo Nikola Tesla dimostrò la capacità del controllo da remoto di un modellino di barca, mettendo le basi del radio controllo applicabile per tutti i mezzi sprovvisti di sistemi di controllo.

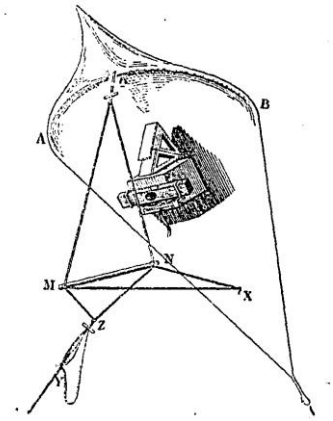
Fig.8A 

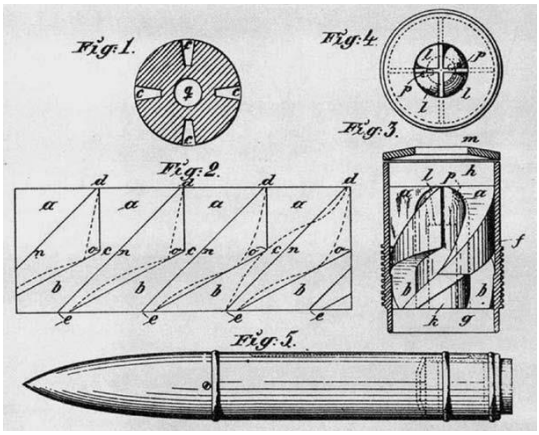
Fig.8B 

Fig.8C

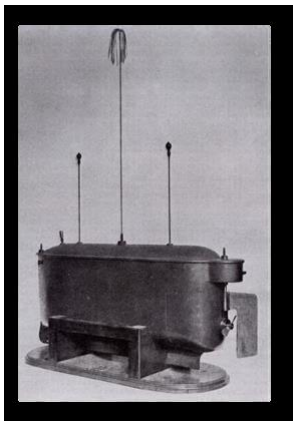
Fig.8D 

Figura 8A (Aquilone _ La Photographie Aèrienne par cerf-volant par Arthur Batut)
Figura 8B (Razzo _ Nobel–Unge Swedish patent no. 10.257, with the first application of the Laval-nozzle principle, Article The Alfred Nobelrocket camera.A nearly aerial photography attempt A. Ingemar Skoog)
Figura 8C (Piccione _ Julius Neubronner, Diapositive prof Chiabrando)
Figura 8D (Barca _ Nikola Tesla U.S. Patent 613,809 —Method of an Apparatus for Controlling Mechanism of Moving Vehicle or Vehicles)

Lo studio delle diverse tipologie di velivoli portò agli inizi del XX secolo, alla nascita degli alianti per garantire il trasporto di attrezzature e persone. La rivoluzione fu presentata dai fratelli Wilbur e Orville Wright che, a seguito delle ricerche già avviate dal pioniere aeronautico Otto Lilienthal, realizzarono un

aliante di dimensioni e di peso inferiori rispetto a quello di Lilienthal, capace di volare grazie ai tre assi di controllo (rollio, beccheggio e imbardata).

Dopo una serie di tentativi e di migliorie apportate sui diversi prototipi di alianti, i fratelli Wright effettuarono il 17 dicembre del 1903 il primo volo con il *"Flyer I"*, velivolo motorizzato e svilupparono successivamente altri modelli sempre più grandi e sofisticati.

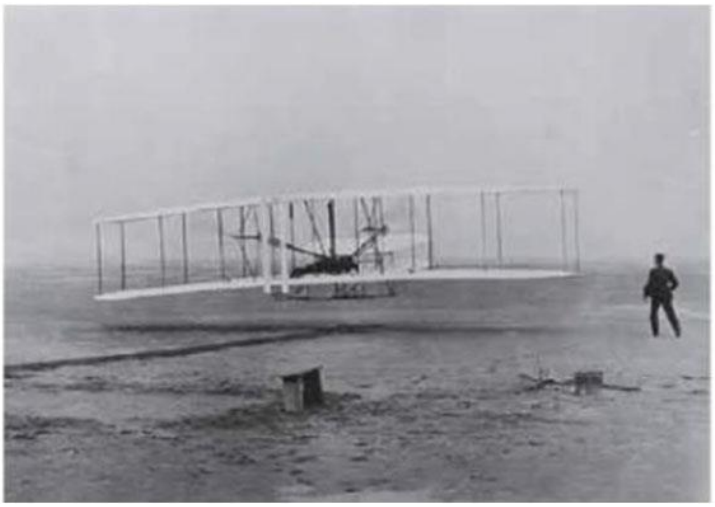


Figura 9 (17 dicembre 1903 _ Primo volo con il "Flyer I" dei fratelli Wright)

Nonostante la realizzazione dei diversi alianti durante gli anni, per quanto riguarda la fotografia aerea, l'aquilone era considerato il mezzo più sicuro e affidabile per questo tipo di impiego.

Nel 1905 il matematico Desclèe Rene realizzò degli scatti immortalando la città di Tournai, mentre nel 1906 il fotografo George Lawrence immortalò la città di San Francisco a seguito del terremoto avvenuto nello stesso anno (Fig.10).

Figura 10 (San Francisco 1906 _ George Lawrence)

Un'altra delle sperimentazioni di acquisizione aerea fu quella di Julius Neubronner, il quale nel 1907 inventò la fotografia aerea con i piccioni. Non ebbe un grande successo in quanto i metodi alternativi garantivano una migliore gestione della strumentazione e un miglior controllo del volo.

Con lo sviluppo dei velivoli, anche le macchine fotografiche subirono diverse modifiche, permettendo di avere un automatismo migliore, sistemi più sofisticati, dimensioni più compatte e meccanismi più

complessi per consentire l'acquisizione di più fotografie. Questo permise alle strutture militari di dotarsi di mezzi capaci di effettuare riprese di ricognizione e rilievi fotografici delle truppe e del territorio nemico, ma anche di utilizzare questi mezzi come velivoli per il trasporto di ordigni.

Infatti, nel 1912 venne effettuata la prima ricognizione fotografica dell'esercito Italiano tramite i dirigibili italiani P2 e P3. Successivamente, nel 1914, con l'inizio della Prima Guerra Mondiale, la ricerca di sistemi sempre più sofisticati portò alla realizzazione di diversi modelli di aeroplani da parte dei fratelli Wright e di Charles F. Kettering utilizzati solamente qualche anno dopo.

Nel 1916 l'Aeronautica Militare Inglese, chiamata anche RAF (Royal Air Force), realizzò uno dei primi sistemi UAV chiamato *Aerial Target* (AT) capace di volare senza la presenza del pilota a bordo e pilotato grazie al radiocomando a distanza. Realizzato sotto la supervisione dell'ingegnere Archibald Montgomery Low, il velivolo a motore era progettato come mezzo da affiancare ai velivoli con pilota e anche come bomba volante da utilizzare durante la guerra. Purtroppo i risultati di volo non furono sufficienti a garantire l'affidabilità del mezzo che doveva ricoprire il ruolo di difesa contro i dirigibili Zeppelin. Quest'ultimi, realizzati da un pallone a struttura rigida, furono utilizzati durante la Prima Guerra Mondiale per la ricognizione e il bombardamento. Successivamente vennero usati come mezzi di trasporto fino agli anni 30', quando furono sostituiti dagli aerei, mezzi più veloci e affidabili.

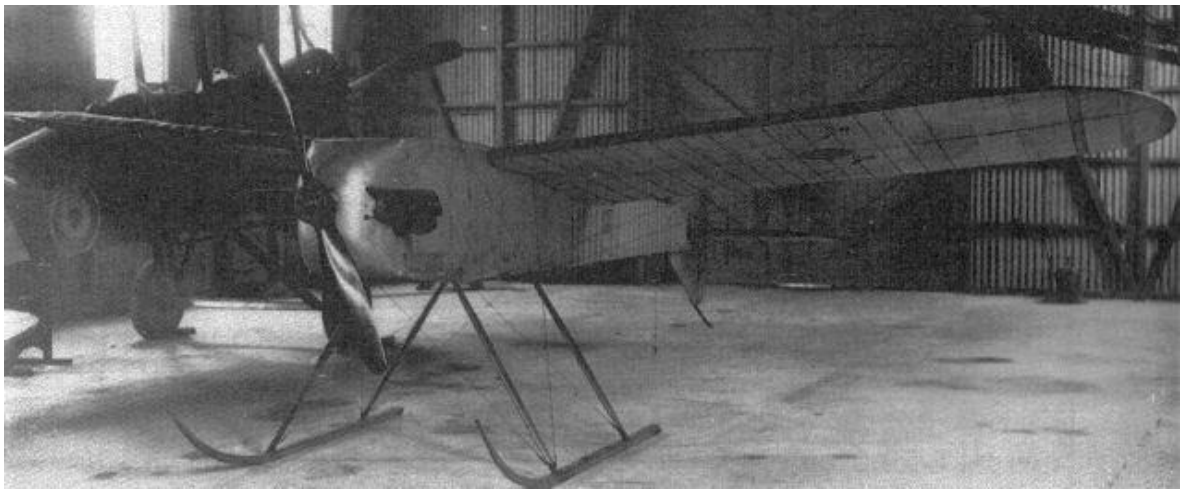


Figura 11 Aerial Target (AT) del Royal Air Force

Nel 1918, dopo quattro anni di sviluppi, venne presentato ufficialmente il Kettering Bug, realizzato dalla compagnia Dayton-Wright Airplane Company e conosciuto anche come "missile aereo radiocomandato" (experimental unmanned aerial torpedo). Questo velivolo dotato di motore, una volta lanciato in aria attraverso dei sistemi a carrello, era caratterizzato dalla presenza di un giroscopio necessario per i sistemi di comando e di stabilità durante il volo. Nonostante il velivolo fosse prodotto per il trasporto di esplosivo a lunghe distanze, non fu mai utilizzato proprio per una serie di problemi tecnici, interrompendo le missioni di volo.

Figura 12 Kettering Bug _ Dayton - Wright

Dopo la fine della Prima Guerra Mondiale, la British Royal Navy rilanciò attorno alla seconda metà degli anni 20', un nuovo sistema senza pilota sotto il nome di RAE Larynx (Royal Aircraft Estabilishment – Long Range Gun with Lynx Engine), caratterizzato dalla capacità di trasportare grandi carichi di esplosivo, coprire distanze attorno ai 480km e volare attraverso il pilota automatico tramite i dati prestabiliti di navigazione.

Figura 13 RAE Larynx _ 1927 _ Test di lancio da una catapulta

Grazie ai test eseguiti e al forte potenziale di questi velivoli, sempre più Paesi dimostrarono forte interesse nell'impiego di questo sistema, sviluppando velivoli più evoluti capaci di decollare, eseguire missioni di volo e successivamente atterrare per poter essere riutilizzati nuovamente.

Lo sviluppo di questi velivoli radio comandati servì inoltre ad effettuare delle prove di modelli di velivoli realizzati per il volo con la presenza del pilota a bordo. L'Inghilterra e gli Stati Uniti furono i primi Paesi a sviluppare questa tecnologia sperimentando velivoli d'assalto radiocomandati con sistemi di videocamere installati, capaci di trasmettere immagini alla stazione di controllo.

Nel 1931 l'Aeronautica Inglese realizzò un modello di velivolo migliorato, chiamato Fairey Queen (FQ), qualche anno dopo sostituito a causa delle problematiche riscontrate durante le operazioni di volo dal successore *De Havilland Queen Bee (DH.82B)* dotato di ruote per l'atterraggio a terra oppure di galleggianti per l'atterraggio sull'acqua, capace di coprire distanze di volo sopra i 450km, volare sopra i 5000m e capace di ritornare alla base per un successivo riutilizzo.

Figura 14 (Winston Churchill durante il lancio del de Havilland Queen Bee DH.82B radio-controlled target drone, 6 June 1941)

La nascita di questi modelli radio comandati e riutilizzabili, porta il termine *drone* (che in inglese significa "ronzio" oppure "maschio dell'ape") ad essere utilizzato per la prima volta nel 1935 dal comandante statunitense Delmer Fahrney, in omaggio al velivolo inglese Queen Bee (tradotto letteralmente "la regina delle api"), per indicare tutti i velivoli radio comandati senza pilota. L'interesse da parte dell'esercito statunitense portò alla realizzazione di nuovi velivoli prodotti dall'azienda fondata da Reginald Denny e da Walter Righter, utilizzati inizialmente per scopi di addestramento e successivamente impiegati durante la Seconda Guerra Mondiale con l'arrivo del modello RP-4 rinominato come Radioplane OQ-2.

Lo scoppio della guerra e il continuo sviluppo dei velivoli, portò al loro impiego in operazioni belliche. Risalenti ancora prima della Seconda Guerra Mondiale, l'impiego di velivoli capaci di trasportare bombe come nell'attacco del 1849 di Venezia, portò allo sviluppo di sistemi sempre più sofisticati capaci di trasportare gli ordigni verso i target prestabiliti. Alcuni Paesi come la Russia e la Germania, sperimentarono tipologie di aerei compositi, capaci di trasportare velivoli più piccoli che, una volta sganciati, potevano effettuare la missione attraverso il comando da remoto. Le ricerche portarono ad un rapido sviluppo del settore aeronautico permettendo la realizzazione di droni di diverse forme, con capacità di carico più grandi e non per ultimo con sistemi di propulsione differenti.

Nel 1950 furono realizzati i primi droni propulsione a razzo identificato anche come endoreattore, capaci di volare a velocità elevata rispetto a un tradizionale drone alimentato da un motore a scoppio. Successivamente furono potenziati anche i motori a reazione (propulsione a jet) come quelli installati sul Ryan Firebee statunitense (Q-2 / KDA-1 Firebee), realizzato come velivolo capace di trasportare bombe e in altri casi per dotati di fotocamera per ricognizione.

Figura 15 (Ryan Firebee _ Q-2 / KDA-1 Firebee)

Dopo gli anni 70' la ricerca si sposta dai velivoli ad ala fissa ai velivoli ad elica dotati di motore a scoppio e realizzati con materiali leggeri per consentire un miglior controllo, peso e dimensioni inferiori e capacità di installazione di sensoristica più sofisticata. Le problematiche riscontrate durante le missioni di volo con un velivolo ad ala fissa riguardavano l'impossibilità di eseguire un volo stazionario, caratteristica principale dei velivoli ad elica. Questo permette al drone di rimanere in un punto fisso o di muoversi lungo gli assi principali del velivolo stesso, di cui quello longitudinale, quello trasversale e quello verticale (rollio, beccheggio e imbardata), garantendo un maggior controllo durante le missioni di volo, ma senza la possibilità di raggiungere la stessa velocità come quelli ad ala fissa.

Solo alla fine del XX° secolo, si scoprì il potenziale dei droni che furono utilizzati per la prima volta in ambito civile. La capacità di questa tecnologia iniziò a trovare impieghi nei diversi settori, dalla fotografia aerea al monitoraggio, dalla sorveglianza alle ispezioni applicate nei diversi campi, dalle riprese cinematografiche al trasporto di oggetti. Vari produttori sperimentarono droni di dimensioni più compatte, con materiali dal costo e dal peso più contenuto e sensori più compatti rispetto alle fotocamere tradizionali allora presenti sul mercato. Il forte interesse e il potenziale per le possibili applicazioni nei diversi ambiti, portò nel 2010, grazie al produttore francese Parrot, all'inserimento sul mercato del primo drone ad uso amatoriale / professionale denominato Parrot AR.Drone (Fig.16), con un prezzo alla portata di tutti e capace di essere controllato attraverso il cellulare o il tablet. Il potenziale di questo velivolo e la tecnologia in se oltre a creare forte interesse da parte di consumatori per l'uso hobbistico, riuscì a richiamare l'attenzione per l'impiego anche da parte di figure professionali quali architetti, geologi, forze dell'ordine e ecc., in sostituzione alle strumentazioni disponibili per le diverse applicazioni.

Figura 16 (Parrot AR.Drone)

Altri produttori come l'attuale leader del mercato droni dell'azienda cinese DJI, ha presentato il suo primo drone multi rotore modello S800 nel 2012, seguito da un modello consumer quadrirotore presentato nel 2013 chiamato DJI Phantom, segnando così l'inizio della dominazione mondiale del mercato droni. Realizzati inizialmente come velivoli capaci di trasportare fotocamere di dimensioni compatte realizzate da diversi produttori e dedicati per un uso amatoriale e professionale, oggi si presenta sul mercato come l'azienda con maggior numero di modelli, da quelli di dimensioni compatte e richiudibili a quelli di dimensioni maggiori con capacità di installazione di sensori di diverso tipo, dalle fotocamere alle termocamere, dai sensori di gas a quelli acustici, dai sensori infrarossi ai sensori LIDAR. Nonostante sia una delle aziende leader in questo mercato, anche il produttore SenseFly con il drone ad ala fissa eBee X viene spesso impiegato nell'agricoltura, nell'edilizia, nel monitoraggio dell'ambiente, sicurezza, sorveglianza e ecc.., così come i multi rotori prodotti dall'azienda Yuneec. Queste tre aziende sono tra le più conosciute sul mercato per quanto riguarda l'utilizzo sia professionale che amatoriale.

17A

17B

17C

17D

Figura 17 A (DJI S800), **17 B** (DJI Phantom), **17 C** (Sensefly eBee X), **17 D** (Yuneec H520E**)**

Altre aziende come 3D Robotics, Airware, INSITU, ecc., producono droni realizzati per missioni specifiche e quindi meno conosciuti se non a livello professionale. Trattandosi di velivoli sviluppati per determinate operazioni, hanno dimensioni più grandi per la possibilità di trasportare carichi maggiori rispetto a droni ad uso commerciale, capacità di installazione di più batterie per missioni di volo prolungate e sensoristica dedicata a seconda dell'impiego. La velocissima diffusione dei droni ha guadagnato popolarità nell'ambito militare proprio per la tecnologia avanzata, per i bassi costi di manodopera e soprattutto per il rischio che in questo caso è molto basso in quanto sono velivoli senza la presenza del pilota a bordo. Il loro impiego è il risultato delle così identificate "guerre a perdite zero"[5].

La tecnologia e le componenti presenti sul mercato hanno permesso lo sviluppo di velivoli di dimensioni compatte classificabili nella categoria dei nano droni. Sono velivoli dal costo molto elevato dovuto alla tecnologia anti rilevamento, ai sensori presenti a bordo, alla durata delle missioni di volo, alla silenziosità e alle dimensioni molto contenute. Questi vengono usati durante missioni di ricognizione come velivoli spia come il drone Black Hornet PRS classificato nella sua categoria proprio per le dimensioni contenute 10 cm x 2,5 cm. Esistono anche velivoli più grandi che però nel loro caso vengono utilizzati o per il trasporto di materiale tecnico o addirittura per il trasporto di ordigni in fase di combattimento.

Figura 18 (Black Hornet PRS)

L'ultimo decennio ha visto la realizzazione di velivoli sempre più evoluti, migliorando così sia l'esperienza di volo che la qualità dei dati acquisiti sia in ambito militare che civile.

La continua evoluzione di questi mezzi e il miglioramento delle caratteristiche dei sensori, permette di ottenere dati ad alta precisione grazie alle caratteristiche dei sensori di acquisizione e di posizionamento e alla capacità di rilevare grandi quantità di dati in tempi contenuti. Nel campo dell'architettura il loro utilizzo consente la sostituzione parziale se non totale di strumenti per il rilievo tradizionale che, a seconda del luogo di rilievo, possono riscontrare limitazioni dovute al luogo, al terreno, all'oggetto o al

[5] Istituto di Ricerche Internazionali Archivio Disarmo – IRIAD (2017) *Droni militari: proliferazione o controllo*. Rapporto di ricerca Istituto di Ricerche Internazionali IRIAD

fabbricato da rilevare. In questo caso possono essere superate attraverso l'impiego dei droni con i relativi sensori semplificando, velocizzando e contenendo i costi necessari per il processo di acquisizione e rilevazione di aree difficilmente accessibili.

Attualmente l'impiego di questi mezzi porta moltissimi vantaggi e migliorano così il processo lavorativo e in alcuni casi sostituiscono l'impiego di personale per lavori che mettono a rischio la salute. Il potenziale dei droni trova interesse in diverse attività e la richiesta del loro impiego trova un netto incremento in moltissimi settori. Questo porta al continuo sviluppo del velivolo e, allo stesso tempo, alla realizzazione di nuovi modelli, con sensoristiche più evolute, meccanismi automatizzati e impieghi in nuovi settori.

Lo sviluppo di nuovi sistemi autonomi consente la realizzazione di velivoli capaci di svolgere mansioni in sostituzione a macchinari precedentemente utilizzati, velocizzando e diminuendo i costi di operatività. Nell'agricoltura l'impiego dei droni permette di svolgere operazioni di monitoraggio e indagine, operazione di rilievo fotogrammetrico di terreni oppure effettuare operazioni di distribuzione di prodotti specifici per le coltivazioni (Fig.19). Per quanto riguarda il tema energetico, i velivoli equipaggiati con termocamere possono essere impiegati per il monitoraggio di impianti fotovoltaici o per il rilievo di strutture o fabbricati per la verifica delle dispersioni termiche.

Figura 19 (Applicazione in agricoltura)

Nel 2017 a Dubai vengono presentati i primi taxi-droni a guida autonoma dell'azienda Cinese Ehang con il modello Ehang 184 (Fig.20), capace di trasportare persone attraverso il sistema di volo autonomo. I prototipi sono in fase di sviluppo, in quanto vi sono moltissime variabili che non permettono la completa sicurezza di volo automatico, dovuta sia alla mancanza di una regolamentazione completa, sia ai sistemi di automatizzazione non in grado di svolgere operazioni in situazioni critiche. Anche a Roma nel 2022 è stato presentato il primo vertiporto in Italia, dove sono stati eseguiti i test per il trasporto di persone (fonte www.larepubblica.com).

Figura 20 Taxi-drone per il trasporto di persone

Anche i colossi mondiali come l'azienda Americana di corrieri DHL e l'azienda Amazon stanno sperimentando droni per la consegna di pacchi in tempi brevi attraverso l'utilizzo di velivoli capaci di interagire con i sistemi di controllo del traffico aereo.

21A

21B

Figura 21 A e 21 B Droni per il trasporto e consegne

L'utilizzo dei droni permette la realizzazione di spettacoli e show attraverso sistemi di programmazione che consentono ai mezzi di interagire e svolgere figure e acrobazie grazie all'automatizzazione e ai sensori presenti sui velivoli. Per quanto riguarda la sorveglianza, l'azienda americana Ring ha sviluppato velivoli capaci di volare all'interno di unità abitative e monitorare l'intero ambiente, sostituendo i sistemi di sorveglianza multi camere. L'azienda Lucid Drone Technologies invece ha introdotto l'utilizzo dei droni per il lavaggio di facciate di grandi dimensioni, dalle abitazioni ai grattacieli, sostituendo così l'impiego di operatori, velocizzando i tempi e diminuendo i costi del servizio.

22A

22B

Figura 22 A Sistemi di sorveglianza e **22 B** sistemi per il lavaggio di facciate

L'impiego dei droni registra negli ultimi anni un forte incremento del mercato mondiale, soprattutto per quanto riguarda Nord America, Europa e Asia (Fig.23).

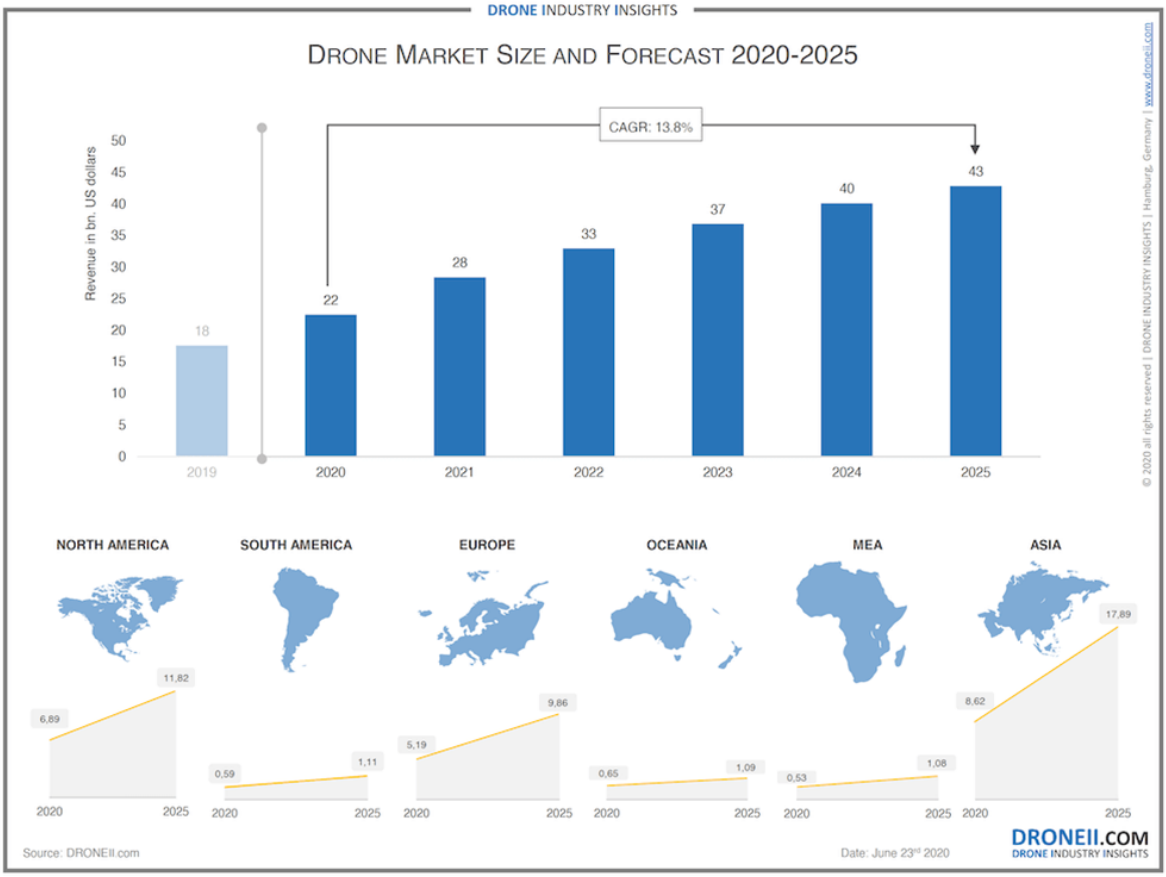


Figura 23 Mercato droni tra il 2020-2025 secondo l'analisi di www.droneii.com

In base alle differenti applicazioni (visibili nel capitolo successivo) i droni si dividono in diverse tipologie a seconda delle misure e delle caratteristiche, per impiego civile o per impiego militare. È possibile identificare il drone come mezzo fondamentale per lo svolgimento dei diversi lavori, dall'ispezione all'esecuzione di determinate mansioni, dal monitoraggio al rilievo di fabbricati, strutture o aree. Questi velivoli hanno delle limitazioni dovute alle condizioni, al mezzo, all'area e alla normativa sempre in aggiornamento. La normativa Italiana[6], tenendo conto delle linee guida stabilite da quella Europea[7], serve a regolare l'utilizzo irresponsabile dei velivoli in zone vietate o luoghi pubblici, aeroporti, piazze, assembramenti di persone e ecc. Dal 2023, la normativa richiede ai diversi produttori di droni, l'inserimento di sistemi connessi agli enti di volo nazionali, in modo da limitare o meno il loro impiego e dall'anno successivo la marcatura di classe delle diverse tipologie di droni elencati nei capitoli successivi.

[6] ENAC (2021) *Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021*
[7] EASA (2019) Regolamento di esecuzione 2019/947

2. IL TERMINE DRONE

Le origini della parola *drone* non sono molto chiare anche se il termine viene attribuito al veicolo militare Inglese DH.82 Queen Bee data la forma e il suono simile al Drone (bee). Intorno al 1936 il capo del gruppo di ricerca statunitense ha usato lo stesso vocabolo per descrivere i veicoli aerei militari senza pilota spesso utilizzati come bombe o per le esercitazioni militari. Un'altra possibile derivazione va attribuita alla **DGAC** – French Directorate for Civil Aviation per identificare dei velivoli commerciali senza pilota[8].

Nel vocabolario Treccani

> ***drone*** ‹*dróun*› s. ingl. (propr. «fuco, pecchione; ronzio»; pl. *drones* ‹*dróunz*›), usato in ital. al masch. – Nel linguaggio militare: **1.** Velivolo privo di pilota e comandato a distanza, usato generalmente per operazioni di ricognizione e sorveglianza, oltre che di disturbo e inganno nella guerra elettronica; è indicato anche con la sigla RPV, dalle lettere iniziali dell'ingl. *Remotely Piloted Vehicle* «veicolo guidato a distanza». **2.** Bersaglio telecomandato, costituito da un simulacro di nave o di aereo, utilizzato nelle esercitazioni di tiro.

Il termine drone è molto generico, quindi va approfondita la terminologia corretta che identifica e classifica il velivolo.

Va specificato che quest'ultimo deriva da UV (Unmanned Vehicles), il quale identifica i veicoli pilotati da remoto caratterizzati dall'assenza del pilota a bordo, che a loro volta si suddividono in diverse sottocategorie tra cui :

- UAV : Unmanned Aerial Vehicles - Veicoli aerei senza equipaggio;
- UGV : Unmanned Ground Vehicles - Veicoli senza pilota a bordo da terra;
- UMV : Unmanned Marine Vehicles - Veicoli marini senza pilota a bordo.

> "Gli UAV (UnmannedAerialVehicles) sono veicoli aerei motorizzati riutilizzabili senza pilota "(Van Blyenburgh 1991)

La categoria UAV, argomento di questa tesi, ha molteplici definizioni adottate dai diversi Paesi. Durante gli anni '70 e '80, il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America (United States Department of Defense -USDOD) utilizza il termine RPV (Remotely Piloted Vehicle) per descrivere un apparecchio aereo robotico guidato da un pilota che usa una stazione di controllo a terra.

[8] https://4mydrone.com/it/tips-uas/droni-uas-principiante/sapr-apr/

Il termine UAV è stato recentemente sostituito da UAS (Unmanned Aircraft System), il quale indica l'intero sistema costituito dal velivolo, dai relativi componenti necessari per il comando e il controllo, dal pilota remoto e dai sensori installati per l'acquisizione di dati. Attualmente non vi è ancora un termine standardizzato che definisce i veicoli aerei a livello internazionale. Infatti, a seconda delle diverse associazioni e dei diversi stati, vi sono definizioni simili ma non univoche.

È importante specificare che gli UAV non includono i modellini per hobby date le caratteristiche e gli impieghi. Anche in ambito militare, i missili e gli ordigni non sono classificabili come UAV perché non sono progettati per ritornare al punto di partenza ed essere riutilizzati come stabilito in alcune definizioni fatte dagli enti governativi.

Nel 2004 il Joint Aviation Authorities (JAA) e l'European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) definisce lo UAV come :

> *UAV : velivolo capace di operare senza la presenza di pilota a bordo*

Nel 2007 il Joint Capability Group on Unmanned Aerial Vehicles definisce lo UAV come :

> *Un velivolo riutilizzabile concepito per operare senza un pilota a bordo.*
> *Non trasporta passeggeri e può essere pilotato in remoto (o pre programmato)*
> *per volare autonomamente.*

Nel 2008 la Federal Aviation Administration (FAA) definisce lo UAV come :

> *Un dispositivo utilizzato o destinato ad essere utilizzato per il volo nell'aria*
> *senza nessun pilota a bordo. Questo include tutte le classi di aerei,*
> *elicotteri, dirigibili, aerei e ascensori traslazionali che non hanno alcun*
> *pilota a bordo. I velivoli senza pilota sono soltanto quegli aerei controllabili*
> *sui tre assi escludendo i palloni tradizionali.*

Successivamente i termini ROA (Remotely Operated Aircraft) e RPA (Remotely Piloted Aircraft) sono stati usati dalla National Aeronautics and Space Administration (NASA) e dalla Federal Aviation Administration (FAA) al posto del termine UAV.

Nel 2009 l'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (AESA) o European Aviation Safety Agency (EASA):

> *Un UAS comprende i singoli elementi del sistema: l'aereo senza pilota,*
> *la stazione di controllo e tutti gli altri elementi del sistema necessari per*

consentire di volo, vale a dire strumenti di "comando e controllo di collegamento" ed "elementi di lancio e di backup". Ci possono essere più di questi elementi in un UAS.

Anche la Federal Aviation Administration (FAA) e il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America (USDoD) hanno adottato il generico termine UAS, che fu originariamente introdotto dalla Marina degli Stati Uniti (U.S. Navy).
Riassumendo, il termine UAS viene utilizzato per indicare l'intero sistema che comprende la stazione di controllo a terra (Ground Control Station - GCS) e i velivoli senza pilota (UnmannedAircraft - UA).

Nel 2011 l'Organizzazione internazionale dell'aviazione civile (ICAO - International Civil Aviation Organization) definisce gli UAS come:

"il sistema che comprende il velivolo capace di operare senza la presenza di equipaggio a bordo,e la stazione di controllo da remoto e tutti gli elementi ad esso associati".

Successivamente il termine UAS è stato sostituito dal termine RPA (Remotely Piloted Aircraft) e RPAS (Remotely Piloted Air System).
Negli Stati Uniti il termine RPV (Remotely Piloted Vehicle) usato da United States Air Force (USAF) è stato sostituito dal termine RPA (Remotely Piloted Aircraft).
In Europa e nel Regno Unito viene utilizzato il termine RPAS (Remotely Piloted Air System).
Il termine RPA (Remotely Piloted Aircraft) indica il velivolo aereo capace di operare senza la presenza di equipaggio a bordo e pilotato da remoto, mentre il termine RPAS (Remotely Piloted Air System) indica l'insieme di tutti gli elementi che comprendono il velivolo pilotato in remoto, la stazione di pilotaggio remoto e tutti i comandi e i controlli necessari per assicurare la realizzazione del volo.

In Italia l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), introduce il termine APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) per indicare tutti velivoli capaci di operare senza la presenza di pilota a bordo
e dalla possibilità di eseguire dei voli automatici tramite una rotta di volo preimpostata, o grazie alla modalità di volo manuale attraverso il controllo remoto da parte di un pilota.
La sigla SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) invece, indica l'insieme costituito dal mezzo aereo APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto), dai relativi componenti necessari per il controllo e comando (stazione di controllo) da parte di un pilota remoto e dai sensori utilizzati per acquisire dati di varia natura.

Nonostante la varietà di acronimi presenti nei diversi stati, il drone per essere definito tale deve essere:

- Controllabile da remoto sui 3 assi
- Capace di volare autonomamente con possibilità di intervenire in modalità manuale
- Essere riutilizzabile
- Essere privo di equipaggio a bordo
- Essere dotato di sensori quali: fotocamera, termocamera, LIDAR, sensore multispettrale ecc..

Gli acronimi APR e SAPR (termine usato in Italia) saranno quelli corretti da utilizzare per indicare il "drone" o l'intero sistema che lo compone.

APR IN AMBITO MILITARE E IN AMBITO CIVILE

Gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), hanno avuto un enorme sviluppo nell'ultimo decennio sia in ambito militare che in ambito civile, sia per via delle applicazioni nei diversi settori, sia per via della velocità di operatività che per la metodologia applicata.

In **ambito militare** il primo veicolo aereo senza pilota a bordo con la possibilità di trasportare carichi, fece la sua comparsa per la prima volta nel 1849 per bombardare Venezia. Non fù di certo il primo bombardamento aereo quanto il primo bombardamento da veicolo aereo senza pilota. Il veicolo inventato dal colonnello Franza Von Uchatius, era formato da un pallone aerostatico con delle cariche esplosive e un sistema di azionamento automatico studiato per sganciare la carica esplosiva dopo un determinato lasso di tempo. L'utilizzo del veicolo aereo senza pilota in ambito militare era finalizzato ad attacchi aerei. Con il passare degli anni e la necessità di sviluppare questa macchina, il loro impiego diventò di fondamentale importanza soprattutto in casi di elevato rischio per la vita umana. Nell'ultimo secolo lo sviluppo contribuì al loro utilizzo anche per altri scopi:

- Trasporto: fornitura di attrezzatura in luoghi difficilmente accessibili da veicoli, e capacità di esecuzione di missioni di volo automatizzate ;
- Sorveglianza: controllo di territori con distanze molto ampie, in condizioni di assenza di luce attraverso sensori a visione notturna, termocamere e scansioni radar ;
- Ricognizione: acquisizione di video e fotografie per l'analisi del territorio nemico (terra ostile), sorveglianza di aree fortemente protette ;
- Attacchi aerei: dotati di armamenti possono colpire e prevenire attacchi terroristici ;
- Sminamento: grazie all'utilizzo di sensori multispettrali o termocamere si acquisiscono immagini che consentono di localizzare ordigni inesplosi ;
- Monitoraggio: screening di aree a seguito di contaminazione nucleare o chimica ;

- Protezione : droni dotati di sistemi laser e radio capaci di interrompere il sistema di controllo di altri droni.

Sono principalmente droni ad uso esclusivamente militare e si distinguono grazie alle loro caratteristiche. Principalmente si tratta di progetti speciali sviluppati con i più noti produttori di veicoli aerei e con caratteristiche elevate per poter soddisfare lo scopo per il quale vengono utilizzati. Sono di diverse dimensioni a seconda del loro utilizzo, indipendentemente dalle missioni per le quali sono utilizzati. Da dimensioni grandi per il trasporto a dimensioni piccole per la sorveglianza. Usano sensori ottici per ingrandire le immagini acquisite, hanno un range operativo molto ampio per poter ricoprire ampie aree e una quota di volo elevata. Il tutto ovviamente garantito anche grazie a durate di volo molto lunghe.

Grazie alla loro derivazione militare, i droni trovano sviluppo in **ambito civile.** Oggi spesso ci troviamo di fronte a una realtà che ci riporta sempre più frequentemente a citare questi veicoli autonomi o addirittura ad avere la necessità di usarli a scopo professionale o attività hobbistica.
Il loro sviluppo ha portato al miglioramento delle loro caratteristiche tecniche, ad un abbassamento di prezzo rendendoli accessibili a tutti e al loro equipaggiamento con sensoristiche differenti per le applicazioni nei diversi settori di cui:

- Agricoltura : mappatura di terreni, distribuzione di prodotti, rilievi multispettrali per il monitoraggio di zone agricole e dello stato delle culture ;
- Controllo della biodiversità: monitoraggio degli organismi viventi, dell'ecosistema e dei servizi ecosistemici ;
- Vigilanza : monitoraggio di zone ad alta criminalità, monitoraggio di confini territoriali, monitoraggio di eventi, zone militari, luoghi pubblici ecc ;
- Soccorso : operazioni di ricerca e soccorso in zone difficilmente raggiungibili e in situazioni estremamente complesse. Queste operazioni vengono chiamate SAR (search and rescue) cioè di ricerca e soccorso e i droni utilizzati prendono il nome di SAR Drones ;
- Emergenze : Oltre alle situazioni di soccorso precedentemente elencate, vengono impiegati per analizzare zone colpite da calamità naturali ;
- Accesso a internet : utilizzo dei droni per l'ampliamento del segnale internet e per la copertura della rete telefonica in aree rurali, in Paesi in via di sviluppo e con scarsa connessione ;
- Geologia : Osservazione e misurazione di fenomeni geologici ;
- Archeologia : Ispezione di siti archeologici e ricostruzione di modelli 3D ;

- Settore industriale : Installazione di componenti, manutenzione di impianti grazie a sistemi e meccanismi installati sul drone stesso ;
- Architettura e Ingegneria : acquisizione di immagini e video di terreni, fabbricati, impianti e strutture. Acquisizione di dati con fotocamere per realizzazione di modelli digitali di elevazione DEM (Digital Elevation Model), Ortofoto per realizzazione di planimetrie, Scansioni Lidar per la realizzazione di modelli 3D di alta precisione, acquisizione di immagini con termocamera per la valutazione dello stato di fabbricati, strutture e infrastrutture.

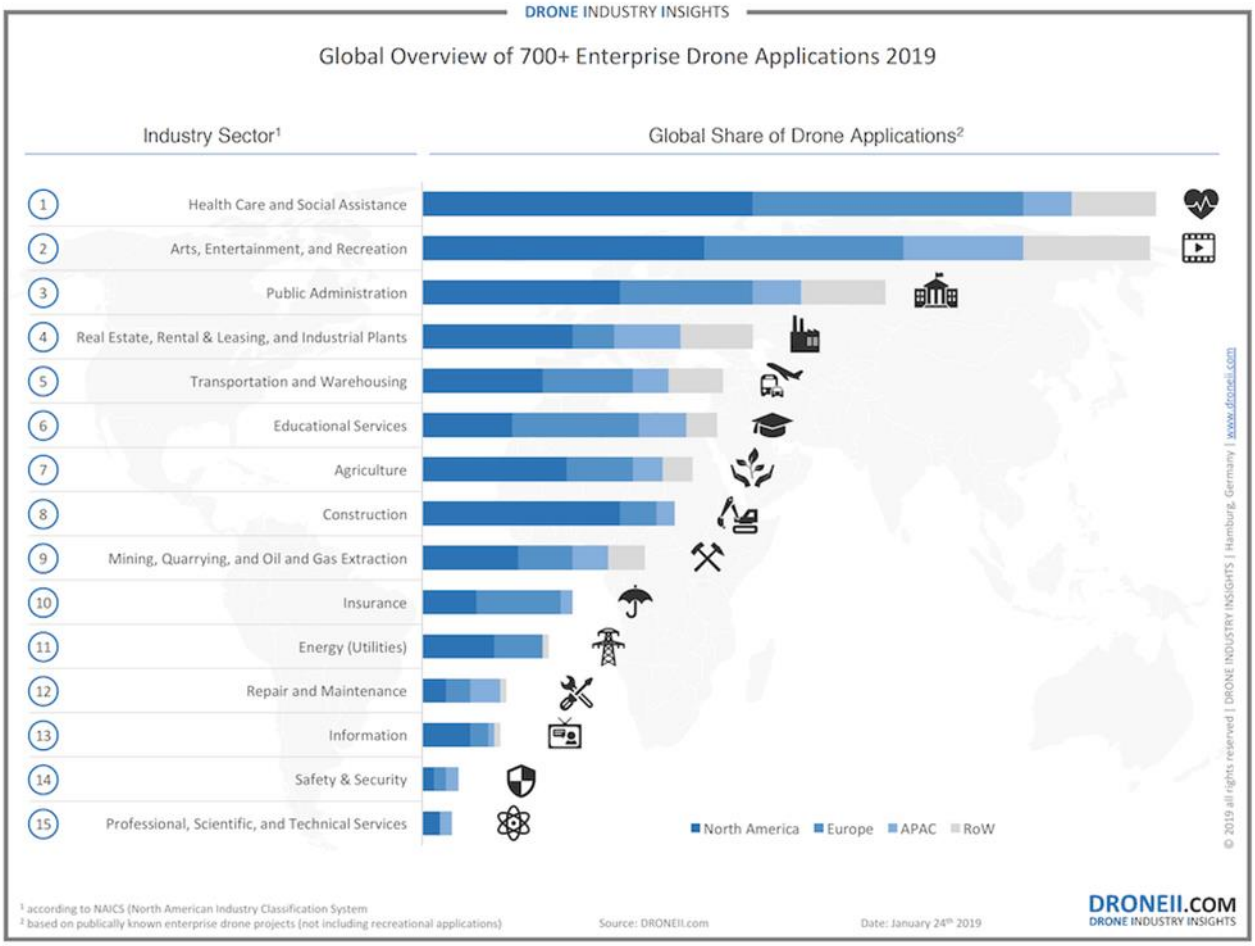


Figura 24 Applicazioni dei droni (www-droneii.com)

Analizzando i dati presenti in Fig.24, il settore di maggior impiego dei velivoli è quello del soccorso, seguito a sua volta dal settore dell'arte e della pubblica amministrazione. Con la continua evoluzione e diffusione degli UAV e grazie anche ai prezzi contenuti di mercato, oggi sono presenti anche nell'attività hobbistica, nel mondo dello spettacolo e soprattutto nel mondo del trasporto. Ovviamente i droni possono essere suddivisi in differenti categorie a seconda della struttura al payload e al peso dell'aeromobile.

2.1 CLASSIFICAZIONE DEI VELIVOLI SENZA PILOTA

L'applicazione del Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) sia in ambito militare che in ambito civile permette la suddivisione e classificazione dei diversi velivoli grazie ai campi di applicazione e alle caratteristiche tecniche. Questo porta ad avere sistemi individuali sviluppati solo per determinate applicazioni. Secondo la classificazione del 2011 della UVS International[9] (*Unmanned Vehicle System International*) il Sistema di Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) può essere classificato in funzione delle principali caratteristiche come *dimensione*, *peso, corpo del velivolo, motore, range operativo, quota operativa, autonomia di volo, il payload* (chiamato anche carico utile è il peso che può trasportare un *drone*) e il peso massimo al decollo (Maximum Take Off Weight - MTOW).

L'insieme di questi parametri serve per distinguere i droni in tre categorie principali di **APR** tra cui *tattici*, *strategici* e *per operazioni speciali.* Nella Tabella 1 all'interno della categoria tattici vi sono le sottocategorie *Mini, Micro* e *Nano* dentro le quali rientrano quasi tutti i velivoli utilizzati in ambito civile.

Tabella 1 Categorie di APR secondo classificazione del 2011 della UVS International

Categoria	Acronimo	Range Operativo [km]	Quota di volo [km]	Durata del volo [h]	MTOW [kg]
Tattici					
Nano	H	<1	100	<1	<0,025
Micro	μ	<10	250	1	<5
Mini	Mini	<10	150 - 300	<2	<30
Close Range	CR	10 - 30	3000	2 - 4	150
Short Range	SR	30 - 70	3000	3 - 6	200
Medium Range	MR	70 - 200	5000	6 - 10	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	>250	50 - 9000	0,5 - 1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	>500	3000	>24	<30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	>500	14000	24 - 48	1500
Strategici					
High Altitude Long Endurance	HALE	>2000	20000	24 - 48	12000
Operazioni speciali					
Unmanned combat aerial vehicle	UCAV	1500	10000	2	10000
Lethal	LETH	300	4000	3 - 4	250
Decoy	DEC	0 - 500	5000	<4	250
Stratospheric	STRATO	>2000	>20000 and <30000	>48	Da definire
Exo-stratspheric	EXO	Da definire	<30000	Da definire	Da definire
Space	SPACE	Da definire	Da definire	Da definire	Da definire

[9] L'associazione UVS International (*Unmanned Vehicle System International*) nasce nel 1997 sotto il nome EURO UVS e successivamente nel 2004 cambia sotto il nome attuale. Viene fondata come associazione nazionale con l'obiettivo principale di promuovere la definizione di normative nazionali, europee e internazionali per promuovere l'uso sicuro dei sistemi senza pilota e per la gestione del traffico aereo. Purtroppo nel mese di Marzo 2021 l'associazione cessò l'attività. https://uvs-international.org/ (L'UVS International definisce la differenza tra UA (Unmanned Aircraft) ossia velivolo capace di operare senza la necessità di avere un pilota a bordo, e tra UAS (Unmanned Aircraft System) definito come un sistema costituito dal velivolo, dai relativi componenti necessari per il comando e il controllo dal pilota remoto e dai sensori installati per l'acquisizione di dati.)

Secondo la classificazione di Clarke (2014) (libro Intelligent Marketing: Employing New-Age Technologies, Di V. Kumar) gli APR possono essere suddivisi in :

- Large drones : tra 100 kg e 150 kg
- Mini drones : tra 20 kg e 30 kg
- Micro drones : tra 0,1 kg e 7 kg
- Nano drones : meno di 0,1 kg

Per quanto riguarda la classificazione dell'ENAC (circolare LIC - 15 del 09/06/2016), *gli APR sono suddivisi in classi e categorie a seconda della Massa Operativa al Decollo (MOD) e della tipologia di meccanica del volo(categoria):*

- Very Light (VL) 0,3kg<MOD≤ 4kg
- Light (L) 4kg<MOD≤25kg
- Heavy (H) MOD>25 kg

Tipologie :

- Ad ala fissa (Ap) / struttura planare : *Per restare in aria sfrutta l'aerodinamica di una (o più) ale fisse.. La propulsione può essere ad eliche, a motore, a reazione oppure senza motori.* Le problematiche riscontrate sono dovute all'autonomia, all'impossibilità di sorvolare in un punto stazionario e alla propulsione inziale (effettuata da un operatore o grazie all'utilizzo di un altro velivolo);

- Elicotteri o ad ala rotante (Hc) / struttura ad eliche: *è un elicottero a uno (o più) rotori collegati a due o più pale, che con la loro rotazione creano la cosiddetta ala rotante;*
- Multicotteri (Mc): *sono molto simili agli elicotteri, caratterizzati dalla presenza di uno o più gruppi motori/eliche, montate di solito su bracci, facendo volare il drone come un elicottero;*

- Dirigibile (As): *Soluzione Ibride e Convertiplani: sono velivoli che sfruttano sia l'aerodinamicità dell'ala fissa ma anche dell'ala rotante, come un UAS ad ala fissa con decollo VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Un ulteriore esempio di soluzione ibrida può essere un dirigibile.*

Attenzione a non confondere un SAPR con un Aeromodello, il quale secondo il Regolamento APR dell'ENAC, viene definito come *"dispositivo aereo a pilotaggio remoto, senza persone a bordo, impiegato esclusivamente per scopi ricreativi e sportivi, non dotato di equipaggiamenti che ne permettano un volo autonomo, e che vola sotto il controllo visivo diretto e costante dell'aeromodellista, senza l'ausilio di aiuti visivi".*

CATEGORIE

I velivoli APR, oltre a essere classificati nell'*ambito militare* e nell'*ambito civile* e suddivisi in categorie tra *operazioni speciali, strategici* e *tattici*, possono essere catalogati in base alle componenti, alle applicazioni, alla struttura, alla propulsione e al sostentamento aerodinamico del velivolo. A seconda della propulsione si possono dividere in APR con motore o senza motore, più leggeri o più pesanti dell'aria.

In base alla struttura e alla propulsione gli APR si suddividono nelle seguenti categorie:

- Ad ala fissa (Ap) / struttura planare
- Elicotteri o ad ala rotante (Hc) / struttura ad eliche
- Multicotteri (Mc)
- Dirigibile (As)

SENZA MOTORE

- Più leggeri dell'aria*:*
    - *palloni aerostatici*

Aeromobile capace di sollevarsi da terra grazie al principio di Archimede e caratterizzato dall'assenza di un motore. Lo spostamento del pallone avviene attraverso l'azione del vento o per mezzo di corde manovrate dagli operatori a terra.

Figura 25 *https://www.rc-zeppelin.com/dslr-aerial-photography-systems.html*

- Più pesanti dell'aria ad ala flessibile:
    - *aquilone*

Aeromobile capace di volare grazie alla sua forma e struttura e grazie all'azione del vento, controllato attraverso un filo manovrato da un'operatore a terra.

Figura 26 *http://fiducialmark.blogspot.com/2009/03/photogrammetry-meets-kite-aerial.html*

- *Parapendio e deltaplano*

Aeromobili caratterizzati dalla presenza del pilota a bordo e dalla capacità di effettuare il volo libero. Nel primo caso il mezzo viene manovrato attraverso corde collegate alle estremità. Nel secondo il mezzo viene manovrato attraverso lo spostamento di peso del pilota. In entrambi i casi il volo ha inizio da un punto di partenza più alto e in alcuni casi favorito dalla presenza di correnti d'aria.

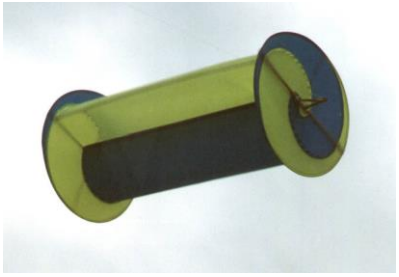
Figura 27 *https://blog.manawa.com/en/outdoor-activities/paragliding/paragliding-vs-hang-gliding-which-one-is-really-dominating-the-skies/*

- Più pesanti dell'aria ad ala fissa :
  - *Alianti*

Aeromobile caratterizzato dall'assenza di motore, dalla capacità di planare grazie alle correnti ascensionali e dalla necessità di decollo attraverso il traino effettuato da un altro velivolo.

Figura 28 *https://mugellogliding.aero/come-vola-un-aliante/*

- Più pesanti dell'aria ad ala rotante :
  - *Aquiloni rotanti*



Aeromobile capace di volare attraverso correnti d'aria che fanno ruotare l'aquilone stesso generando portanza necessaria per sollevarlo.

Figura 29 *https://forum.flitetest.com/index.php?threads/cylinder-plane.15822/#lg=post-168827&slide=0*

CON MOTORE

- *Più leggeri dell'aria :*
    - *Dirigibili*

Aerostato dotato di motore capace di essere manovrato mediante comandi aerodinamici e/o propulsivi.

Figura 30 *https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16967/1/CD- 3074.pdf*

- *Più pesanti dell'aria e ad ala flessibile :*
    - *Parapendio*

Aeromobili caratterizzati dalla presenza del pilota a bordo e dalla capacità di effettuare il volo grazie alla presenza di motore. Il mezzo viene manovrato attraverso corde collegate alle estremità.

Figura 31 *https://it.wikipedia.org/wiki/Paramotore#/media/File:Decollo_paramotore.jpg*

- *Più pesanti dell'aria ad ala fissa :*
    - *Elica*

Drone molto diffuso in ambito professionale, capace di volare grazie al peso ridotto e alla presenza di motore. Il decollo viene effettuato attraverso una manovrra di lancio eseguita da parte dell'operatore.

Figura 32 *https://www.sensefly.com/drone/ebee-x-fixed-wing-drone/*

    - *Jet*

Drone caratterizzato dalla presenza di motore a reazione. Viene utilizzato per lo più in ambito militare dato la complessità di utilizzo e gli elevati costi di gestione.

Figura 33 *Immagine _ dispense Corso droni per il rilievo territoriale e architettonico, Chiabrando 2020-2021*

- *Più pesanti dell'aria ad ala rotante :*
    - *Singolo rotore*

Chiamato anche mini-elicottero, l'aeromobile a singolo rotore a differenza di quello multirotore viene molto influenzato durante le missioni di volo in presenza di vento.

Figura 34 *Immagine _ dispense Corso droni per il rilievo territoriale e architettonico, Chiabrando 2020-2021*

- *Rotori coassiali*

Aeromobile caratterizzato dalla presenza dei rotori coassiali. Come nel caso di quello a singolo rotore l'aeromobile presenta delle difficoltà in presenza di vento.

Figura 35 *https://www.miniplanes.fr/fpv100-walkera-devo-f4-mode2*

- *Birotore*

Aeromobile di ultima generazione caratterizzato dalla presenza di due rotori. Derivato dai quadrirotore il V-Copter Falcon è capace di effettuare missioni di volo di maggior durata rispetto ai multirotore grazie alla presenza di due soli motori che permettono un consumo di batteria minimo e quindi una maggiore durata di volo.

Figura 36 *https://zerozero.tech/*

- *Quadrirotore*

Figura 37 *DJI Matrice 300 RT*
https://www.dji.com/it/matrice-300

È tra gli aeromobili più diffusi sul mercato sia per uso professionale, sia per uso hobbistico, caratterizzato dalla presenza di quattro rotori indipendenti capaci di migliorare la stabilità del mezzo e l'utilizzo anche in presenza di vento. Di questi fa parte anche l'FPV - First Person View identificato anche come sistema di pilotaggio remoto dove il pilota "vede" come se fosse a bordo. Per l'uso sportivo o hobbistico invece, sono sistemi modulari con sensori integrati ma con la possibilità di installazione di action cam per le riprese aeree. Vengono principalmente manovrati con l'utilizzo di visori e permettono maggior controllo e manovre estreme.

DJI FPV

HGLRC Sector 5 V3 Freestyle FPV

Figura 38 A (*https://www.dji.com/it/dji-fpv) e* **36 B***(https://www.hglrc.com/collections/fpv-racing-drone)*

- *Multirotore*

Aeromobili caratterizzati da cinque o più rotori, con dimensioni più grandi rispetto ai quadrirotori e aventi la capacità di montare sensori o attrezzatura più grande e di compiere voli di durata maggiore.

Figura 39 *https://www.quadricottero.com/2014/08/in-arrivo-i-nuovi-droni-multirotori.html*

Tutte le tipologie precedentemente elencate hanno dei vantaggi e svantaggi a seconda dell'utilizzo e dell'applicazione nei diversi ambiti. A seconda della struttura ad eliche o della struttura planare i SAPR hanno diverse caratteristiche che ne consentono l'utilizzo in base alle necessità di applicazione nei diversi campi.

Tabella 2 *dispense Corso droni per il rilievo territoriale e architettonico, Chiabrando 2020-2021*

Tipo	range	durata	vento	manovr.	payload
Pallone	0	++	0	0	+
dirigibile	++	++	0	+	++
aquilone	+	0	0	0	0
aliante	++	+	+	+	+
Ala fissa a motore	++	++	+	+	++
Aquilone rotante	++	+	+	+	+
Elicottero con singolo rotore	+	+	++	++	+
Elicottero con rotori coassiali	+	++	++	++	++
quadrirotore	0	0	++	++	0
multirotore	+	+	++	++	+

Ogni singolo velivolo è caratterizzato da diverse caratteristiche che a loro volta possono portare vantaggi o svantaggi nei diversi ambiti di utilizzo. Nell'ambito dell'architettura gli APR utilizzati sono prevalentemente quelli ad ala fissa a motore, il quadrirotore e il multirotore.

Attualmente nella maggior parte delle applicazioni anche al di fuori dell'architettura, i sistemi principalmente usati sono il quadrirotore e il multirotore grazie alla varietà di sensori che possono essere installati, alla capacità di carico ma soprattutto alla possibilità di mantenere un punto stazionario durante le fasi di acquisizione di dati. Questo permette di ottenere una migliore qualità di dati acquisiti. Per capire meglio com'è strutturato un APR bisogna approfondire i principi di volo e i componenti che lo costituiscono.

2.2 PRINCIPI DI VOLO

Un velivolo (esempio APR ad ala fissa) per poter effettuare un volo, necessita di un sistema di forze applicate in base al movimento che deve compiere.

- La **portanza** è più comunemente conosciuta come la forza che spinge un velivolo verso l'alto, permettendogli di rimanere in volo, contrastando la forza di gravità. È la forza aerodinamica generata dalla differenza di pressione tra la superficie superiore e inferiore dell'ala[10].Viene indicata con la lettera L derivante dalla parola inglese Lift. Nel caso di velivoli ad ala essa agisce in modo perpendicolare al moto spingendo il velivolo dal basso verso l'alto. Nei multirotore invece viene generata dal moto delle eliche.

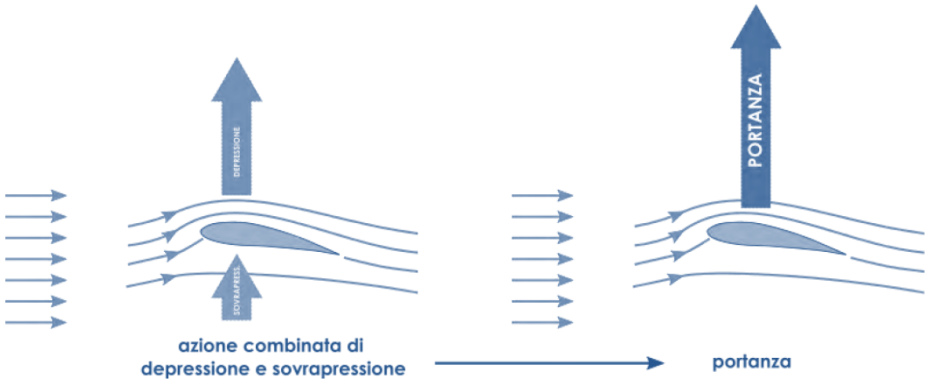


Figura 40 immagine corso droni ENAC _ UAS_25022021

- La **resistenza** è la forza contraria alla direzione di volo ed è spesso dovuta alla forma del velivolo, alle ali e al loro comportamento aerodinamico (ENAC). Viene indicata con la lettera D derivante dalla parola inglese Drag.

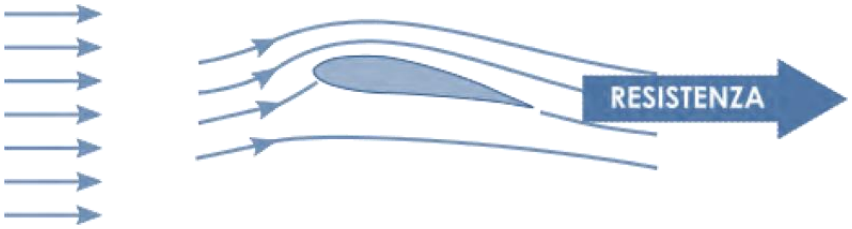


Figura 41 immagine corso droni ENAC _ UAS_25022021

La portanza e la resistenza sono generate dalla forma della sezione dell'ala (profilo alare) e dalla sua inclinazione rispetto alla direzione del flusso[11].

[10] Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021.
[11] Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021.

Il **peso** è costituito dal peso del velivolo stesso e dal carico pagante (payload). È la forza sempre diretta verso il basso. Viene indicato con la lettera W derivante dalla parola inglese Weight (ENAC).

- La **spinta** è la forza motrice generata dal sistema propulsivo che può essere di diverso tipo (motoelica, turbogetto, turbofan ecc.). Viene indicata con la lettera T derivante dalla parola inglese Thrust.

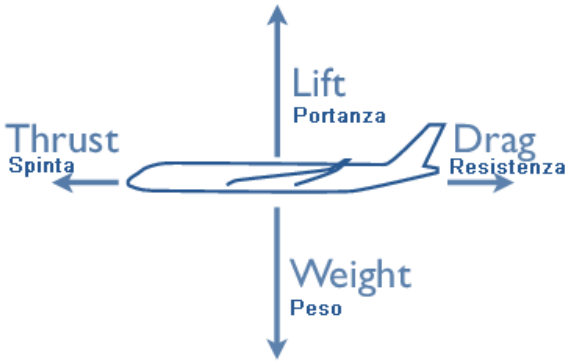
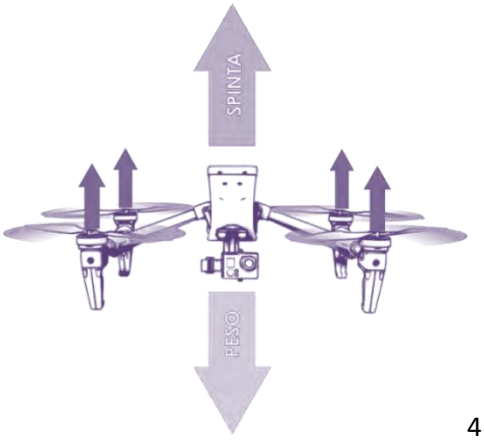


Figura 42 *https://www.researchgate.net/figure/Aircraft-balance-of-forces-in-cruise_fig1_317401929*

Per quanto riguarda i multicotteri vi sono diverse forze agenti che consentono il volo. A differenza dei velivoli ad ala fissa (precedentemente elencati) i multicotteri sono dotati di più eliche necessarie a generare una spinta perpendicolare al piano di rotazione delle eliche stesse. Durante la fase di decollo le eliche dei multicotteri generano una spinta verso il basso necessaria a mantenere in equilibrio il multicottero e inalzarlo nella fase iniziale di volo conosciuta anche come *hovering,* ossia la condizione in cui il velivolo si trova stabilizzato a quota costante e velocità nulla.

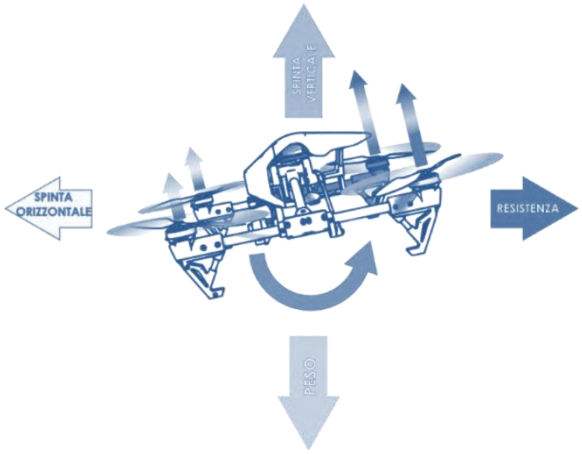
Qualora il multicottero realizzi una missione di volo, lo spostamento del velivolo viene effettuato grazie alla spinta generata dai motori a seconda della direzione immessa equilibrando la resistenza generata invece dagli altri motori che equilibrano il peso del velivolo.

Hovering



41 A

Volo



41 B

Figura 43 A e 41 B Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021

Lo spostamento dei velivoli avviene su tre assi che attraversano il suo baricentro :

- Asse verticale - asse di imbardata (yaw) rotazione sull'asse verticale
- Asse trasversale - asse di beccheggio (pitch) Picchiata / Cambrata (inclinazione avanti/indietro)
- Asse longitudinale - asse di rollio (roll) inclinazione a sinistra o destra

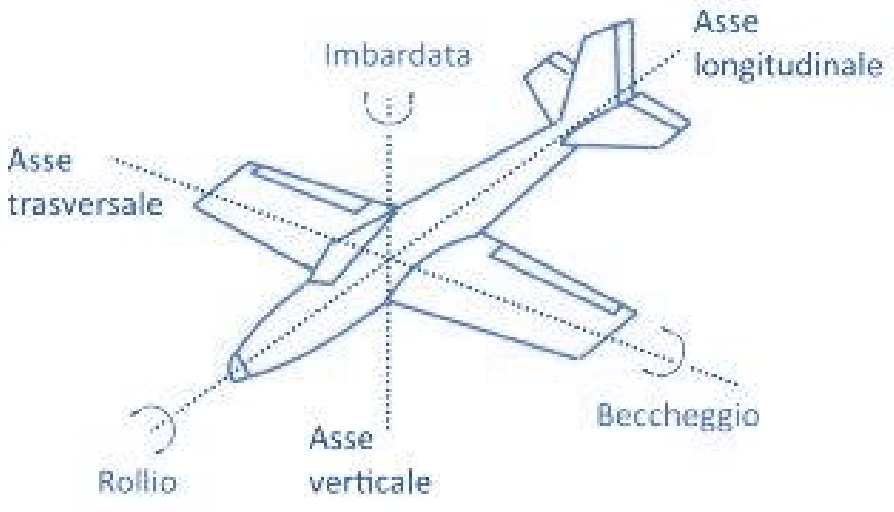


Figura 44 *https://www.airsardiniavirtual.it/wp_alivirtuali/Airsardinia%20Academy/navigazione/lezioni/le-superfici-mobili/*

Nei quadrirotori, lo spostamento del velivolo avviane grazie all'azione di ogni singolo rotore che, a seconda della direzione di volo, aumenta il numero di giri per ottenere la spinta necessaria a generare lo squilibrio delle forze e dei momenti.

La particolarità di questo velivolo è che ogni motore elettrico ha verso di rotazione opposto a quello adiacente, cioè due motori ruotano in senso orario e gli altri due in senso antiorario. In base alla direzione inserita all'operatore, i motori si comportano in modo diverso per contrastare le forze dei motori adiacenti e modificare il verso di volo del velivolo stesso.

- Per i movimenti sull'asse verticale dell'APR, i quattro motori lavorano in sintonia aumentando di potenza per effettuare la salita verticale, diminuendo la potenza per effettuare la discesa verticale.

- Per i movimenti sull'asse di beccheggio (pitch) e quello di rollio (roll) l'ESC controlla l'aumento di potenza di un motore e la diminuzione di potenza di quello opposto.

- Per i movimenti sull'asse di imbardata (yaw) la stessa potenza dei motori va incrementata sui due motori opposti e diminuita sui restanti due.

2.3 COMPONENTI DELL'APR

Un velivo può essere definito un APR grazie al raggruppamento di sottosistemi e di componenti che lo costituiscono e che ne garantiscono il controllo da remoto.

I sottosistemi necessari per far decollare l'APR sono:

- Sostentamento : le eliche per quanto riguarda i multicotteri, le ali che a loro volta possono essere fisse, flessibili o rotanti (es. a struttura planare o elicotteri), e gli involucri degli aerostati (es. dirigibile) ;
- Propulsione : nel multirotore è ad elica, quest'ultima mossa da un motore elettrico (o in rari casi da motore a combustione interna) ;
- Controllo : è il sottosistema più importante necessario al controllo dei sistemi di sostentamento e della propulsione (se presente o meno nel velivolo). Il controllo di volo, garantisce attraverso la comunicazione dei componenti elettronici del velivolo e della stazione di controllo a terra, la possibilità di eseguire le missioni di volo.

L'insieme di questi tre sottosistemi è fondamentale al corretto svolgimento di volo autonomo. Il termine *volo autonomo* va distinto dal *volo automatico* in quanto il primo si riferisce ad un volo dove non vi è possibilità di intervento esterno da parte dell'operatore (es. pallone sonda). Per *volo automatico* (o semi autonomo) invece si intende la capacità di volare seguendo determinati punti senza l'ausilio del controllo diretto del pilota, che però può intervenire in qualunque momento. (Chiabrando 21). Esiste una terza categoria che definisce il *pilotaggio remoto* (o controllo a terra), il quale richiede un costante intervento da parte del pilota per il controllo del RPV (Remote Pilot Vehicle, veicolo pilotato da remoto).

Tutte le tipologie di APR sono a loro volta strutturate da altri sottosistemi indispensabili per il controllo del velivolo a distanza. Come nei velivoli con equipaggio, anche gli APR hanno struttura e componenti molto simili tra loro. In base alle dimensioni gli APR avranno componenti più o meno sofisticate e durata di volo variabile, ovviamente più il velivolo ha dimensioni ridotte, meno raffinate saranno le compenti.

La tipologia maggiormente diffusa degli APR sono i multicotteri (Mc) di cui il quadricottero. La struttura a quattro bracci con il corpo centrale è la tipologia di velivolo più sviluppata grazie ai numerosi vantaggi, come migliore possibilità di controllo, lunga durata di volo e capacità di installazione di diverse sensoristiche.

Per capire com'è strutturato il velivolo, di fondamentale importanza sono le parti lo compongono e che creano il gruppo di sottosistemi necessari per il controllo dell'APR.

Le parti fondamentali affinché un velivolo possa essere definito tale sono:

- Stazione di controllo
- Telaio
- Motori
- ESC
- Eliche
- Flight Control
- Sensori
- IMU
- PMU
- Datalink
- Ricevente
- Batterie
- Payload

Autonomia, Controllo di volo _ sono governati dai sottosistemi precedentemente elencati

Vi sono i sottosistemi esterni al velivolo ma necessari per il suo controllo:

- **Stazione di controllo per ricezione e trasmissione di dati** : è il sottosistema che comprende la postazione di controllo, di monitoraggio e i sistemi di comunicazione. Sono sistemi di controllo sviluppati principalmente per UAV per operazioni militari. Vengono identificati sotto il termine GCS (Ground Control System) per il controllo di veicoli senza pilota o razzi con possibilità di controllo da grandi distanze. In base alla tipologia di velivolo che viene utilizzato, la stazione di controllo può essere formata da uno o più **Radiocomandi (RC)** e a sua volta, può essere collegata a tablet, cellulare o schermi esterni per monitorare la missione di volo. I dati di controllo del velivolo vengono inviati dal radiocomando attraverso un'antenna di trasmissione comunicando attraverso al ricevitore del velivolo stesso. Nei velivoli di classe più alta, possono essere utilizzati di due radiocomandi: il primo per permette la manovrabilità del mezzo attraverso i comandi di Rollio (inclinazione a destra o sinistra), Picchiata / Cambrata (inclinazione avanti/indietro), Imbardata (rotazione sull'asse verticale) e infine la potenza, mentre con il secondo si ha possibilità di manovrare i sensori installati per esempio termocamere o LIDAR da parte del secondo operatore. Con questo procedimento si ottiene una migliore acquisizione di dati in situazioni più complesse. Ovviamente ogni produttore di velivoli ha il suo sistema di controllo e i relativi comandi impostati a seconda delle missioni di volo da effettuare.

- **Telaio :** è il corpo dell'intero sistema di velivolo che sostanzialmente fa da struttura, sulla quale sono installate le componenti necessarie allo svolgimento una missione di volo. Può avere una struttura planare cioè ad ala fissa (Ap), struttura ad eliche cioè elicotteri (Hc), dirigibile (As) e

infine i multicotteri (Mc). Quest'ultimi, oggetto di ricerca di questa tesi, sono tra i più diffusi grazie alle caratteristiche tecniche e alla capacità di carico chiamata anche **Payload.**

Il telaio dei multicotteri (Mc) è costituito da un corpo centrale che racchiude il "cuore" del'APR, dove sono collocati l'insieme dei sensori, il flight controller, l'alimentazione e il payload. Per quanto riguarda l'estremità, la struttura si differenzia a seconda delle diverse tipologie che possono avere ad esempio quattro bracci nel caso dei quadricotteri, sei bracci nel caso degli esacotteri e otto bracci nel caso degli ottocotteri. Sull'estremità di ciascuno di essi è collocato un motore che a sua volta viene controllato da un controllore di velocità chiamato **ESC.** Una delle caratteristiche fondamentali è il materiale del telaio stesso che può essere in alluminio, in carbonio e infine in plastica alleggerita. Ovviamente ogni materiale presenta caratteristiche differenti e comporta più o meno solidità del velivolo stesso. Prendendo in esempio il modello della DJI Mavic Mini 2 il cui telaio è in plastica rafforzata e il peso contenuto di soli 249g, è garantita un'autonomia di volo attorno ai 30 min, ma a sfavore presenta una maggiore instabilità a differenza di quelli di dimensioni superiori. L'utilizzo di materiali plastici inoltre ha un minor costo di realizzazione da parte del produttore e in questo caso prezzi di mercato accessibili anche a livello hobbistico oltre che a quello professionale.

- **Motori :** sono la componente che garantisce l'energia necessaria per mettere in moto le eliche che genereranno una forza contraria alla forza di gravità, necessaria per sollevare e muovere il velivolo. I motori utilizzati sugli APR sono chiamati *brushless* (motori senza spazzole). Esistono anche i motori *brushed* (motori a spazzole) presenti in gran parte dei piccoli elettrodomestici (esempio phon, frullatori, ecc.)nei quali, durante la rotazione, le spazzole vanno a contatto con il commutatore creando attrito e facendo sì che si consumino. Non risultano adatti per un APR proprio per il fatto che i motori generano dei disturbi elettromagnetici che possono influenzare il corretto funzionamento del velivolo dei vari sensori.

  Per quanto riguarda i motori *brushless, sono* caratterizzati dall'assenza delle spazzole, dalla presenza di una parte fissa (base del motore), da una cassa rotante esterna (solitamente caratterizzata da un involucro in alluminio) e da un avvolgimento interno chiamato spire*[12] (quest'ultime non ruotano) attraverso le quali passa il flusso di corrente regolata dall'**ESC** (Electronic Speed Controller) e da un mozzo al quale viene installata l'elica . Sono inoltre motori molto più leggeri che contribuiscono a diminuire il peso complessivo del velivolo e consumano meno energia, sono più potenti e più affidabili.

[12] In elettrotecnica, ciascuno degli elementi che costituiscono l'avvolgimento di una bobina, un trasformatore, ecc.

Tenendo sempre come riferimento il quadrirotore, i quattro motori sono montati sulle estremità dei quattro bracci, lavorando sia in coppia che in sintonia e permettendo così, di effettuare le manovre sui tre assi (vedi capitolo principi di volo / meccanica di volo).

- **Electronic Speed Controller** (ESC) : è uno dei componenti più importanti al quale si collega il motore del velivolo, per aumentare o diminuire il numero di giri per mantenere in volo il velivolo stesso. Viene collegato alla centralina di controllo che a sua volta, in base ai comandi del pilota e ai sensori presenti a bordo, regola la velocità di ogni singolo motore attraverso l'ESC corrispettivo.

- **Eliche :** possono essere in ABS, carbonio o altri materiali. Spesso si utilizzano i materiali più leggeri e resistenti per garantire maggiore performance. Si suddividono in Sinistrorse (CCW Counter Clock Wise) che ruotano in senso antiorario e in Destrorse (CW Clock Wise) che ruotano in senso orario.
  Con il continuo sviluppo degli APR anche le eliche sono sempre in costante miglioramento per garantire maggiore resistenza, un'autonomia di volo maggiore e soprattutto minore rumorosità. È di fondamentale importanza monitorare il loro stato e sostituirle a seconda del loro grado di usura.

- **Flight Control :** è il micro-processore principale che acquisisce e invia dati in automatico per lo svolgimento del corretto volo del'APR. È costituito da un processore, da diversi sensori e da pin input e output collegati alle altre componenti (esempio ESC). Grazie anche al software dedicato il *Flight Control* può rimanere in volo in modalità automatica senza l'intervento da parte dell'operatore.

- **Sensori :** sono le componenti che aiutano a misurare i parametri necessari per il corretto svolgimento della missione di volo. Si suddividono in tre diverse tipologie e possono essere presenti o meno in un velivolo a seconda della tipologia dell'APR:

    - Propriocettivi : sono i sensori che individuano la posizione del drone nello spazio, misurano la velocità dei rotori (ESC) e altri parametri necessari per il corretto andamento del volo anche in casi di assenza di contatto visivo con l'APR. Alcuni di loro sono il modulo GPS, la bussola, l'IMU (Inertial Measurement Unit), altimetro, misurazione del carico utile ;
    - Esterocettivi : sensori necessari a misurare parametri come la distanza da ostacoli, sensori che misurano le temperature, fotocamere ecc.. ;

- Enterocettivi / Interocettivi : sensori infrarossi, sensori gamma e ecc..

- **Sensori di navigazione e controllo** : sono delle schede madri con dei processori che consentono al velivolo di elaborare i segnali di input quali i comandi del pilota. Della stessa categoria fanno parte i sensori anticollisione che permettono di svolgere la missione quasi autonomamente aiutando il velivolo ad evitare gli ostacoli non visibili dal pilota. Attraverso l'acquisizione di tutti i dati la scheda madre fornisce input ai sistemi di propulsione attraverso l'ESC (Electronic Speed Controller).

- **IMU :** Inertial Measurement Unit è una scheda con all'interno dei sensori , permette al Flight Controller di rilevare gli spostamenti del velivolo. I sensori installati al suo interno sono anche chiamati *sensori navigazionali* di cui :

  - Accelerometro: misura le accelerazioni lungo i tre assi di cui asse di imbardata (yaw), asse di beccheggio (pitch) e asse di rollio (roll). Questo sensore fornisce i dati necessari per calcolare l'angolo del velivolo e determinare gli angoli di assetto per il rollio e il beccheggio ;
  - Barometro : rileva la variazione della pressione atmosferica grazie alla quale è possibile determinare la quota di volo ;
  - Telemetro : insieme al barometro sono in grado di rilevare l'altitudine dal terreno con una precisione superiore ;
  - Magnetometro : sensore in grado di misurare le 3 componenti del campo magnetico terrestre e fornire il corretto dato di orientamento di prua del velivolo ;
  - GPS : Global Positioning System in grado di fornire la corretta posizione geografica nello spazio utile per il volo in un punto fisso e verso un punto preimpostato ;
  - Giroscopio : sensore in grado di fornire dati necessari per mantenere l'assetto di volo e la stabilità lungo i tre assi (yaw, pitch e roll).

- **PMU :** Power Management Unit consente di distribuire la corrente dalle batterie alle altre componenti dell'APR, mantenendo una tensione elettrica costante e citando possibili problemi causati dalla batteria.

- **DATALINK :** è il dispositivo di comunicazione che permette di ricevere immagini e dati telemetrici in tempo reale.

- **RICEVENTE :** è il dispositivo collegato al radiocomando che permette di comandare l'APR.

- **Batterie (alimentazione) :** il continuo sviluppo degli APR ha permesso la realizzazione di velivoli alimentati da combustibili con motore a scoppio a velivoli alimentati da batterie con motori elettrici. L'utilizzo dei motori elettrici *brushless* (senza spazzole) alimentati da batterie ricaricabili ai polimeri di Litio Li-Po ha portato nell'ultimo decennio allo sviluppo di velivoli di dimensioni ridotte con componenti più piccole e leggere, capaci di rimanere in volo attorno ai 30 min (autonomia media dei droni in commercio nell'anno 2021-2022). Non sempre però le batterie hanno un'autonomia sufficiente per missioni di volo più complicate; oppure, più il velivolo è piccolo, più sarà compatta la batteria o nel caso contrario più il velivolo è grande, maggiore sarà il consumo di batteria. Non a caso nei sistemi SAPR professionali il telaio permette l'installazione di più batterie proprio per poter garantire maggiore autonomia di volo. L'autonomia viene influenzata anche dalla sensoristica installata sul drone, dalle eliche, dal peso e dalla presenza di correnti di vento, facendo si che i motori aumentino la resistenza in volo consumando più energia del dovuto. Nonostante negli ultimi anni siano stati fatti grandi passi per aumentare l'autonomia degli APR, le batterie Li-Po presentano problematiche legate alle temperature di operazione e ai cicli di carica. Con il passare degli anni la performance diminuisce e l'autonomia si abbassa rispetto a quella dichiarata dal produttore.

- **Payload :** è il termine che viene utilizzato per indicare la capacità di trasportare apparecchiature elettroniche o sensori. Più precisamente viene indicato come *carico utile* dato dalla differenza tra il peso totale (con l'attrezzatura o sensori installati) e il peso a vuoto del velivolo. I payload possono essere di diverso tipo a seconda dell'utilizzo e dalla necessità di dati richiesti dalle missioni di volo. Gli APR multirotore (principalmente usati come velivolo per l'elevato payload) possono essere equipaggiati con diversi sensori sia attraverso un supporto fisso al telaio che attraverso un Gimbal che consente di mantenere il sensore installato su di esso, stabilizzato indipendentemente dai movimenti del velivolo. All'aumentare della grandezza del velivolo, aumentano anche le sue capacità di carico utile, favorendo l'installazione di sensori più grandi con caratteristiche elevate per ottenere dati di alta precisione. Ovviamente il carico utile di questi velivoli specifici non deve mai superare quello dichiarato dal produttore in modo da poter garantire il corretto funzionamento del velivolo ed evitare operazione pericolose. Nell'ambito dell'Architettura l'utilizzo del sistema SAPR ha contribuito nell'ultimo decennio, la possibilità di effettuare operazioni specifiche, grazie anche alla realizzazione di nuovi sensori con possibilità di installazione sui velivoli.

Tra quelli presenti sul mercato è possibile elencare alcuni *sensori imaging* di cui la fotocamera - videocamera, camere ad infrarosso, camere digitali RGB, camere termiche e altri come il sensore LIDAR, radar, dispositivi per carico e scarico, dispositivi audio, illuminazione, ecc. L'installazione di questi sensori sul velivolo comporta però la modifica del comportamento del velivolo in aria in quanto le manovre risulteranno rallentate, l'autonomia diminuirà e in alcuni casi sarà richiesta la partecipazione di un secondo operatore per gestire il sensore stesso.

3. SENSORI IMAGING

La parte fondamentale dell'APR è il sensore, che in base alla tipologia installata permette l'acquisizione di un determinate tipologie di dati. Le dimensioni, l'autonomia e tutti gli altri parametri sono comunque importanti ma la tipologia di sensore è la componente principale per cui un velivolo viene scelto. Con il continuo sviluppo di nuovi sensori, il settore dell'architettura riscontra sempre più necessità nell'utilizzo dei sistemi SAPR proprio per le determinate applicazioni. Il vasto mercato dei droni offre oggi velivoli con gimbal ai quali possono essere installati diversi tipi di sensore, altri con sensori specifici fissi al corpo del velivolo e altri ancora con la possibilità di utilizzare più sensori contemporaneamente.

FOTOCAMERE / VIDEOCAMERE

Tra i sensori maggiormente diffusi sul mercato vi sono le fotocamere e le videocamere, grazie alle quali è possibile acquisire foto o video durante le missioni di volo. A seconda della tipologia di velivolo e della capacità di carico, i sensori possono essere fissi oppure installati sul Gimbal e in alcuni casi anche affiancati da un secondo sensore.

L'impiego del *drone* nell'ambito dell'architettura principalmente nasce per il rilievo territoriale e per quello architettonico ma viene anche utilizzato per pianificazione e gestione di progetti, mappatura di aree archeologiche, topografia di terreni e corsi d'acqua, ispezione e monitoraggio di cantiere, rilievi fotogrammetrici di edifici, ponti, viadotti ecc.

L'impiego degli APR con questi sensori permette di effettuare indagini anche in zone difficilmente agibili o per esempio nei viadotti, per ispezionare punti difficilmente raggiungibili. Inoltre i costi di un'operazione risultano inferiori e le tempistiche notevolmente ridotte.

Ovviamente non tutti i sensori possono garantire la stessa qualità di dati dovuti sia alla proprio caratteristiche che a quelle del velivolo stesso. Più le dimensioni del velivolo sono compatte, minore sarà la qualità del sensore e dei dati ottenuti e viceversa per quando il velivolo è di grandi dimensioni.

Per quanto riguarda i sensori di velivoli destinati all'uso civile e nel caso delle applicazioni nell'ambito dell'architettura, possono essere elencati a seconda del loro della grandezza dei sensori e se sono sensori non realizzati per APR come macchine fotografiche e action cam o sensori integrati già nel velivolo o per il velivolo.

I produttori di sensori imaging mettono sul mercato diverse camere / videocamere con sensori aventi parametri diversi per avere immagini o video di qualità diverse, rendendo così i prodotti accessibili anche per un utilizzo non professionale. Ovviamente più il prezzo di un prodotto è

contenuto, più sarà piccolo il sensore e meno funzioni saranno presenti, al contrario di un prodotto ad uso professionale. La grandezza del sensore influisce inoltre sulla qualità delle immagini e dei video acquisiti. Per capire le diverse tipologie di velivoli e sensori è opportuno distinguere le diverse dimensioni.

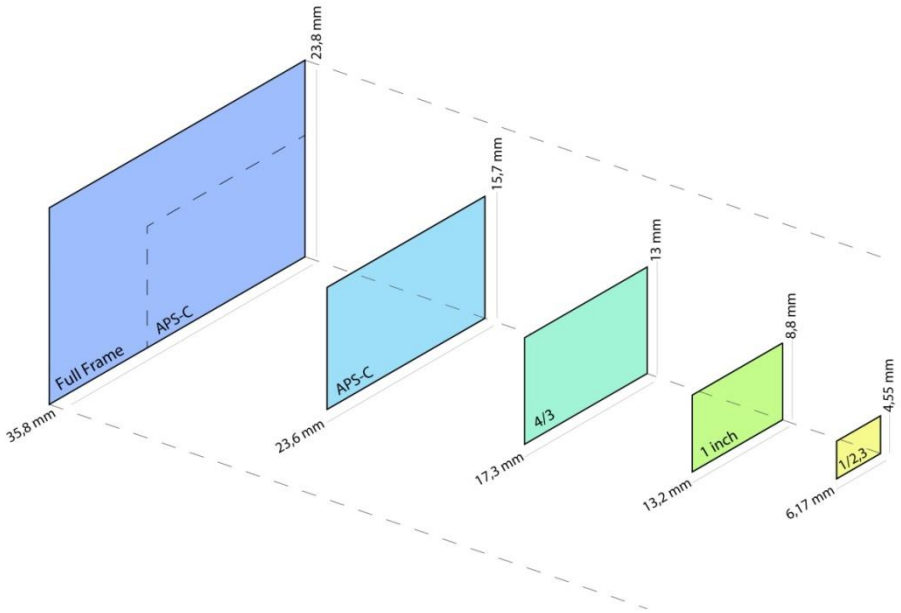


Figura 45 Misure di sensori di imaging (fotocamere / videocamere)

Nell'immagine illustrata precedentemente è possibile vedere come i sensori differiscano per misure, che a loro volta influiscono anche sulla grandezza del corpo macchina di una fotocamera sia che essa sia DSLR o fotocamera compatta.

Negli APR possiamo avere due categorie di velivoli, quelli con sensori non integrati e non realizzati per APR come macchina fotografica o action cam, e quelli con i sensori integrati o intercambiabili realizzati esclusivamente per determinati modelli di APR.

3.1 CAMERE RGB

- Tra i primi sensori imaging installati sui velivoli vi sono le fotocamere digitali di cui DSLR e mirrorless installate sui primi optacotteri (esempio DJI S800 _ nel 2013). Le DSLR (Digital Single Lens Reflex) sono anche conosciute come reflex, chiamate cosi proprio per la presenza di uno specchio interno che riflette l'immagine di ripresa proiettandola sul mirino del corpo macchina,

e per la presenza di un sensore digitale che acquisisce l'immagine al sollevamento dello specchio posto davanti.

Sono caratterizzate dalla presenza di sensori *FULL FRAME o APS-C* di diversa grandezza a seconda della marca e dalla presenza di obiettivi intercambiabili con diverse aperture e lunghezze di focale.

(Esempio di sensori DSLR presenti sul mercato _ anno 2022)

44A

44B

Figura 46 A e 46 B (Canon 90D e 5D mk iv https://www.canon.it/cameras/dslr-cameras/)

Canon 90D _ *sesnore APS-C*	Canon 5D Mark IV _ *sensore Full Frame*
Sensore 22,2 x 14,8 mm	Sensore 36 x 24 mm
141 x 105 x 77 mm	151 x 116 x 76 mm
Peso 701g	Peso 890g
32,5 megapixel	30,4 megapixel
Video 4k	Video 4k

Per quanto riguarda le mirrorless invece, sono "senza specchio", ma come nelle reflex con sensori di diverse misure e obiettivi intercambiabili. Possono avere le stesse dimensioni come le prime, ma l'assenza dello specchio permette di avere un corpo macchina di dimensioni inferiori e in questo caso peso minore. Sono quelle più utilizzate proprio perché un velivolo garantisce maggiore manovrabilità e autonomia grazie al payload.

Una considerazione va effettuata sulla grandezza dei sensori in quanto alcuni produttori, nonostante usino la stessa denominazione dei sensori, producono sensori di misure leggermente diverse.

(Esempio di sensori mirrorless presenti sul mercato _ anno 2022)

47 A

47 B

Figura 47 A e 47 B (Fotocamere mirrorless A7 III e A7C , https://www.sony.it/)

Sony A7 Mark III _ *Full Frame*	Sony A7C _ *Full Frame*
Sensore 35,6 x 23,8 mm	Sensore 35,6 x 23,8 mm
126,9 x 95,6 x 73,7 mm	124 x 71 x 59,7 mm
Peso 650g	Peso 509g
24,2 megapixel	24,2 megapixel
Video 4k	Video 4k

Nonostante le DSLR o mirrorless di fascia di prezzo alta siano considerate le migliori per la fotografia e per le riprese video proprio per le caratteristiche del sensore e per le impostazioni di acquisizione, sono da abbinare a obiettivi che si differiscono in categorie e fasce di prezzo a seconda delle loro caratteristiche. Gli obiettivi delle case madri dei più famosi marchi hanno dei costi che partono dai 300€ per gli obiettivi variabili (già presenti su alcuni modelli di macchine di fascia bassa) e possono superare anche i 10’000€ per obiettivi cinematografici. Sul mercato è possibile trovare anche obiettivi di altri marchi a prezzi più accessibili ma questo comporta anche una qualità d’immagine inferiore.

Si dividono in tre diverse categorie per la distanza di focale, ovvero la distanza fra il centro ottico dell’obiettivo e il piano di messa a fuoco (il sensore), e possono essere fissi o variabili con diverse aperture focale.

- **Grandangolari** - con lunghezze di focali inferiori ai 35 mm, consentono di avere un angolo di visuale più ampio ;
- **Normali** - con lunghezze di focali che arrivano ai 70 mm, consentono un angolo di visuale simile a quello degli occhi ;

- **Teleobiettivi** - con lunghezze di focali superiori ai 70mm , per acquisizione di soggetti lontani

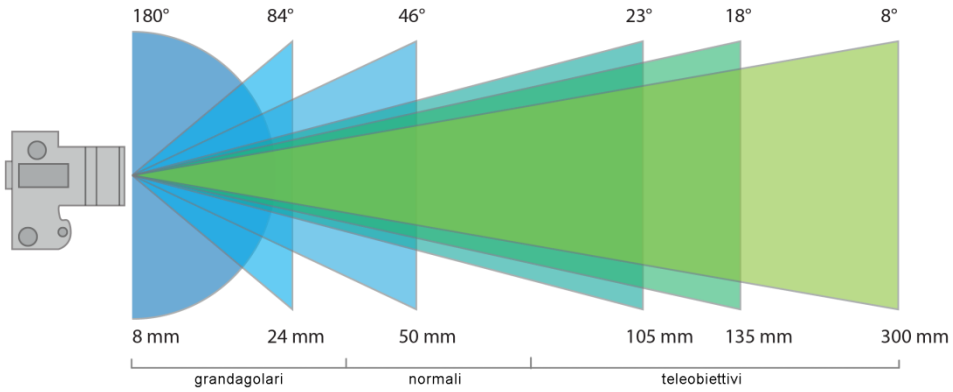


Figura 48 *Esempio obiettivi variabili e fissi*

49 A

49 B

Figura 49 A e 49 B (https://www.sony.it/)

Sony 28-70 mm , f / 3.5 - 5.6	Sony 50 mm , f / 1.2
Obiettivo variabile	Obiettivo fisso
550€	2300€

Per l'impiego professionale si ricorre all'utilizzo di ottiche fisse che a loro volta possono avere un'apertura di diaframma più ampio utile per l'acquisizione di immagini in condizioni di poca luce. La scelta delle ottiche fisse porta numerosi vantaggi anche per quanto riguarda la distorsione delle immagini che è meno visibile in quelle acquisite con ottiche variabili. Questo fattore comporta un minore intervento sull'elaborazione delle immagini nell'applicazione in fotogrammetria.

(Esempio di sensori DSLR installati su octacoptero)

Sensore: variabile
Pixel effettivi : variabile
Video: variabile
Peso : 4.2 Kg - 11 Kg
Autonomia: 15 min

Figura 50 DJI SPREADING WINGS S1000 con DSLR installata.
https://www.dji.com/it/spreading-wings-s1000

- Un altro dei primi sensori utilizzati su velivolo per uso civile è l'*action camera*, fotocamera di dimensioni compatte nata principalmente per essere installata su caschi o altra attrezzatura sportiva come ad esempio quelle prodotte dall'azienda più conosciuta del marchio GoPro. Per le sue dimensioni compatte, l'impiego sugli APR nacque grazie all'azienda produttrice DJI con la nascita del modello DJI Phantom 1 (presentato nel 2013) sul quale è possibile installare action cam differenti e di dimensioni simili alla GoPro grazie a un supporto fisso, oppure installarla su un *gimbal* per mantenere il sensore stabile anche in condizioni di vento o vibrazioni del velivolo. L'installazione però comporta una lunghezza di focale che può essere impostata da lineare a grandangolare con impostazioni che possono essere inserite solamente prima del volo. Purtroppo questo sensore non può essere comandato durante la fase di volo in quanto non interagisce con il velivolo né con i sistemi di comando del pilota.

(Esempio di action cam _ GoPro Hero 10 Black)

GoPro HERO 10 Black _ *sensore 1 / 2,3*"
Sensore 23,6 megapixel , f / 2.5
71,8 x 50,8 x 33,6 mm
Peso 153g
Video 5.3 k

Figura 51 *https://gopro.com/it/it/shop/cameras/hero10-black/CHDHX-101-master.html*

(Esempio di action cam installata su quadrirotore)

Sensore: variabile

Pixel effettivi : variabile

Video: variabile

Peso : 0,8 Kg - 1,2 Kg

Autonomia: 15 min

Figura 52 DJI Phantom 1 _ presentato nel 2013 (https://www.dji.com/it/phantom)

Attualmente questa tipologia di sensore viene impiegata anche nei sistemi FPV.

Il settore degli APR ha portato nell'ultimo decennio lo sviluppo a un livello tale da poter sostituire la sensoristica, quali macchine fotografiche e action cam. Quest'ultimi sensori si distinguono per il fatto che sono esterni al velivolo, prodotti da altri marchi per scopi totalmente diversi dalla fotografia aerea a installati grazie a meccanismi o gimbal. Sulla loro base però sono stati realizzati sensori di imaging di dimensioni più piccole, sia fissi che intercambiali che vanno da *1 / 2,3"* al *Full Frame,* permettendo di ridurre le dimensioni dei velivoli e garantire un maggior controllo a costi più contenuti. La possibilità di usare componenti sempre più compatte ha permesso la realizzazione di velivoli con bracci e eliche richiudibili per facilitare anche il trasporto.

- Sensori da 1 / 2,3" sono installati su gran parte degli APR in commercio e soprattutto su velivoli di dimensioni compatte per garantire un peso contenuto e un'autonomia incrementata e per poter in alcuni casi rientrare nella normativa che stabilisce il regolamento di volo. L'insieme di queste caratteristiche ha permesso di inserire sul mercato un velivolo dal prezzo contenuto, accessibile anche per scopi non professionali. Si tratta di velivoli dalle caratteristiche di base che permettono però acquisizione di foto e video di qualità alta grazie anche al sensore. Possono essere usati anche a scopo professionale in aree con limitazioni di volo e dove non è richiesto un grado di dettaglio alto dei dati da acquisire.

Esempio - DJI Mavic Mini 2

Sensore: 1 / 2,3”
Pixel effettivi : 12 megapixel, f / 2.8
Video: 4K
Peso : 249g
Autonomia: 31 min

Figura 53 DJI Mavic Mini 2

- Sensori da 1” sono presenti su APR di fascia di prezzo medio alta proprio per la presenza del sensore da un pollice che permette di ottenere immagini più nitide anche in condizioni di scarsa illuminazione. Sono velivoli di livello semiprofessionale realizzati per i creator di contenuti multimediali e per i fotografi che ricercano una qualità di immagini più alta. Possono essere usate anche nell’ambito dell’architettura, come nel caso del modello DJI Phantom 4 RTK. Grazie al modulo RTK integrato nel drone è possibile acquisire dati di posizionamento a livello centimetrico per una migliore accuratezza. Inoltre il velivolo può essere connesso alla stazione mobile D-RTK2 per un’acquisizione più precisa dei dati.

Esempio - DJI Phantom 4 RTK

Sensore: 1”
Pixel effettivi : 20 megapixel , f / 2.8
Video: 4K
Peso : 1391g
Autonomia: 30 min

Figura 54 DJI Phantom 4 RTK

- Sensori 4/3 sono installati sui velivoli professionali. Principalmente vengono usati per cinematografia e fotografia di dettaglio. La presenza di un sensore così grande permette di ottenere immagini di qualità elevata. Ad esempio nel caso del modello DJI Mavic 3 il sensore da un pollice è affiancato da un sensore più piccolo da 1/2 pollice dedicato al teleobiettivo per la fotografia ravvicinata. Possono essere usati per ispezioni di aree difficilmente accessibili o per il monitoraggio di cantieri grazie a quest’ultimo sensore.

Esempio - DJI Mavic 3

Sensore: 4/3

Pixel effettivi : 20 megapixel , f / 2.8

Teleobiettivo: 12 megapixel , f / 4.4 (1/2”)

Video: 5.1K

Peso : 895g

Autonomia: 46 min

Figura 55 DJI Mavic 3

- I sensori 35 o APS-C sono modulari e realizzati per APR ad uso professionale. Sono caratterizzati dalla possibilità di essere installati o sostituiti da sensori di diverse misure e possono essere installati con lenti di diverse lunghezze di focale. I costi sono molto elevati sia per il sensore con le lenti che per il velivolo in sè. Vengono usati per le produzioni cinematografiche ad alti livelli. Sono sensori che permettono di acquisire immagini in formato RAW e video in diverse gamme di colori necessarie per la post produzione. Nel caso del modello DJI Inspire 2 viene installato il sensore Zenmuse X7 chiamato anche Super 35 del formato APS-C.

Esempio - DJI Inspire 2 + Zenmuse X7

Sensore: ZENMUSE X7- APS-C

Obiettivi: intercambiabili , f / 2.8

Pixel effettivi : 24 megapixel

Video: 6K

Peso : 3440 - 4250 g

Autonomia: 23 - 27 min

Figura 56 DJI Inspire 2

- Sensori Full Frame come quello precedentemente elencato sono modulari e realizzati per un determinato modello di velivolo. Sono i sensori professionali più grandi progettati per immagini di alta qualità e precisione. Sempre la DJI, leader nel mercato degli APR produce il modello DJI Matrice RTK al quale è possibile installare diversi sensori di cui il sensore di imaging Zenmuse P1 dal formato Full Frame. Il sensore permette l’installazione di lenti di diverse misure di focale e di acquisire fotografie di

alta qualità e precisione. Come precedentemente descritto, all'aumentare del sensore, aumenta sia la qualità dell'immagine che la possibilità di scattare immagini anche in condizioni di bassa illuminazione.

Viene utilizzato nell'ambito dell'architettura per operazioni su aree medio-grandi anche senza la necessità di GCP (Ground Control Point - Punti di controllo a terra).

Esempio - DJI Matrice 300 RTK + Zenmuse P1

Sensore: ZENMUSE P1- Full Frame

Obiettivi: intercambiabili , f / 2.8

Pixel effettivi : 45 megapixel

Video: 4K

Peso : max 9 Kg

Autonomia: 55 min

Figura 57 DJI Matrice 300 RTK con sensore Zenmuse P1

3.2 TERMOCAMERE RADIOMETRICHE

- Sono sensori ad infrarossi utilizzati per le misure e le analisi termografiche che permettono di individuare le diverse temperature di superficie attraverso le radiazioni infrarosse. Nell'ambito dell'architettura sono utilizzati per ricavare dati di precisione necessari sia per le analisi in tempo reale che per la successiva valutazione termica di edifici e di impianti. Dai dati ricavati è possibile individuare le superfici disperdenti di un fabbricato, valutando la sua efficienza termica o addirittura monitorare il corretto funzionamento di impianto fotovoltaico, impianti elettrici o interi impianti industriali. Sono sensori abbinati a fotocamere ad alta risoluzione che permettono l'acquisizione di immagini RGB per poter individuare facilmente l'area con le possibili anomalie. Al di fuori del campo dell'architettura, sono anche nel settore della sorveglianza, operazioni di ricerca e soccorso. L'impiego degli APR per la termografia radiometrica risulta molto efficace, in quanto il processo è molto più veloce rispetto all'utilizzo di strumentazioni "stazionarie" e consente di arrivare in punti difficilmente accessibili e visibili a costi contenuti.

  Tra i marchi più conosciuti sul mercato, gli APR con questa tipologia di sensori sono quelli dei produttori DJI e Parrot. Un esempio è il DJI Matrice 300 RTK che permette l'installazione di più tipologie di sensore, di cui il ZENMUSE H20T. Questo sistema integra quattro sensori capaci di lavorare in contemporanea per ottenere dati riguardanti la distanza da un corpo, le immagini visibili dalla fotocamera e quelle visibili con la termocamera.

Esempio sensore - DJI ZENMUSE H20T

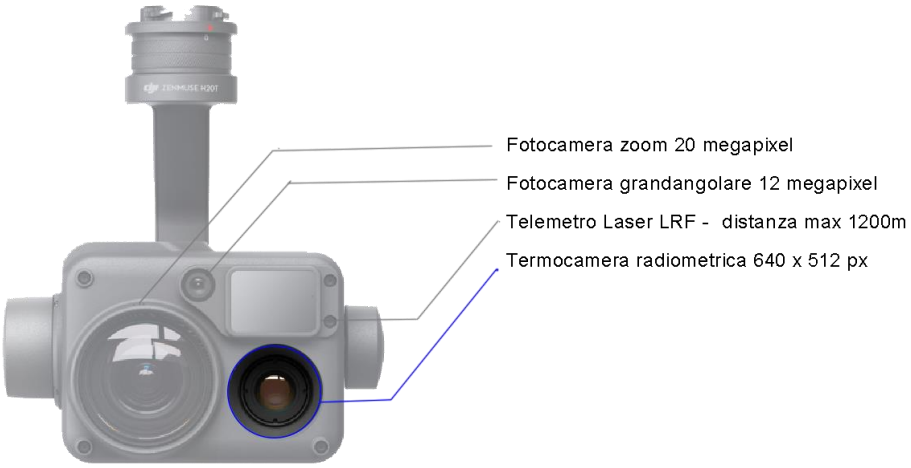


Figura 58 DJI Zenmuse H20T

Le immagini acquisite con questa tipologia di sensori sono immagini o filmati a falsi colori con gradazioni di colore che vanno dal rosso per le temperature più elevate, al blu per le temperature più basse. Nell'ambito dell'architettura vengono utilizzate per individuare la differenza di temperature delle superfici di un edificio, come per esempio quando vi è un ponte termico su una facciata (Fig.59). Sono anche impiegati nell'agricoltura per monitorare lo stato di salute delle coltivazioni e in archeologia per l'individuazione di strutture sepolte, monitoraggio impianti fotovoltaici, ecc.

Figura 59 Esempio acquisizione con termocamera Zenmuse H20T (https://www.dji.com/it/zenmuse-h20-series)

3.3 FOTOCAMERE A VISIONE NOTTURNA

Sono sensori usati principalmente per operazioni di sorveglianza notturna, monitoraggio e missioni di salvataggio. Sono fotosensibili e molto costosi, in quanto affiancati ad altri sensori per poter avere più dati comparabili nelle specifiche missioni di volo.

Per esempio nel caso del sensore DJI Zenmuse H20N, i due sensori starlight a visione notturna sono affiancati da termocamere radiometriche. Il sensore a visione notturna, a differenza di un normale sensore RGB, è in grado di catturare immagini in condizioni di scarsa illuminazione. Nel caso di operazioni di salvataggio vengono principalmente utilizzati per l'ispezione dell'area di intervento e affiancati da termocamere per l'individuazione di persone grazie alla differenza di temperatura non visibile in questo caso dal sensore a visione notturna. (Fig.61)

Esempio sensore - DJI ZENMUSE H20N

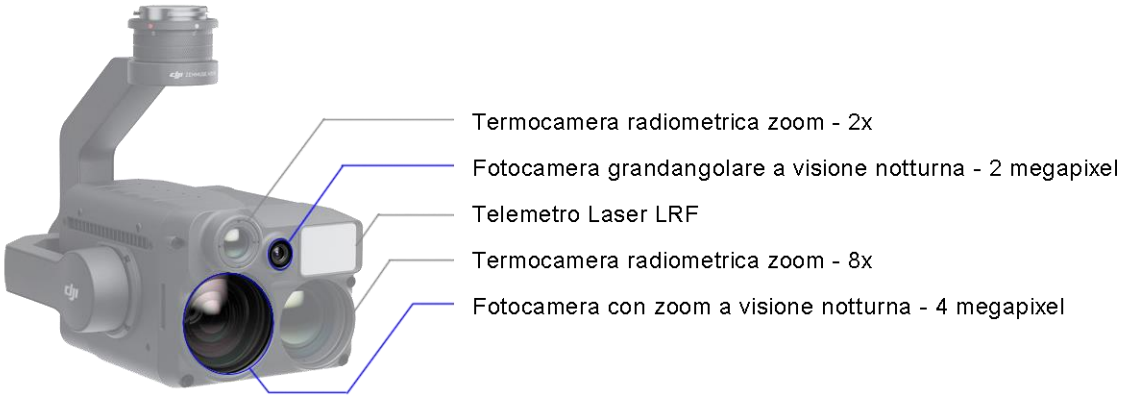


Figura 60 DJI Zenmuse H20N

Termocamera a sinistra, Fotocamera a visione notturna a destra

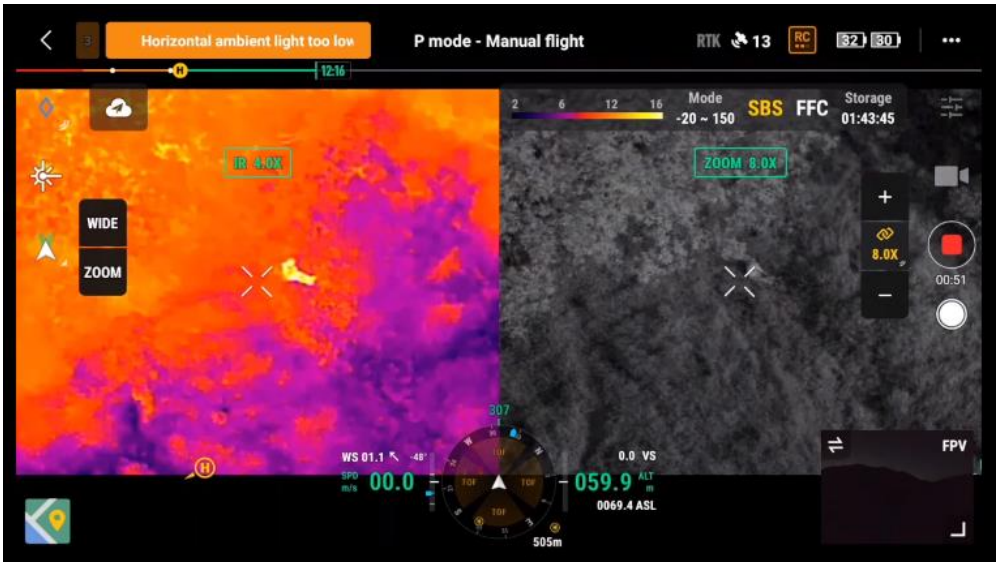
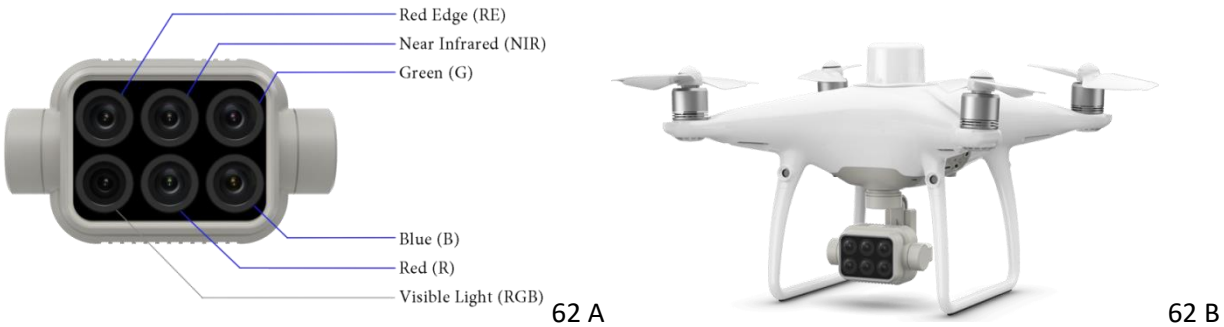


Figura 61 Esempio immagini termocamera e fotocamera a visione notturna www.dji.it

3.4 CAMERE MULTISPETTRALI

Sono sensori utilizzati principalmente in agricoltura in quanto i dati da loro acquisiti, consentono di ispezionare e monitorare coltivazioni ma anche oggetti grazie alla radiazione solare riflessa, nelle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico (visibile all'infrarosso). Le radiazioni rilasciate o riflesse dell'area e degli oggetti permettono di ottenere immagini multibanda per la realizzazione di mappe dettagliate e l'individuazione di diverse problematiche. Nel monitoraggio della vegetazione è possibile rilevare lo stato di salute, le diverse tipologie di colture e di terreno. Possono essere utilizzati per l'ispezione di aree per l'individuazione di discariche non autorizzate. In situazioni di emergenza come incendi boschivi, sono utilizzati per il monitoraggio del territorio e la mappatura dei terreni colpiti. Nel settore dell'edilizia sono impiegati per la mappatura e il monitoraggio delle diverse tipologie di coperture come per esempio l'amianto. Possono essere usati in ambito urbano per la valutazione del verde, nel monitoraggio delle infrastrutture, per la mappatura di siti archeologici, per il monitoraggio fluviale, ecc.



62 A 62 B

Figura 62 A (Sensore Multispettrale + RGB) e **60 B** (DJI P4 Multispectral)

Nel modello DJI P4 Multispectral sono presenti 5 sensori multispettrali di cui blu, verde, rosso, Red-Edge e vicino-infrarosso e 1 sensore RGB, affiancati da un sensore di luce solare.

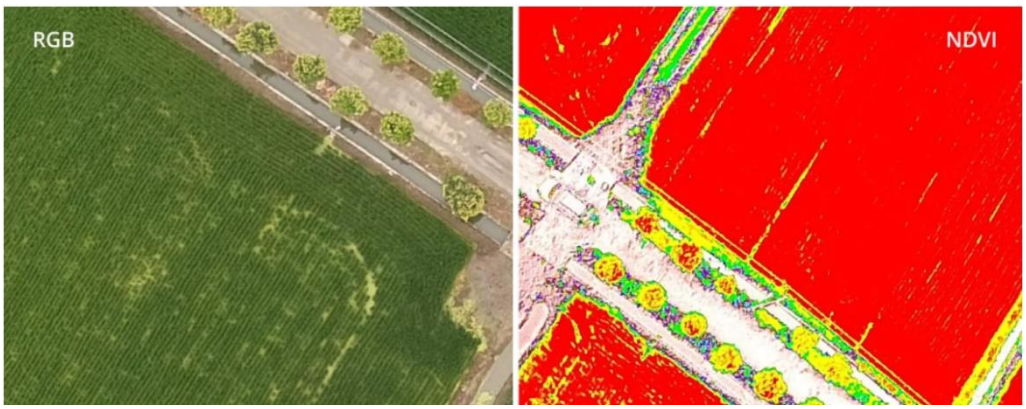


Figura 63 Esempio immagini multispettrali https://www.dji.com/it/p4-multispectral

3.5 LIDAR _ sensore non imaging

Sono sensori utilizzati principalmente nell'ambito dell'architettura per la creazione di modelli digitali 3D, anche se il loro impiego trova applicazione in scenari come la gestione agricola e forestale, il monitoraggio di impianti elettrici e infrastrutture, mappatura di alluvioni, pianificazione territoriale, geologia, difesa, ecc. Tra i sensori più conosciuti sul mercato vi è il sensore LIDAR (del modello DJI ZENMUSE L1), il quale permette di acquisire 240'000 punti/s, con precisione elevata e con distanza di rilevamento fino a 450m. Inoltre è affiancato da un sensore RGB da 20 megapixel per l'acquisizione di immagini a colori, da un sensore di visione per precisione di posizionamento, da GNSS e da IMU. La tecnologia LIDAR (Light Detection and Ranging) è molto simile a quella radar ma anziché utilizzare le onde radio, essa utilizza la luce. Il sistema LIDAR proietta raggi laser che attraverso la luce riflessa su un oggetto, acquisiti da un sensore in grado di rilevare il tempo impiegato dalla luce per raggiungere una superficie e tornare indietro.

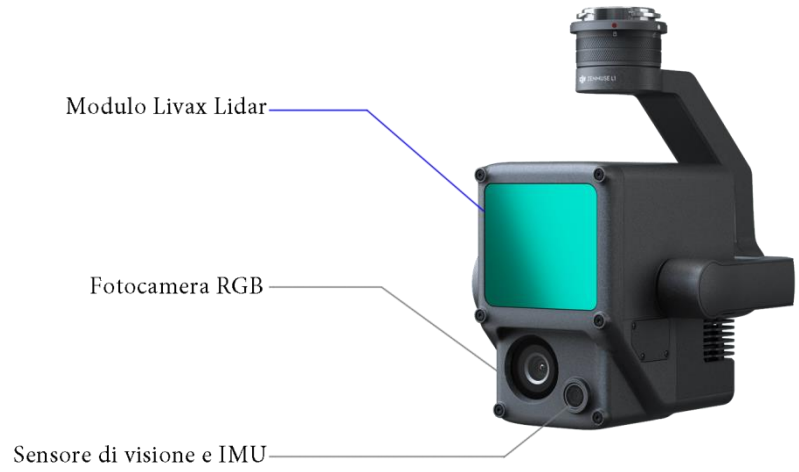


Figura 64 DJI ZENMUSE L1

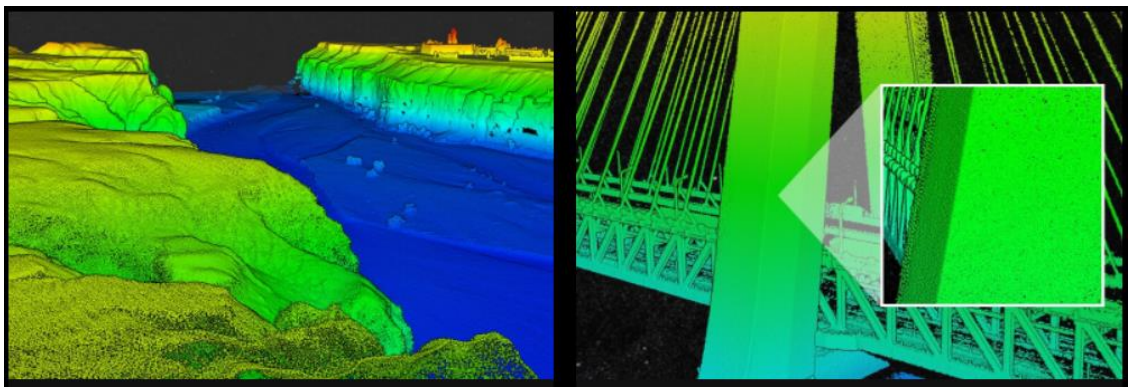


Figura 65 Esempio immagini https://www.dji.com/it/zenmuse-l1

3.6 SENSORI RTK e ACCESSORI

Oltre i sensori di posizionamento, di imaging e lidar, alcuni degli APR sono dotati di sensori di diverse tipologie oppure consentono l'installazione di sensori di terze parti.

Nel caso del DJI P4 Multispectral è presente un sensore di luce solare che ne cattura l'irradiazione, per ottimizzare l'acquisizione delle immagini. È dotato inoltre di un sensore di posizionamento RTK (Real Time Kinematic) per ottenere dati di posizionamento precisi con un errore che si aggira attorno a pochi centimetri. Inoltre vengono memorizzati i dati di osservazione satellitare per essere rielaborati in PPK (Post Porcessed Kinematic) attraverso software dedicati. Possono essere affiancati da un ricevitore GNSS di alta precisione della DJI D-RTK2 per un'acquisizione di dati di posizionamento precisi al centimetro.

Figura 66 DJI P4 Multispectral con sensore RTK

In base alle tipologie di APR e alle missioni di volo da effettuare, esistono sensori di vario tipo a partire da quello per il rilevamento del gas (Fig.65 A), dal sistema di illuminazione (Fig. 65 B) agli speaker (Fig. 65 C), dal telemetro laser LRF e così via fino ad arrivare a bracci o meccanismi che consentono di svolgere veri e propri lavori in modo automatico o manuale.

67 A

67 B

67 C

Figura 67 A - U10 Drone (http://www.ailf.com.cn/product_detail_en_793075.html)

Fig. 67 B- DJI Spotlight (https://www.dji.com/it/mavic-2-enterprise-advanced?site=brandsite&from=nav)

Fig. 67 C - DJI speaker (https://www.dji.com/it/mavic-2-enterprise-advanced?site=brandsite&from=nav)

CONSIDERAZIONI

I sensori precedentemente elencati hanno contribuito a migliorare i processi di acquisizione ed elaborazione di dati grazie ai costi di operatività contenuti, alla velocità di acquisizione e soprattutto alla facilità di utilizzo e integrazione con altre strumentazioni. È sempre più evidente che gran parte della strumentazione statica o "da terra" viene sostituita e in parte integrata con quella aerea, infatti il campo dell'architettura richiede un maggior numero di operatori SAPR per poter soddisfare la continua crescita della domanda. Ovviamente ci sono sempre e comunque dei limiti che non permettono di utilizzare l'APR sia dal punto di vista normativo, sia dall'ambiente o luogo in cui si vuole operare, e in alcuni casi limiti dovuti alla sensoristica.

Più che un modello ad uso hobbistico, il *drone* ormai è considerato un vero e proprio strumento lavorativo utilizzato non solo nell'architettura, ma in diversi settori.

4. APPLICAZIONI MOBILE e SOFTWARE

Un altro sistema fondamentale per l'operatività di un mezzo, oltre alla parte hardware precedentemente elencata è il software. È la componente fondamentale dell'intero sistema SAPR, in quanto contiene i dati e gli automatismi che consentono al velivolo di effettuare le missioni di volo. Per software si intende il sistema operativo capace di ricevere, elaborare ed inviare dati per la corretta esecuzione delle missioni di volo. Possono essere applicazioni dedicate per sistemi operativi mobile oppure programmi installati su sistemi operativi stazionari come personal computer o stazione di controllo.

A seconda della tipologia di velivolo e dell'applicazione, i software possono differire in base alle operazioni di volo, ai sensori installati e alla tipologia di dati da acquisire. Sono strutturati in modo da consentire il monitoraggio di alcuni dei parametri fondamentali del velivolo (velocità, quota, direzione, segnale gps, carica della batteria e ecc.) oppure altri come i parametri del sensore di imaging (inclinazione gimbal, modalità di scatto, zoom, impostazioni dell'otturatore, modalità video, ecc.), e interagire con le parti meccaniche (motori, gimball, attuatori, ecc.). In alcuni casi possono consentire di impostate modalità di volo utilizzando i *waypoint* (punti di riferimento nello spazio fisico che nell'ambito della navigazione aerea sono espresse in longitudine, latitudine e altitudine), oppure di scegliendo alcune tra le modalità automatiche disponibili.

È fondamentale distinguere i software in due categorie di cui software per il comando e l'acquisizione di dati e software per l'elaborazione dei dati. I primi sostanzialmente sono quelli necessari al settaggio del velivolo e della missione di volo, mentre i secondi sono utilizzati per l'elaborazione dei dati e l'estrapolazione di prodotti necessari all'analisi. Esistono altre due categorie di software: una che riguarda tutta la parte gestionale dei velivoli, dal registro delle autorizzazioni di volo alle attività, dalla gestione dei piani di manutenzione alla pianificazione di volo e ecc., e una che riguarda i software di simulazione chiamati anche *Flight Simulator,* ossia quelli che permettono agli operatori di effettuare missioni di test virtuali necessarie per ricreare la modalità di volo reale.

Per quanto riguarda i software per il comando e l'acquisizione di dati, sul mercato esistono software e applicazioni sviluppate dalle stesse case produttrici di APR e altri sviluppate da terzi, dedicate per specifici modelli. Ogni software ha i suoi pro e contro e funzioni differenti a seconda dell'impiego.

Tra i software e le app per il comando e l'acquisizione di dati più utilizzati sul mercato ci sono :

- DJI : Uno dei leader mondiali nella produzione di APR, radiocomandi, sensori, accessori, software e ecc., sia ad uso amatoriale che ad uso professionale. Per quanto riguarda i software, applicazioni mobile e programmi pc, il produttore fornisce aggiornamenti periodici sia per il velivolo che per le zone di volo. A seconda del Paese in cui si adopera un APR, esso consente o limita l'utilizzo in determinate zone, fornendo un aggiornamento delle mappe come la No Fly Zone (area in cui non è permesso volare: aeroporti o zone militari) per quanto riguarda sistemi APR o altri sistemi di volo non autorizzati, oppure come nel caso delle funzionalità, vengono limitati alcuni dei parametri come la distanza massima dalla quale si può operare un velivolo. Per fare una breve distinzione tra due Paesi, secondo le normative Europee in Italia gli APR possono volare in modalità CE* la quale limita di accedere ai parametri massimi dichiarati dal produttore, mentre per quanto riguarda gli Stati Uniti d'America gli APR possono effettuare le missioni di volo in modalità FCC* la quale consente di sfruttare a pieno le funzionalità dichiarate dal produttore.

    - CE : è la modalità Europea che limita secondo le normative in vigore, alcune delle funzionalità di un APR per quanto riguarda i parametri di volo di cui, raggio d'azione e altezza. Prendendo come esempio il modello DJI Mavic Air, il velivolo opera con 13 canali nelle frequenze 2.4 GHz o 5.8 GHz a potenza ridotta. Sono delle frequenze poco stabili e poco affidabili che limitano il raggio di operatività del velivolo stesso.
    - FCC : è la modalità utilizzata negli Stati Uniti d'America che permette di sfruttare a pieno le potenzialità del velivolo. Il drone DJI Mavic Air opera in questo caso con 11 canali sempre nelle frequenze 2.4 GHz e 5.8 GHz a potenza piena, conducendo missioni di volo a distanze e altezze maggiori.

  Tra le app maggiormente diffuse vi è DJI GO, dedicata principalmente al pilotaggio di tutte le tipologie di APR della stessa marca e attualmente sostituita dalla DJI FLY per i modelli nuovi. Permette l'inserimento di una serie di modalità di volo preimpostate per la realizzazione di video e foto. Permette l'utilizzo del velivolo in modalità manuale, adottando però una serie di limitazioni riguardo le normative locali.

  Grazie anche ai sensori presenti sull'APR, essa consente di effettuare manovre e intervenire laddove si presente un problema.

DJI GO 4.0

Figura 68 *DJI GO 4.0 _ mobile app per l'acquisizione di immagini e video* (https://fulldrone.com/should-i-buy-the-mavic-air/)

Sempre la stessa azienda sviluppa l'applicazione DJI Pilot, realizzata specificatamente per il settore industriale. È compatibile solamente con modelli della gamma *Enterprise (velivoli professionali per specifiche missioni di volo)* e imposta una serie di parametri necessari all'acquisizione di dati per il rilievo fotogrammetrico.

DJI PILOT

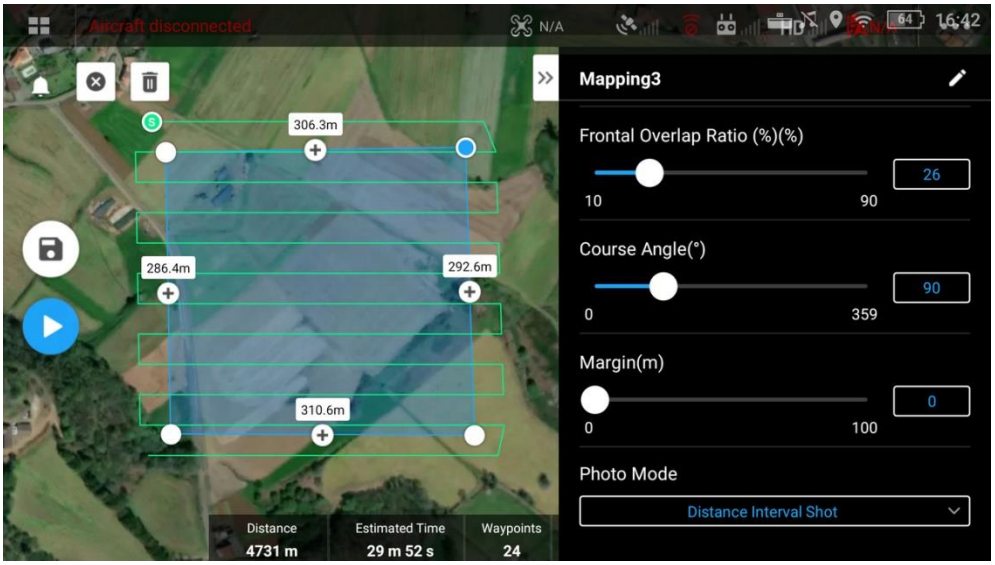


Figura 69 *DJI PILOT _ mobile app per rilievo fotogrammetrico* (https://matricepilots.com/threads/dji-pilot-margin.25217/)

- Pix4D mobile : Azienda Svizzera nota per lo sviluppo di software per dispositivi mobile e stazionari, dedicati per l'acquisizione e l'elaborazione di dati per la ricostruzione di mappature in 2D o3D. Si integra con gran parte dei sistemi APR presenti sul mercato e possiede una serie di funzioni personalizzabili per l'acquisizione di dati. Inserisce degli input per individuare l'area oggetto di rilievo e stabilisce il metodo di acquisizione, i parametri del sensore e la tipologia di dati da acquisire. Ha le funzioni simili al software DJI Pilot ed imposta missioni di volo specifiche per il rilievo fotogrammetrico, dal settaggio del sensore al numero di acquisizione, dall'inclinazione del gimball per il volo nadirale e obliquo, alla tipologia e alla quota di volo.

  Pix4D Capture

Figura 70 *Pix4D Capture _ mobile app per rilievo fotogrammetrico* (https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture)

- Altri : DroneDeploy, SimActive, Precision Hawk, DroneSense x Parrot

  Per l'elaborazione dei dati acquisiti tramite gli APR, si fa riferimento a software capaci di estrapolare i prodotti necessari per ulteriori approfondimenti o analisi. Gran parte possiede costi elevati proprio per la capacità di gestione, per la funzionalità e l'elaborazione dei dati e non per ultimo richiedono computer con caratteristiche elevate che soddisfino i requisiti necessari per elaborare un gran quantitativo di dati.

  Di fondamentale importanza sono il velivolo e la sensoristica installata in quanto, da una parte la dimensione dell'APR può influire sulle missioni di volo in presenza di raffiche di vento e dall'altra i parametri del sensore installato. Quest'ultimo è di fondamentale importanza poichè più il sensore è grande e con risoluzione più alta, migliore sarà la qualità delle immagini che a loro volta porteranno ad una migliore restituzione dei dati.

Tra i ***Software*** professionali più conosciuti per l'elaborazione dei dati ci sono :

- Agisoft Metashape : è uno dei software più utilizzati per quanto riguarda la fotogrammetria da terra e quella aerea. La capacità di elaborare immagini e integrare coordinate di riferimento necessarie per il corretto allineamento porta a modelli 3D georeferenziati, ortofoto e nuvole di punti. Dall'estrapolazione del modello tridimensionale si possono ottenere una serie di informazioni e dati utili per effettuare misurazioni, ricostruire modelli 3D in software dedicati, ricavare piante e prospetti nel caso di un fabbricato, realizzazione di Modello Digitale di Elevazione (DEM) utile per la rappresentazione delle quote di un territorio o di una superficie. Può essere utilizzato per modelli 3D di oggetti anche senza inserire coordinate di riferimento. Le fotografie acquisite possono essere scattate o con attrezzatura professionale o con la fotocamera del cellulare. Il software permette l'elaborazione delle immagini, compensando le problematiche causate dall'attrezzatura come la distorsione delle immagini qualora fossero utilizzate lenti grandangolari. Inoltre anche l'esposizione dell'immagine può influire sulla ricostruzione fedele del modello tridimensionale.

- DJI Terra : sviluppato dall'azienda leader DJI, è attualmente in fase di sviluppo dall'azienda produttrice, anche se le funzionalità disponibili permettono di ottenere dati necessari per la ricostruzione di un modello tridimensionale. È un software molto simile a quello della Agisoft, ma limitato in alcune impostazioni. Integra una serie di funzioni che consentono di programmare una missione di volo e successivamente acquisire ed elaborare i dati.

- Pix4D : Consente di programmare mappature di territori, effettuare missioni di sorveglianza e ispezioni di impianti e cantieri. Molto simile ai precedenti due, consente l'elaborazione per la realizzazione di modelli 3D.

- Altri software : DroneDeploy, Agribotix, Reality Capture, ecc...

Essendo software che lavorano con un'elevata quantità di dati, il processo di elaborazione necessita di una quantità di tempo utile alla correzione dei dati ove necessario, integrazione con i GCP (Ground Control Points) rilevati con GNSS e/o RTK e settaggio dell'elaborazione ed estrapolazione dei dati. Per poter ridurre i tempi di elaborazione, i software necessitano computer dotati di una capacità di calcolo elevata con schede grafiche dedicate e processori ad alta frequenza.

Attualmente quasi tutti i produttori di software stanno cercando di realizzare prodotti sempre più completi, per avere così, in un unico prodotto l'intero sistema funzionale. Dal settaggio del velivolo alla pianificazione del volo, dall'acquisizione dei dati alla loro elaborazione, dal registro delle autorizzazioni di volo alle attività, dalla gestione dei piani di manutenzione alla pianificazione, fino alle modalità di simulazione. L'insieme di queste impostazioni permette di avere un controllo migliore dalla fase di programmazione di volo alla fase finale di elaborazione dei dati, e soprattutto monitorare l'intero processo e gli effettivi registri di volo. Quest'ultimo dato è fondamentale per l'ente di volo locale e per il pilota in quanto consente l'accesso a dati nel caso in cui si verifichino problematiche o condizioni critiche durante la fase di volo.

5. NORMATIVA

Il continuo sviluppo dei velivoli a pilotaggio remoto, il miglioramento delle loro caratteristiche, dei sensori e quindi dei dati che è possibile acquisire, hanno consentito nell'ultimo decennio, l'inserimento sul mercato di velivoli performanti a prezzi accessibili, sia per quanto riguarda l'utilizzo in ambito militare sia per l'utilizzo in ambito civile. Come dimostrato nel capitolo II, il loro impiego permette non solo l'applicazione in diversi settori, ma anche di migliorare e velocizzare le operazioni per l'acquisizione di un grande quantitativo di dati. Per quanto riguarda l'ambito civile, l'utilizzo irresponsabile dei velivoli è un fenomeno che causa moltissimi problemi quando non viene effettuato da operatori qualificati, ed eseguito senza considerare le nozioni necessarie per operare, come l'utilizzo a livello hobbystico, dove in gran parte dei casi vengono trascurati quelli che sono gli aspetti legislativi al fine di poter effettuare una missione di volo regolare. Purtroppo sono sempre più frequenti i casi di sorvolo di aree vietate, nei pressi degli aeroporti, in prossimità di assembramenti di persone, cortei o manifestazioni, ecc.., dove vigono norme stabilite dagli enti di volo locali, necessarie per regolare il traffico aereo e prevenire il verificarsi di situazioni pericolose. È possibile fare riferimento a situazioni registrate sia in Italia che altri paesi, di utilizzo irresponsabile dei velivoli da parte di turisti stranieri in aree con assembramenti di persone o nei pressi dei monumenti. È possibile interpretare in due diversi modi questa situazione: nel primo caso il turista potrebbe essere sprovvisto di licenze o attestati necessari che consentono di operare qualora la normativa non lo vieti, mentre nel secondo caso è possibile che la normativa vigente sia differente da quella del paese di origine del turista. La differenza di normative tra i diversi stati, ha permesso la redazione di una serie di linee guida stabilite dagli enti internazionali di navigazione aerea, utili per la la stesura delle norme a livello nazionale. Attualmente sia la normativa nazionale che internazionale sono in continuo aggiornamento, dovuto all'esponenziale crescita dell'utilizzo dei droni sia a livello professionale che a livello amatoriale, cercando di adattare le leggi a fornire le linee guide per il corretto utilizzo dei velivoli. La necessità di una normativa atta a regolare l'impiego dei droni serve oltre allo svolgimento del volo sicuro, anche alla gestione del traffico aereo, grazie ai sistemi di interazione tra i velivoli e la registrazione delle missioni di volo. Non per ultimo, l'utilizzo di questi velivoli richiede il conseguimento dell'attestato al fine di poter operare nel rispetto delle leggi, così come il registro di volo, l'assicurazione e i relativi permessi necessari.

5.1 NASCITA DELLE PRIME LEGGI

Con la nascita dei primi mezzi capaci di volare e con l'incrementare del traffico aereo, molte nazioni riscontrarono la necessità di formare un regolamento che possa stabilire linee guide utili per la navigazione aerea. Il 13 ottobre del 1919 a Parigi, 12 nazioni firmarono la prima convenzione internazionale chiamata "Convenzione per il regolamento della Navigazione Aerea", stipulata per stabilire alcune delle norme di volo riguardanti tutti quei mezzi capaci di volare, e definire bene il concetto di aeromobile. Quest'ultimo viene definito come «*ogni apparecchio che si può sostenere nell'atmosfera grazie alla reazione dell'aria*» mentre per quanto riguarda il regolamento si stabilì che «*ogni Nazione avesse il potere di regolare la circolazione aerea sul proprio territorio e di concedere o meno ad altri stati il diritto di utilizzare il proprio spazio aereo nelle rotte stabilite*»[13], e infine viene definito l'obbligo di immatricolare gli aeromobili nei registri nazionali dei singoli stati. In Italia la convenzione viene resa esecutiva il 24 dicembre del 1922, ma rivista successivamente, per riformulare alcuni dei concetti non del tutto definiti. Con la convenzione di Parigi viene formulata la CINA (Commissione Internazionale di Navigazione Aerea) nata con lo scopo di applicare modifiche alle leggi e aggiornarle in base anche agli altri paesi.

Per quanto riguarda il regolamento nazionale, nel 1925 viene formulato il Regolamento di Navigazione Aerea (R.D. 11 gennaio 1925, n.356), con lo scopo di introdurre la definizione di aeromobile ed elencare le diverse tipologie e classificazioni di velivoli. Nell'Art.1 del suddetto regolamento, l'aeromobile viene definito come « *un meccanismo che, utilizzando il sostentamento statico o quello dinamico dell'aria, sia atto a trasportare cose o persone* ».

Con le successive revisioni del 1933 (R.D. 18 dicembre 1933, n.2348) e del 1938 (R.D. 15 aprile 1938, n.1350), viene ulteriormente modificata in « *un meccanismo od una qualsiasi struttura che, utilizzando il sostentamento statico o quello dinamico dell'aria, sia atto a trasportare cose o persone* ».

Nel 1941 con l'art 718 la definizione indicava « *per aeromobile si intende ogni macchina capace di navigare nello spazio aereo e di trasportare persone o cose da un luogo ad un altro* ».

Successivamente nel 1942 la definizione viene ulteriormente modificata con l'art. 743 dove « *per aeromobile si intende ogni macchina atta al trasporto per aria di persone o cose da un luogo all'altro* ».

Quello che in quest'ultima definizione non viene specificato e il requisito di sostentamento, dando così una definizione molto generica che riguarda tutti i mezzi capaci di effettuare un volo o lo spostamento.

[13] Convenzione per il regolamento della Navigazione Aerea, Parigi 13 ottobre 1919, « ogni apparecchio che si può sostenere nell'atmosfera grazie alla reazione dell'aria» e « ogni Nazione avesse il potere di regolare la circolazione aerea sul proprio territorio e di concedere o meno ad altri stati il diritto di utilizzare il proprio spazio aereo nelle rotte stabilite »

Un ulteriore modifica del testo viene adottata nel 1944 con la Convenzione di Chicago in aggiornamento alla Convenzione di Parigi, dove viene definito il termine di aeromobile come "*ogni macchina che possa trarre sostentamento nell'atmosfera da reazioni dell'aria diverse dalla reazione dell'aria sulla superficie terrestre*".

A livello nazionale, in Italia è stato elaborato un decreto in riferimento all'Art. 8 della Convenzione di Chicago, dove con il D.Lgs. 6 marzo 1948, n. 616 e successivamente rettificato con la legge del 17 aprile 1956, n. 561, descrive che "*gli aeromobili senza pilota (civili, perché la Convenzione non si applica agli aeromobili di Stato) non possono sorvolare il territorio di uno Stato contraente, salvo che abbiano ottenuto l'autorizzazione speciale di detto Stato e conformemente a tale autorizzazione. Ogni Stato s'impegna ad assicurare che il volo degli aeromobili senza pilota, in zone aperte agli aeromobili civili, sia controllato in modo da evitare ogni pericolo per gli aeromobili civili*"[14].
Nel corso degli anni la definizione di aeromobile è stata interpretata in diversi modi, da un lato dovuto alla traduzione errata di *aircaft* dove in un caso veniva tradotta come *velivolo* che comprende una categoria generale di mezzi capaci di rimanere in volo, mentre nell'altro caso come *aeromobile* che comprende una categoria omogenea di mezzi capaci di effettuare il processo di volo.

Dagli ultimi testi presentati con la Convenzione di Chicago, le normative riguardanti i velivoli senza equipaggio a bordo, sono state trascurate fino alla comparsa dei primi velivoli civili. Solo attorno agli anni 2000, con l'incremento del traffico aereo e l'importante evoluzione tecnologica, l'Italia fu uno dei primi paesi Europei a presentare uno strumento giuridico riguardante gli aeromobili. Il 14 luglio 2004 viene presentata la legge n. 178, riguardante le "*Disposizioni in materia di aeromobili a pilotaggio remoto delle Forze Armate".* Con l'Art. 1, viene introdotto il termine APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) che indica "*un mezzo aereo pilotato da un equipaggio che opera da una stazione remota di comando e controllo"*.

Successivamente in Italia con il decreto legislativo del 9 maggio 2005 n. 96 e il decreto legislativo del 15 marzo 2006 n. 151, viene ulteriormente aggiornata la definizione di aeromobile, tra cui quella descritta nell'Art. 743 in «Per aeromobile si intende ogni macchina destinata al trasporto per aria di persone o cose». Con questo aggiornamento vengono considerati anche i mezzi a pilotaggio remoto ad uso civile, individuati dal regolamento dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) successivamente descritto, e quelli ad uso militare individuati dai decreti del Ministero della difesa, consentendo l'inserimento dei mezzi a pilotaggio remoto nel traffico aereo e implicando l'adattamento a tutte le regole presenti nel Codice di Navigazione Aerea.

[14] Antonio De Rosa, 2013

Per quanto riguarda la normativa a livello Europeo, nel 2002 fu presentato dalla EUROCONTROL e dalla JAA (Joint Aviation Authorities), un primo quadro regolamentare con una serie di norme riguardanti la gestione dell'intero sistema di pilotaggio, le modalità per la gestione e per operare in sicurezza, le licenze necessarie e non per ultimo i criteri per la navigazione, che possono a loro volta variare da uno stato all'altro grazie agli organi nazionali di volo. In questa normativa rientrano esclusivamente i velivoli pilotati da remoto con massa inferiore al decollo di 150 Kg.

Sempre nello stesso anno viene fondata l'EASA, (European Union Aviation Safety Agency) ente che realizza una normativa generale riguardante la sicurezza aerea per gli stati membri, e consente agli enti dei singoli stati di regolare l'aviazione civile nazionale. Essa introduce il primo regolamento 1702/2003 il 27 settembre del 2003, il quale "stabilisce le regole di attuazione per la certificazione di aeronavigabilità ed ambientale di aeromobili e relativi prodotti, parti e pertinenze, nonché per la certificazione delle imprese di progettazione e di produzione"[15] per i paesi che ne fanno parte come illustrato in Fig.72. Successivamente viene introdotto il regolamento 2042/2003 il 28 novembre 2003, che riguarda il "mantenimento della navigabilità di aeromobili e di prodotti aeronautici, parti e pertinenze, nonché sull'approvazione delle imprese e del personale autorizzato a tali mansioni. Il testo ufficiale viene pubblicato nel 2009 Policy Statement Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft System (UAS), riguardante i velivoli civili con massa MTOM superiore ai 150 Kg".

Figura 71 Logo EASA

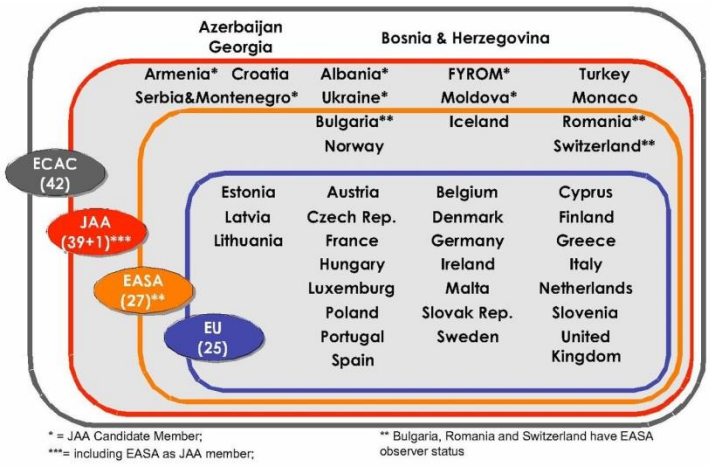


Figura 72 Paesi appartenenti ai diversi organismi di gestione dell'ambito aeronautico (2005) Immagine wikipedia

L'EASA attualmente fornisce le norme a 27 paesi membri dell'Unione Europea + Islanda, Liechtenstein, Svizzera e Norvegia, necessarie per effettuare la valutazione del rischio per le missioni di volo. A seconda del mezzo utilizzato e dell'aumento del rischio, la normativa prevede requisiti più alti riguardanti il pilota e il velivolo, e il contrario al diminuire del rischio.

[15] EASA, Programma di lavoro 2004, p.3

Inoltre, prevede la modifica delle normative europee sulla privacy, tenendo in considerazione sia la raccolta dei dati personali eseguita dagli organi di controllo, sia i dati i personali delle attività private dei singoli cittadini. Come già specificato l'ente introduce le normative per tutti i velivoli senza pilota a bordo con massa al decollo superiore ai 150 Kg, mentre per quanto riguarda quelli di massa inferiore al decollo, impone ai membri che ne fanno parte di realizzare una regolamentazione adeguata secondo le esigenze del singolo stato. Attualmente a livello internazionale, l'ente prevede delle norme europee comuni e obblighi utili sia per i produttori che per gli operatori. Successivamente sono state inserite nuove norme con il Regolamento di esecuzione 2019/947, sostituendo le norme nazionali di ogni singolo stato appartenente.

Nel 2010 è stato presentato un ulteriore testo pubblicato dall'ICAO - International Civil Aviation Organization (Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile) con la circolare n. 238 "Unmanned Aircraft Systems (UAS)", inserendo delle normative riguardanti anche gli aeromobili senza pilota a bordo, con MTOM superiore ai 150 Kg, tenendo conto dei principi espressi nella Convenzione di Chicago, e di tutti i requisiti necessari quali licenze del pilota, immatricolazione, assicurazione e aeronavigabilità.

Figura 73 Logo ICAO

Nel 2014 viene presentata la Comunicazione della Commissione Europea COM 207 "A new era for aviation: Opening the aviation market to the civil use of remotely piloted aircraft systems in a safe and sustainable manner" che prevede la realizzazione di una serie di norme utili per controllare l'utilizzo dei velivoli senza andare a ostacolare lo sviluppo e l'impiego professionale di questo settore.

Nel 2015 grazie alla Dichiarazione di Riga, la Commissione Europea stabilisce una serie di regole standard necessarie alla regolamentazione degli aspetti riguardanti la sicurezza, la privacy, la responsabilità e l'assicurazione. Viene introdotto l'obbligo di collocazione di un QR-Code associato all'operatore, utile per la sua individuazione qualora si verifichino situazioni pericolose e voli in aree vietate.

Sempre nel 2015, l'EASA introduce il documento "Concept of Operations for Drones" dove vengono identificati tutti i limiti necessari da rispettare, le modalità di volo, le categorie di appartenenza dei velivoli e stabilito se è necessario essere in possesso dell'attestato per poter pilotare gli UAS. Nel 2019 con l'entrata in vigore del Regolamento di esecuzione UE 2019/947, viene rimossa la distinzione tra volo professionale e amatoriale, viene introdotto il sistema di identificazione remota e l'obbligo di registrazione del velivolo sui portali di controllo del volo. È stata presentata la suddivisione dei velivoli in tre differenti categorie in base alle tipologie di operazioni, alla valutazione dei rischi verso persone o proprietà suddividendole in :

- ***Open category***: riguarda le operazioni a basso rischio, con possibilità di operare in aree non soggette a rischio sicurezza (ad esempio lontano dagli aeroporti), con un limite massimo di utilizzo di 150 m per l'altezza e un raggio di azione di 500 m, includendo tutti i velivoli di peso inferiore ai 25 Kg, con un quota massima di volo di 120 m e operazione condotta in VLOS, senza la necessità di richiedere specifiche autorizzazioni prima di effettuare l'operazione. In base alla tipologia di volo essa viene suddivisa in tre diverse categorie:
    - **A1** - volo sopra le persone (altezza massima di volo 120 m) ;
    - **A2** - volo vicino alle persone (altezza massima di volo 120 m, distanza di 30 m dalle persone con possibilità di riduzione a 5 m in modalità velocità bassa) ;
    - **A3** - volo lontano dalle persone (altezza massima di volo 120 m, distanza di 150 m dalle persone e aree urbane) ;

- ***Specific category***: a differenza della prima il rischio per le operazioni è più elevato e richiede la comunicazione dell'esecuzione della missione di volo alle autorità aeronautiche, e il rilascio dell'autorizzazione da parte di esse.

- ***Certified category***: è quella più pericolosa e riguarda le operazioni rischiose che richiedono determinate autorizzazioni pur rispettando le regole aeronautiche. Vengono paragonate alle missioni di volo eseguite da velivoli con pilota a bordo, e richiedono l'acquisizione delle stesse certificazioni.

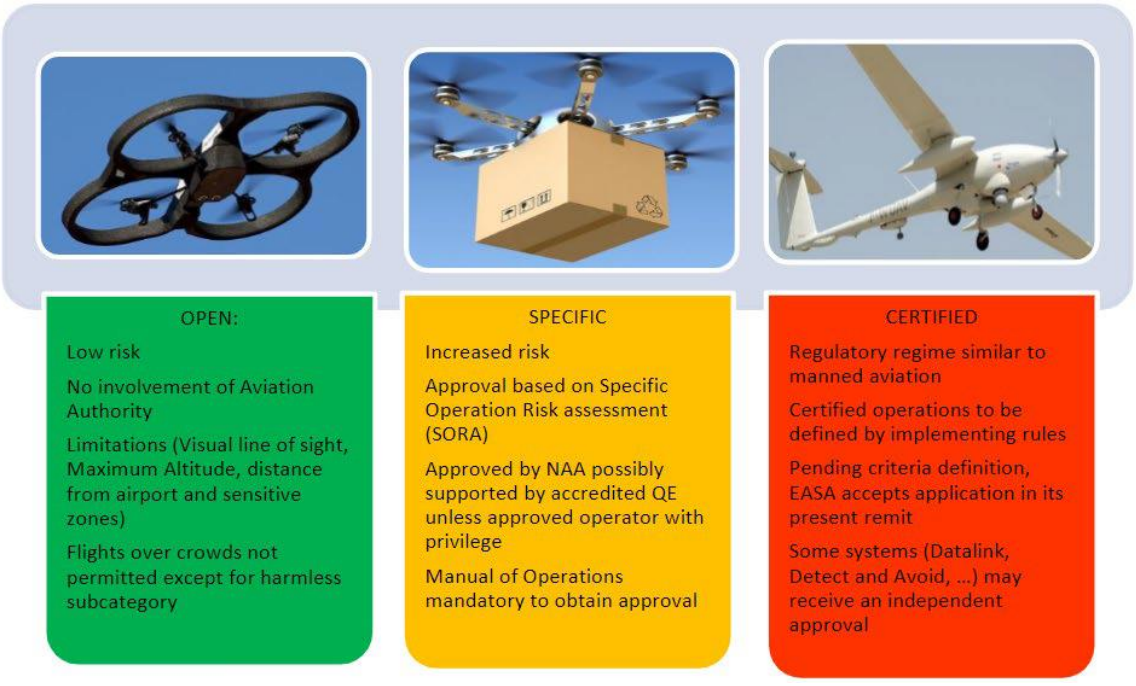


Figura 74 *dispense Corso droni per il rilievo territoriale e architettonico , Chiabrando 2020-2021*

Per quanto riguarda l'*Open category,* il Regolamento Europeo suddivide i velivoli in un'ulteriore sottocategoria, classificandoli in cinque differenti classi in base al peso al decollo. Ogni singola classe avrà dei valori stabiliti entro i quali il velivolo appartenente alla relativa classe può operare. Questa suddivisione consente di ottenere la marcatura di classe CE[16] in base alle seguenti sottocategorie:

Classe C0 (Sottocategoria A1) :

Peso massimo al decollo : inferiore a 250 g
Velocità massima : 19 m/s
Altezza massima : 120 m
Registrazione : No, se non presente la fotocamera e se è considerato un giocattolo

Classe C1 (Sottocategoria A1) :

Peso al decollo : inferiore a 900 g
Velocità massima : 19 m/s
Altezza massima : 120 m
Registrazione : Sì

Classe C2 (Sottocategoria A2) :

Peso massimo al decollo : inferiore a 4 Kg
Velocità massima : Illimitata
Altezza massima : 120 m
Registrazione : Sì

Classe C3 (Sottocategoria A3) :

Peso massimo al decollo : inferiore a 25 Kg
Velocità massima : Illimitata
Altezza massima : 120 m
Registrazione : Sì

Classe C4 (Sottocategoria A3) :

Peso massimo al decollo : inferiore a 25 Kg
Velocità massima : Illimitata
Altezza massima : 120 m
Registrazione : Sì

Dal 1 Gennaio 2024 il Regolamento Europeo consentirà l'esecuzione di operazioni che rientrano nella *Open Category* solo con velivoli provvisti di marcatura di classe CE appartenente dalla classe C0 a C4, oppure operazioni effettuate con velivoli costruiti privatamente che non necessitano di marcatura di classe solo se acquistati prima del 31 dicembre 2023.

[16] marcatura di classe CE è stabilità dal Regolamento Europeo 765/2008 e consente di identificare la classe di appartenenza del velivolo che attesta la sua conformità riguardo tutte le normative stabilite dall'ente di volo.

Per poter eseguire una missione di volo con un velivolo appartenente alle precedenti classi, è necessario essere a conoscenza delle seguenti operazioni suddivise in "*non critiche*" e "*critiche*".
Le *non critiche* sono quelle condotte in VLOS, lontano da assembramenti di persone, agglomerati urbani o infrastrutture sensibili, dove in caso di malfunzionamenti, non si prevedono danni a terzi. Sono condotte ad almeno 50 m dalle persone e ad una distanza orizzontale di 150 m da aree congestionate, in condizioni di luce diurna e non per ultimo al di fuori delle zone ATZ- Aerodrome Traffic Zone.

Le *critiche* invece sono quelle che non rispettano quanto previsto dalle prime e permettono quindi di avvicinarsi ai centri urbani analizzando il livello dei rischi e ovviamente richiedendo le autorizzazioni necessarie a volare vicino alle persone sempre sotto controllo visivo da parte dell'operatore.

A loro volta possono svolgersi in :

- ***VLOS - Visual Line of Sight**, operazioni condotte entro una certa distanza, sia orizzontale che verticale, tale per cui il pilota remoto è in grado di mantenere il contatto visivo continuativo con il mezzo aereo, senza aiuto di strumenti per aumentare la vista, tale da consentirgli un controllo diretto del mezzo per gestire il volo, mantenere le separazioni ed evitare collisioni*[17];

- ***EVLOS - Extended VLOS**, operazioni condotte in aree le cui dimensioni superano i limiti delle condizioni VLOS e per le quali i requisiti del VLOS sono soddisfatti con l'uso di metodi alternativi ;*

- ***BVLOS - Beyond VLOS**, operazioni condotte ad una distanza che non consente al pilota remoto, di rimanere in contatto visivo diretto e costante con il mezzo aereo, che non consente di gestire il volo, mantenere le separazioni ed evitare collisioni.*

  (Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto _ ENAC_Edizione 2 del 16 luglio 2015, Emendamento 2 del 22 dicembre 2016)

Per poter identificare le aree in cui è possibile operare, l'EASA individua quattro differenti zone che regolano l'utilizzo o meno dei velivoli. Ovviamente ogni singolo stato appartenente all'ente può individuare o modificare le aree in cui non è consentita l'esecuzione delle missioni di volo e le aree per le

[17] la distanza entro cui possono essere svolte operazioni in VLOS è funzione della capacità del pilota di determinare l'effettiva condizione dell'APR in termini di posizione, assetto e velocità, nonché presenza di ostacoli e altri aeromobili. Il pilota è il responsabile finale nel determinare le condizioni di VLOS, che possono essere influenzate da condizioni meteo, posizione del sole e ostacoli. (ENAC - Regolamento APR_Edizione 3_Emendamento 1)

quali è necessario richiedere l'autorizzazione. Vengono individuate, come visibile in Fig.xx da : *Geo Zone escluse* individuate nelle mappe dal colore rosso dove non è consentito il volo di qualsiasi velivolo, *Geo Zone ristrette* identificate dal colore giallo dove vigono determinati limiti che consentono il volo solo attraverso l'autorizzazione in quanto possono essere nei pressi degli aeroporti, zone militari e ecc., *Geo Zone facilitate* dove nella categoria *Open* è possibile effettuare le missioni di volo rispettando i limiti e le linee guida fornite degli enti nazionali, e infine *Spazio Aereo U-Space,* uno spazio aereo definito all'interno del quale è possibile effettuare operazioni di volo di ogni tipo con velivoli di ogni classe. Quest'area attualmente in fase sviluppo da parte degli enti di aviazione internazionale e nazionale, fornisce un insieme di funzioni, processi automatizzati e digitali utili a gestire il traffico aereo tradizionale e quello dei mezzi a pilotaggio remoto, garantendo la possibilità ai velivoli utilizzati in ambito sia professionale che civile, di interagire tra di loro attraverso sistemi di comunicazioni automatici, garantendo maggiore sicurezza e controllo del traffico aereo.

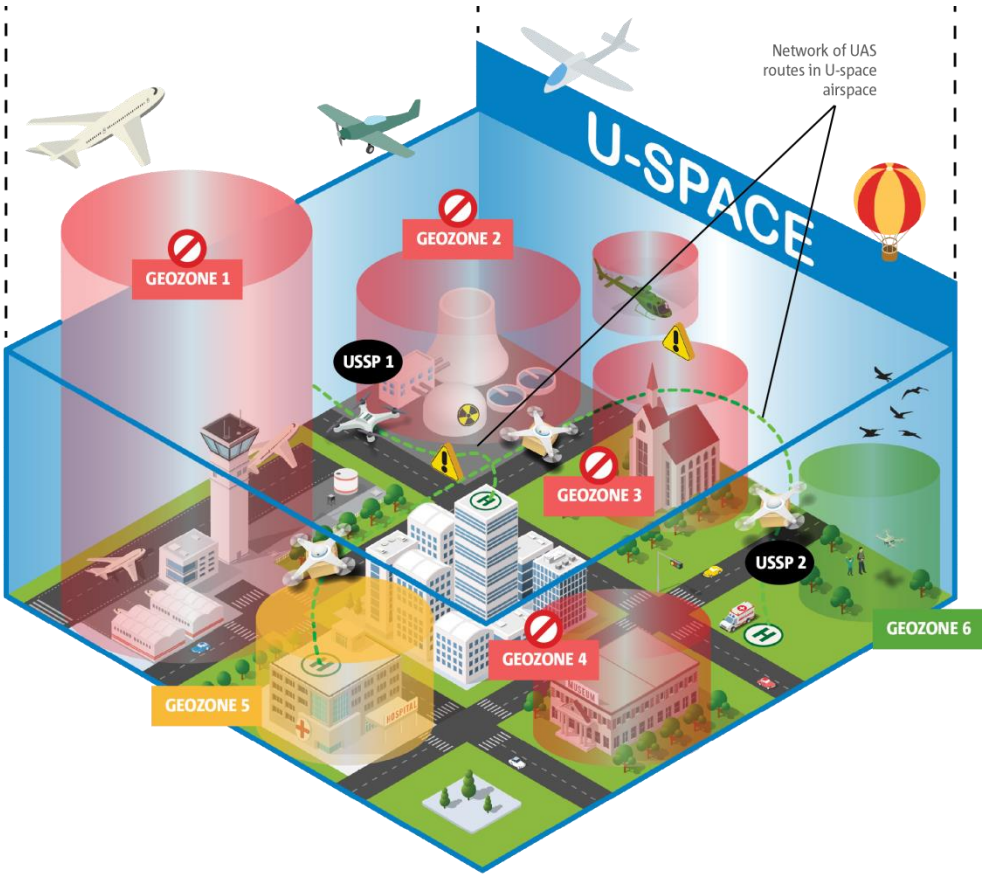


Figura 75 Geozone per l'utilizzo degli UAS, EASA

Per quanto riguarda il territorio Italiano, l'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo - ENAV, si occupa della gestione del controllo del traffico aereo civile e dei servizi dedicati per l'assistenza alla navigazione in Italia. Gestisce principalmente le Informazioni, la Meteorologia, la Cartografia Aeronautica e le Procedure di volo e infine per le Radiomisure.

Figura 76 Logo ENAV

L'ente che invece controlla la regolamentazione dei velivoli radiocomandati senza la presenza del pilota a bordo sul territorio Italiano è l'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile). Nato nel 1997, gestisce tutte le attività che riguardano l'indirizzo, il controllo e la vigilanza indipendentemente dal tipo di velivolo o dalla tipologia di operazioni, stabilendo una serie di normative che permettono e regolano l'utilizzo dei velivoli, fornendo una serie di funzioni tra cui :

Figura 77 Logo ENAC

1. Regolamentazione tecnica, attività ispettiva, sanzionatoria, di certificazione, di autorizzazione, di coordinamento e di controllo, nonché la tenuta degli albi e dei registri nei settori di competenza;

2. Rapporti con Enti, società ed organismi internazionali, nonché funzioni di rappresentanza anche su delega del Ministero dei Trasporti;

3. Istruttoria atti su tariffe, tasse e diritti aeroportuali per conto del Ministero dei Trasporti;

4. Definizione e controllo parametri di qualità dei servizi aeroportuali e del trasporto aereo;

5. Regolamentazione, esame e valutazione dei piani regolatori aeroportuali, dei programmi di intervento e dei piani di investimento aeroportuale.

(Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021)

Realizzato secondo le linee guida presentate dall'EASA, l'ente realizza il regolamento "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" nel 2015, prevedendo nel testo alcune modifiche riguardanti le altezze massime, le quote di volo, i limiti di peso e la suddivisione in tre differenti classi, i velivoli a pilotaggio remoto senza la presenza del pilota a bordo e la distinzione fondamentale tra aeromobili a pilotaggio remoto e aeromodelli. Successivamente viene modificato con le nuove leggi realizzate dal Regolamento Europeo, aggiornato nel 2019 con il Regolamento "Mezzi aerei a Pilotaggio Remoto" - Edizione 3 del 11 novembre 2019. Nel 2020 viene ulteriormente modificato con il Regolamento "Mezzi aerei a Pilotaggio Remoto" - Edizione 3, Emendamento 1 del 14 luglio 2020. Quest'ultimo viene abrogato a seguito dell'attuale

Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021, definendo alcuni degli aspetti normativi aggiornati secondo il Regolamento Europeo.

Il regolamento realizzato dall'ENAC, identifica con l'acronimo SAPR - Sistemi a Pilotaggio Remoto, includendo tutti quelli con massa al decollo inferiore a 150 Kg. Per quanto riguarda la *Open category*, l'ente identifica ulteriori due categorie tra cui *Aerodina* all'interno della quale sono identificati tutti i velivoli di massa più pesante dell'aria, e *Aerostati* che comprende tutti i mezzi più leggeri dell'aria (es. mongolfiere, dirigibili e ecc..). Nel caso dei *droni* viene fatto riferimento alla prima che, a sua volta, identifica i velivoli ad *ala fissa* o ad *ala rotante* (come già descritto nel Capitolo II). Le normative sono state realizzate tenendo riferimento a quelle definite dall'EASA, così come la suddivisione delle differenti categorie, classi e operazioni (precedentemente elencate).

Dal 1° marzo 2020 è entrato in vigore l'obbligo per tutti gli operatori che utilizzano UAS per attività professionali, di registrare il proprio velivolo nello stato di residenza, in modo da ottenere un codice identificativo QR, utile all'individuazione del velivolo e dell'operatore qualora si verifichino operazioni pericolose o voli in zone vietate. Lo stesso regolamento vale anche peri droni sotto i 250 g che, essendo dotati di sensori capaci di acquisire immagini, necessitano di un QR code e di un'assicurazione. Attualmente secondo le normative stabilite dall'UE e dagli enti nazionali, per i velivoli sotto i 250 g, l'operatore non è tenuto a essere in possesso dell'attestato di competenza, nonostante per l'utilizzo sono comunque richieste alcune competenze e conoscenze dei limiti, di cui la consultazione delle mappe del portale D-Flight, per verificare limitazioni nelle aree di volo.

Dal 1 luglio 2020, il Regolamento Europeo inserisce l'obbligo di conseguire l'attestato per poter operare con UAS di peso maggiore o uguale a 250 g e una massa operativa al decollo minore di 25 Kg. Sul territorio Italiano, l'ENAC si occupa rilasciare gli attestati a seguito dello svolgimento di test per la verifica dell'apprendimento del regolamento dei "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto".

Dal 1 gennaio 2024 il regolamento europeo sarà modificato per poter includere i droni al di sotto dei 250 g , nella Open Category A1 con marcatura Open CE.

Come già specificato nel regolamento EASA, quello prodotto dall'ente nazionale ENAC, prevede inoltre la presentazione dall'operatore, di una serie di documenti di cui quelli elencati nell'Art 8 dell'attuale regolamento :

- Manuale del velivolo
- Manuale delle operazioni
- Manuale della manutenzione
- Tabella delle prestazioni testate

- Assicurazione
- Attestato del pilota

Per quanto riguarda l'assicurazione, L'art. 27 del Regolamento ENAC specifica che per <<le operazioni con un UAS è imprescindibile la stipula di un'assicurazione concernente la responsabilità verso terzi, adeguata allo scopo. Il mezzo deve essere sempre assicurato indipendentemente dall'attività che si andrà a svolgere>>.

L'Attestato del pilota è sicuramente il documento più importante tra tutti, in quanto certifica il percorso formativo seguito dal pilota, riguardante la normativa e la capacità di pilotare il mezzo in modo corretto, al fine di condurre una missione di volo sicura. In base alla tipologia di missione e alle categorie di appartenenza precedentemente elencate (open, specific e certified), possono essere necessari attestati differenti che a loro volta possono richiedere ulteriori autorizzazioni.

Oltre alla documentazione precedentemente elencata, è opportuno eseguire alcune procedure fondamentali prima di ogni operazione :

- Verifica della quota degli ostacoli e dei fabbricati intorno all'area
- Controllo dell'attrezzatura per un efficiente missione di volo
- Pianificazione dell'operazione
- Controllo dei NOTAM (Notices To AirMen)
- Controllo del METEO

Il NOTAM , comunica tutte le informazioni, segnalazioni, divieti e procedure in uso temporaneamente difformi da quanto pubblicato in AIP (Aeronautical Information Publication) o che subiranno un cambiamento permanente (PERM). Sono avvisi sullo stato di funzionamento e le modifiche apportate agli aeroporti, ostacoli, radio-aiuti, servizi, procedure e attività attinenti la navigazione aerea, in modo da consentire al personale addetto alle operazioni di volo di essere a conoscenza di tutte le informazioni necessarie. (Regolamento UAS-IT Ed 1 del 4 gennaio 2021)

Sempre a livello nazionale, la società D-Flight si occupa della fornitura dei servizi di dichiarazione, di geo-consapevolezza, di registrazione, di identificazione del velivolo a distanza e della realizzazione di mappe del territorio nazionale, con individuazione delle aree in cui e possibile operare o no, a seconda dei limiti imposti e alla presenza di infrastrutture sensibili. Attraverso la registrazione sul portale www.d-flight.it è possibile accedere alle mappe dell'area nella quale si intende effettuare la missione di volo. Le aree sono suddivise in tre differenti tipologie :

Figura 78 Logo D-Flight

- Aree proibite (aree **P**) laddove il volo è sempre vietato ;
- Aree ristrette (aree **R**) quando sono soggette a certe condizioni (p.e.: giorni/orari);
- Aree pericolose (aree **D**) quando al loro interno si svolgono attività pericolose per la navigazione aerea;

In base a queste tipologie, prima di effettuare una qualsiasi missione di volo, l'operatore è tenuto a pianificare la missione di volo sul portale, scaricare un codice QR identificativo e posizionarlo sul velivolo, escludendo ovviamente la categoria sotto i 250g qualora si tratti di velivolo ad uso ricreativo e senza la presenza di sensori per le riprese aeree.

A seconda delle limitazioni nei pressi degli aeroporti, le zone vengono identificate da colori ai quali vengono associati i limiti come descritti in Tab.3.

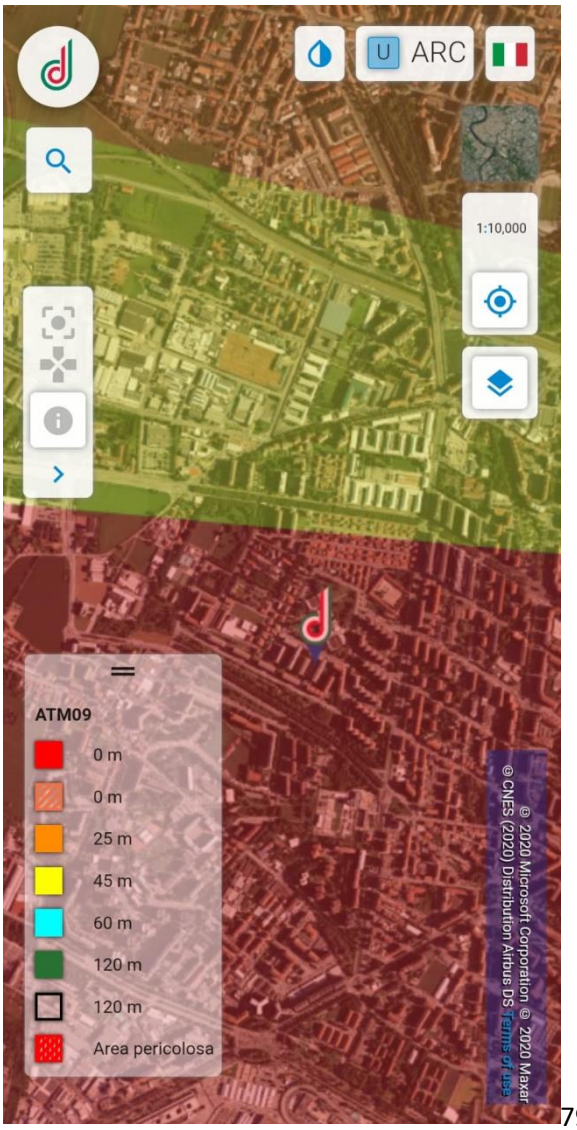
Tabella 3 Limitazioni aeroporti _ *dispense Corso droni per il rilievo territoriale e architettonico, Chiabrando 2020-2021*

AREA	Pista Strumentale long / lat	Pista non Strumentale long / lat	Eliporti non strumentali	Militari	Quota MAX
ROSSA	Fino 6/2 Km	Fino 3/1 Km	Fino 1,5 Km raggio	Fino 6 Km raggio (fuori ATZ)	0
ARANCIO	Fino 10/4 Km	Fino 6/2,5 Km	Fino 2,5 Km raggio	Fino 10 Km raggio	25
GIALLA	Fino 15/8Km	Fino 10/4Km	Fino 3,5 Km raggio	Fino 15/8 Km (long/lat)	45
AZZURA	Oltre 15/8Km	Oltre 10/4Km	Oltre 3,5 Km raggio	Oltre 15/8Km (long/lat)	60 (in CTR) 120 (fuori)

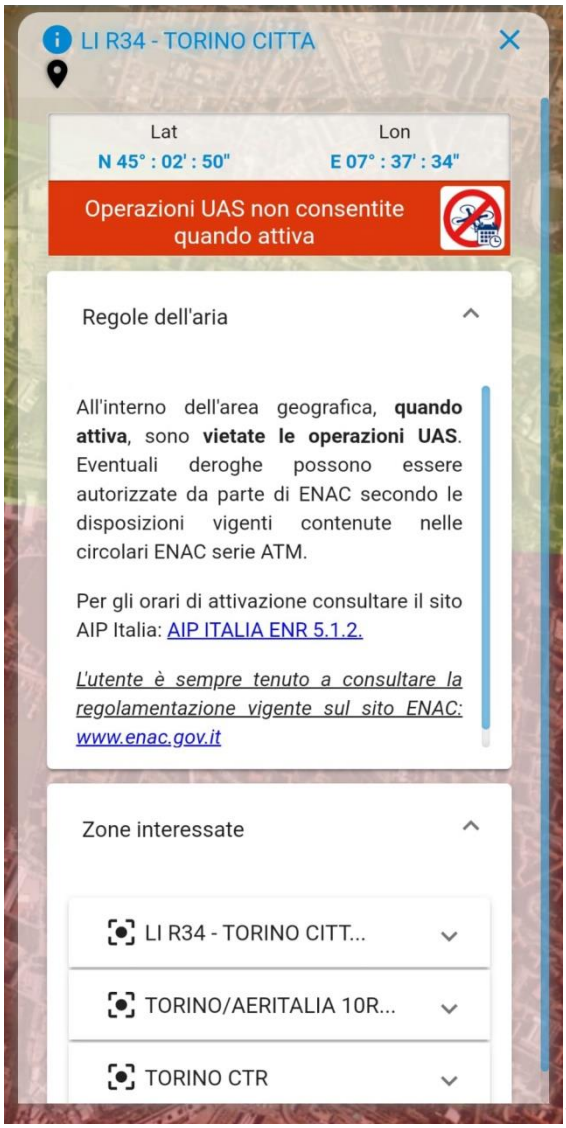
Per gli spazi aerei, sono identificate delle aree nei pressi degli aeroporti necessarie per la regolamentazione del traffico aereo, divise in :

- ATZ - Aerodrome Traffic Zone / Zona di Traffico Aeroportuale che rappresenta uno spazio aereo intorno all'aeroporto
- CTR - Control Zone / Zona di Controllo utile per il flusso del traffico IFR (Instrument Flight Rules) in avvicinamento o allontanamento rispetto a un aeroporto.

Nel caso dell'area di rilievo dell'Istituto Alvaro - Gobetti, sono state consultate le mappe presenti sul portale D-Flight per verificare la possibilità di effettuare la missione di volo. Dalle mappe visualizzate, l'area oggetto di rilievo si trova nella zona rossa per la vicinanza all'Aeroporto Internazionale di Torino-Caselle e non consente le operazioni con UAS come visibile in Fig.77A e 77B.



79A



79B

Figura 79 A (Mappa visualizzata sul portale D-Flight) **e 79 B** (Regole dell'aria di rilievo visibili su D-Flight)

L'area interessata si trova nella zona LI R34 - TORINO CITTA' identificata come Zona Regolamentata vietata al sorvolo del traffico civile 24 h su 24h per motivi di sicurezza. Inoltre interessa i limiti della zona TORINO/AERITALIA 10R/28L associata all'aeroporto civile non strumentale e la zona TORINO CTR (Zona di controllo di Torino).

TORINO CTR - Le operazioni dei SAPR all'interno dei CTR sono consentite esclusivamente ai sistemi con mezzi aerei di massa operativa al decollo minore di 25 kg, fino ad un'altezza massima di 70 m AGL e fino ad una distanza massima sul piano orizzontale di 200 m.

LI R34 - TORINO CITTA' - Le operazioni dei SAPR non possono essere condotte all'interno delle aree regolamentate attive. All'interno di quest'area le operazioni specializzate critiche e non critiche possono essere condotte solo previa autorizzazione da parte di ENAC.

In questo caso per consentire l'esecuzione del rilievo, sono state richieste le autorizzazioni all'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile - ENAC e ai Vigili Urbani della Città di Torino, ottenendo l'autorizzazione utile per di svolgere la missione di volo, con limitazione di volo esclusivamente all'interno del perimetro dell'area di rilievo rispettando tutti i limiti e procedure per la sicurezza descritte nel Regolamento ENAC, al fine di garantire l'esecuzione della missione di volo.

CONCLUSIONI

In conclusione alle normative sopra presentate, è possibile verificare come con la continua crescita dei sistemi a pilotaggio remoto, gli organi responsabili per l'aviazione aerea dei diversi stati, hanno adottato le normative stabilite dall'EASA (Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea), riadattandole in base alle necessità dello spazio aereo nazionale. Grazie anche all'aggiornamento del Regolamento Europeo, dal 2024 ogni singolo velivolo prodotto, sarà inserito in una delle categorie sopra elencate, obbligando ogni operatore ad entrare in possesso dell'attestato per pilota, di registrare il proprio mezzo sui portali dedicati entrando in possesso di un QR-code. Queste modifiche sono state definite per poter controllare il traffico aereo, per formare gli operatori e per inserire l'obbligo della sottoscrizione della copertura assicurativa per responsabilità civile verso terzi.

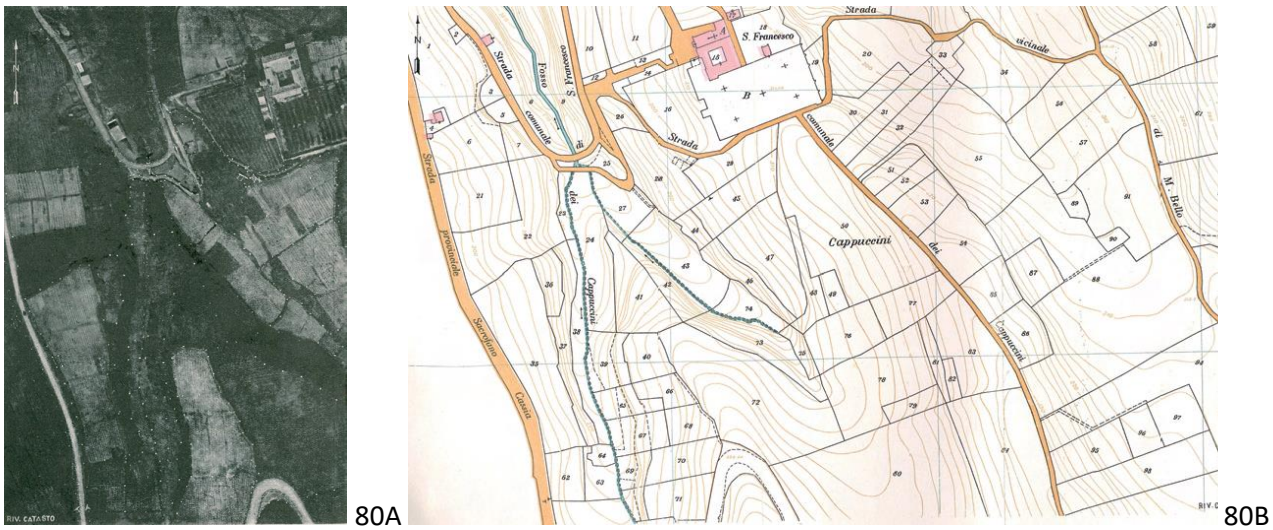
6. APPLICAZIONI DEL DRONE NELL'AMBITO DELL'ARCHITETTURA

Nel presente capitolo saranno presentati impieghi dei droni per le applicazioni nell'ambito dell'architettura, confrontando i differenti metodi utilizzati. Saranno analizzati alcuni esempi, portando il velivolo ad essere uno strumento fondamentale nel campo professionale grazie alle sue capacità e ai numerosi vantaggi. Il drone oggi permette l'applicazione in diversi contesti e per quanto riguarda la realizzazione di progetti, può essere utilizzato in diverse fasi del rilievo o dell'analisi di un sito, dalle indagini preliminari del terreno o del fabbricato, alla fase di costruzione o realizzazione dell'opera, sino all'ispezione finale di verifica del completamento. Sono anche impiegati nelle fasi successive del monitoraggio del sito e della verifica dell'integrità della struttura e delle componenti.

Il termine drone viene sempre più utilizzato in Architettura, in quanto è uno degli strumenti fondamentali per lo svolgimento delle operazioni di rilievo e analisi di aree o fabbricati. Grazie alla varietà di sensori presenti è possibile ottenere dati ed informazioni necessarie per condurre ricerche, sia direttamente sul campo, sia analisi effettuate sui dati acquisiti ed elaborati all'interno di software dedicati.

- **6.1 APPLICAZIONI CATASTALI**

Con il diffondersi della tecnologia dei sistemi a pilotaggio remoto SAPR, l'applicazione dei droni trova impiego anche nelle applicazioni catastali. A seguito delle caratteristiche e delle potenzialità elencate nei capitoli precedenti, l'impiego di questi mezzi consente di ottenere dati molto precisi grazie alla sensoristica di alto livello, alla capacità di acquisizione di immagini di luoghi difficilmente accessibili da un tecnico e all'elaborazione dei dati attraverso software dedicati. Proprio grazie a questi vantaggi il Catasto Italiano, organo nato per l'archiviazione di mappe, documenti e atti che riportano un insieme di dati riguardanti i singoli immobili di cui informazioni sulle caratteristiche tecniche, sulle superfici e sui nominativi dei possessori, fu uno dei primi ad introdurre l'impiego del metodo aerofotogrammetrico già nel 1934. Questo metodo è basato sull'acquisizione di più fotogrammi aerei secondo una determinata frequenza e consente di realizzare un modello ottico tridimensionale del terreno attraverso dei restitutori, il quale, una volta ottenuto, permette di ottenere informazioni planimetriche ed altimetriche di punti identificati sul modello. Questo metodo sviluppato da Nistri e Santoni, richiede l'acquisizione di dati riguardanti punti di appoggio sul terreno per il passaggio al sistema di coordinate cartografiche. Questo metodo documentato sempre nello stesso anno sotto il titolo "Esperimenti di fotogrammetria aerea per la formazione delle mappe del Catasto italiano" e pubblicato sulla Rivista del Catasto e dei Servizi Tecnici Erariali, n. 1 del 1934 Figure 2a e 2b), utilizzato in parallelo al metodo di rilevamento tradizionale, ha concesso la realizzazione di mappe catastali di diversi territori provinciali del Lazio (illustrati nelle immagini).



80A 80B

Figura 80 A e 80 B La cartografia catastale, plano-altimetrica, del Comune di Campagnano Romano nella Rivista del Catasto e dei Servizi tecnici Erariali n. 1, anno 1934 (fotogramma originale) e (cartografia)

Grazie a questi metodi sono state effettuate diverse prove di acquisizione, arrivando ad utilizzare agli inizi del XXI secolo con lo sviluppo dell'era del web, dei Database Topografici contenenti dati riguardanti un insieme di oggetti (lineari, areali e puntiformi) legati da relazioni topografiche. Grazie a questi dati

ottenuti dall'elaborazione di immagini attraverso software dedicati, è possibile ottenere informazioni di oggetti che identificano la posizione geografica attraverso le coordinate, le relazioni di vicinanza tra gli oggetti e per finire gli attributi che indicano la tipologia, lo stato e la destinazione d'uso. Nonostante la grandissima quantità di dati disponibili, l'Agenzia delle Entrate tutt'ora necessita di un continuo aggiornamento dati 3D e catastali come base per il Geographic Information System (GIS) e per applicazioni di mappatura del terreno. Questo implica l'utilizzo di metodi di acquisizione che consentono di integrare più informazioni possibili come immagini, ortofoto, modelli tridimensionali di edifici o infrastrutture e modelli digitali di elevazione (DEM). Proprio per la necessità di avere tutti questi dati in tempi relativamente brevi e l'acquisizione di dati georeferenziati ad alta precisione, il sistema catastale punta all'integrazione degli SAPR.

ESEMPIO DI RILIEVO CON GNSS E SAPR

Negli ultimi anni il continuo aumentare della domanda da parte degli enti nell'ottenere dati costantemente aggiornati, fa sì che l'integrazione dei sistemi SAPR sia sempre di più una realtà che permette di migliorare la modalità di acquisizione dei dati in tempi molto brevi e con costi più contenuti. Uno degli esempi dell'utilizzo di SAPR per le applicazioni catastali, è quello citato sul sito di "The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing"[18], nel quale articolo "UNMANNED AERIAL VEHICLE IN CADASTRAL APPLICATIONS - M. Manyoky, P. Theiler, D. Steudler, and H. Eisenbeiss" vengono comparate due tipologie di dati di qui quelli acquisiti attraverso l'utilizzo dei droni e quelli ottenuti tramite le tecniche tradizionali di rilevamento tramite GNSS (Global Navigation Satellite System) effettuata nel 2011.

81A

81B

Figura 81 A Immagine della prima area localizzata a Krattigen/BE
Fig. 81 B Immagine della seconda area localizzata al Campus Science City (Hoenggerberg) ETH Zurich. Entrambe le immagini sono state eseguite tramite SAPR.

[18] https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XXXVIII-1-C22/57/2011/

Lo studio effettuato consiste nell'analisi di due aree diverse localizzate sul territorio Svizzero e nella comparazione delle diverse tecniche per dimostrare le potenzialità dei sistemi SAPR e il loro utilizzo in sostituzione ai metodi di rilievo convenzionali.
I metodi di confronto utilizzati sono quello eseguito con i sistemi GPS/GNSS e la stazione totale, utilizzati proprio per la caratteristica dell'elevata accuratezza utile per l'aggiornamento di mappe di aree molto vaste, e i sistemi SAPR che, a seconda dell'equipaggiamento e dei sensori presenti, permettono di ottenere dati precisi grazie ai sensori di navigazione e posizionamento, e qualità delle immagini elevate grazie alla risoluzione dei sensori di immagine. La possibilità di operare a diverse altezze e non per ultimo di acquisire immagini seguendo un piano di volo portano ad una maggiore quantità di dati utili per le successive elaborazioni.

Per il rilievo tramite GNSS sono stati utilizzati le attrezzature della Leica di cui;
Leica TPS System 1200 con un grado di precisione fino a 2 mm
Leica GPS System 1200 con un grado di precisione tra 2-3 cm

Per il rilievo tramite UAV è stato utilizzato il modello Falcon 8 prodotto dalla Ascending Technologies (AscTec), caratterizzato dalla presenza di otto rotori che conferiscono maggior stabilità al velivolo durante il volo e una capacità di payload di 500g. Per la precisione l'UAV è equipaggiato con dei sistemi di posizionamento GNSS, sensori barometrici per il rilievo dell'altezza, un compasso e un'unità IMU. Il sensore imaging presente sul velivolo è una camera Panasonic Lumix DMC-LX3, dal peso di 265g, con un sensore da 10 Megapixel con un'apertura di focale da 24mm.

Con la strumentazione sopra elencata, il rilievo è stato effettuato seguendo un workflow che consiste nell'acquisizione dei dati, nella loro elaborazione, e per finire nella realizzazione di mappe utili per l'aggiornamento del catasto.

- DATI ACQUISITI TRAMITE GNSS e stazione totale

  Per l'acquisizione dei dati tramite il GNSS, sono stati utilizzati dei metodi prestabiliti dagli standard Svizzeri sul monitoraggio catastale. Sono stati rilevati dei punti necessari all'individuazione dei confini territoriali e strade. Per quanto riguarda il rilievo dei fabbricati invece, è stata utilizzata la stazione totale, ottenendo dati successivamente rielaborati per la realizzazione di planimetrie e per il confronto con i dati presenti sul Catasto Svizzero. Grazie al rilievo è stato possibile individuare la presenza di nuovi fabbricati, modifiche dei lotti e la presenza di alberi.

- DATI ACQUISITI TRAMITE UAV

  Per il rilievo tramite UAV sono state effettuate alcune operazioni di calibrazione della camera, per la corretta acquisizione delle immagini e dei target posizionati sul terreno. Inoltre la corretta pianificazione del piano di volo porta di scattare immagini anche a bassa quota e da diverse angolazioni grazie all'inclinazione del sensore che al volo longitudinale e trasversale dell'area rilevata.
  Una volta ottenuti i dati, sono stati rielaborati all'interno del software ArcGIS per la realizzazione di una mappa modellata a seconda dei punti, dei fabbricati e degli alberi rilevati per entrambe le aree.

Comparando i due metodi di rilievo, è stato possibile confrontare il grado di precisione ottenuto e il tempo necessario per lo svolgimento e l'elaborazione dei dataset.
Per il metodo di rilievo tramite il GNSS e stazione totale, è possibile ottenere dati con una precisione al centimetro, esclusivamente dei punti rilevati dall'operatore a differenza del metodo UAV con il quale viene acquisita una quantità maggiore di dati.

Per la verifica delle misure ottenute attraverso la strumentazione utilizzata, il Catasto Svizzero fa riferimento al VAV 2008 e TVAV 2008, nel quale vengono indicate le tolleranze specificate nell'articolo 3, identificate a seconda di una delle 5 aree in cui è collocata l'area di rilievo.
L'area di test del Campus Science City ETH Zurich è collocata nella zona TS2 (Built-up areas and construction zones), mentre quella di Krattigen è collocata nella zona TS2 (Intensively used agricultural and forested areas). A seconda della zona, il TVAV individua dei parametri entro i quali devono rientrare le misure come, ad esempio, quelli indicati nella tabella a seguire.

Tabella 4 Tabella Swiss TVAV con le precisioni delle due aree di rilievo

Accuracies	**Zones**	
	TS2	TS3
Land ownership	3.5cm	7cm

Per la verifica dei dati, l'accuratezza che può registrare la stazione totale si può misurare in millimetri mentre quella del GNSS ha delle coordinate 3D con una precisione che può andare attorno i 2-3cm, dati dichiarati dal singolo produttore. Ovviamente quest'ultimo dato può essere migliorato con l'affiancamento di una stazione di riferimento per ottenere maggior numero di informazioni.
Col primo metodo il grado di dettaglio delle misure dipende dalla precisione della strumentazione utilizzata, mentre col secondo dipende dalla qualità delle immagini che, a sua volta, dipende dal sensore

utilizzato, dalla sua calibrazione, dall'altezza di volo e dalla disponibilità di punti di controllo a terra che siano essi artificiali o naturali. Le immagini acquisite con UAV, a seguito di una corretta calibrazione dello strumento, vengono elaborate e controllate per la corretta individuazione dei target posizionati a terra nel caso in cui alcune delle immagini risultino poco definite a causa di vibrazioni del velivolo, della luce solare e in alcuni casi dalle possibili raffiche di vento. Uno dei punti a favore degli UAV è la possibilità di ottenere un elevata quantità di informazioni utili per la realizzazione di modelli tridimensionali di aree, di oggetti o di fabbricati, con la possibilità di effettuare misure direttamente sul modello e l'estrapolazione di ortofoto.

OSSERVAZIONE SUI DATI

I dati acquisiti attraverso la stazione totale e GPS/GNSS, sull'area di test del Campus Science City ETH Zurich (TS2) il grado di dettaglio è attorno i 0.5cm, mentre per l'area di test di Krattigen (TS3), la differenza tra le coordinate ufficiali e i punti rilevati è attorno i 2.5cm, contro i 3.5cm e 7cm richiesti dal catasto.

Per quanto riguarda il metodo di rilievo tramite UAV, in riferimento al TVAV del catasto Svizzero, la precisione per l'area del Campus Science City ETH Zurich, è di 1.8cm laterale.
Per l'area di Krattigen invece, la precisione è di 2.0cm laterale, valori molto più bassi rispetto alla precisione indicata in tabella di 3.5cm per TS2 e 7.0cm per l'area TS3.

OSSERVAZIONE SUL METODO DI RILIEVO

A seguito dei dati analizzati delle due aree di rilievo, è possibile confermare l'accuratezza di entrambe le attrezzature confrontando i risultati ottenuti con i valori di precisione stabiliti dal catasto Svizzero. Il metodo di rilievo tramite stazione totale e GPS/GNSS consente di ottenere una quantità di dati sufficiente per poter eseguire le verifiche necessarie su un lotto o fabbricato. Sono attualmente tra i metodi più utilizzati nel settore dell'architettura nonostante la corsa tecnologica punta al passaggio agli UAV. Quest'ultimi, sempre più conosciuti nell'ultimo decennio, hanno molti punti a favore, in quanto il loro utilizzo consente di velocizzare la procedura di rilievo e di ottenere più dati possibili necessari alla successiva elaborazione in software dedicati, per la restituzione di modelli tridimensionali, utili per successive analisi, misure ed estrapolazione di dati. Per quanto riguarda la velocità e la quantità di dati, lo UAV è lo strumento più adatto allo svolgimento dei rilievi aerofotogrammetrici, anche se in alcuni possono essere riscontrate problematiche legate al velivolo, alle condizioni meteo, ai divieti dell'area di rilievo oppure fattori come la calibrazione del sensore, il piano di volo, l'altezza del velivolo, l'inclinazione del sensore, fattori che vanno attentamente impostati in modo da ottenere il miglior

risultato possibile. Non da escludere sono i software necessari per l'elaborazione dei dati a la restituzioni dei modelli tridimensionali. La corretta esecuzione del piano di volo consente quindi di ottenere dati precisi con valori molto simili a quelli rilevati tramite GPS/GNSS e stazione totale. Il metodo di rilievo UAV risulta molto efficace nelle applicazioni catastali, permettendo di effettuare rilievi di grandi superfici e fabbricati, acquisendo più informazioni possibili con costi e tempi di esecuzione ridotti rispetto al rilievo tradizionale.

- **6.2 APPLICAZIONE PER LA SICUREZZA NEI CANTIERI**

L'utilizzo dei droni trova un importante impiego nel monitoraggio della sicurezza nei cantieri, aumentando il livello di supervisione per garantire maggiore sicurezza durante l'intero ciclo di esecuzione del cantiere.

L'argomento sulla sicurezza può ampliarsi in numerose sottocategorie, dal rilievo prima dell'inizio del cantiere, al monitoraggio durante le fasi di realizzazione e al completamento dell'opera. L'impiego nei cantieri può essere effettuato utilizzando un sistema a pilotaggio remoto munito di videocamera con sistema di comunicazione bidirezionale utile per la comunicazione tra l'operatore e gli operai. L'utilizzo dei droni può consentire inoltre l'analisi dettagliata del cantiere attraverso le fotografie acquisite e alla comunicazione in tempo reale, utile per garantire il controllo della sicurezza dell'intero cantiere, dalla supervisione dei lavoratori al controllo dei materiali e dell'equipaggiamento, con la possibilità di eseguire giornalmente le stesse verifiche al fine di garantire che i criteri necessari per la sicurezza vengono rispettati, riducendo i tempi di ispezione dell'area. Nel caso di cantieri molto grandi, la verifica richiede un maggior tempo per il controllo e nel caso della presenza di un solo tecnico incaricato per la sicurezza, l'attività risulta molto più complessa nel a monitorare situazioni pericolose e prevenire i possibili rischi interagendo direttamente con il personale presente in cantiere.

ESEMPI DI APPLICAZIONI

- La prima applicazione sull'utilizzo di droni per la sicurezza in cantiere condotta dal George Institute of Technology nel 2012 presenta dei test eseguiti per dimostrare la valutazione dei rischi presenti in cantiere attraverso l'utilizzo dei droni grazie a una serie di ricerche condotte per analizzare l'utilizzo di questa interfaccia nuova. La ricerca consiste nell'effettuare una serie di valutazioni attraverso l'applicazione nell'ambito cantieristico, analizzando immagini acquisite in tre diverse condizioni.

  Per fare ciò, è stato utilizzato un drone di quelli già presenti sul mercato, fornito di fotocamera capace di trasmettere immagini in tempo reale su sistemi operativi come pc, tablet e telefono grazie a software o applicazioni per il pilotaggio del mezzo. La ricerca è stata effettuata seguendo una serie di procedure (come elencate in Fig.82), necessarie per eseguire l'analisi, rivelando quelli che sono i pro e i contro nel suo utilizzo.

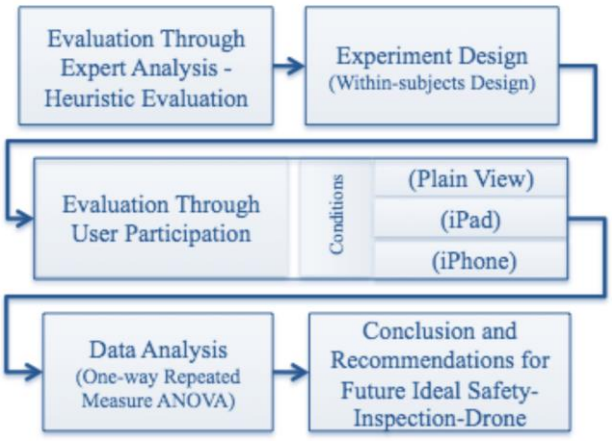


Figura 82 Procedure per la missione di volo

Per questa ricerca il drone utilizzato è stato quello prodotto dalla Parrot, modello AR.Drone.

- È stato condotto un test simulando un'ispezione di cantiere attraverso l'utilizzo di fotografie precedentemente effettuate con il drone, confrontando tre diverse condizioni di lettura delle immagini di cui:

  - Immagini analizzate su un telo da proiezione (A)
  - Immagini analizzate su cellulare iPhone (B)
  - Immagini analizzate su tablet iPad (B)

  Nel caso del test effettuato con lettura su iPhone e iPad (B), le immagini vengo analizzate tramite l'interfaccia utente FlightRecord (applicazione mobile). Il test è stato effettuato con la partecipazione di 10 volontari, per comparare i dati ottenuti nell'individuare il numero di elmetti visibili (dispositivi di protezione individuale DPI).
  Successivamente dopo la raccolta dei dati di ogni partecipante, viene effettuato un questionario dove ad ognuno viene chiesto di indicare le condizioni visive secondo una scala Likert a 7 punti (indicando con 1=fortemente in disaccordo fino a 7=fortemente d'accordo) come mostrato nella Tabella 1.

Tabella 5 *Irizarry, et al., 2012*

	Condizioni visive	Proiettore	iPad	iPhone
1	Posso completare questo compito efficacemente	6.4	4.8	3.7
2	Sono in grado di completare questo compito velocemente	6.3	5.1	4.8
3	Sono in grado di completare questo compito efficientemente	6.2	4.4	3.7
4	Sono a mio agio nell'utilizzo di questo sistema	6.3	4.5	3.7
5	La dimensione delle immagini è sufficientemente grande da poter individuare il numero di elmetti	6.7	5.1	3.1
6	Il compito è stato mentalmente impegnativo	2.7	2.7	3
7	Il compito è stato fisicamente impegnativo	1.9	2.5	2.6
8	L'esecuzione del compito è stata affrettata	2.7	2.9	4.3
9	In media, la qualità delle immagini era buona	6.3	3.4	2.6
10	In media, sono soddisfatto dalla facilità nel completare questo compito	6.4	4.6	3.5

È stato realizzato inoltre un grafico dove viene individuato il grado di accuratezza che si può ottenere grazie alle tre diverse modalità di lettura. Dalla sua analisi si evince che in base alla dimensione dello schermo disponibile, il grado di accuratezza risulta maggiore per la lettura sul telo da proiezione e meno preciso per quanto riguarda la lettura su smartphone. Considerando l'esperimento come un'analisi da effettuare su più cantieri, dal punto di vista della praticità, lo schermo del tablet risulta quello che soddisfa il fattore precisione e trasportabilità.

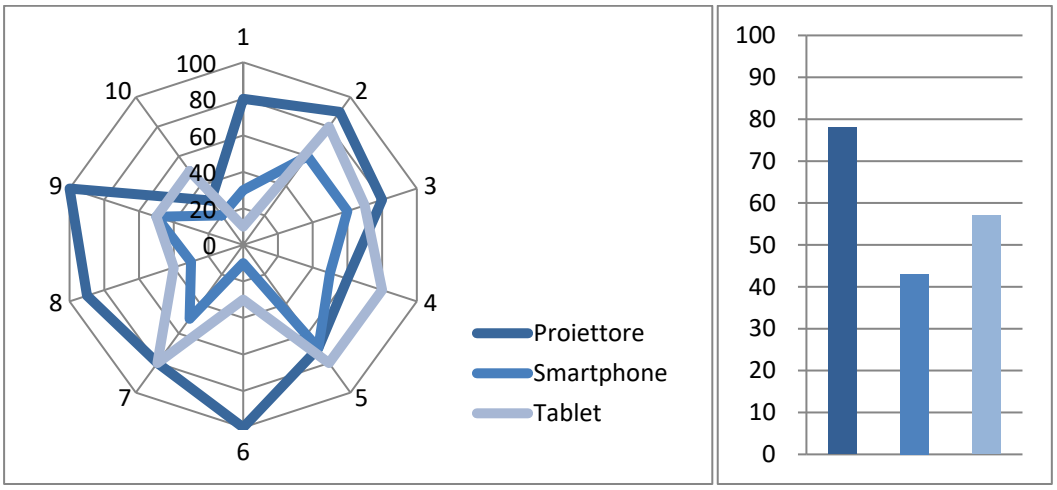


Figura 83*(Grafico 1- Accuratezza su tre diverse tipologie di lettura, proiettore, smartphone e tablet.)*

I dati inseriti in Tabella 5, dimostrano le condizioni visive di utilizzo attraverso le tre tipologie di schermi, identificando un grado di soddisfacimento nell'utilizzo, maggiore per lo schermo del proiettore e minore per gli altri due schermi. Anche l'analisi del grado di precisione individuato in Grafico 1 consente di identificare lo schermo del proiettore come quello più indicato per ottenere un'accuratezza maggiore rispetto a quello dello smartphone.

Grazie a questa simulazione di controllo in cantiere, è stato possibile effettuare l'operazione di verifica della sicurezza in cantiere attraverso tre metodi differenti, consentendo al safety manager di individuare da remoto e in tempi ridotti gli operatori sprovvisti del proprio dispositivo di protezione.

Dai dati ricavato dai questionari e dall'esperienza dei partecipanti, è stato possibile individuare alcune delle proprietà che un drone dovrebbe avere per un miglior impiego durante il processo di ispezione:

- L'interazione con gli operatori grazie ad altoparlanti montati sul drone
- Possibilità di navigazione autonoma

- Videocamera di qualità alta per identificare più dettagli durante l'ispezione
- Durata della batteria più lunga
- Possibilità di multitasking
- Operatività in condizioni meteo instabili

- La seconda applicazione in ambito cantieristico è quella descritta nella Tesi di Alessio Calantropio - "L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici di emergenza sismica".
  La ricerca riguarda il caso studio di un cantiere dismesso, situato nella località di Bersezio (Valle Stura- CN), all'interno del quale è presente una struttura ricettiva realizzata per il turismo montano e il terreno ad essa appartenente. La ricerca prevede l'analisi e l'individuazione dei fattori di rischio connessi al sito, attraverso la raccolta e la rielaborazione di dati tramite l'utilizzo dei diversi sistemi a pilotaggio remoto e software dedicati.

  Per la raccolta delle informazioni necessarie all'analisi dell'area in oggetto, è stato svolto il rilievo fotogrammetrico tramite UAV attraverso due tipologie di droni tra cui il modello ad ala fissa eBee della casa produttrice SenseFly e il modello multirotore Bebop 2 prodotto dalla Parrot. Il rilievo fotogrammetrico[19] consiste nella produzione di cartografia attraverso la raccolta di informazioni da immagini satellitari e aeree, e nella realizzazione di modelli tridimensionali di oggetti architettonici di qualsiasi forma e dimensione anche difficilmente accessibili. La tecnica prevede l'acquisizione di differenti immagini di un oggetto da almeno due punti di vista differenti per poter ottenere quelle che sono le coordinate spaziali di esso. Per ottenere una maggior accuratezza sono stati posizionati dei GCPs (Ground Control Points) e successivamente rilevati tramite GPS/GNSS necessari per georeferire e scalare il modello tridimensionale in seguito generato. Per la raccolta dei dati, sono stati effettuati diversi voli con riprese sia nadirali che oblique in modo da ottenere più informazioni possibili del lotto e dei fabbricati. Il test eseguito è stato realizzato seguendo una serie di procedure necessarie per il corretto svolgimento dell'operazione e per ottenere una qualità di dati migliore, di cui la prima fase che riguarda il rilievo dell'area in oggetto e la seconda che riguarda l'elaborazione dei dati.

[19] " La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotografiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici." (Slama C.C., Theurer. C. and Hendrikson S.W. (1980)).

FASE DI RILIEVO

- Come fase principale è stato effettuato uno studio sull'area di ricerca per poter verificare la possibilità di effettuare il volo con i droni e soprattutto le restrizioni imposte dal regolamento ENAC.

- Importanti sono da considerare anche le condizioni metereologiche in quanto fattore fondamentale per la riuscita del rilievo.

- Per la raccolta di dati sono stati utilizzati il drone ad ala fissa eBee della casa produttrice SenseFly e il drone multirotore Bebop 2 della casa produttrice Parrot, scelti per questo impiego grazie alle loro caratteristiche tecniche idonee rispetto alle normative presenti e alla qualità dei sensori.

84A 84B

Figura 84 A Drone ala fissa SenseFly **e 84 B** Drone quadrirotore Bebop 2

- Sono stati posizionati in diversi punti dell'intera area di rilievo 14 marker a terra (Fig.89), e successivamente rilevati con GPS/GNSS per poter georeferire e scalare il modello generato tramite i software dedicati al calcolo fotogrammetrico.

Figura 85 Distribuzione dei marker all'interno dell'area di rilievo

- Sono stati eseguito tre voli di cui uno con il drone ad ala fissa eBee per l'acquisizione di immagini nadirali con voli longitudinali lungo l'intera area (foto 1) e due voli con il drone

multirotore Bebop 2 di cui uno longitudinale lungo l'intera area (foto 2) e uno circolare attorno ai fabbricati con il drone multirotore (foto 3).

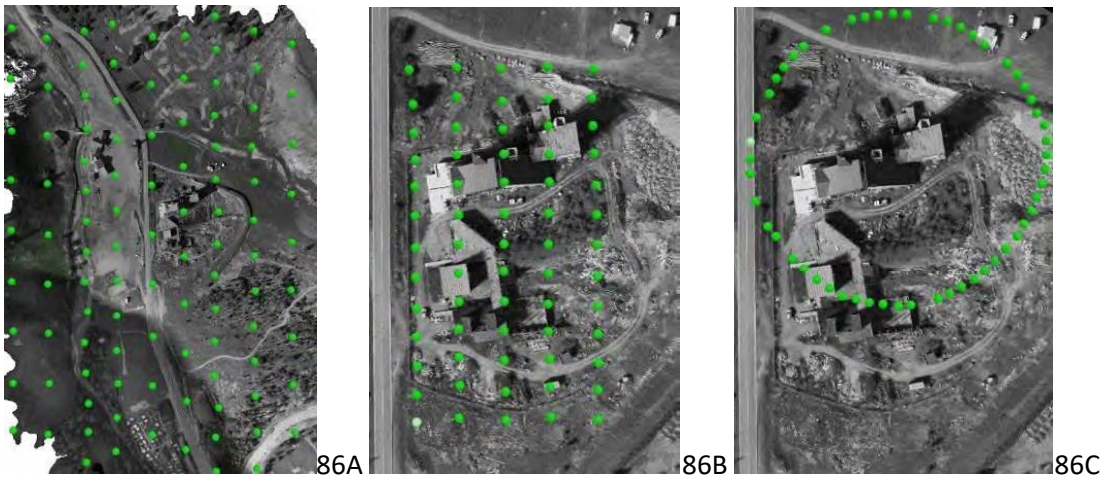


Figura 86 A Volo con drone ala fissa, **86B** Volo con drone multirotote, **86C** Volo con drone multirotore

FASE DI ELABORAZIONE DI DATI

- Le immagini acquisite sono state importate nel software Pix4D dove a loro volta sono state allineate ed elaborate ottenendo il modello tridimensionale.
  Sono stati eseguiti i processi di realizzazione della Sparse cloud-Nuvola sparsa, della Dense Cloud-Nuvola densa, della Mesh triangolata e Mesh texturizzata per generare modelli altimetrici e ortofoto.

Il modello altimetrico è quello che rappresenta l'oggetto di rilievo in 3D e si può dividere in due diverse tipologie: DSM (Digital Surface Model) che rappresenta un modello digitale della superficie dove ad ogni punto corrisponde un colore e un dato contenente le informazioni riguardo la quota di superficie; DTM (Digital Terrain Model) che rappresenta il modello digitale del terreno esclusi alberi e fabbricati.

- Una volta generato il modello tridimensionale è possibile ricavare diverse informazioni riguardo l'intera area di rilievo, verificare le coordinate di ogni singolo punto presente nel modello, generare delle sezioni sul terreno o sui fabbricati, misurare aree o volumi. L'insieme di questi dati consente di effettuare diverse operazioni di monitoraggio e di ispezione del cantiere come di seguito elencate :

- Monitoraggio del cantiere e dello stato di avanzamento dei lavori da remoto sostituendo e soprattutto velocizzando il processo che richiede la presenza fisica in cantiere. In questo modo con il drone è possibile raccogliere dati e aggiornare il modello 3D grazie alle tecniche fotogrammetriche, per confrontare i dati con i disegni di progetto. Si ha così la possibilità di individuare variazioni e intervenire in tempi relativamente brevi.
  Inoltre è possibile evitare rischi interferenziali di cantiere tra operatori e tecnici, garantendo la possibilità all'intero team di collaborare e accedere ai dati rilevati, così come fornire aggiornamenti ai clienti e dare loro la possibilità di mostrare l'avanzamento dei lavori.

- È possibile analizzare le immagini di post volo, ispezionando dettagli strutturali o parti di edificio difficilmente visibili dall'operatore, evitando di utilizzare macchinari o impalcature ed effettuando verifiche e misure per la corretta realizzazione dell'opera.
  Inoltre è possibile verificare i volumi di terreno da eliminare o da riportare.

- Monitoraggio e sorveglianza dei macchinari e dell'attrezzatura presente in modo da gestire il loro impiego o meno durante le diverse fasi di realizzazione dell'opera, verificare il loro corretto posizionamento.

- Monitoraggio della sicurezza in cantiere verificando che gli operatori, qualora presenti, siano equipaggiati di sistemi di protezione personale, verificare se i lavori vengono svolti in sicurezza così come i casi di pericolo come i lavori in quota.

In conclusione, l'impiego dei droni in cantiere permette di ottenere molteplici informazioni necessarie sia prima dell'inizio di un cantiere, sia durante la fase di realizzazione del cantiere e per quanto riguardo la fase finale di controllo e ispezione prima della consegna. Sicuramente l'utilizzo può essere impiegato successivamente anche durante gli interventi di controllo della struttura o area per verificarne l'integrità, nel caso fosse compromesso dall'usura dei materiali.
I fattori che favoriscono l'impiego del drone sono sicuramente positivi parlando di velocità e costi, ma in altri casi sono tutt'ora limitati in quanto le normative attuali del regolamento ENAC vietano l'utilizzo in determinate aree.
Con lo sviluppo di questa tecnologia e dei sensori presenti su droni, questo strumento consentirà di ottenere dati sempre più dettagliati e ridurre i costi e i tempi delle operazioni per il monitoraggio dell'iter progettuale e della sicurezza nei cantieri.

- **6.3 RILIEVO DI AREE COLPITE DA CALAMITA' NATURALI**

Un'altra applicazione dei sistemi SAPR è il rilievo di aree colpite da calamità naturali, per la realizzazione di cartografie di emergenza, ortofoto e modelli tridimensionali. Grazie alla possibilità di eseguire voli secondo traiettorie pianificate, di controllare il velivolo da remoto e grazie all'elevato raggio d'azione e possibile raggiungere zone pericolose e inaccessibili permettendo di intervenire nella fase successiva agli eventi di calamità naturale. Il vantaggio nell'acquisire informazioni in tempi relativamente brevi consente di effettuare l'elaborazione dei dati con software dedicati, per poter valutare l'entità dell'evento, i danni riportati alle strutture o ai terreni e ricavare informazioni metriche. Grazie alla realizzazione di modelli tridimensionali dell'area interessata, è possibile il confronto con il modello tridimensionale precedente, fornito dai sistemi informativi geografici nazionali, e verificare i danni al territorio e agli edifici.

Un esempio è il caso studio del comune di Limone Piemonte (della Tesi di Marcello Cittadini Bellini - Il ruolo della Geomatica a supporto della valutazione dei danni al territorio a seguito di eventi alluvionali. Il caso dell'alluvione di Ottobre 2020 a Limone Piemonte (CN))[20]. L'area interessata è stata colpita dalla forte pioggia, subendo gravi danni sul territorio, causati dall'esondazione dei torrenti presenti nelle vicinanze. L'operazione post emergenza consiste nel rilievo dell'area tramite l'impiego del drone, con successiva elaborazione dei dati in software dedicati, confrontati con quelli ricavati dal Sistema Informativo Geografico della Regione Piemonte. Questo esempio è stato eseguito confrontando i dati satellitari prima dell'evento, i dati satellitari post evento e i dati ottenuti con il drone.

Il procedimento di acquisizione delle immagini tramite drone per il rilievo fotogrammetrico dell'abitato, è stato effettuato in più riprese nei mesi successivi alla catastrofe, ottenendo informazioni riguardanti l'area e i danni subiti dal territorio e dai fabbricati.
Il rilievo sul posto è stato svolto in due fasi differenti :

PRIMA FASE - rilievo degli impianti sciistici di Limonetto

- Analisi dell'area e pianificazione del rilievo dell'area;
- Posizionamento di target collocati nell'area interessata al rilievo, necessari per georeferire le immagini successivamente acquisite con il drone ;

[20] Bellini M.C., Prof.re Tonolo F.G. e Prof.ssa Spanò A.T. (2020) *Il ruolo della Geomatica a supporto della valutazione dei danni al territorio a seguito di eventi alluvionali. Il caso dell'alluvione di Ottobre 2020 a Limone Piemonte (CN).*

- Rilievo delle coordinate dei target tramite sensore GNSS in modo da ottere dati con un grado di precisione centimetrica;
- Acquisizione delle immagini tramite drone a quota 100m, stabilita in base alla conformazione e agli ostacoli presenti sul terreno, con una frequenza di scatti tale da ottenere una sovrapposizione delle immagini dell'85% e ricoprimento laterale dell'80% ;

SECONDA FASE - rilievo dell'area Tetti Mecci

- A differenza della prima fase, per il rilievo di quest'area è stato utilizzato un drone con tecnologia RTK (real time kinematic) in sostituzione ai punti di controllo a terra, effettuando il volo ad una quota di 150m prestabilita in base alla conformazione del terreno e una sovrapposizione delle immagini delll'85% e ricoprimento laterale dell'80.

FASE DI ELABORAZIONE DEI DATI

Le immagini acquisite vengono ispezionate per la verifica della loro qualità, e successivamente elaborate all'interno del software Agisoft Metashape Professional tramite il processo fotogrammetrico, secondo i seguenti step:

- Allineamento delle immagini con posizionamento dei centri di presa e orientamento del sensore, generando dall'identificazione dei punti comuni tra le immagini, una nuvola di punti sparsa;

- Verifica del corretto allineamento delle immagini con possibilità di eliminare le immagini non adatte all'elaborazione;

- Inserimento delle coordinate dei punti di appoggio rilevati con il GNSS, necessarie per il corretto orientamento delle immagini e dei punti di controllo. I punti andranno collimati nel centro dei marker presenti nelle foto, consentendo una ricostruzione della geometria dell'area con dettaglio elevato e una precisione centimetrica. Questo procedimento è stato effettuato solo per l'area di Limonetto.

- Generazione della nuvola densa di punti necessaria per generare gli ortofoto e il modello di superficie DSM dell'area di studio;

Per l'area di Tetti Mecci, non è stato effettuato il passaggio di inserimento dei punti di controllo ma è stata utilizzata la georeferenziazione diretta tramite sensore RTK già presente sil drone. Dall'elaborazione dei dati delle due aree è stato possibile ricavare modelli tridimensionali dell'area e ortofoto, caratterizzati da una risoluzione geometrica di 0.03 m e un'accuratezza di posizionamento 3D con valori di circa 0.04 m.

VERIFICA DEI DATI

La fase principale di quest'applicazione consiste nella verifica del prodotto di elevazione della superficie DSM generato con i dati ricavati con il drone e il confronto con i modelli di elevazione del terreno DEM della Regione Piemonte prima del verificarsi dell'evento.

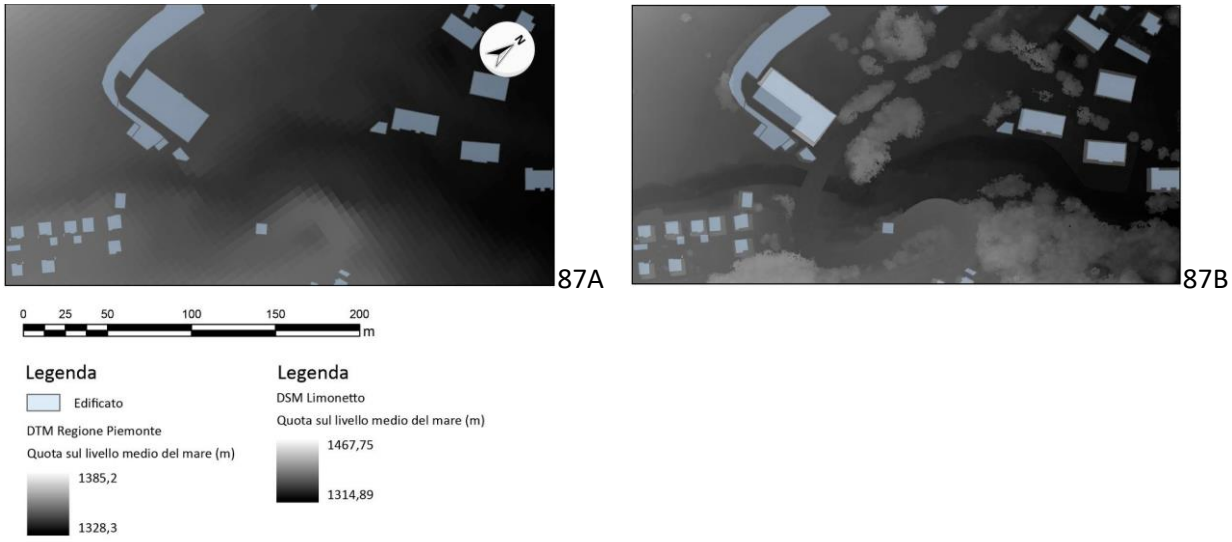


Figura 87 A DTM prima dell'evento (sinistra), **87 B** DSM post-evento (destra), area di Limonetto

Con l'utilizzo del software ArcGIS è stato possibili identificare i danni che ha subito l'area interessata, sottraendo dal modello DSM ottenuto dai dati acquisiti con il drone, il modello DTM della Regione Piemonte. In questo modo è stato ottenuto un prodotto dove le differenze di altezza rappresenteranno le aree maggiormente colpite. In questo caso il risultato sarà un modello in cui i valori positivi saranno individuati da edifici e vegetazione, mentre i valori negativi corrisponderanno alla differenza di quota e quindi alle superfici erose. Di fondamentale importanza è il modello DSM, ricavato dalla restituzione fotogrammetrica, con una precisione centimetrica molto alta (<0.05 m) e una risoluzione spaziale di 0.08 m , a differenza del DTM della Regione Piemonte con una precisione più bassa (0.60 m nelle aree di minor precisione, densamente urbanizzate o aree boscate) e risoluzione spaziale di 5 m.

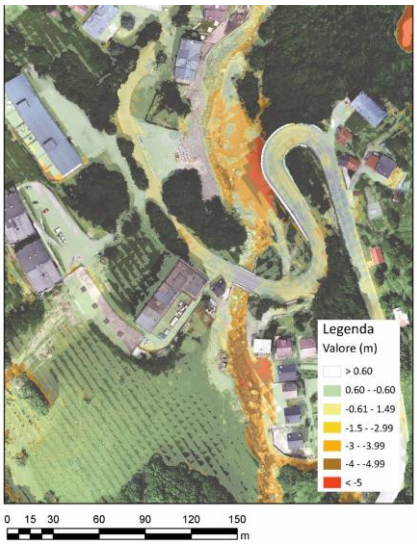


Figura 88 Differenza altimetrica di elevazione tra Post evento e Pre evento (Tetti Mecci)

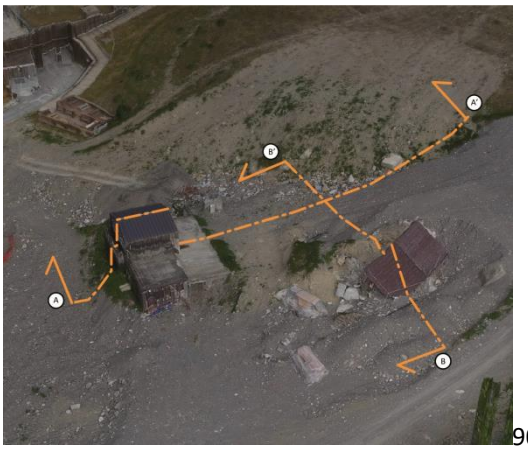
Nella mappa precedentemente illustrata si ottiene come risultato la differenza tra il DSM ricavato dai dati acquisiti con il drone e il DTM della Regione Piemonte, individuando le superfici che hanno subito variazioni di quota registrate, identificate nella mappa con le gradazioni di colore indicate dai rispettivi valori presenti in legenda, escludendo quelli compresi tra - 0.60 m e + 0.60 m dato l'errore di accuratezza per quanto riguarda il DTM della Regione Piemonte. Nel caso in cui le analisi necessitino di dati più precisi, il confronto dovrebbe essere effettuato tra due modelli con accuratezza maggiore come ad esempio uno realizzato da rilievo con il drone pre-evento e uno post-evento, in modo da poter confrontare dati più precisi.

Dai dati ricavati dal processo fotogrammetrico è possibile fare osservazioni anche su altri prodotti come il confronto di ortofoto da satellite e ortofoto da drone. Come precedentemente descritto, la risoluzione dei dati è di fondamentale importanza in quanto consente di effettuare valutazioni precise riguardo i danni causati al terreno o agli edifici.

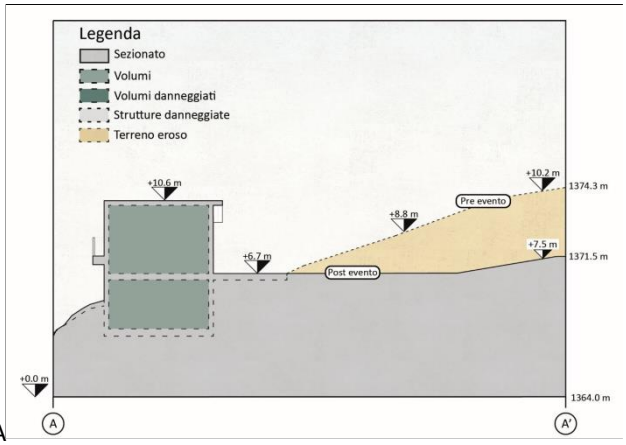
Figura 89 Confronto di ortofoto satellitare (sinistra) e ortofoto da drone (destra) dell'area di Limonetto

Dall'osservazione dell'ortofoto satellitare, è possibile valutare i danni subiti al territorio, ai fabbricati in base al grado di dettaglio visibile, mentre dall'ortofoto da drone la valutazione è stata effettuata con precisione centimetrica della struttura dell'edificio e del terreno.

Dai modelli tridimensionali sono state realizzate sezioni dell'area di interesse, necessarie per verificare da una seconda visuale i danni subiti post-evento. Possono essere effettuate su una porzione terreno per verificare i volumi di terreno eroso oppure sugli edifici per verificare le strutture danneggiate. Una volta unite è possibile confrontarle e verificare il cambiamento subito post-evento.



90A



90B

Figura 90 A Fig. xxx Modello 3D texturizzato, **90 B** Sezione A-A' (Limonetto)

Le sezioni avranno una precisione diversa di cui 0.05 m per quella ricavata dal DSM ricavato da drone e di 0.60 m per quella ricavata dal DTM della Regione Piemonte.

CONCLUSIONI

Osservando i diversi prodotti ottenuti con l'impiego dei droni per il rilievo di aree colpite da calamità naturali, vengono identificati alcuni problemi riguardanti il rilievo stesso e i dati, e i vantaggi che consentono in termini di sicurezza e dati ricavati. Dall'analisi dei modelli DTM della Regione Piemonte e dai DSM ricavati con il drone, è possibile osservare che: nel primo caso, la risoluzione delle immagini sarà tale da poter identificare la geometria del terreno e gli edifici presenti su di esso con una precisione di 0.60 m per quanto riguarda le aree boscate e densamente urbanizzate, mentre per quanto riguarda il DSM ricavato dalle immagini acquisite da drone, il prodotto risulterà di qualità maggiore rispetto al primo, con una precisione centimetrica di 0.05 m, consentendo di identificare in modo molto più dettagliato il terreno e gli edifici. In conclusione, l'impiego del drone porta a un prodotto più dettagliato necessario ad un'analisi più accurata e ad un rilievo effettuato in tempi ridotti e con costi contenuti.

- **6.4 RILIEVO CON DRONE CON SENSORI RGB E TERMOCAMERA PER ANALISI DEL COSTRUITO STORICO**

Un'altra delle applicazioni prevede l'utilizzo della termocamera, capace di acquisire immagini in falsi colori o grigi per il rilievo del terreno o dell'oggetto inquadrato identificando le caratteristiche termiche dei materiali differenti. Il risultato sarà un'immagine dove ad ogni pixel sarà associato un colore o un tono grigio che rappresenta il valore di temperatura differente a seconda del tipo di materiale. È molto importante stabilire che le immagini termiche acquisite possono avere letture errate qualora i materiali dell'oggetto rilevato o dell'area siano esposti a variazioni di temperatura a seconda delle condizioni meteo. L'irraggiamento solare può variare la temperatura dell'oggetto così come la trasmissione di calore dovuta dal contatto con materiali di differenti temperature. Questi sono alcuni dei fattori da considerare prima dell'operazione di rilievo in quanto possono influenzare i dati e fornire una lettura errata.

Grazie a questi sensori le applicazioni possono essere di diverso tipo, dal monitoraggio delle superfici disperdenti di un fabbricato al monitoraggio di un impianto fotovoltaico o industriale, e in altri casi per le applicazioni in archeologia per indagini di strutture sepolte.

Uno degli esempi per l'analisi del costruito storico attraverso l'acquisizione dati con sensori RGB (fotocamera) e Termocamera è lo studio effettuato sul borgo di Bout du Col (presentato nella Tesi di Guglielmo Cortese, Integrazione innovativa di termografia e fotogrammetria aeree da UAV per l'analisi del costruito storico). Lo studio è stato effettuato con entrambi i sensori per poter ottenere tipologie di dati differenti e successiva realizzazione di modelli tridimensionali.

Il procedimento, come anche in altri casi di rilievo, è stato suddiviso in più fasi in modo da programmare l'intero processo per ottenere una quantità e qualità di dati necessari ad essere rielaborati e generare un prodotto adeguato utile per le fasi finali di analisi.

FASE DI PIANIFICAZIONE E STUDIO DEL TERRITORIO

Questa fase consiste nell'analisi dell'area di rilievo, verificando il dislivello del territorio, la presenza di ostacoli e le limitazioni imposte dalle normative vigenti sul territorio. Successivamente è stata pianificata la distribuzione dei punti di controllo sul territorio e impostato un piano di volo tramite l'analisi delle immagini satellitari e il DTM dell'area di rilievo. Quest'ultimo è di fondamentale importanza in quanto consente di organizzare il rilievo in più voli qualora sia presente un dislivello del terreno, e di mantenere l'altezza di volo tra terreno e velivolo costante, in modo da avere la stessa risoluzione di tutto il modello

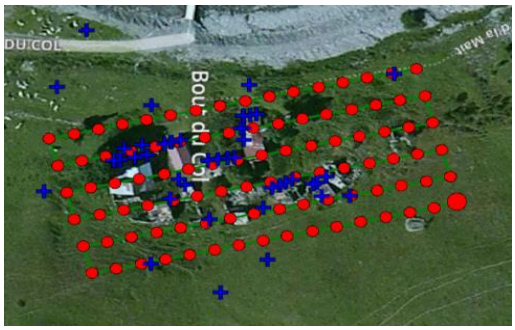
tridimensionale successivamente generato. Di fondamentale importanza è l'ispezione dell'area prima del volo, utile per individuare gli ostacoli che presenta il terreno.

FASE DI RILIEVO

Per il rilievo dell'area di interesse, sono stati posizionati marker distribuiti in differenti punti del territorio e rilevati tramite ricevitori GPS/GNSS e stazione totale. I punti di controllo sono stati utilizzati per le successive fasi di elaborazione dei dati, utili per l'orientamento delle immagini acquisite con i diversi sensori, e per poter scalare e georeferenziare il modello tridimensionale.

Le acquisizioni tramite drone sono state eseguite in due momenti distinti in quanto l'irraggiamento solare del terreno può compromettere la lettura dei dati sia per quanto riguarda il sensore termico che quello RGB.

1. Rilievo con sensore termico (Zenmuse XT2 con risoluzione 640 x 512) : per le riprese è stato effettuato il volo a schema semplice con un solo passaggio a presa della termocamera nadirale, effettuato in assenza dell'irraggiamento solare per consentire una risposta termica dei materiali del terreno più attendibile. (96 termogrammi)



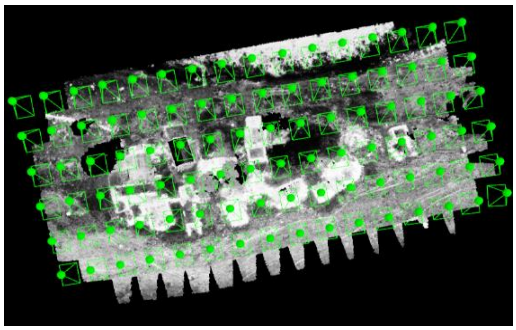
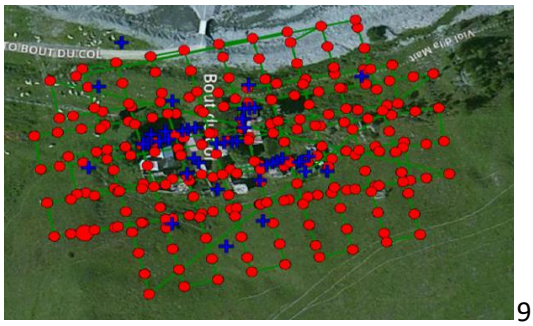
91A 
91B

Figura 91 A Schema di acquisizione camera termica , **91 B** Dense cloud e centri di presa (ottenuta in fase di elaborazione dei dati)

2. Rilievo con sensore RGB (Zenmuse X4S con risoluzione 5472 x 3648) : a differenza del primo volo, in questo caso le riprese sono state effettuate in condizioni di illuminazione differenti, ottenendo immagini di qualità migliore. Per le riprese sono stati effettuati due piani di volo di cui uno a griglia singola con presa della fotocamera nadirale e uno a griglia doppia con presa della fotocamera a 45° utile per ottenere più informazioni possibili riguardo il dislivello del terreno e gli edifici. (235 fotogrammi)



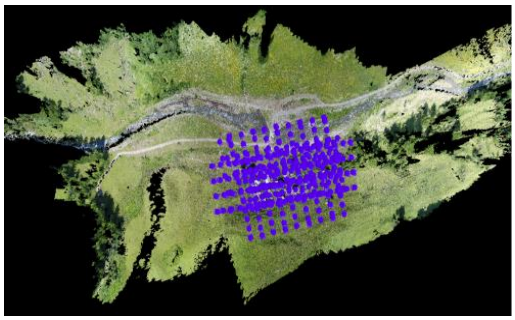
92 A  92 B

Figura 92 A Schema di acquisizione camera RGB, **92 B** Dense cloud e centri di presa (ottenuta in fase di elaborazione dei dati)

I dati rilevati dai diversi sensori, saranno con risoluzioni differenti in base alla risoluzione del sensore con cui sono stati acquisiti, consentendo di produrre attraverso i software di elaborazione, modelli tridimensionali di qualità e precisione differenti.

FASE DI ELABORAZIONE DEI DATI

Per l'elaborazione dei dati acquisiti tramite termocamera è stato utilizzato il software Pix4D Mapper, che permette di texturizzare i termogrammi su mesh generati da foto acquisite con la termocamera. Prima di procedere all'importazione nel software, i termogrammi sono stati elaborati nel software Flir Tools + in modo da impostare l'altezza di volo media e il valore di emissività generico dei materiali di indagine dei fabbricati. Successivamente con il software Pix4D sono stati collimati i punti di controllo a terra precedentemente rilevati.

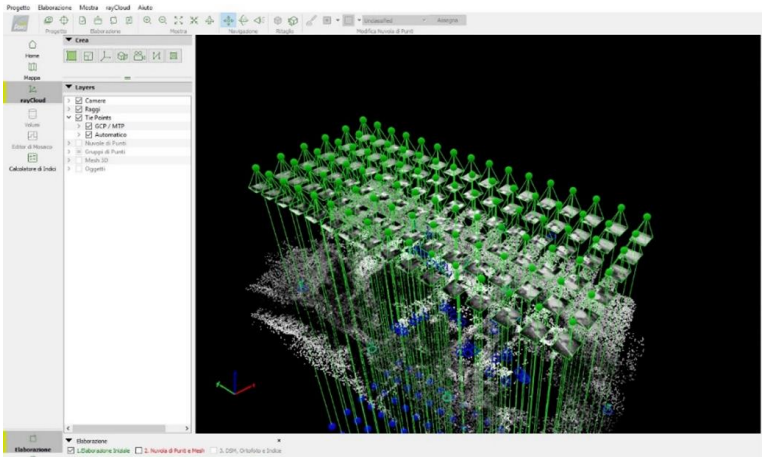


Figura 93 Sparse cloud in scala di grigi

Il passaggio successivo è stato quello di generazione della Dense Cloud e della Mesh. Infine, sono stati generati il modello DSM e gli ortofoto utili per l'analisi e la verifica dei dati di temperatura. Grazie alle mappe di radianza graduate e alle palette di colori è stato possibile identificare gli elementi rilevati e l'area circostante.

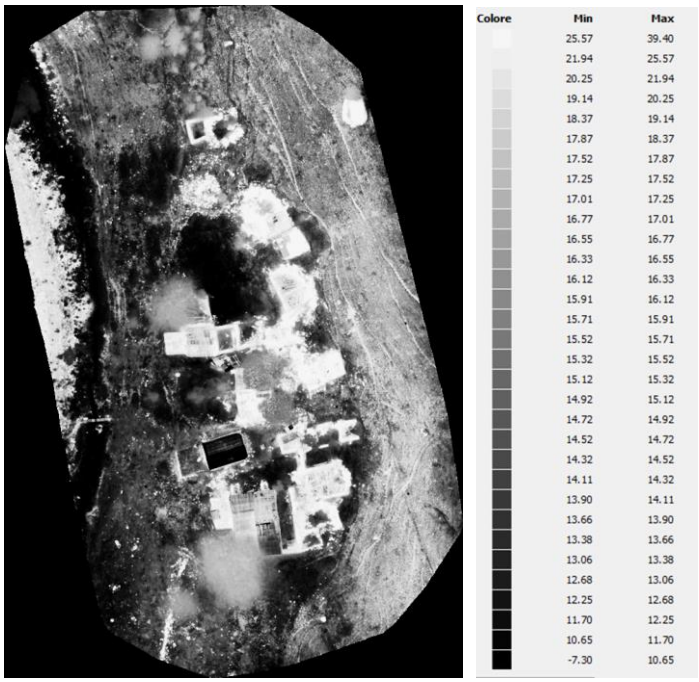
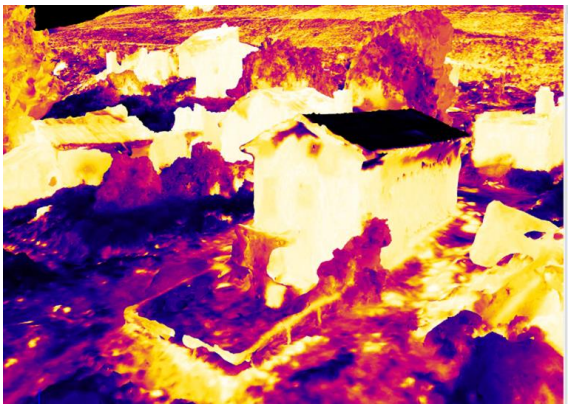


Figura 94 Ortofoto termica in scala di grigi

- Per l'elaborazione dei dati acquisiti con il sensore RGB, l'elaborazione delle immagini è stata eseguita con il software Pix4D, dove è stata eseguita la collimazione dei punti di controllo a terra basando l'allineamenti sul file Exif, per generare successivamente la Sparse cloud, la Dense cloud e la Mesh.
- Confrontando i due prodotti ottenuti è possibili stabilire che il prodotto generato con i dati del sensore RGB è di qualità superiore a quello con i dati ricavati dalla termocamera, grazie alla sua risoluzione del sensore, al maggior numero di fotogrammi, all'inclinazione della camera a 45°, ottenendo informazioni più dettagliate sia sugli edifici che sull'area di analisi. Analizzando i due rilievi è possibile notare che dal maggior numero di immagini acquisite e dalla maggiore risoluzione del sensore, il prodotto finale ottenuto con il sensore RGB sarà di qualità maggiore e consentirà di avere informazioni più dettagliate riguardo gli alzati. Per ottenere un modello termico più dettagliato, i due prodotti generati sono stati uniti all'interno del software Pix4D, tramite la procedura di texturizzazione delle informazioni termiche sul modello generato dalle immagini acquisite col sensore RGB. Con i dati di quest'ultimo si procede all'elaborazione e alla creazione della mesh mentre con quelli del sensore termico si procede alla texturizzazione.


95A

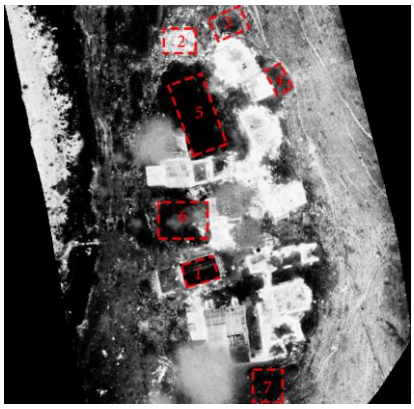
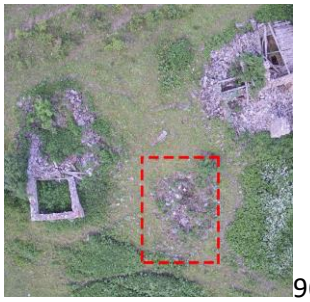
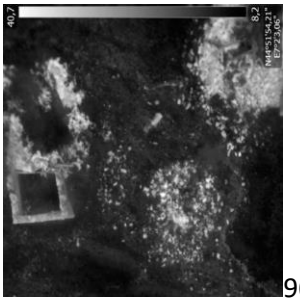

95B

Figura 95 A Mesh generata da immagini RGB e texture realizzata dai termogrammi, **95 B** ortofoto termica

Dall'unione dei dati è stato realizzato un modello termico tridimensionale di qualità maggiore, necessario per l'esecuzione di indagini più approfondite sul costruito e sul territorio, e risalire alla collocazione di edifici mancanti del borgo. Sono stati utilizzati differenti algoritmi che definiscono l'intervallo di temperature, a seconda di quello che consente di individuare le discontinuità di temperatura. Inoltre le indagini sono state eseguite direttamente sulle singole aree utilizzando il software "Flir Tool +" verificando i termogrammi e modificando i parametri di emissività per un'analisi più approfondita.


96A


96B

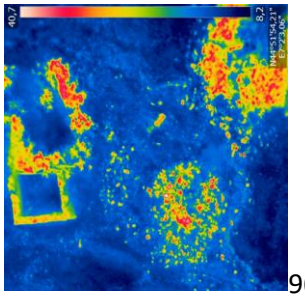
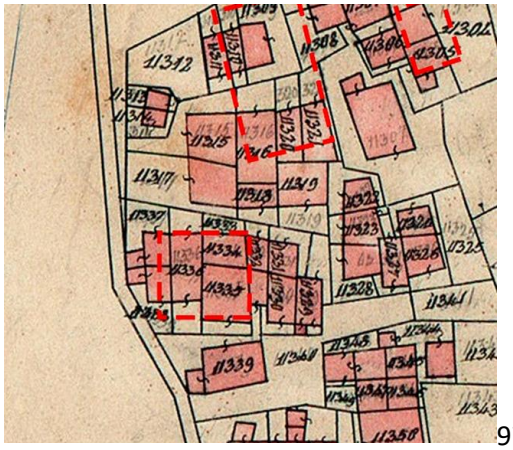

96C

Figura 96 A Fotografia Zona 2, **96B** Ortofoto termica Zona 2, **96 C** Mappa riflettanza spettrale Zona 2

A seguito della generazione delle mappe è possibile eseguire il confronto con quelle del catasto e verificare la presenza dei fabbricati nelle aree di analisi.


97A

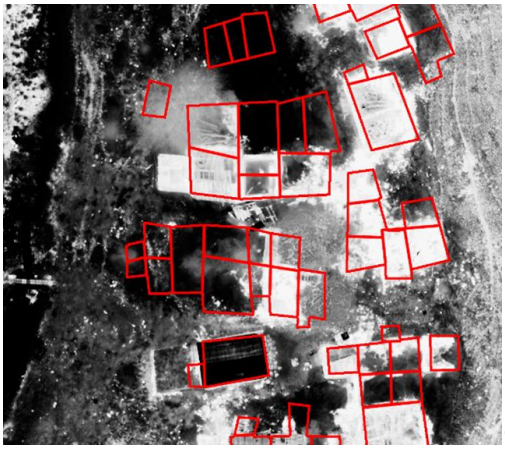

97B

Figura 97 A Mappa catastale Rabbini 1855-1887, **97 B** Sovrapposizione mappa catastale a mappa di riflettanza

Grazie all'analisi di questo caso è possibile dimostrare l'impiego del drone munito dei sensori RGB e Termocamera, eseguire indagini del costruito storico, ottenere risultatati conformi ai dati catastali ed informazioni dettagliate riguardo alla posizione esatta degli edifici.

CONCLUSIONI

L'applicazione analizzata dimostra come il metodo di rilievo tramite drone equipaggiato con il sensore RGB e termico permette di ottenere informazioni dettagliate, utili per l'investigazione del territorio e del costruito storico. Il caso studio dimostra la quantità elevata di informazioni ricavabili, la velocità di rilievo e di elaborazione dei dati e non per ultima la possibilità di operare da remoto a differenza delle metodologie tradizionali di rilievo. Sicuramente ci sono tutt'ora delle limitazioni che non permettono l'impiego dei droni in determinati ambiti o problematiche dovute alle condizioni climatiche e alla conducibilità termica dei materiali presenti nelle aree di rilievo. Per quanto riguarda i sensori utilizzati, nel caso di quello RGB le problematiche che possono compromettere la corretta restituzione del modello tridimensionale potrebbero essere legate all'errata calibrazione del sensore, a un numero ridotto di scatti, all'errata pianificazione della traiettoria di volo e alla presenza di vegetazione o parti ombreggiate dell'area o degli edifici. Il sensore termico invece può riscontrare alcune problematiche legate al numero ridotto di scatti, alla pianificazione del volo e all'irraggiamento solare. In questo caso, a seconda delle diverse ore del giorno o addirittura in assenza del sole, i dati acquisiti possono fornire informazioni più dettagliate e veritiere. In conclusione, il rilievo con sensori termici permette di ottenere informazioni sia sulla presenza dei fabbricati tutt'ora esistenti sia su quelli non più integri, e realizzare modelli tridimensionali utili per il monitoraggio dell'area o per una possibile riqualificazione in futuro.

- **6.5 RILIEVO CON DRONE MUNITO DI SENSORE LIDAR PER IL MONITORAGGIO DI INFRASTRUTTURE**

L'impiego dei droni in architettura è una realtà sempre più presente anche per quanto riguarda il monitoraggio e l'ispezione di aree, di edifici o strutture e permette di ottenere un elevato quantitativo di dati in tempi brevi e a costi ridotti rispetto ai metodi tradizionali di rilievo.

Il monitoraggio periodico delle infrastrutture e degli edifici permette di individuare le criticità riguardanti le strutture e lo stato dei materiali, utili per la pianificazione degli interventi di manutenzione. I metodi tradizionali di monitoraggio spesso richiedono l'esecuzione di test sui materiali con l'utilizzo di apparecchiature costose, che spesso risultano complesse e rischiose, è qualora effettuate più volte, possono compromettere la qualità dei materiali. Proprio in questo caso l'impiego dei droni per il rilievo, consente oggi di utilizzare diverse tipologie di sensori utili per ottenere dati necessari per l'analisi, lo studio o il monitoraggio di strutture o impianti, semplificando il procedimento di ispezione e ottenere risultati utili per l'analisi.

Il caso studio analizzato è quello presentato nell'articolo *"Integration of UAV-LIDAR and UAV-Photogrammetry for infrastructure monitoring and bridge assessment"*[21], consiste nell'ispezione del ponte di Cortemaggiore (PC) attraverso due metodologie diverse. Il primo caso utilizza il metodo tradizionale di rilievo con l'utilizzo di stazione totale, GNSS e acquisizione di foto tramite drone con sensore RGB per essere successivamente rielaborati in modo da ottenere il modello tridimensionale.

Il secondo metodo invece prevede il rilievo con drone equipaggiato di sensore GNSS RTK e sensore LIDAR, quest'ultimo capace di misurare la distanza di un oggetto e acquisire informazioni tridimensionali dell'intorno, ottenendo come prodotto una nuvola di punti ad alta precisione. Prima di arrivare al prodotto finito sono state eseguiti diversi procedimenti di cui:

- PIANIFICAZIONE DEL RILIEVO E STUDIO DEL TERRITORIO
- RILIEVO DELL'OGGETTO DI ANALISI
- ELABORAZIONE DEI DATI

[21] Gaspari F., Ioli F., Barbieri F., Belcore, E., Pinto L. (2022) *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, vol. Xliii-b2-2022*, "Integration of UAV-LIDAR and UAV-Photogrammetry for infrastructure monitoring and bridge assessment"

FASE DI PIANIFICAZIONE E STUDIO DEL TERRITORIO

Consiste nell'analisi dell'area da remoto grazie alle immagini satellitari presenti online utili per verificare la presenza di ostacoli o la vicinanza ad aree con divieti e non per ultimo le normative locali che possono compromettere l'operazione di rilievo con il drone, e infine l'ispezione diretta sul posto, fondamentale in quanto consente di verificare lo stato di conservazione del ponte.

FASE DI RILIEVO

Per questa fase sono state effettuati due rilievi separati di cui uno con il metodo tradizionale con l'utilizzo di drone equipaggiato di sensore RGB e un altro con drone equipaggiato di sensore LIDAR e RTK.

- Rilievo con il metodo 1 che consiste nel posizionamento dei GCP e successiva misurazione con il ricevitore GPS/GNSS e rilievo con la stazione totale. Successivamente è stata effettuata l'acquisizione delle immagini con il drone equipaggiato di sensore RGB, seguendo una traiettoria di volo precedentemente imposta in modo da ottenere un migliore prodotto durante l'elaborazione dei dati.

- Rilievo con il metodo 2 consiste nell'utilizzo di drone equipaggiato con sensore GNSS RTK e LIDAR. È un'operazione molto più veloce rispetto alla prima in quanto il sensore GNSS RTK già integrato consente di ottenere le informazioni direttamente nella fase di rilievo. In questo caso sono stati effettuati due voli di cui uno in modalità automatica e uno in modalità manuale.

  In entrambi i casi il settaggio dei sensori e delle traiettorie di volo sono stati effettuati tenendo conto dell'altezza di volo, della qualità del sensore e del numero di fotogrammi, per ottenere un prodotto di qualità alta utile per il successivo processo di elaborazione e analisi.

FASE DI ELABORAZIONE DEI DATI

In questa fase i dati acquisiti attraverso i due metodi differenti, sono stati elaborati e ottimizzati, per la restituzione di un prodotto più preciso possibile.

- Con il metodo 1, le immagini acquisite con drone dotato di sensore RGB , sono state elaborate con il software Agisoft Metashape insieme alle coordinate precedentemente rilevate dei relativi target, ottenendo una nuvola di punti accurata scalata e georeferenziata.

Figura 98 Modello tridimensionale generato dalle immagini acquisite con il sensore RGB

- Con il metodo di rilievo con drone equipaggiato di sensore LIDAR e GNSS RTK è stata ottenuta una nuvola di punti dell'intera area rilevata. Per quanto riguarda il volo automatico precedentemente programmato, sono stati rilevati il ponte e l'area circostante con acquisizioni dall'alto mentre in modalità manuale sono state effettuate delle riprese anche al di sotto del ponte. Quest'ultima operazione ha fornito dei dati differenti in quanto volare al di sotto del ponte ha influenzato i dati rilevati con il sensore RTK, a causa del segnale debole dei sensori di posizionamento. Oltre alle modalità differenti di controllo, le impostazioni di presa del sensore sono state di 90° ad altezza fissa per il volo automatico e 30° per quello manuale con una quota di volo variabile. I risultati dei voli hanno portato alla creazione di due modelli differenti di nuvole di punti, con due differenti margini d'errore. Proprio in questo caso i due prodotti sono stati uniti per ottenere un modello tridimensionale più accurato.
-

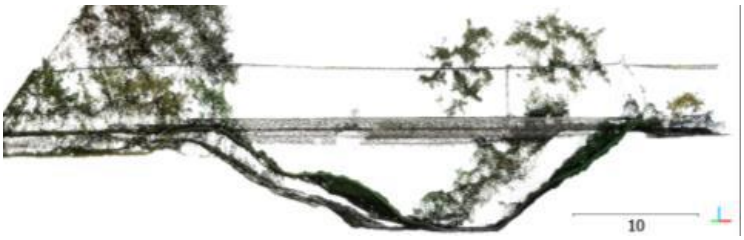
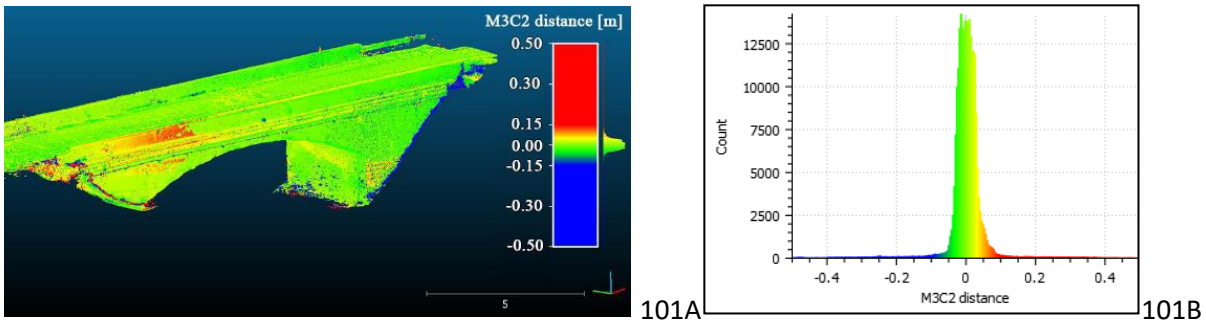


Figura 99 Nuvola di punti acquisita con LIDAR in modalità automatica

Figura 100 Nuvola di punti acquisita con LIDAR in modalità manuale

I modelli precedentemente generati sono stati a loro volta confrontati per verificare la precisione ottenuta dal metodo 1 con quello effettuato con il sensore LIDAR. La differenza tra i modelli confrontati è stata analizzata con il software Cloud Compare, utilizzando il logaritmo

M3C2 come illustrato in figura 105°. La differenza è data dalle informazioni acquisite con il sensore RTK del drone durante il rilievo al di sotto del ponte, compromettendo il corretto posizionamento nello spazio. Nonostante questo, dai due rilievi saranno ottenute informazioni riguardanti l'oggetto rilevato grazie alle diverse modalità di acquisizione effettuate e ai diversi sensori utilizzati.



101A 101B

Figura 101 A Modello nuvola di punti**, 101 B** Istogramma distanze tra la nuvola di punti realizzata con il rilievo tradizionale e quella con LIDAR

Dai prodotti sarà possibile ricavare piante prospetti e sezioni utili alla verifica delle misure degli elementi strutturali o delle parti compromesse del ponte, e avere un prodotto tridimensionale utile per le future operazioni di rilievo necessarie per monitorare e verificare l'integrità della struttura.

CONCLUSIONI

Dalle osservazioni dei prodotti precedentemente ottenuti è stato possibile ricavare informazioni precise su infrastrutture o edifici sia grazie alla velocità del procedimento di acquisizione dei dati, alla possibilità di operare da remoto in luoghi difficilmente raggiungibili o pericolosi, alla possibilità di ottenere informazioni precise grazie alla corretta pianificazione di volo e alla sensoristica presente sui droni e non per ultimo a costi ridotti e non invasivi sulle strutture. Nel primo caso, il metodo di rilievo tradizionale consiste nell'utilizzo di più strumenti che a loro volta implicano più tempo necessario per le operazioni di rilievo e in questo caso più tempo per la fase di unione ed elaborazione dei dati. Inoltre, la pianificazione di volo automatico limita l'acquisizione dei dati solo alle parti visibili dalle traiettorie impostate, senza avere informazioni riguardanti la parte sottostante del ponte. Per il rilievo con l'utilizzo del sensore LIDAR e GNSS RTK l'operazione risulta molto più veloce, ma con dei limiti dovuti alle ricezioni di segnale a causa delle ostruzioni. Nel caso invece di strutture complesse, l'utilizzo del drone col sensore LIDAR equipaggiato con il sensore di posizionamento RTK consentirà in modalità manuale di rilevare dati di parti di strutture, edifici o terreni difficilmente accessibili o in presenza di ostruzioni. La possibilità di interagire di manovrare il mezzo in diretta permette un miglior controllo da parte dell'operatore, operando in tempo reale e individuando le parti compromesse delle strutture qualora

non fossero visibili nelle operazioni di ispezione diretta. In luoghi con presenza di ostruzioni, il sensore di posizionamento riscontra problemi legati alla ricezione del segnale e influenza il corretto posizionamento della nuvola di punti nello spazio. Come specificato in precedenza, l'operazione di rilievo risulterà più veloce dato il minor numero di strumentazione utilizzata e in questo caso anche l'operazione di restituzione dei dati sarà effettuata in tempi minori grazie all'insieme di dati rilevati con il drone. Dall'osservazione dei due prodotti, è possibile ottenere tipologie di informazioni differenti con tempi di elaborazione variabili a seconda della quantità dei dati, dei sensori utilizzati e dalla corretta esecuzione dell'operazione di volo. In conclusione, in entrambi i casi l'impiego del drone permette di ripetere le operazioni nel tempo, di avere immagini della struttura sempre aggiornate e di ottenere un modello tridimensionale con dati utili per le operazioni di analisi dello stato di conservazione della struttura.

ANALISI DELLE APPLICAZIONI

- **come si usano i droni**
- **per fare cosa e che tipo di dati**
- **con quali sensori**
- **tipo di volo**
- **cosa è stato sviluppato sul tema grazie ai droni**

6.1 APPLICAZIONI CATASTALI

- RILIEVO DI TERRENI E FABBRICATI
- AGGIORNAMENTO DI MAPPE CATASTALI
- SENSORE UTILIZZATO: RGB
- VOLI NADIRALI E OBLIQUI
- SONO STATI SVILUPPATI METODI SPEDITIVI DI RILIEVO PER L'AGGIORNAMENTO DELLE MAPPE CATASTALI, CONSENTENDO DI OTTENERE MAGGIORE NUMERO DI DATI CON UNA PRECISIONE SIMILE A QUELLA DEL METODO DI RILIEVO CON STAZIONE TOTALE E GPS/GNSS

6.2 APPLICAZIONE PER LA SICUREZZA NEI CANTIERI

- MONITORAGGIO DEI CANTIERI, DALLA SICUREZZA ALL'ESECUZIONE DEI LAVORI
- INDIVIDUAZIONE SITUAZIONI O ZONE PERICOLOSE
- SENSORE UTILIZZATO: RGB
- VOLO NADIRALE, OBLIQUO E CIRCOLARE
- QUESTO METODO CONSENTE DI ESEGUIRE RIELIEVI PRE, DURANTE E POST CANTIERE, ESEGUIRE ISPEZIONI SPEDITIVE E TENERE AGGIORNATO L'AVANZAMENTO DEI LAVORI

6.3 RILIEVO DI AREE COLPITE DA CALAMITA' NATURALI

- MONITORAGGIO DI AREE O STRUTTURE CHE HANNO SUBITO DANNI
- INDIVIDUAZIONE DEI DANNI DELL'AREA E DELLE STRUTTURE
- SENSORE UTILIZZATO: RGB
- VOLO NADIRALE E OBLIQUO
- ATTRAVERSO IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO E' POSSIBILE ESEGUIRE ANALISI DI VASTE SUPERFICI DI TERRITORIO PER LA VALUTAZIONE DEI DANNI CAUSATI

6.4 RILIEVO CON DRONE CON SENSORI RGB E TERMOCAMERA PER ANALISI DEL COSTRUITO STORICO

- RILIEVO DI EDIFICI STORICI
- INDIVIDUAZIONE DI STRUTTURE
- SENSORE UTILIZZATO: RGB e TERMOCAMERA
- VOLO NADIRALE E OBLIQUO
- CON QUESTO METODO E' POSSIBILE OTTENERE INFORMAZIONI RIGUARDANTI ALL'IMPRONTA DI STRUTTURE NON PIU' INTEGRE, INDIVIDUANDO GRAZIE ALLE IMMAGINE TERMICHE, I MATERIALI CON DIFFERENTE TEMPERATURA

6.5 RILIEVO CON DRONE MUNITO DI SENSORE LIDAR PER IL MONITORAGGIO DI INFRASTRUTTURE

- RILIEVO DI INFRASTRUTTURE
- VERIFICA DELL'INTEGRITA DELLA STRUTTURA
- SENSORE UTILIZZATO: RGB e LIDAR
- VOLO NADIRALE E OBLIQUO, E VOLO MANUALE
- CON QUESTO METODO E' POSSIBILE ACQUISIRE INFORMAZIONI RIGUARDANTI LA STRUTTURA E LO STATO DI CONSERVAZIONE, O MONITORARLA ATTRAVERSO L'ESECUZIONE DI RILIEVI PROGRESSIVI E IL CONFRONTO DEI MODELLI TRIDIMENSIONALI.

7. FOTOGRAMMETRIA _ concetto

Il concetto di *fotogrammetria* oggi viene utilizzato sempre più spesso grazie alla metodologia e le tecniche impiegate per lo studio e la rappresentazione del territorio attraverso il rilievo. La tecnica del rilievo fotogrammetrico è l'alternativa al rilievo tradizionale, ottenendo così differenti prodotti grazie ai fotogrammi realizzati con attrezzatura capace di acquisire immagini, per effettuare le operazioni di rilievo in tempi relativamente brevi e a costi contenuti.

È una tecnica di rilievo che può essere utilizzata per applicazioni in diversi ambiti e permette di generare dati contenenti informazioni dettagliate del terreno o di oggetti, grazie alle immagini acquisite da cellulari, macchine fotografiche o velivoli equipaggiati di fotocamera.

> *<< La fotogrammetria è quella tecnica che consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi .>>*[22]

I prodotti generati dalle misure fotogrammetriche possono essere :

- **Disegni** : rappresentazioni grafiche di oggetti oppure carte topografiche rappresentanti particolari planimetrici e curve di livello ;
- **Immagini** : immagini digitali, ortofotopiani e ortofotocarte ;
- **Numeri** : coordinate di punti di oggetto in un sistema di coordinate tridimensionale .

Questa tecnica consente di ricostruire oggetti tridimensionali e la determinazione di alcune loro caratteristiche, da dati ricavati senza richiedere il contatto fisico con gli oggetti stessi, solo attraverso l'acquisizione di immagini fotografiche effettuate da posizioni differenti, utili per ottenere più informazioni possibili, visibili dalle differenti angolazioni dei punti di presa. Grazie a questa metodologia, è possibile sostituire le operazioni della topografia tradizionale che necessitano di attrezzature per il rilievo di punti caratteristici, tempi di rilievo e di elaborazione lunghi e costi elevati per le operazioni di campagna.

Il rilievo fotogrammetrico presenta alcuni vantaggi di cui :

- Consente di eseguire il rilievo in tempi brevi e a costi contenuti, per la produzione cartografica di grandi aree ;

[22] Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri W. (2014) *Misure, rilievo, progetto per Costruzioni, ambiente e territorio*. Zanichelli, IV ed, Vol. III, modulo online, Unità T1

- Consente di rilevare una grande quantità di punti ;
- Permette di eseguire rilievi accurati con precisione uniforme di tutti i punti ;
- Permette di effettuare misure sul prodotto generato nei software di elaborazione ;
- Attraverso l'elaborazione nei software è possibile ricostruire il modello tridimensionale di oggetti o aree, senza avere contatto fisico con essi;

7.1 DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONI

La fotogrammetria viene classificata in base a:

- Tipologia di **presa** che a sua volta si divide in :
    - Fotogrammetria **terrestre** - Le prese avvengono da terra; in questo caso gli oggetti si trovano a distanze inferiori a 200 m; per cui si parla anche di fotogrammetria dei vicini (rilievo di edifici) ;
    - Fotogrammetria **aerea** - Le prese avvengono da un aereo; in questo caso il terreno si trova a distanze superiori a 200 m; per cui si parla anche di fotogrammetria dei lontani (rilievo del territorio).

- Tipologia di **fotografia** a sua volta divisa in :
    - Fotogrammetria **classica** - Le fotografie sono ottenute dallo sviluppo di emulsioni fotosensibili su pellicola, o su lastre di vetro (in negativo e in positivo) ;
    - Fotogrammetria **digitale** - Le fotografie sono ottenute sotto forma numerica e organizzate in un grigliato di pixel. Possono essere ottenute sia da una macchina digitale, sia per scansione di una fotografia tradizionale.

- Tipologia di **elaborazione** a sua volta divisa in :
    - Fotogrammetria **analitica -** La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene elaborando numericamente (con moderni strumenti di calcolo) opportune misure effettuate direttamente sui fotogrammi ;
    - Fotogrammetria **analogica -** La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con dispositivi fisici (bacchette metalliche, raggi luminosi) che riproducono all'inverso il fenomeno della presa ;
    - Fotogrammetria **digitale** - La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene dall'unione delle fotografie attraverso l'utilizzo di software dedicati per la restituzione

fotogrammetrica, ottenendo come prodotto una nuvola di punti oppure elaborati derivati come ortofoto e modelli del terreno.

(Fonte_ Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri W. (2014) *Misure, rilievo, progetto per Costruzioni, ambiente e territorio*. Zanichelli 2014, IV edizione, Vol. III, modulo online, Unità T1)

7.2 STORIA DELLA FOTOGRAMMETRIA

Fase pionieristica

L'origine della fotogrammetria risale a metà dell'ottocento con la nascita della fotografia nel 1839, affiancando il metodo tradizionale del rilievo di punti, al rilievo realizzato tramite l'acquisizione delle fotografie.

Nel 1859 viene fondata da Aime Laussedat, il quale dimostra che le misure possono essere ottenute dai fotogrammi, ma questo procedimento non era del tutto corretto per via degli errori dovuti alla distorsione degli obiettivi fotografici.

Nel 1865 questa tecnica viene perfezionata da Ignazio Porro, attraverso l'integrazione del *fotogoniometro*, dove quest'ultimo "permetteva di misurare gli angoli delle direzioni che vanno dal centro dell'obiettivo ai punti dell'oggetto fotografato"[23].

Fase analogica e stereoscopica

Negli inizi del Novecento, grazie alla scoperta del metodo stereoscopico da parte di C. Pulfrich e il principio della marca mobile[24] di F.Stoltz ,vengono risolte le problematiche di riconoscimento di punti omologhi su due immagini diverse. Grazie all'utilizzo dello strumento stereo-micrometro realizzato dalla ditta Zeiss, era possibile analizzare due immagini della stessa area rilevata e ricavare le quote e le distanze relative a diversi punti dell'area. Grazie a questi sviluppi, nel 1908 E. Von Orel ha realizzato lo stereo-autografo, grazie al quale è stato risolto il problema del passaggio da due fotogrammi alla proiezione orizzontale, utilizzando elementi fisici di tipo analogico[25].

Il concetto di aerofotogrammetria viene ufficialmente introdotto durante la Prima Guerra Mondiale (1915-1918), grazie all'impiego di aerei per il rilievo e l'analisi dei territori.

[23] Cannarozzo R., 2014

[24] Cortese G., 2019 - Marca mobile : nella fotogrammetria analitica placchette circolari riportate sulle lastre su cui sono incise le marche di collimazione stereoscopica

[25] Cannarozzo R., 2014

Fase analitica

Verso la metà del Novecento, il calcolo elettronico ha trasferito l'elaborazione del processo fotogrammetrico verso un'impostazione analitica, grazie all'utilizzo calcolatori esterni[26].

Il metodo prevedeva il passaggio da una coppia stereoscopica di fotogrammi alla relativa proiezione ortogonale, attraverso il calcolo numerico di un certo numero di equazioni elaborate dal computer[27].

Fase digitale

Grazie all'introduzione della tecnologia digitale verso negli anni '90, i fotogrammi sono passati da analogici a digitali, in cui le immagini sono costituite da informazioni radiometriche catturate da un sensore composto da pixel. Grazie alle immagini digitali, sono stati sviluppati software specifici basati su principi di computer vision, arrivando a quelli attuali che utilizzano le tecniche di SfM (Structure from Motion) successivamente descritte.

7.3 PRINCIPI GEOMETRICI

Utilizzando la tecnica fotogrammetrica, è possibile determinare le posizioni dei punti di un oggetto, grazie alle informazioni dei punti corrispondenti sulle immagini acquisite da differenti punti di presa. In questo caso vengono definite le relazioni geometriche tra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle immagini proiettate sul piano fotografico (lastra) come illustrato in Fig.102. Ad ogni punto A, B dell'oggetto tridimensionale (spazio oggetto), corrisponde un punto A', B ' sul piano fotografico (spazio immagine). In questo caso è possibile pensare alla fotografia come una prospettiva centrale, dove i segmenti che congiungono il punto A con A' e B con B', si incontrano in un punto *O* molto vicino al piano fotografico, identificato come centro di presa.

[26] Kraus,1994
[27] Cannarozzo R., 2014

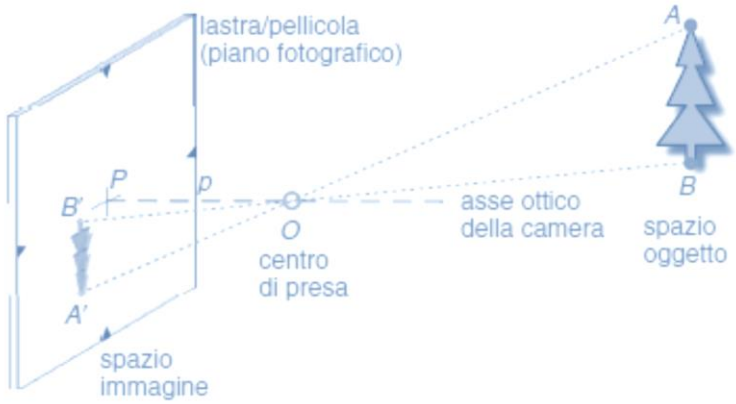


Figura 102 Relazione tra spazio punti tridimensionali dell'oggetto e immagine del piano fotografico _ Cannarozzo, 2014

Per la ricostruzione tridimensionale di un oggetto è importante fare un'osservazione qualora si disponga di una sola immagine o di più immagini. Nel primo caso, qualora fosse presente una sola immagine piana (come quella della fotografia), non è possibile definire la posizione o la dimensione di un oggetto in quanto non contiene informazioni sufficienti per definire la dimensione e la posizione di un oggetto tridimensionale. Nel caso in cui si disponga di due fotogrammi scattati da posizioni differenti, è possibile ottenere una visione stereoscopica* dell'oggetto fotografato, del quale possiamo ricavare le dimensioni della larghezza, della lunghezza e della profondità come visibile in Fig.103.

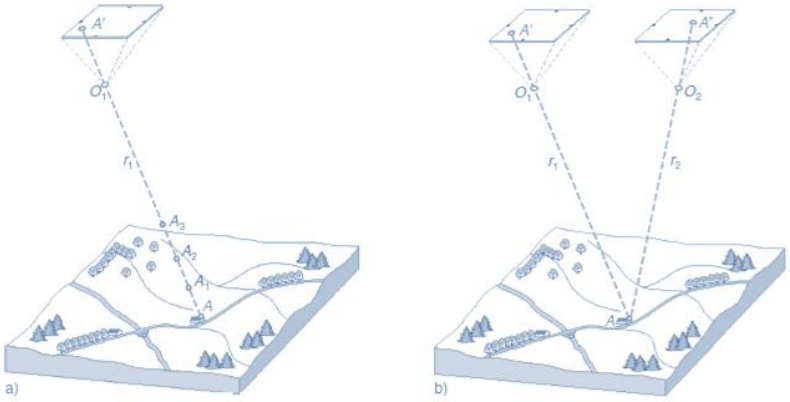


Figura 103 Confrotno tra una sola fotografia (a) e due fotografie (b) _ Cannarozzo, 2014

Il principio della visione stereoscopica è lo stesso di cui si avvale la vista umana. Nella visione binoculare, vengono raccolte due immagini leggermente diverse tra di loro di cui una dalla retina dell'occhio destro e una dalla retina dell'occhio sinistro. Le immagini avranno informazioni differenti dovute oltre alla distanza interpupillare e dal punto di vista differente come visibile in Fig.103. Nell'esempio rappresentato dall'immagine, con l'uso del solo occhio sinistro è possibile visualizzare il punto P e Q mentre usando solo l'occhio destro non è possibile percepire i due punti come distinti tra di loro. Con l'utilizzo di entrambi gli occhi, si ha una visione differenziata dei due punti e si ha la possibilità di apprezzare la dislocazione nello spazio, avendo una visione stereoscopica.

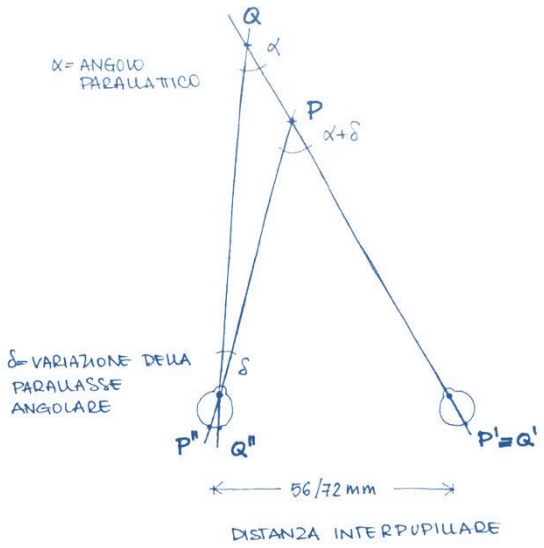


Figura 104 Schema della visione binoculare _ Bertocci, Manuale di rilievo architettonico e urbano,2012

L'effetto stereoscopico, risulta utile per la rilevazione e lo studio dell'architettura e del territorio poiché con l'utilizzo di due fotogrammi dello stesso oggetto, è possibile ricostruire la posizione nello spazio. Nel caso di territori o oggetti molto grandi da rilevare, si ricorre alla "prese stereogrammetriche" chiamate anche coppie di fotogrammi, contenenti l'oggetto da rilevare o una parte di esso. Attraverso l'acquisizione di strisciate di fotogrammi sovrapposte sia in senso trasversale che longitudinale, ogni punto deve essere sempre visibile in una coppia di fotogrammi in modo da permettere la ricostruzione con precisione della posizione nello spazio dell'oggetto rilevato. Attraverso un certo numero di punti di appoggio sul terreno, le cui posizioni sono ricavate tramite operazioni topografiche, è possibile ottenere informazioni riguardo le posizioni dei centri di presa e l'orientamento delle lastre.

7.4 FASI DEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO _ fotogrammetria digitale

Le operazioni che costituiscono l'intero processo del rilievo fotogrammetrico vengono suddivise in tre differenti fasi di cui :

- **Acquisizione** : operazioni riguardanti l'acquisizione delle immagini fotografiche ;
- **Orientamento** : operazioni per la determinazione dei parametri, utili per l'orientamento dei centri di presa e delle lastre, che saranno impiegati nella fase successiva ;
- **Restituzione** : operazioni che consentono la generare la forma e la dimensione dell'oggetto rilevato attraverso i restitutori, capaci di produrre un immagine raddrizzata, un disegno e un insieme numerico di coordinate.

- Per la corretta restituzione dell'oggetto rilevato, la **fase di acquisizione** è quella più importante in quanto, a seguito di una corretta progettazione del piano di volo e del settaggio dei parametri dei sensori, il prodotto finale generato durante le operazioni di restituzione, potrà risultare più dettagliato e

accurato. Tra i principali fattori che incidono sulla corretta progettazione del piano di volo è opportuno distinguere alcune delle categorie di cui :

- Tipologia di presa che a sua volta si divide in tre differenti categorie :
    - Ripresa **normale**, dove le prese sono perpendicolari al soggetto rilevato, ma parallele tra di loro ;
    - Ripresa **inclinata**, dove le prese sono inclinate verso il soggetto, ma parallele tra di loro ;
    - Ripresa **convergente**, dove le prese sono inclinate verso il soggetto, ma non parallele tra di loro.

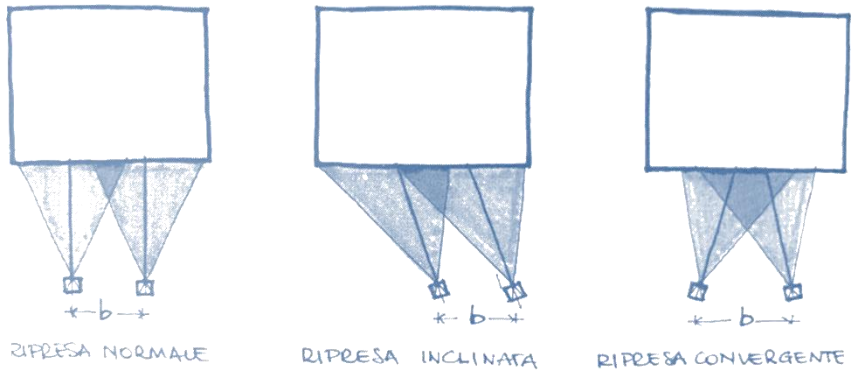


Figura 105 Schemi di presa_ Bertocci, Manuale di rielievo architettonico e urbano,2012

Dalle differenti tipologie di prese, il fotogramma acquisito è generalmente un'immagine prospettica rappresentata fuori scala, che in base alla tipologia di rilievo effettuato, deve essere identificata, secondo la scala media, la superficie abbracciata, la base di presa e il GSD (Ground Sample Distance).

- **Scala media** viene calcolata utilizzando la seguente formula :

$$1 / S = f / D$$

1/S = scala del fotogramma

f = distanza focale dall'obiettivo

D = distanza dalla superficie "media"

Qualora la focale *f* dell'obiettivo di acquisizione sia pari a 100mm e l'oggetto da rilevare sia a una distanza *D* pari a 100'000mm (100m), il valore della scala media sarà di 1 : 1000. Nel caso del rilievo architettonico, viene utilizzato il rapporto di 1/3 - 1/4, dove per la restituzione in scala 1/100 i fotogrammi devono essere al massimo in scala 1/400.

- **Superficie abbracciata** è un valore che dipende dalla lunghezza della focale *f* e dall'ampiezza del fotogramma. A parità di superficie abbracciata, all'aumentare della focale, aumenta anche la distanza di presa.

- **Base di presa (B)**, corrisponde alla distanza tra i centri di presa della camera tra due acquisizioni consecutive come visibile in Fig.106. Al diminuire della base di presa, maggiore sarà il **ricoprimento** tra le immagini e quindi aumenterà anche il numero di scatti. In questo caso siamo in presenza di un modello stereoscopico dove una porzione del modello fotografato, è presente su due fotogrammi consecutivi in cui la sovrapposizione /overlap (µ) delle immagini è maggiore del 50% (di solito si usa µ compreso tra il 60% e il 70%).

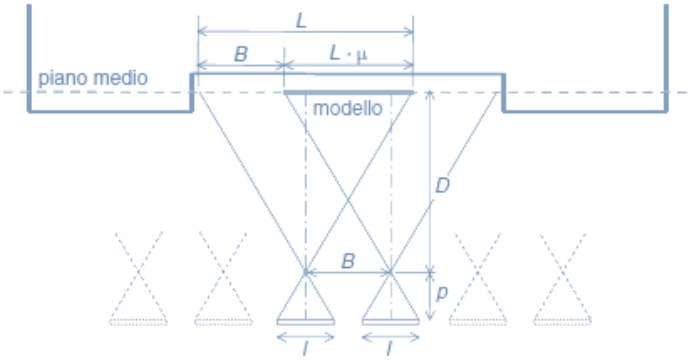


Figura 106 Schema di presa _ Cannarozzo, 2014

- **GSD**, corrisponde al **Ground Sample Distance**, cioè la distanza tra il centro di due pixel consecutivi. Al diminuire della dimensione del pixel, maggiore sarà il dettaglio e quindi le informazioni contenute nell'immagine, e viceversa sarà all'aumentare del pixel. Questo valore è fondamentale per ottenere immagini di qualità alta utili per l'elaborazione e generazione di prodotti accurati e dettagliati nei software dedicati. Per calcolare valore della distanza, viene utilizzata la seguente formula :

GSD = (s x H) / (f x l)

s = lunghezza del sensore (varia a seconda del sensore utilizzato)

H = distanza di presa (valore stabilito dall'operatore che nel caso di rilievo aereo viene stabilito facendo riferimento ai limiti e alle ostruzioni)

f = distanza della focale

l = numero di pixel

Come già anticipato, per la buona riuscita del rilievo e la restituzione di un prodotto dettagliato devono essere rispettati i parametri ricavabili dalle formule precedenti e alcune impostazioni dell'attrezzatura :

- È consigliabile impostare la risoluzione massima del sensore utilizzato ;

- Le lenti grandangolari possono causare problemi di distorsione delle immagini ;
- Lenti fisse sono preferibili così come l'utilizzo degli stessi parametri della camera per ogni foto acquisita ;
- ISO della fotocamera impostato nel valore più basso possibile per evitare l'effetto rumore nelle immagini ;
- Apertura e velocità di scatto alta (per evitare effetto di trascinamento).

Per quanto riguarda la fotogrammetria terrestre chiamata anche *close range*, per via delle piccole distanze tra l'oggetto e la camera, nella Fig.107 sono rappresentati i corretti metodi per il rilievo di facciate, interni o singoli oggetti. La corretta esecuzione del processo di acquisizione e il maggior numero di fotogrammi consecutivi, porterà ad ottenere più informazioni possibili per le successive fasi di elaborazione dei dati.

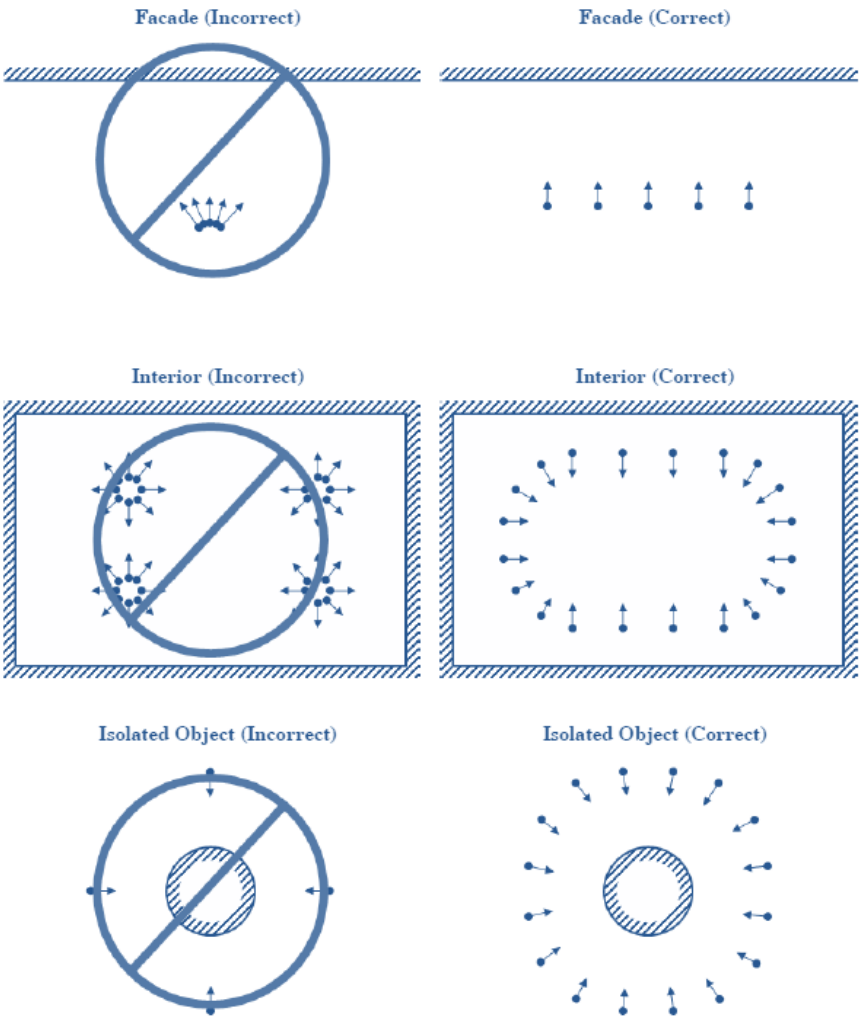


Figura 107 Esempio di prese per la corretta acquisizione di dati _ Manuale Agisoft Metashape 2.0

Non per ultimo è da considerare la scelta dell'attrezzatura da utilizzare con il relativo sensore, lo studio dell'impostazione delle prese e delle strisciate e del corretto calcolo del piano di volo.

- La seconda fase di **elaborazione** dei dati utili al fine di restituire un modello tridimensionale corretto, è la fase di *orientamento*, a sua volta identificata in due operazioni distinte di cui: *orientamento interno* legato alla stima dei parametri della camera, e *orientamento esterno* dal quale procedimento viene ripristinata la posizione nello spazio e della camera al momento della presa. Il primo si occupa della calibrazione della camera e del calcolo degli errori dovuti al fotogramma e alla distorsione dell'obiettivo. Il secondo invece si divide invece in orientamento relativo e orientamento assoluto come visibile in Tabella 6.

Tabella 6 Orientamento interno e orientamento esterno _ Cannarozzo, 2014

Orientamento interno	Insieme di *parametri* che consentono di ricostruire la metrica della *proiezione centrale*, quindi delle stelle di *raggi proiettanti*. Essi sono uguali per tutti i fotogrammi del rilievo, in quanto legati alla camera utilizzata nella presa, e vengono forniti dal costruttore della camera in appositi documenti (*certificati di calibrazione*).	
Orientamento esterno	**Orientamento relativo**	Determina la posizione relativa dei due fotogrammi, realizzando l'intersezione dei *raggi proiettanti*, dunque del *modello* tridimensionale dell'oggetto, ma in una *scala arbitraria* e con una *giacitura spaziale generica* (quindi svincolato dal sistema di riferimento assoluto *XYZ* legato all'oggetto rilevato).
	Orientamento assoluto	Il *modello* ricavato nella fase precedente viene *rototraslato* e *scalato*, in modo da riferirlo al *sistema di riferimento assoluto* e dimensionarlo alla *scala desiderata*. In questa fase è necessaria la conoscenza della posizione di alcuni *punti di appoggio* al suolo.

In breve l'orientamento è quella fase necessaria a ricavare informazioni riguardanti la posizione relativa tra i diversi fotogrammi, e determinare la loro collocazione nello spazio. Per questo processo è fondamentale essere a conoscenza dei parametri della fotocamera utilizzata, de la posizione nello spazio dei centri di proiezione e infine della direzione di presa. Attualmente, nei software di elaborazione dei dati, i parametri del sensore vengono ricavati dai dati presenti nelle immagini, al fine di eseguire le operazioni di calibrazione e orientamento.

L'insieme dei parametri di orientamento interno ed esterno permettono a loro volta di definire le equazioni di collinearità, indentificando le relazioni tra i punti immagine, il punto oggetto e il punto centro di presa.

Attualmente le operazioni di orientamento fotogrammetrico, insieme alla generazione dei modelli tridimensionali e delle nuvole di punti, vengono eseguite all'interno di software di fotogrammetria digitale utilizzando le tecniche di SfM (Structure from Motion). Attraverso una serie di algoritmi e di processi derivati dal computer vision, i sistemi SfM consentono di stimare la posizione 3D di punti rappresentati in differenti immagini, ricostruendo la geometria dell'oggetto rilevato (structure) e le posizioni di ogni singola presa (motion), anche in assenza dei parametri di calibrazione della camera.

Nella fotogrammetria tradizionale la posizione di ogni singolo punto visibile da due fotogrammi veniva stimata dalle equazioni di collinearità attraverso la triangolazione fotogrammetrica, grazie ai parametri di orientamento interno e esterno. Per quanto riguarda i sistemi SfM vengono utilizzati i principi della geometria epipolare[28], modificando la relazione tra i centri di presa, i *tie points* e le posizioni dei punti, per orientare le prese, stimando gli orientamenti interni ed esterni.

Attraverso il *bundle adjustment*, il software riesce a minimizzare l'errore della ricostruzione, migliorando la precisione nel calcolo degli orientamenti di ciascun fotogramma. Questo metodo consente di calcolare le relazioni fra coordinate "terreno" e coordinate "immagine". Il processo dà una stima della calibrazione della camera, della sua posizione e determina dei punti caratteristici nello spazio tridimensionale. Per poter orientare e scalare correttamente il modello generato, è possibile effettuare questa operazione andando a inserire all'interno del software di elaborazione, il sistema di riferimento assoluto dei punti a terra, dei quali si si conosce il posizionamento geografico. Quest'ultimo può essere determinato attraverso il rilievo con sistemi GPS/GNSS dei punti di riferimento a terra chiamati anche GCP (Ground Control Point), utili per l'orientamento esterno.
Grazie a questi processi, i programmi di fotogrammetria sono in grado di elaborare l'insieme di immagini, eseguire le operazioni di orientamento e ricostruzione come visibile in Fig.112, generando un prodotto come la nuvola di punti densa (dense cloud).

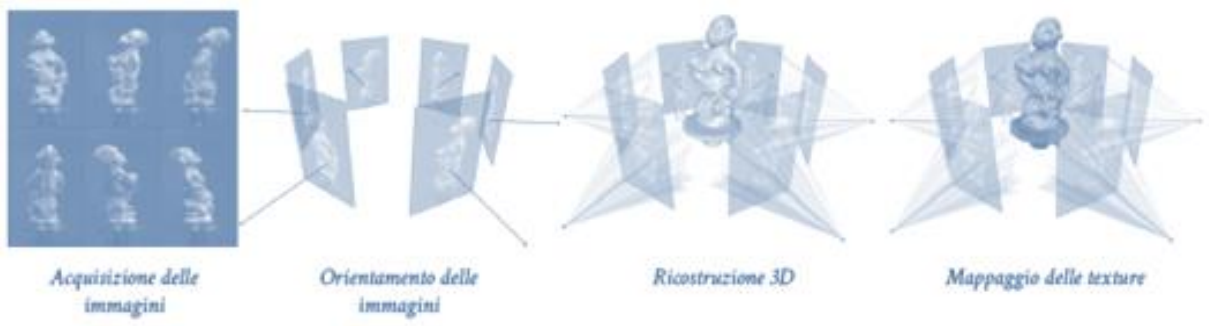


Figura 108 Fasi di elaborazione SfM _ Spanò A. T., dispense Workshop "Metodi 3D Imaging and ranging per la documentazione del patrimonio", Politecnico di Torino, 2019

[28] geometria epipolare : descrive le relazioni che sussistono tra i punti corrispondenti a due viste

I sistemi SfM quindi sono fondamentali per quanto riguarda la fase successiva di restituzione, in quanto permettono di attuare le fasi di orientamento e la realizzazione del modello denso di punti.

L'ultimo processo di elaborazione è il *Dense Image Matching*, grazie al quale il programma rielabora i dati fino ad adesso ottenuti, generando dalle immagini una nuvola di punti densa, utile per la creazione del modello tridimensionale dell'area o dell'oggetto rilevato. L'elaborazione consiste nella ricerca delle corrispondenze tra le immagini, nella verifica della procedura di matching e nel calcolo della posizione nello spazio dell'oggetto rilevato. Il processo a sua volta può essere eseguito tramite gli algoritmi di tre differenti operazioni, eseguiti nelle aree di corrispondenza delle immagini :

- Area Based Matching (ABM) : si basa sul confronto di differenti livelli di grigio tra le immagini;
- Feature Based Matching (FBM) : si basa sulla ricerca di aree, punti e linee tra le immagini ;
- Relational Matching (RM) : si basa su entità radiometriche, spaziali o topologiche.

- La terza ed ultima fase è quella della **restituzione**, che consiste nell'esecuzione automatizzata di differenti passaggi, per ottenere il prodotto finale ed eseguire le operazioni di:

  - misurazione sul modello stereoscopico a seguito dell'orientamento delle immagini ;
  - determinazione delle coordinate x,y,z dei punti ;
  - l'editing e la verifica dei dati ;
  - restituzione grafica degli elaborati

La fase di restituzione è l'ultimo processo di elaborazione dei dati che consente, per quanto riguarda la fotogrammetria digitale, di svolgere una serie di operazioni automatizzate. La possibilità di utilizzare software per la restituzione fotogrammetrica, permette di agire sulle impostazioni di elaborazione dei dati, per ottenere modelli tridimensionali, ortomosaico, modelli di elevazione, nuvole di punti utili al fine di eseguire anche analisi o misure dell'oggetto rilevato. I software di fotogrammetria, così come quelli analizzati in questa tesi di cui Agisoft Metashape e DJI Terra, permettono l'esecuzione di una serie di operazioni automatizzate, per l'elaborazione di grandi quantità di dati, con tempi di elaborazione variabili a seconda della qualità del prodotto finale e della potenza di calcolo del computer utilizzato.

7.5 FOTOGRAMMETRIA DA UAV

Nasce principalmente per scopi militari durante la Seconda Guerra Mondiale, come metodo per ricavare informazioni e dati relativi al territorio e alle zone militari, attraverso camere montate su aerei, per effettuare rilievi da quote elevate. Grazie allo sviluppo di questa tecnica, viene utilizzato anche il telerilevamento da satellite per l'aggiornamento cartografico. Con lo sviluppo dei velivoli senza la

presenza del pilota a bordo (es. aquiloni), il metodo di rilievo ha permesso di sostituire la topografia tradizionale per effettuare riprese da basse quote e in tempi ridotti di grandi superfici di territorio. Questa tecnica permette quindi di produrre cartografie con precisione metrica e ricavare informazioni riguardanti tutti i punti del terreno, a differenza del rilievo topografico. Con l'introduzione degli UAV in ambito civile, e il continuo sviluppo di questi sistemi, la fotogrammetria con il drone consente l'applicazione in molteplici campi, dal rilievo urbano a quello agroforestale, da quello archeologico al rilievo di cantieri, così come il rilievo zone colpite da calamità naturali e ecc.

Grazie alla continua evoluzione dei droni, alla tipologia di sensori per l'acquisizione delle immagini, alla possibilità di eseguire la missione di volo in modalità manuale o automatica e soprattutto grazie al costo e ai tempi di operazione bassi, oggi è possibile effettuare rilievi fotogrammetrici da bassa quota (Close Range Photogrammetry), ottenendo immagini di dettaglio attraverso sensori come camere RGB, camere termiche, camere multispettrali e LIDAR, di aree di grandi dimensioni consentendo di restituire prodotti tridimensionali ad altra precisione (Fig.109).

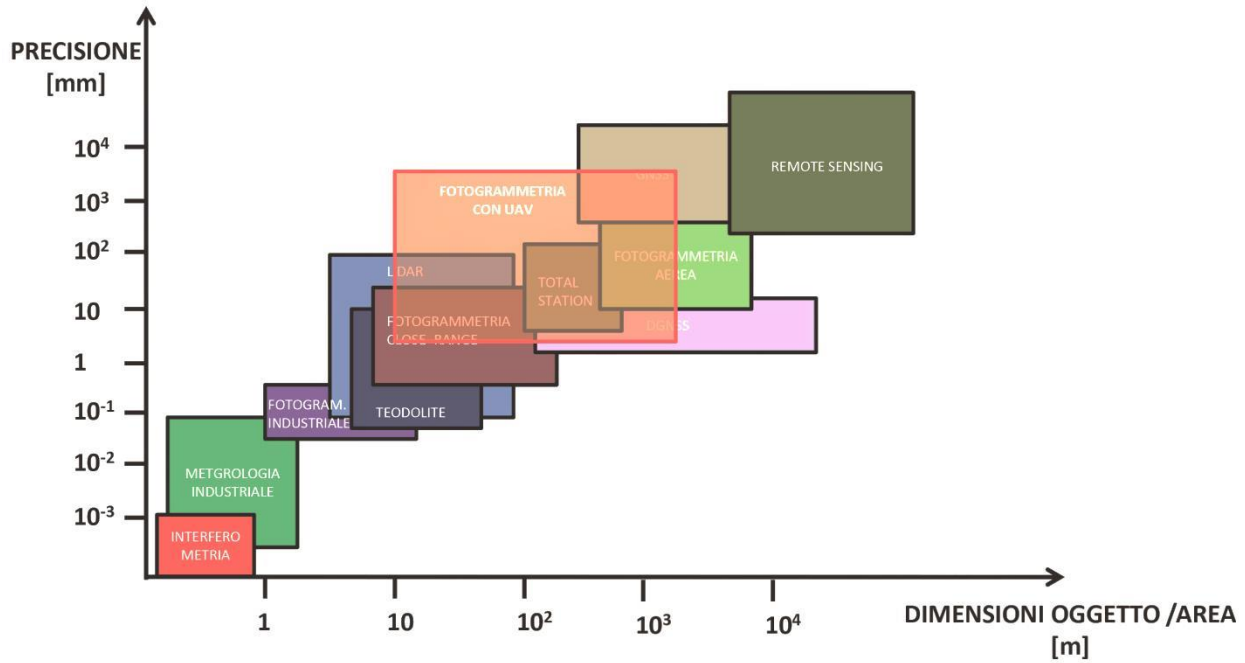


Figura 109 Dispense Chiabrando 2021

A differenza della fotogrammetria terrestre, la fotogrammetria da UAV consente di eseguire rilievi aerei per l'acquisizione di dati di parti di fabbricati difficilmente raggiungibili (es. rilievi di coperture) o di aree di grandi dimensioni. Grazie all'elaborazione dei dati tramite il processo fotogrammetrico SfM (Structure from Motion), è possibile generare mappe territoriali, modelli tridimensionali, ortomosaici e modelli altimetrici di cui (DTM, DEM e DSM). I primi due rappresentano il terreno mentre l'ultimo rappresenta sia il terreno che tutti gli elementi naturali e antropici.

Per eseguire una missione di volo corretta ed ottenere immagini ottimali per la successiva fase di elaborazione e restituzione, è opportuno programmare il piano di volo, determinando sulla base della scala di rappresentazione, i parametri riguardanti la velocità del mezzo, la quota, la tipologia di sensore utilizzato e il numero di scatti.

Le acquisizioni vengono effettuate ad intervalli regolari con sovrapposizione μ (overlap) di almeno 60% tra i fotogrammi adiacenti di ogni strisciata e con una sovrapposizione laterale ε (sidelap) minima di 15% come visibile in Fig.110.

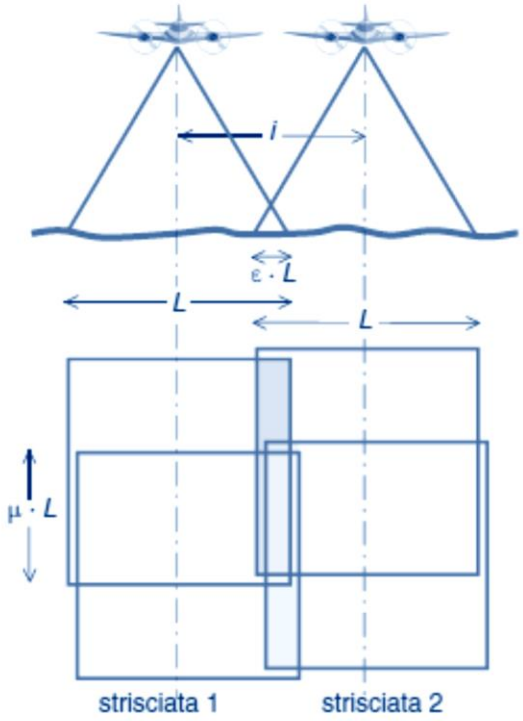


Figura 110 Sovrapposizione tra fotogrammi _ Cannarozzo, 2014

In base al rilievo da effettuare, è possibile programmare la missione di volo in modalità automatica all'interno di software dedicati (es. DJI Pilot o DJI GS Pro), impostando la modalità di volo in strisciate singole, strisciate a doppia maglia o volo circolare come visibile in Fig.114. Per l'acquisizione di più informazioni, è possibile effettuare più voli con inclinazione nadirale della camera (perpendicolare al terreno) e con inclinazione obliqua a 45°, quest'ultima utile per la ricostruzione tridimensionale.

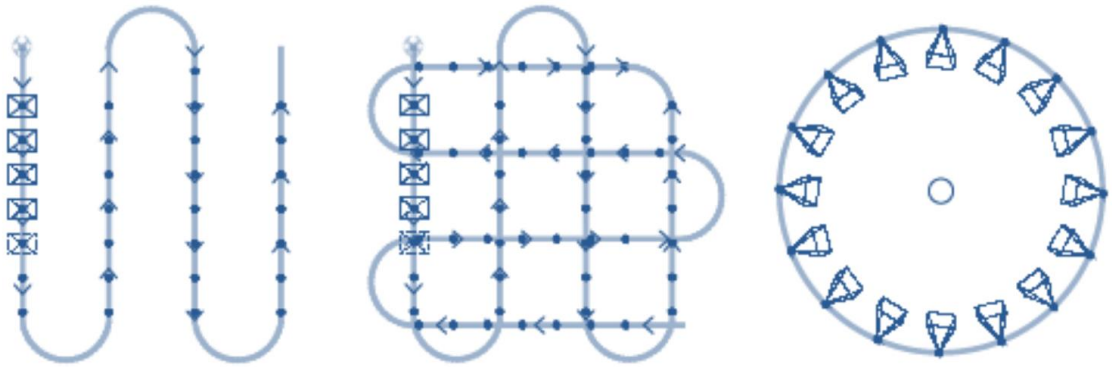


Figura 111 Strisciata singola (A), strisciata a doppia maglia (B) e volo circolare (C) _ Einaudi, 2019

In base alle applicazioni e all'ambiente di volo, le missioni di volo possono essere eseguite in modalità manuale al fine di garantire un miglior controllo del drone nel caso in cui venga richiesto un maggior controllo da parte dell'operatore. In questo caso, il volo sarà effettuato rispettando tutti i parametri precedentemente calcolati. Questa modalità viene utilizzata nel caso in cui siano presenti ostruzioni nell'area di rilievo o qualora i sensori anticollisione del drone limitino l'esecuzione della missione di volo.

Dalle formule successivamente elencate è possibile ricavare alcuni dei dati utili per il piano di volo. Quest'ultimo sarà dato dalla moltiplicazione del *GSD* precedentemente ricavato con la focale del sensore (f), e il prodotto ottenuto diviso per la larghezza di ogni pixel del sensore (d_{pixel}).

Da $\boldsymbol{GSD = \sigma * ½}$

dove

$\boldsymbol{\sigma}$ **= 0.2mm * n** (scala di rappresentazione)

Ricavo il piano di volo

Piano di volo = ($\boldsymbol{GSD * f}$ **) /** $\boldsymbol{d_{pixel}}$

Dal piano di volo è possibile ricavare i valori lx e ly dai quali vengono ricavate le sovrapposizioni trasversali e longitudinali :

Lx = lx * (piano di volo / $\boldsymbol{f}$ **)**

Ly = ly * (piano di volo / $\boldsymbol{f}$ **)**

Sovrapposizione trasversale (60%) = 0,6 * Lx

Sovrapposizione longitudinale (80%) = 0,8 * Ly

Dai valori si lx e ly è possibile ricavare :

Interasse = Lx * (1 - 0,6)

Base di presa = Ly * (1 - 0,8)

Tempo tra gli scatti = base di presa / 5

Infine, dalle dimensioni dell'area intera da rilevare, è possibile ricavare il numero di strisciate attraverso la seguente formula :

Strisciate = lato / 45

Ovviamente più acquisizioni vengono effettuate, migliore sarà il risultato a seguito dell'elaborazione dei dati. Nel caso in cui il terreno risulti irregolare, è possibile effettuare il volo in più parti oppure inserire all'interno dei software di programmazione del volo, il modello di elevazione del terreno in modo da mantenere il valore del GSD invariato.

Infine, come integrazione al rilievo con droni, è possibile utilizzare target distribuiti all'interno dell'area di rilievo o sul fabbricato stesso in modo da essere successivamente rilevati oltre alle acquisizioni con il drone, anche con rover GPS/GNSS, per poter georeferenziare e scalare il modello generato all'interno dei software di elaborazione.

CONCLUSIONI

Dall'analisi di questo capitolo, la tecnica del rilievo fotogrammetrico permette di ottenere un insieme di dati acquisiti tramite fotografie da cellulari, droni o macchine fotografiche, attraverso l'elaborazione nei software dedicati. Si può definire quindi che è una tecnica di rilievo indiretto e che permette di ricavare dalle immagini, la geometria e le misure reali dell'oggetto, senza la necessità di entrare in contatto diretto con esso. Come specificato nel capitolo "Applicazioni del drone nell'ambito dell'Architettura", può essere utilizzato per differenti tipologie di rilievo, per l'analisi dei cantieri, per il monitoraggio di strutture, di rilievi territoriali, rilievi di aree colpite da calamità naturali e ecc. La possibilità di utilizzare droni per la fotogrammetria aerea, permette di ottenere un maggiore quantitativo di dati, anche di parti di fabbricati o aree difficilmente raggiungibili, e integrare gli stessi con dati rilevati da rover GPS/GNSS, per georeferenziare e scalare il modello generato. Attraverso una corretta progettazione della missione di rilievo, all'utilizzo di un sensore ad alta risoluzione e alla corretta impostazione di elaborazione dei dati, è possibile ricavare un modello tridimensionale più dettagliato e accurato. Inoltre, grazie anche all'utilizzo di computer con parametri di calcolo elevati, il tempo di elaborazione può essere ridotto ulteriormente.

8. RILIEVO ISTITUTO COMPRENSIVO “C. ALVARO – P. GOBETTI” TORINO

In questo capitolo verrà affrontato il rilievo fotogrammetrico con UAV dell’Istituto Comprensivo “ C. Alvaro - P. Gobetti “ situato a Torino, analizzando le tecniche e l’attrezzatura utilizzata, l’elaborazione dei dati attraverso i software Agisoft Metashape e DJI Terra e il confronto dei risultati ottenuti con entrambi. Questo studio serve per confrontare i due metodi utilizzati, attraverso l’analisi dei dati e la qualità di dati necessari per le operazioni di rilievo, indagine e documentazione fotografica nell’ambito architettonico. L’impiego dello UAV permetterà di acquisire dati difficilmente estrapolabili da attrezzature stazionarie, di ottenere immagini di qualità alta grazie alla sensoristica installata e di georeferenziare quest’ultime grazie ai dati acquisiti sul campo tramite il GPS/GNSS. L’insieme di dati saranno processati secondo i principi fotogrammetrici ed elaborati grazie agli algoritmi implementati in alcuni software di fotogrammetria e successivamente confrontati tra i metodi utilizzati.

OBIETTIVO

L’obiettivo di questa tesi è quello di applicare e validare una metodologia che supporti la possibilità di effettuare il rilievo di un edificio attraverso l’utilizzo del drone e la successiva elaborazione dei dati acquisiti in software dedicati per la restituzione fotogrammetrica. Grazie alla forte crescita dell’impiego di questa metodologia i software disponibili sul mercato consentono di restituire dati durante le fasi de elaborazioni, in tempi sempre più ristretti e di qualità elevata. L’operazione di questo caso studio consisterà nell’effettuare il rilievo dell’Istituto Comprensivo “ C. Alvaro - P. Gobetti “ attraverso l’utilizzo di UAV quadrirotore di fascia medio alta tra quelli disponibili sul mercato, attraverso l’acquisizione di immagini tramite il sensore RGB su di esso installato. Il procedimento consisterà nello studio preliminare di pianificazione dell’operazione di volo attraverso l’analisi dell’area di rilievo e delle relative leggi vigenti sul territorio. Grazie anche agli strumenti e alle tecniche fornite dalla Geomatica, il rilievo sarà effettuato posizionando una serie di target a terra, successivamente misurati tramite sensore GNSS, necessari per georeferenziare e scalare il modello tridimensionale successivamente generato dalle immagini. Per l’elaborazione fotogrammetrica sarà utilizzato il software Agisoft Metashape e il software DJI Terra. Dalla realizzazione dei due prodotti, sarà effettuata un’analisi dei dati ricavati dalle nuvole rispetto alle coordinate rilevate con il GPS/GNSS, un confronto tra le nuvole stesse e infine sarà dimostrato attraverso i dati, l’accuratezza dei prodotti generati dalle foto rilevate con il drone.

8.1 CASO STUDIO

L'edificio oggetto di analisi di questa tesi è l'Istituto Comprensivo " C. Alvaro - P. Gobetti ", situato in via Romita nel quartiere Mirafiori Nord localizzato a sud ovest della città di Torino e realizzato negli anni 70' a seguito del rapido sviluppo demografico della città. La struttura dell'edificio situata in posizione centrale e sviluppata in diagonale sul lotto di pertinenza a sua volta costituito in gran parte da aree verdi, presenta una pianta rettangolare con distribuzione a piastra, suddiviso in quattro blocchi che a loro volta ospitano le scuole di diversi gradi scolastici e servizi dedicati per il quartiere. Lo sviluppo in orizzontale dell'edificio permette di avere spazi interni distribuiti e articolati nei diversi blocchi e mantenere altezze contenute rispetto gli edifici dei lotti adiacenti. La tipologia di questo fabbricato segue una soluzione progettuale riguardante l'architettura scolastica degli anni 60' e 70' che consiste nell'unire più funzioni e servizi nella stessa struttura, con accessi e distribuzioni separate e aree verdi di connessione con l'intorno urbano.

Data la grandezza/ l'estensione del lotto e lo sviluppo in orizzontale del fabbricato, lo studio consiste nell'effettuare il rilievo dell'edificio utilizzando le tecniche e le discipline della Geomatica, acquisendo dati attraverso l'utilizzo di un drone e rover GNSS, in modo da ottenere un maggior quantitativo di dati anche di parti difficilmente rilevabili, in tempi e costi ridotti. L'impiego di queste strumentazioni e l'unione dei dati rilevati, porteranno ad acquisire informazioni necessarie alla realizzazione di un modello tridimensionale tramite le tecniche della fotogrammetria, per l'estrapolare l'ortomosaico o misurazione diretta sul modello tridimensionale per effettuare operazioni di ispezione, verifica della struttura o aggiornamento delle carte tecniche.

L'obiettivo sarà quello di progettare il piano di volo per ottenere più informazioni sia per l'analisi che per la realizzazione di un modello tridimensionale più accurato, elaborare successivamente i dati acquisiti con il drone in due software differenti di cui Agisoft Metashape e DJI Terra e infine confrontare la qualità dei prodotti finali e dei report generati con entrambi.

Figura 112 Vista aerea Istituto Alvaro-Gobetti

8.2 PIANO DI VOLO

Prima di effettuare la missione di volo, è opportuno programmare il piano di volo (PdV) per effettuare le operazioni di rilievo in modo sicuro ed efficiente al fine di acquisire più informazioni possibili, di qualità elevata utili per le analisi e per la realizzazione del modello tridimensionale. Il prodotto finale sarà condizionato dai parametri impostati, dalla strumentazione e dalla durata del rilievo stesso.

- PIANIFICAZIONE DEL PIANO DI VOLO

La prima fase consiste nell'individuazione dell'area oggetto di rilievo, fondamentale per l'analisi del contesto a seconda dell'area oggetto di rilievo (es. aree residenziali, sportive, industriali o zone scolastiche come nel caso dell'area di intervento), in modo da verificare se sono aree soggette ad assembramenti o a limitazioni indicate dalle normative nazionali. Con l'utilizzo di ortofoto aggiornate, carte tecniche o piattaforme online come Google Maps è possibile ottenere informazioni preliminari riguardo le dimensioni o la morfologia dell'area, la presenza di edifici con altezze differenti o interferenze come alberi, linee elettriche e ecc.

Figura 113 Ortofoto da Google Maps con quote dell'area di rilievo

Trattandosi di un complesso scolastico localizzato in una zona residenziale, le prime analisi sono state effettuate esaminando le immagini visibili tramite Google Street View aggiornate all'anno 2021, per verificare il contesto circostante e la presenza di interferenze.

Osservando l'area di rilievo è stato possibile identificare la presenza di alberi all'interno del lotto come visibile in tutte le immagini successivamente allegate e alcuni edifici di altezze superiori all'Istituto, visibili nelle immagini seguenti, localizzati rispettivamente a sud e a est del lotto.

Figura 114 Vista Via Giacomo Balla angolo Via Pietro Canonica

Figura 115 Vista Nord-Ovest di Via Giacomo Balla

Figura 116 Vista Via Giuseppe Romita angolo Via Giacomo Balla

Figura 117 Vista Via Pietro Canonica angolo Via Giuseppe Romita

Per programmare il Piano di Volo è stato utilizzato il modello digitale del terreno DTM fornito dalla Regione Piemonte, per impostare le strisciate di volo secondo la conformazione dell'area interessata e l'elevazione del terreno. In questo caso, dai dati verificati, l'area di interesse risulta piuttosto pianeggiante con una quota media del terreno attorno ai 260 m sul livello del mare.

	Quote Terreno DTM (P.D.L.)			
	id_punto	quota (m)	coord_nord	coord_est
1	511418	259,71	4989052.323	1391884.737
2	514317	260,5	4989088.059	1391799.672
3	509551	261,4	4989126.713	1391706.643
4	509847	261,45	4989314.816	1391785.918
5	511419	260,21	4989271.591	1391944.116
6	509556	259,78	4989218.411	1391940.159
7	509552	259,62	4989090.791	1391933.513
8	509721	259,38	4989058.681	1391931.645

quota media 260,2563

Figura 118 Ortofoto Geoportale Regione Piemonte con quote di terreno DTM (http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=mappa)
Tabella 7 Quote terreno ricavate dal DTM

Per quanto riguarda le quote dei fabbricati, degli alberi o di altri manufatti è possibile fare affidamento al modello digitale della superficie DTM, ma in assenza di questo modello è stato possibile fare affidamento alle informazioni presenti sul sito del Geoportale, consultando le misure delle Quote di Gronda (P.D.G.) dei fabbricati presenti attorno all'area di rilievo.

	Quote Gronda (P.D.G.)			
	id_punto	quota (m)	coord_nord	coord_est
A	462233	284,6	4988988.132	1391889.663
B	61943	286,8	4989051.945	1391803.073
C	61351	271,1	4989225.034	1391717.387
D	1027321	268,4	4989295.238	1391896.018
E	62086	294,9	4989102.166	1391939.591
F	229902	274.7	4989160.879	1391820.848

Figura 119 Ortofoto Geoportale Regione Piemonte con quote di terreno DTM http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=mappa
Tabella 8 Quote terreno ricavate dal DTM

Ricavando queste informazioni è possibile identificare l'altezza dell'edificio più alto attorno al lotto di rilievo facendo la differenza tra la quota del punto E di 294,9 m, e la quota media del terreno di 260 m (utilizzata in quanto il terreno risulta piuttosto pianeggiante). Il risultato sarà di una quota di 34 m, al di sopra della quale sarà effettuato il volo, per evitare situazioni pericolose durante le

operazioni di rilievo. Da non escludere che una seconda valutazione dell'area di rilievo sarà effettuata direttamente sul posto per verificare la presenza degli ostacoli non identificati dall'analisi preliminare, in modo da garantire un'esecuzione sicura dell'operazione.

Per il rilievo fotogrammetrico è stato utilizzato il drone quadrirotore semiprofessionale della marca DJI modello Phantom 4 PRO, modello equipaggiato con camera RGB da 1 pollice dalla risoluzione di 20 Megapixel, e sensori anticollisione utili per evitare ostacoli in 5 direzioni diverse.

120A

120B

Figura 120 A UAV utilizzato - DJI Phantom 4 PRO **e 120 B** UAV in volo durante l'operazione di rilievo

SCHEDA TECNICA DJI PHANTOM 4 PRO

PESO :	1388g (con batteria ed eliche)
DIMENSIONI :	40.5 x 33.0 x 22.5(h) cm
VELOVITA' MASSIMA :	72 km/h
SISTEMI DI POSIZIONAMENTO :	GPS/GLONASS
DISTANZA MASSIMA :	3500 m in modalità CE
ALTEZZA MASSIMA :	500 m
SENSORI ANTICOLLISIONE :	Infrarossi
AUTONOMIA :	30 min
BATTERIA:	5870 mAh

SCHEDA TECNICA SENSORE RGB

FOTOCAMERA:	CMOS 1"
RISOLUZIONE:	20 Megapixel
SENSORE :	13,2 * 8,8 mm
PIXEL :	2.4 micron
DIMENSIONE IMMAGINI:	5472 x 3648 pixel
CAMPO VISIVO FOV :	84°
LUNGHEZZA FOCALE:	8,8 mm
FRAME RATE :	14 fotogrammi

Per pianificare la missione di volo, è stato di fondamentale importanza scegliere la scala più adeguata perla rappresentazione dell'intero isolato, in quanto attraverso le formule successivamente mostrate sarà possibile pianificare le impostazioni di volo per ottenere immagini di qualità elevata capaci di raggruppare più informazioni possibili all'interno di ogni singolo pixel. Per rappresentare l'edificio e il lotto di pertinenza, è stata scelta la scala di 1:200 come più adeguata alla restituzione di un maggior numero di informazioni. Dalle formule successivamente indicate è possibile ottenere i valori della precisione di rappresentazione e il valore della tolleranza.

SCALA 1 : n	n	σ	T	
1:50	50	10	20	mm
1:100	100	20	40	mm
1:200	200	40	80	mm
1:500	500	0,1	0,2	m
1:1000	1000	0,2	0,4	m
1:2000	2000	0,4	0,8	m

scala = 1 : n

PRECISIONE DI RAPPPRESENTAZIONE
σ = 0.2 MM * n

TOLLERANZA al 95%
T = 2 * σ

In questo caso è possibile ricavare il *Ground Simple Distance (GSD)* che indica la distanza tra il centro di due pixel vicini di un'immagine a terra. Al diminuire dei pixel, diminuirà il GSD ma aumenterà il dettaglio delle immagini e viceversa all'aumentare dei pixel.

$$GSD = \sigma * ½ \quad \text{---> } \quad GSD = 40 * ½ = 20 \text{ mm}$$

Per ricavare il piano di volo sarà utilizzata la seguente formula data dalla moltiplicazione del *GSD* precedentemente ricavato con la focale del sensore (f), e il prodotto ottenuto diviso per la larghezza di ogni pixel del sensore (d_{pixel}).

$$\text{Piano di volo} = (GSD * f) / d_{pixel}$$

Piano di volo = (20 * 8,8) / 0,0024 = 73333,333 mm

Piano di volo = 73 m

GEOMETRIA DEL SENSORE RGB _ DJI PHANTOM 4 PRO				
distanza principale /focale	8,8	mm		
lx	13,2	mm	5472	pixel
ly	8,8	mm	3648	pixel
pixel	2,4	micron	0,0024	mm

Il risultato ottenuto è l'altezza massima alla quale è possibile effettuare le riprese per ottenere un prodotto rappresentato nella scala 1:200 precedentemente stabilita. All'aumentare dell'altezza, il valore del *GSD* aumenterà e le immagini acquisite saranno meno dettagliate. Al contrario invece è possibile stare al di sotto della quota di volo stabilita e ottenere immagini un *GSD* minore.

Un altro dei parametri da tenere in considerazione per l'acquisizione di un maggior quantitativo di informazioni è lo schema dei blocchi fotogrammetrici, che per quanto riguarda terreni dalla superficie pianeggiante consiste nella sovrapposizione delle immagini con ricoprimento longitudinale di 80% e ricoprimento trasversale di 60%. Più elevato è il ricoprimento, maggiore sarà il numero delle immagini acquisite, consentendo loro volta, a seguito dell'elaborazione nei software dedicati, di generare un prodotto più preciso con un grado di dettaglio elevato.

Attraverso le formule in seguito allegate, è possibile calcolare le sovrapposizioni e le strisciate longitudinali e trasversali. Tenendo in considerazione il dato precedentemente ricavato sul piano di volo, in campo è stato scelto di effettuare la missione di volo ad un'altezza di quota di 52 m (Fig. xx), inferiore rispetto alla quota di 73 m ricavata dalle formule. La scelta del piano di volo è stata effettuata considerando i dati del DSM della Città di Torino, il piano di volo precedentemente calcolato e non per ultima l'ispezione sul campo prima dell'esecuzione della missione di volo. La quota di volo più bassa consente in questo caso di ottenere un GSD inferiore come illustrato nel calcolo successivo, utile per realizzare durante le successive elaborazioni delle immagini, un modello più dettagliato.

$$GSD = (d_{pixel} * \text{Piano di volo}) / f$$

$$GSD = (0{,}0024 * 52000) / 8{,}8 = 14{,}18 \text{ mm}$$

GSD = 1,4 cm/pixel

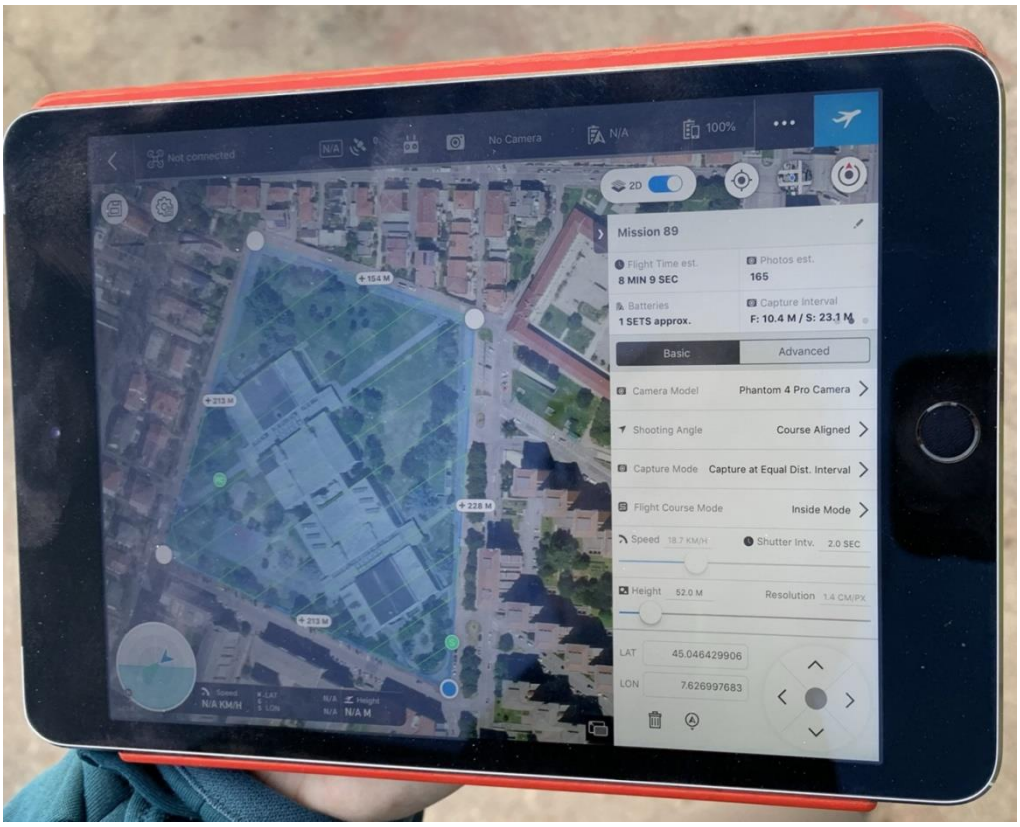


Figura 121 Impostazione piano di volo

Trattandosi di un lotto con una forma irregolare, per effettuare i calcoli riguardanti le strisciate, è stata ipotizzata una forma quadrata del lotto considerando come valori le misure dei lati più grandi localizzati perpendicolarmente tra di loro a sud - ovest (213 m) e a nord - ovest (213 m).

Dalla quota prestabilita di 52 m, sono stati calcolati i valori di lx e ly dai quali a loro volta sono stati ricavati i valori di sovrapposizioni e il numero di strisciate in entrambi i casi longitudinali e trasversali.

Lx = lx * (piano di volo / *f*)

Lx = 13,2 * (52000 / 8,8) = 78000 mm = 78 m

Ly = ly * (piano di volo / *f*)

Ly = (8,8 * (52000 / 8,8)) = 52000 mm = 52 m

Dai valori ottenuti si ricava la sovrapposizione trasversale e longitudinale con le seguenti formule :

Sovrapposizione trasversale (60%) = 0,6 * Lx

Sovrapposizione trasversale = 0,6 * 78 = 46,8 m

Sovrapposizione longitudinale (80%) = 0,8 * Ly

Sovrapposizione longitudinale = 0,8 * 52 = 41,6 m

Per calcolare l'interasse delle strisciate e la base di presa si utilizzano i valori ricavati di Lx e Ly e dai risultati ottenuti si ricava l'intervallo tra gli scatti :

(ricoprimento trasversale al 60%)

Interasse = Lx * (1 - 0,6)

Interasse = 78 * (1 - 0,6) = 31,2 m

(ricoprimento longitudinale all' 80%)

Base di presa = Ly * (1 - 0,8)

Base di presa = 52 * (1 - 0,8) = 10,4 m

Tempo tra gli scatti = base di presa / 5

Tempo tra gli scatti = 10,4 / 5 = 2,08 s ~ 2 s

Dalle misure precedentemente stabilite del lotto, sono state ricavate il numero di strisciate nella direzione longitudinale e in quella trasversale :

Strisciate = lato / 45

Strisciata longitudinale = 213 / 45 = 4,733333 ~ 5 strisciate

Strisciata trasversale = 213 / 45 = 4,733333 ~ 5 strisciate

Un altro dei dati da tenere in considerazione è quello della velocità, che nei casi di voli a bassa quota, si aggira tra 1 e 5 m/s. Quest'ultimo, insieme ai valori del tempo di otturazione del sensore e alla scala media del fotogramma, possono variare in base alla tipologia di volo e alle condizioni di illuminazione, e causare problemi di trascinamento. Inoltre, di fondamentale importanza è il settaggio manuale delle impostazioni del sensore, utile al fine di ottenere immagini con esposizioni simili, per la restituzione attraverso i software di fotogrammetria, di modelli tridimensionali ottimizzati.

Per evitare il verificarsi di questa condizione è possibile utilizzare la seguente formula :

Trascinamento = velocità * esposizione * (focale / piano di volo)

Velocità di volo impostata = 18,7 Km/h = 5,19 m/s (vedi Fig.xx)
Esposizione = 1/1000 = 0,001 s (esempio)
Focale = 8,8 mm = 0,0088 m
Piano di volo = 52 m

Trascinamento = 5,19 m/s * 0,001 s * (0,0088 m / 52 m) = 0,87831

0,87831 < 1 pixel (2,4) ok

Rolling shutter

Nel caso in cui il risultato ottenuto con la formula precedente sia minore del pixel del sensore utilizzato, non sarà presente il verificarsi del trascinamento. In questo caso, le impostazioni ottimali per l'acquisizione delle immagini dovranno essere in modalità manuale, in modo da inserire valori di esposizione adatti affinche non si verifichi la condizione di trascinamento.

Per quanto riguarda il rilievo sul campo, i parametri del sensore sono stati impostati in modalità automatica in quanto le condizioni di illuminazioni continuavano a variare e questo può compromettere le immagini e quindi la restituzione del modello tridimensionale in fase di elaborazione dei dati.

8.3 FASE DI RILIEVO

La fase di rilievo sul campo è stata eseguita in collaborazione con il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino, in data 21 ottobre 2021, in condizioni del meteo ottimali con la possibilità di eseguire il volo in V-LOS in modo da permettere all'operatore di avere un continuo contatto visivo con il drone. Prima della missione di volo è stata effettuata un'ulteriore analisi dell'area di rilievo e dell'intorno per verificare che non siano presenti interferenze non individuate precedentemente. Le ulteriori verifiche sono di fondamentale importanza per l'operatore, al fine di eseguire le operazioni di rilievo in condizioni sicure.

Il passaggio successivo è stato il posizionamento dei target (12 in totale) in punti facilmente individuabili, distribuiti uniformemente all'interno del lotto dell'Istituto e posizionandoli in alcuni punti sul tetto della struttura in modo da rilevare successivamente i dati sullo sviluppo in altezza. I target utilizzati sono di dimensioni 60 x 60 cm (Fig.122A) con tonalità di colori differenti in modo da essere più facilmente individuabili nelle foto acquisite con il drone.

122A

122B

Figura 122 A Target utilizzati **e 122 B** Posizionamento target nell'area di rilievo

La fase successiva consiste nella misurazione dei target chiamati anche punti di controllo a terra (Ground Control Points - GCP), utilizzati nelle fasi successive per aumentare l'accuratezza assoluta per georeferire correttamente le immagini e scalare il modello tridimensionale.
La misurazione è stata effettuata con l'utilizzo di un ricevitore GNSS (GPS) modello Geomax Zenith 35 (Fig.124A), posizionando lo strumento in posizione statica al centro di ogni target o su punti naturali. I dati rilevati sono la Latitudine (Nord), la Longitudine (Est) e l'Altitudine (H) con riferimento al sistema di coordinate WGS84[29].

[29] WGS84 (*World Geodetic System1984*) è un sistema di coordinate geodetico globale, basato su un elissoide di riferimento elaborato nel 1984.

La tecnologia utilizzata è stata NRTK (Network Real Time Kinematic) con appoggio alle reti di stazioni fisse di HxGN SmartNet (Hexagon ex ITALPOS) distribuite sul territorio. Ciò permette di costruire una rete di punti di appoggio utile per la fase di orientamento del modello fotogrammetrico.
I valori ottenuti saranno elaborati attraverso il software "ConveRgo.ge" per andare a correggere le quote elissoidiche e trasformate in quote geoidiche.

Sono stati misurati 14 punti differenti come illustrato in Fig.123 di cui 12 punti artificiali identificati dai target posizionati all'interno del lotto e sulla struttura, e 2 punti naturali identificati dagli spigoli sud-ovest del campo da gioco, denominati come punto 103(Fig.124A) e 104 (Fig.124B). A seguito di un errato posizionamento del GPS/GNSS sul punto 105, è stato scelto di scartare questo dato per le fasi di elaborazioni successive.

Figura 123 Punti di appoggio a terra

124A

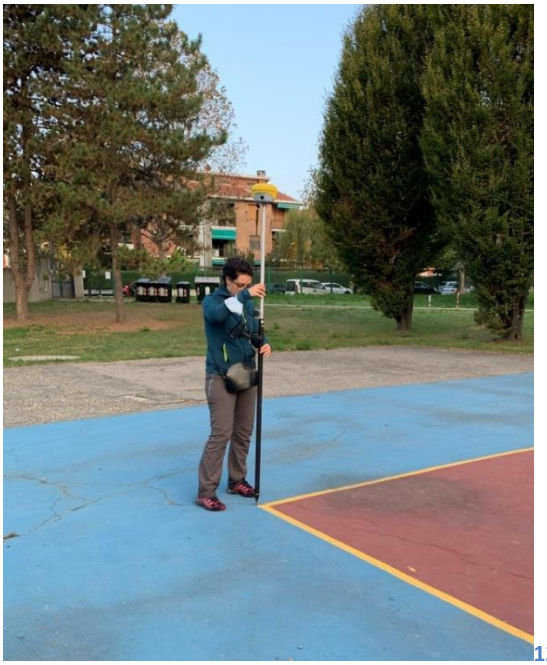

124B

Figura 124A Punto naturale 103 **e 124B** Punto naturale 104

Dopo aver rilevato sia i target artificiali che quelli naturali con l'utilizzo del rover GNSS, è stato effettuato il volo secondo le impostazioni precedentemente stabilite su base dell'analisi dell'area di rilievo e dai risultati dei calcoli effettuati.

Sono stati pianificati due voli differenti, di cui un volo con l'inclinazione obliqua del sensore a 45° e un volo con l'inclinazione nadirale. I parametri del sensore sono stati impostati con esposizione in modalità automatica a causa del continuo variare delle condizioni di illuminazione. Anche il numero di strisciate è stato aumentato in modo da consentire l'acquisizione di più informazioni possibili per la realizzazione di un prodotto più accurato in fase di elaborazione.

Il primo volo consiste nell'esecuzione di 9 strisciate parallele al lato nord-ovest dell'area di rilievo, con inclinazione nadirale del sensore, impostazione in modalità automatica dell'esposizione e un'altezza di volo di 52 m, con un GSD di 1,4 cm/pixel. In totale con un singolo volo sono state acquisite 177 fotografie.

Figura 125 Piano di volo con inclinazione nadirale

Il secondo volo invece consiste nell'esecuzione di 10 strisciate orientate perpendicolarmente alla struttura, con inclinazione obliqua di 45° del sensore, impostazione in modalità automatica dell'esposizione e anche in questo caso con altezza di volo di 52 m e un GSD di 1,4 cm/pixel. In questo caso sono state acquisite 153 fotografie sempre con un volo singolo.

Figura 126 Piano di volo con inclinazione a 45°

La scelta di effettuare due voli differenti di cui uno con strisciate parallele al lotto e inclinazione nadirale del sensore e una perpendicolare all'edificio con inclinazione obliqua a 45°, è stata fatta per acquisire più dati possibili della struttura e del lotto da angolazioni diverse.

Dalle due missioni di volo differenti, sono state acquisite 330 fotogrammi in totale con valori dell'esposizione che variano da 1/60 fino a 1/320. Prendendo in considerazione il valore più alto e utilizzando la formula del trascinamento è possibile verificare se le immagini risultano mosse.

Esposizione 1/320 = 0,003125 s

$$\text{Trascinamento} = 5{,}19 \text{ m/s} * 0{,}003125 \text{ s} * (0{,}0088 \text{ m} / 52 \text{ m}) = 2{,}74471$$

$$2{,}74471 > 1 \text{ pixel } (2{,}4) \text{ no}$$

Come illustrato nella formula del trascinamento, i valori dell'esposizione in modalità automatica non soddisfano il risultato della formula ma andando a verificare sia le immagini nadirali che quelle oblique, la qualità risulta molto elevata come visibile in Fig.127 e in Fig.128 tale da permettere l'elaborazione di esse per la realizzazione del modello tridimensionale.

Figura 127 Fotogramma nadirale

Figura 128 Fotogramma obliquo a 45°

8.4 ELABORAZIONE DATI DA UAV

Dai dati ricavati con l'utilizzo del sistema UAV, si passa alla fase principale del caso studio che consiste nella loro elaborazione in software dedicati per la fotogrammetria e la realizzazione di un prodotto di analisi, utile per estrapolare dati e informazioni con lo scopo di effettuare indagini sulla struttura e sul lotto di pertinenza dell'Istituto Comprensivo " C. Alvaro - P. Gobetti".

La ricerca consiste nell'elaborazione dei dati acquisiti con il velivolo, attraverso l'impiego di due software differenti tra cui il software Agisoft Metashape Professional, uno dei software più conosciuti per quanto riguarda la fotogrammetria, e il software DJI Terra fornito dalla stessa azienda che produce il drone DJI Phantom 4 PRO utilizzato per il rilievo. Il confronto tra i due consentirà di

dimostrare come dallo stesso input di dati utilizzati, è possibile ottenere prodotti di qualità differente a seconda della potenzialità del programma.

Prima di passare ai software di fotogrammetria, sono state elaborate le coordinate Z acquisite con il rover GNSS in modo da correggere i valori delle quote elissoidiche per essere successivamente proiettate sul geoide. Quest'operazione è stata effettuata attraverso il software "ConveRgo.ge", dove è stato inserito il grigliato con i dati precisi dell'ondulazione del geoide dell'area di rilievo, fornito dall'Istituto Geografico Militare (IGM). Le quote Est (X) e le quote Nord (Y) rimangono invariate.

Tabella 9 Punti di appoggio a terra con quota Z corretta

Target	X	Y	Z
101	391 736.833	4 989 146.605	260.170
102	391 776.274	4 989 109.199	259.775
103	391 742.648	4 989 111.843	260.224
104	391 725.978	4 989 118.861	260.230
106	391 838.390	4 989 226.700	260.062
107	391 788.568	4 989 260.924	260.842
108	391 847.676	4 989 180.111	259.743
109	391 865.966	4 989 119.028	259.739
110	391 822.147	4 989 110.080	271.400
111	391 798.757	4 989 156.569	271.335
112	391 779.672	4 989 182.490	271.399
113	391.787.788	4 989 140.696	271.368
114	391.756.458	4 989 177.851	266.695

La fase successiva è l'analisi dei fotogrammi acquisiti in modo da identificare eventuali anomalie che possano andare a compromettere la fase di ricostruzione tridimensionali new software di fotogrammetria. Come già specificato in precedenza, a seguito della continua variazione dell'illuminazione solare, le impostazioni del sensore sono state inserite in modalità automatica. Come risultato si ottengono immagini con esposizione diversa, che possono andare a compromettere il risultato finale. In questo caso, per andare a correggere la differenza tra le diverse immagini, è stata effettuata una correzione attraverso il Software Adobe Lightroom Classic, andando ad aumentare o a diminuire l'esposizione delle immagini attraverso i parametri del contrasto e della luminosità. In alcune immagini sono state regolate anche le tonalità dei colori, andando a regolare le parti con luminosità elevata o quelle in ombra.

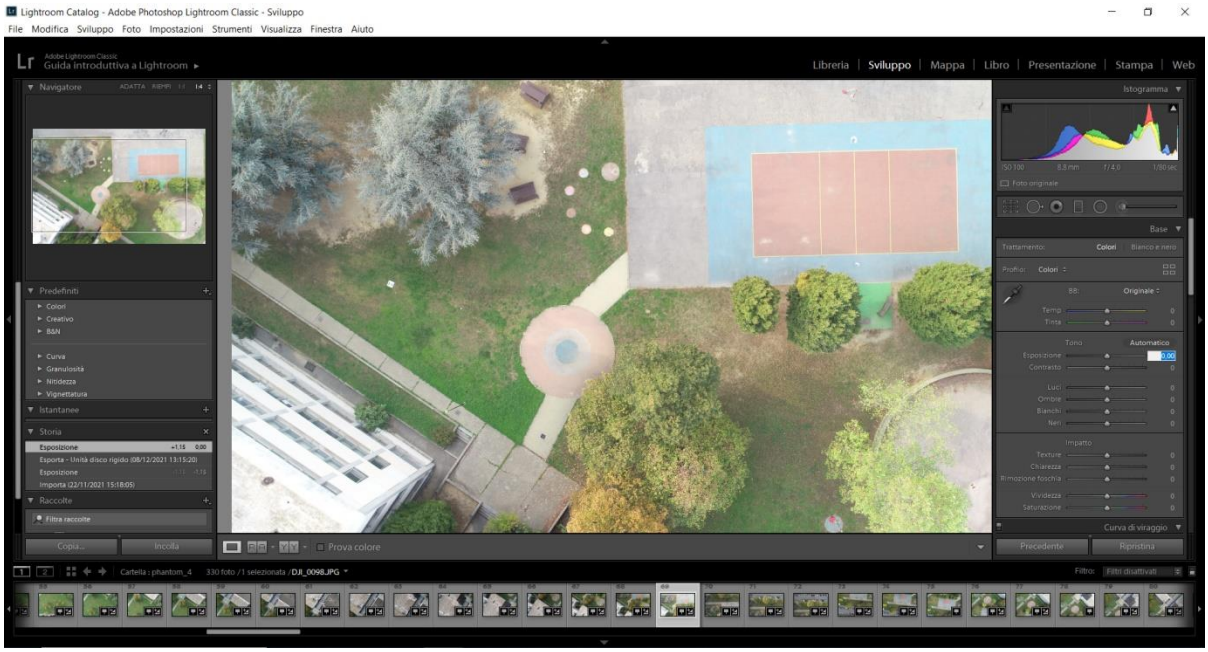


Figura 129 Immagine non elaborata _ programma Adobe Photoshop Lightroom Classic

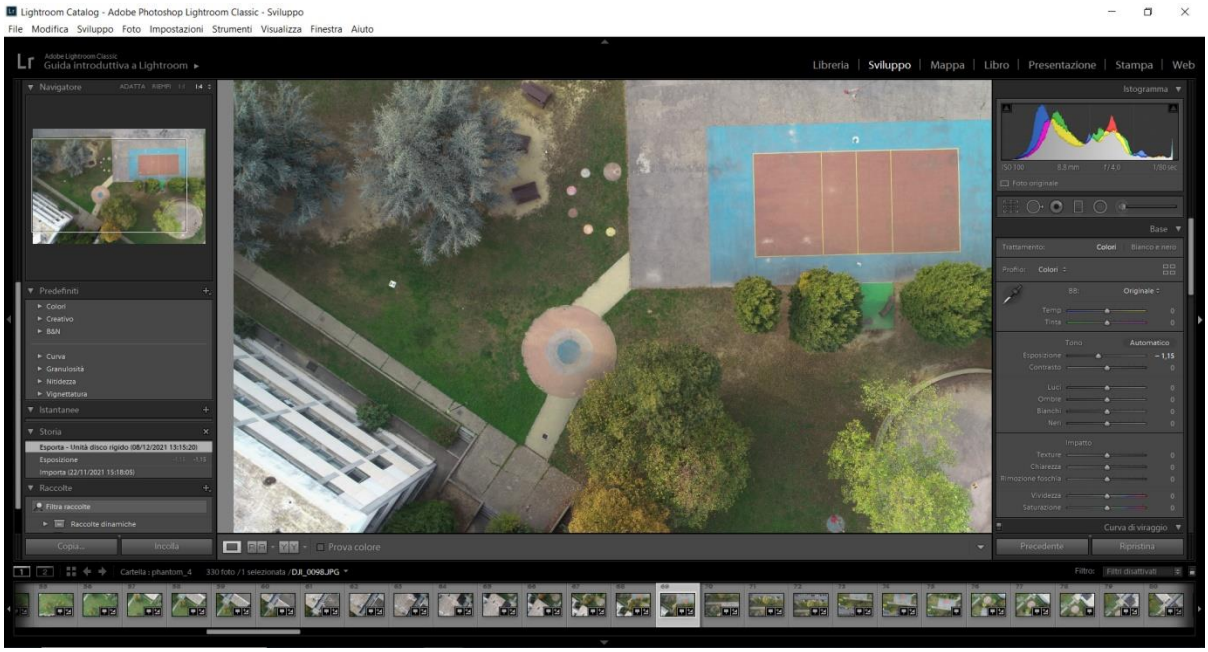


Figura 130 Elaborazione immagine nel programma Adobe Photoshop Lightroom Classic

Con questo procedimento, è stato possibile migliorare i dettagli delle immagini con esposizioni diverse come illustrato in Fig.129, per evitare che alcune parti dell'immagine siano difficilmente leggibili. Le modifiche effettuate in Fig.130, hanno permesso di correggere il parametro dell'esposizione con conseguente miglioramento dell'immagine, con dettagli più nitidi.

Le modifiche effettuate sono necessarie per ottenere immagini dettagliate con tonalità di colori uniformi, utili per le successive operazioni di Image Matching nel software di elaborazione fotogrammetrica, per la restituzione di un prodotto dettagliato di alta qualità.

8.5 ELABORAZIONE DATI CON SOFTWARE DI FOTOGRAMMETRIA

La fase principale di ricerca di questa tesi è quella di elaborazione dei dati precedentemente acquisiti e processati nei software di elaborazione fotografica, con l'utilizzo dei software di fotogrammetria Agisoft Metashape e DJI Terra, dove saranno analizzati i vari processi applicativi, le metodologie e i risultati ottenuti. Il confronto tra i due permetterà di identificare il la rapidità di risposta e la facilità di impiego di entrambi, analizzando gli errori residui dei Ground Control Points (GCP) e dei Check Points (CP), il tempo impiegato e il prodotto finale ottenuto.

8.5.1 ELABORAZIONE CON AGISOFT METASHAPE _ Metodo 1

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software Agisoft Metashape Professional 1.7.0, sviluppato per la restituzione fotogrammetrica sfruttando l'approccio SfM (Structure From Motion). Il software viene utilizzato per la capacità di effettuare l'allineamento di immagini e il calcolo per la calibrazione della camera, generando modelli tridimensionali, attraverso la collimazione automatica di punti omologhi da un insieme di foto.

Il primo step di elaborazione consiste nell'importare in un blocco unico (chunk), tutti i 330 fotogrammi acquisiti con i due voli di cui 177 acquisiti con inclinazione nadirale del sensore e 153 acquisiti con inclinazione obliqua a 45° del sensore. Il secondo step consiste nell'allineamento e orientamento automatico delle immagini con il valore di precisione impostato alla massima qualità. La scelta di inserire questo valore è stata dettata dalla necessità di ottenere un prodotto preciso di qualità elevata, utile per generare un prodotto più accurato. Al diminuire della qualità del prodotto finale che si vuole ottenere, il tempo impiegato per l'elaborazione dei dati diminuisce così come la qualità del prodotto finale.

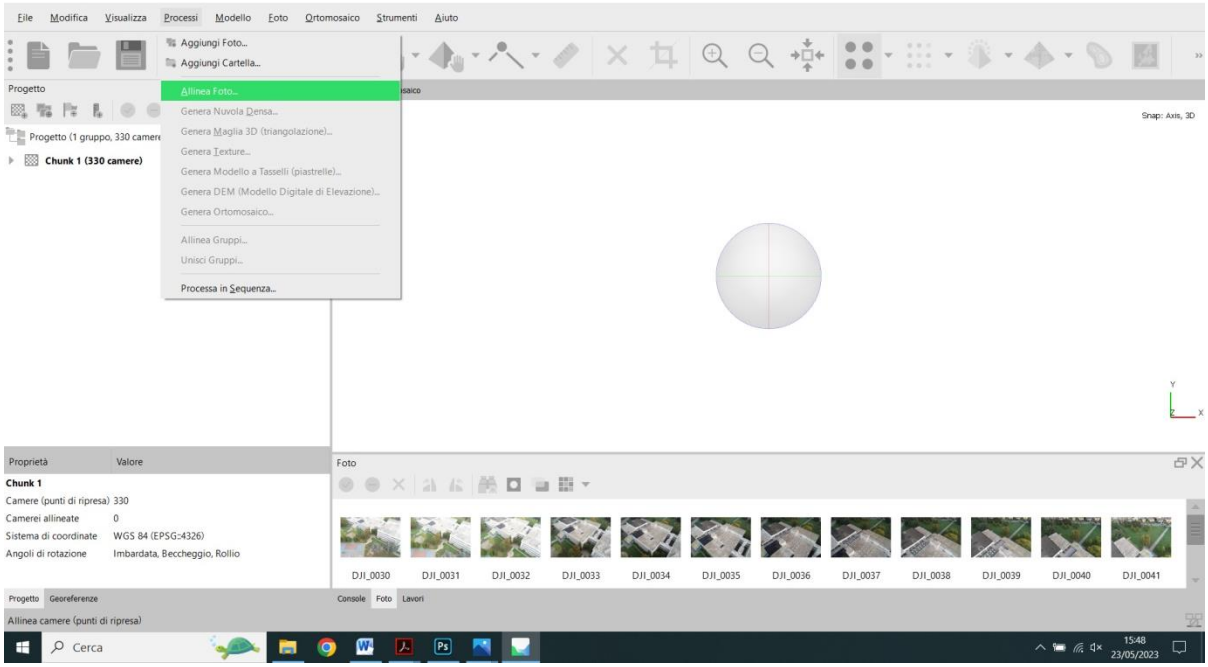


Figura 131 Importazione e allineamento immagini nel software Agisoft Metashape Professional 1.7.0

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato un computer a postazione fissa, con processore Intel i9 - 12900K con 3.19 GHz , 64 GB di memoria RAM e scheda grafica nVidia GeForce RTX A5000 con 24GB di memoria grafica, necessari al programma per l'elaborazione dei dati.

Il tempo di elaborazione dei dati con impostazione di precisione a qualità massima, è di 9 minuti e 20 secondi per la ricerca delle corrispondenze, e di 5 minuti e 18 secondi per l'allineamento, ottenendo come prodotto una prima nuvola sparsa di punti formata dall'insieme di *Tie Points*.

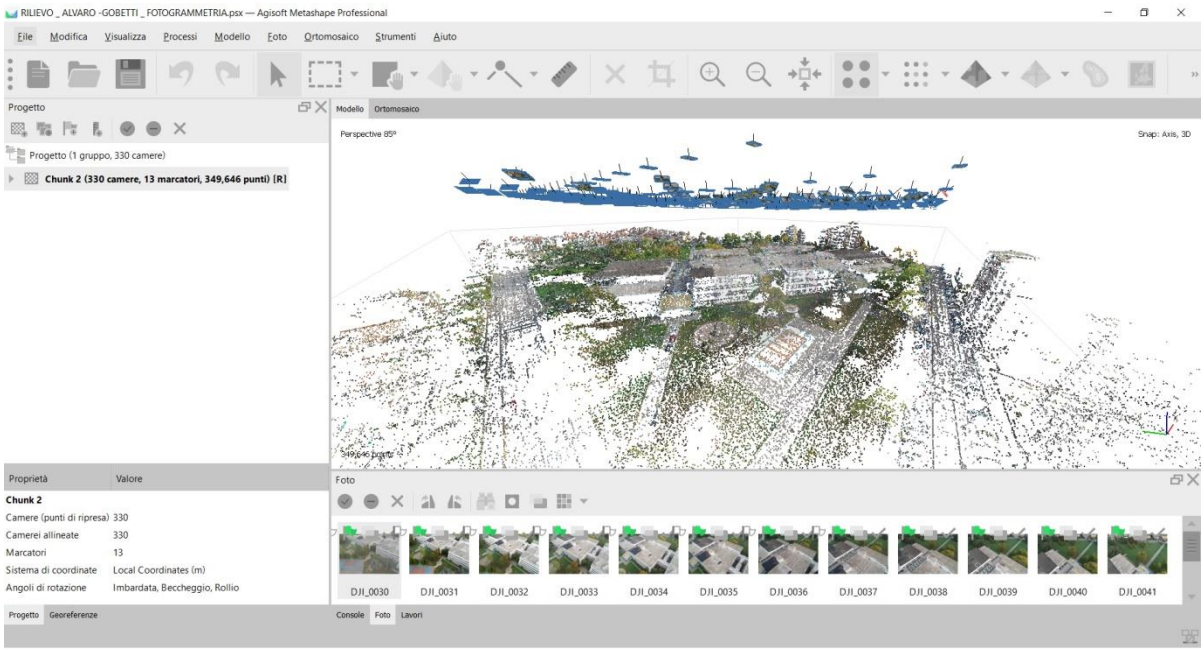


Figura 132 Nuvola di punti rada e prese nadirali e oblique, software Agisoft Metashape Professional 1.7.0

In questa fase è importante verificare che la nuvola di punti sparsa sia distribuita uniformemente su tutta l'area di rilievo in modo da poter procedere alla successiva fase di elaborazione che prevede l'inserimento delle coordinate rilevate con il rover GNSS/GPS, per il corretto orientamento del modello attraverso la roto-traslazione e alla variazione di scala. Nella seguente mappa (Fig.133) è possibile verificare le strisciate delle prese nadirali e oblique del sensore, dove dal con il colore blu è indicata l'area con maggior sovrapposizione delle immagini (overlap), che cambia verso il rosso per le aree con minore sovrapposizione.

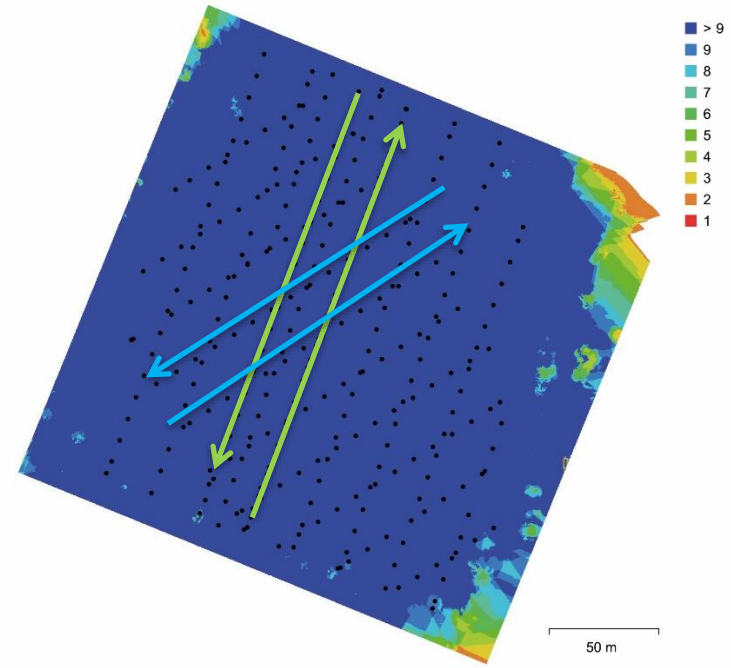


Figura 133 Posizione delle camere (punti di scatto) e loro sovrapposizione (ottenuto dal rapporto di elaborazione), con prese oblique (azzurro) e nadirali (verde)

Il risultato ottenuto tramite le 330 immagini utilizzate, è un prodotto con 349,646 *Tie Points*, un ricoprimento dell'area di 0.0526 km^2 e una risoluzione pixel a terra di 1.36 cm/pixel. Dall'osservazione della mappa illustrata in Fig.133, è possibile verificare la distribuzione omogenea dei punti di presa e una maggiore sovrapposizione delle immagini (overlap). I punti distribuiti nella direzione delle frecce di colore azzurro sono le prese oblique distribuite perpendicolarmente all'edificio, mentre i punti distribuiti lungo le frecce di colore verde rappresentano le prese nadirali distribuite trasversalmente all'edificio.

Per il corretto orientamento esterno o triangolazione aerea, è stato importato all'interno del programma Metashape, il file delle coordinate in formato ".csv", precedentemente rielaborate nel software ConveRgo_ge da coordinate elissoidiche in ortometriche (o geoidiche). Una volta inseriti questi dati nel software di fotogrammetria, sono stati indicati con punti precisi nelle immagini, attraverso il procedimento di collimazione che consiste nel far coincidere un determinato punto con il centro di mira dello strumento utilizzato. Vengono collimati nelle diverse immagini, i punti di controllo a terra (*GCP-Ground Control Points)* in modo da far coincidere i marcatori (marker) al centro dei relativi target precedentemente distribuiti in modo uniforme all'interno dell'area di rilievo.

Durante questa fase sono stati collimati 13 marcatori (come rappresentati dall'icona a bandierina visibile in Fig.134), solo nelle immagini in cui sono visibili i marker o i punti naturali rilevati. Come precedentemente specificato, il punto 105 è stato escluso a seguito di un errato posizionamento

del GPS/GNSS sul target. Per quanto riguarda l'assegnazione dei punti, per avere un confronto migliore, lo stesso numero di punti saranno assegnati alle stesse fotografie anche nel software DJI TERRA in modo da verificare quale dei due software è capace di restituire un prodotto più accurato. Grazie alla collimazione dei punti, il modello tridimensionale successivamente generato risulterà georeferenziato e scalato.

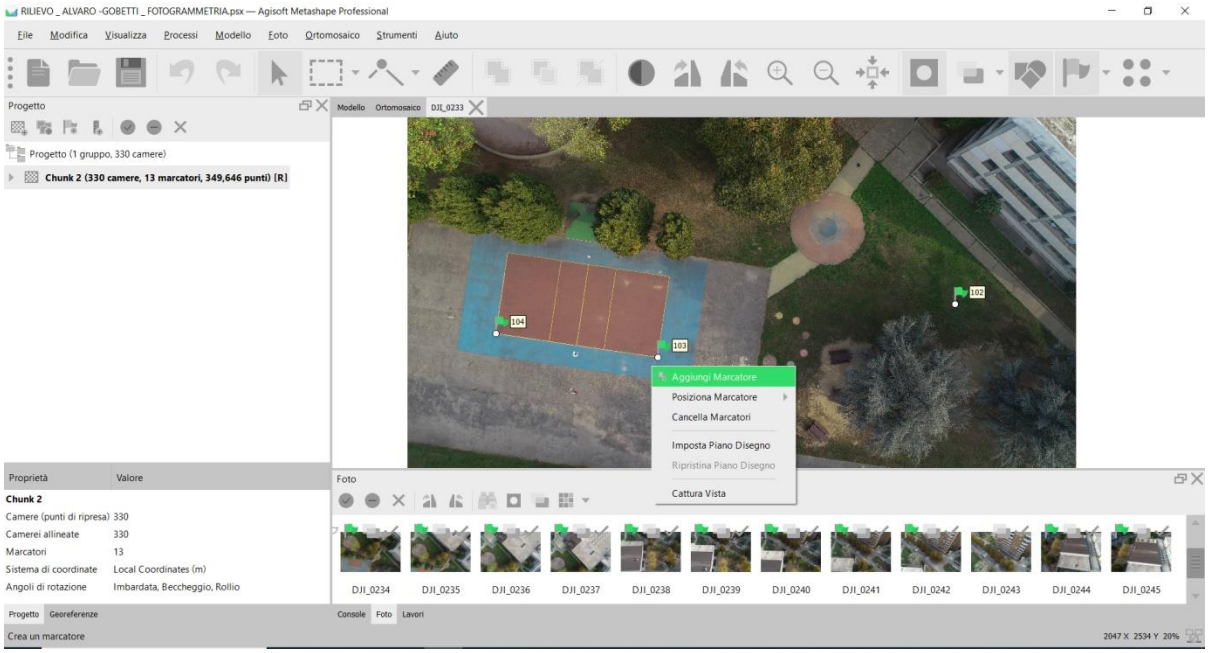


Figura 134 Posizionamento marcatori su marker e punti rilevati, software Agisoft Metashape Professional

Questo passaggio è fondamentale per la rototraslazione del modello, in quanto l'inserimento di tutti i marcatori permette di ottenere un modello più elaborato, georeferenziato e correttamente scalato. Dopo aver posizionato nelle diverse immagini circa 30/35 punti per ogni singolo marcatore facilmente individuabile, è stata generata la nuvola di punti densa con impostazione *media* della qualità e filtraggio dei dati in modalità *leggero,* per l'assenza di altri edifici attorno che possono prolungare la durata del processo di elaborazione, sia per la presenza di dettagli importanti dell'area e della struttura rilevata. Per questo processo sono stati utilizzati 9 target come punti di controllo a terra (GCP - Ground Control Points) e 4 target come punti di verifica (CP- Check Points), utili per poter verificare l'accuratezza della ricostruzione.

Per avere un corretto posizionamento nel sistema globale, sono state modificate le impostazioni georeferenze, inserendo nel sistema di coordinate RDN2008 /UTM zone 32N (N-E) (EPG::6707), come georeferenzazione camera WGS 84 (EPSG::4326) e come georeferenza marcatore RDN2008 /UTM zone 32N (N-E) (EPSG::6707) come illustrato in Fig.135.

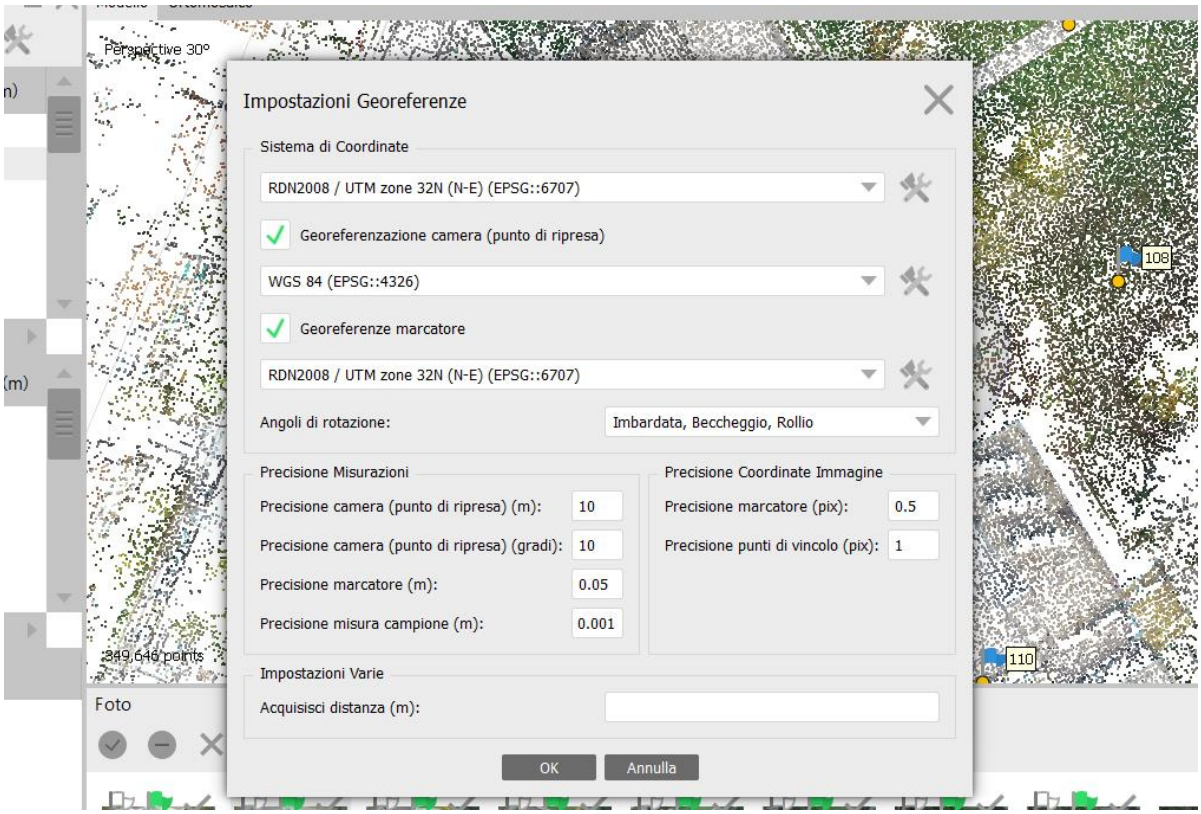


Figura 135 Impostazione georeferenze

Per ottimizzare ulteriormente il prodotto, il software esegue in automatico il processo di *Bundle Block Adjustment*, che consiste nel minimizzare l'errore con la tecnica SfM[30], nel ricalcolo dei parametri di calibrazione del sensore, della sua posizione e determina i punti caratteristici nello spazio 3D.

Il processo di calibrazione del sensore consiste nel modificare le distorsioni radiali e quelle tangenziali delle immagini, seguendo il modello di calibrazione di Brown[31].

[30] La tecnica SfM consente di ricostruire un modello tridimensionale grazie a una sequenza di immagini stereoscopiche, stimando i parametri del sensore durante la fase di acquisizione della sequenza (motion) e il modello geometrico (structure), elaborando le immagini per individuare le corrispondenze di punti tra esse. (Roggero 2013)

[31] Modello di calibrazione di Brown viene utilizzato come base per il calcolo dei parametri addizionali, insieme ai coefficienti k4 per la distorsione radiale e i coefficienti p3 e p4 per le distorsioni tangenziali. Esso risolve il problema di calibrazione riguardante i parametri della distanza principale (c), la posizione del punto principale (xp, yp) e i parametri di distorsione delle lenti di cui simmetrica radiale (k1,k2,k3), tangenziale (p1,p2) e affine (b1,b2)delle lenti. (Remondino et al, 2006)

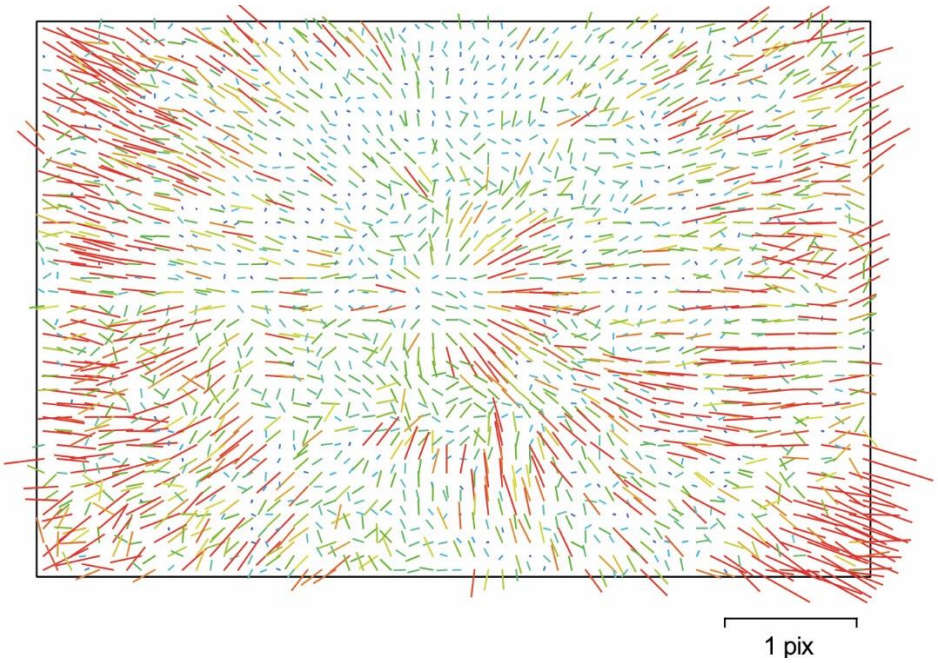


Figura 136 Residuali Immagine per FC6310 (8.8mm). I vettori colorati mostrano l'errore medio di riproiezione dei pixel nelle corrispondenti celle, calcolato su tutte le immagini.

Sensore : FC6310 (8.8mm) Immagini : 330
Risoluzione: 5472 x 3648 Lunghezza Focale: 8,8 mm
Dimensione Pixel : 2.41 x 2.41 µm

Tabella 10 Ottimizzazione dei coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione

	Valore	Errore	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	**3641.89**	0.023	1.00	0.02	-0.39	-0.29	0.30	-0.27	0.24	0.00	-0.17
Cx	**6.29703**	0.015		1.00	-0.02	-0.00	0.00	-0.01	0.01	0.88	-0.02
Cy	**14.9137**	0.015			1.00	-0.02	-0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.72
K1	**0.00990426**	3.7e-05				1.00	-0.97	0.92	-0.87	-0.00	-0.04
K2	**-0.0631892**	0.00018					1.00	-0.99	0.95	0.00	0.01
K3	**0.107575**	0.00035						1.00	-0.99	-0.00	-0.00
K4	**-0.0613755**	0.00023							1.00	0.01	0.00
P1	**-0.000364061**	1.4e-06								1.00	-0.02
P2	**-0.000630288**	1.2e-06									1.00

Per valutare l'accuratezza della restituzione tridimensionale del modello sono stati utilizzati 9 target come punti di controllo a terra GCP e 4 target (scelti casualmente) come punti di verifica CP. In Fig.137 è possibile individuare le posizioni stimate dei punti di controllo GCP contrassegnate da un punto e le posizioni dei punti di verifica CP contrassegnate da una croce. L'errore Z è rappresentato dal colore dell'ellisse che varia da -1.6 cm (blu) a 1.6 cm (rosso), mentre gli errori X e Y sono rappresentati dalla forma dell'ellisse.

Figura 137 Punti di controllo a terra

GROUND CONTROL POINTS _ errori stimati

Tabella 11 Errori stimati in cm nei Ground Control Points nelle elaborazioni della Camera Front

Etichetta	errore X (m)	errore Y (m)	errore Z (m)	Totale (m)	Immagine (pix)
102	0.019	-0.007	-0.007	0.022	0.528 (26)
104	0.001	0.006	0.008	0.011	0.796 (31)
106	0.001	-0.001	-0.006	0.006	0.546 (45)
107	-0.005	-0.001	0.009	0.010	0.486 (31)
108	-0.001	-0.015	0.005	0.016	0.493 (27)
110	0.002	-0.008	0.007	0.011	0.378 (26)
111	-0.008	0.016	-0.007	0.019	0.440 (37)
112	-0.004	0.015	-0.007	0.017	0.542 (44)
113	-0.005	-0.003	-0.002	0.007	0.517 (25)
Totale	**0.007**	**0.010**	**0.007**	**0.014**	**0.538**

CHECK POINTS _ errori stimati

Tabella 12 Errori stimati in cm nei Check Points nelle elaborazioni della Camera Front

Etichetta	errore X (m)	errore Y (m)	errore Z (m)	Totale (m)	Immagine (pix)
101	0.011	0.013	-0.012	0.021	0.381 (28)
103	0.007	0.011	0.010	0.017	0.688 (37)
109	-0.001	-0.011	0.015	0.019	0.593 (22)
114	0.006	0.014	0.001	0.016	0.457 (30)
Totale	**0.007**	**0.012**	**0.011**	**0.018**	**0.551**

DENSE CLOUD

Il passaggio successivo consiste nella Generazione delle *Nuvola di punti densa* chiamata anche *Dense Cloud,* sulla base dei tie points precedentemente individuati dal software. Essa viene generata dal software con settaggi di qualità più elevati rispetto alla nuvola di punti sparsa, da punti 3D per ogni singolo pixel di ciascuna immagine. È un'operazione che richiede una potenza di calcolo elevata e tempi di elaborazione lunghi, a seconda della quantità e della qualità di dati, della performance del computer e non per ultimo, della qualità del prodotto finale che si vuole ottenere. In questo caso la qualità del prodotto finale è stata impostata in *media* con modalità di filtro *leggero.* Il tempo impiegato è stato di 7 minuti e 58 secondi con 32'846'535 *tie points* individuati per la *generazione dei parametri delle mappe di profondità*, mentre il tempo di *generazione dei parametri della nuvola densa* è stato di 13 minuti e 7 secondi. Il modello tridimensionale che si ottiene, chiamato anche *reality - based,* sarà un modello dettagliato utile per descrivere e analizzare l'area di rilievo, il fabbricato e il contesto dell'area di analisi.

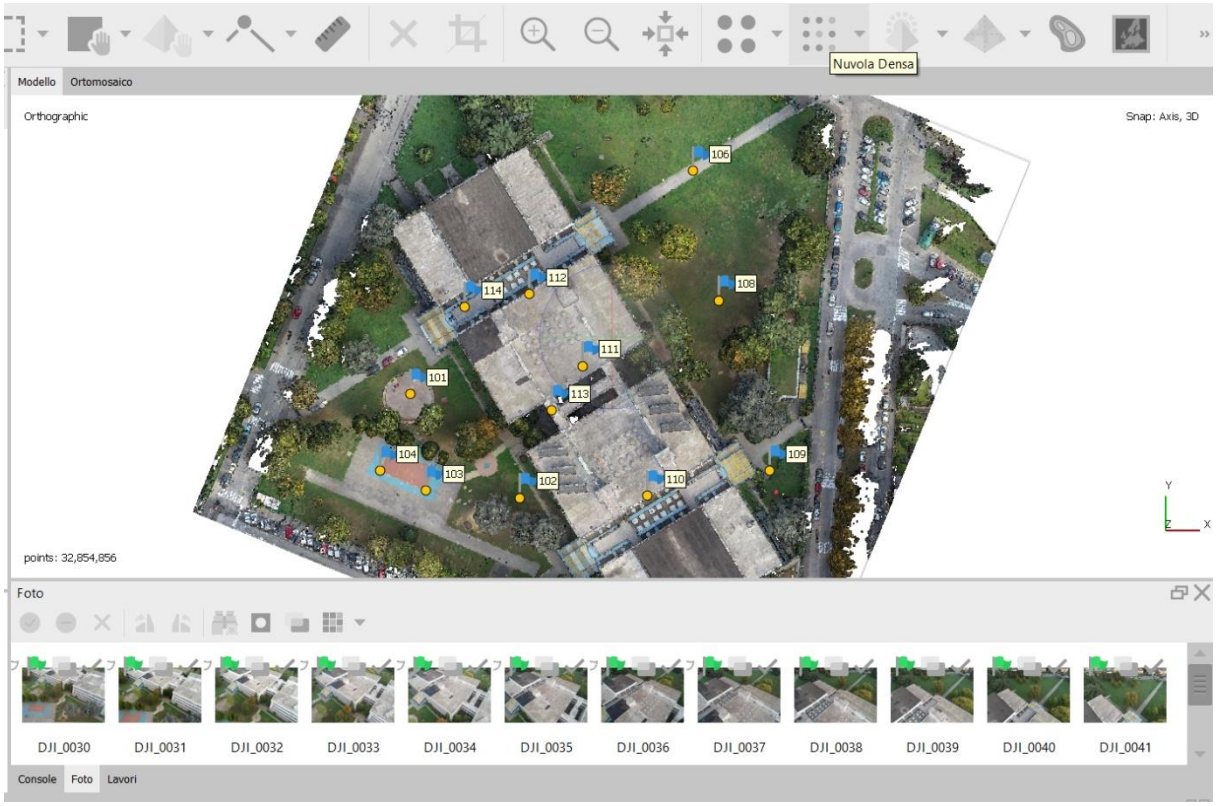


Figura 138 Nuvola di punti densa

GENERAZIONE DELLA MESH TRIANGOLATA E MESH TEXTURIZZATA

Il processo di elaborazione della mesh triangolata consiste nel generare una maglia 3D di triangolazione attraverso il processo di poligonizzazione della nuvola densa, dove l'unione dei diversi punti avviene tramite linee che formano dei triangoli grazie alla tecnica della Triangolazione Delaunay[32]. Viene generata la maglia 3D di triangolazione con impostazione *media* di conteggio facce impiegando un totale di 7 minuti e 43 secondi.

Dopo la ricostruzione delle superfici tridimensionali è possibile procedere alla al processo di generazione della texture che consiste nel proiettare su ciascun triangolo, il colore corretto estrapolato dalle immagini utilizzate per la generazione del modello tridimensionale. Il processo di elaborazione chiamato anche texture mapping consente di ottenere il prodotto con la mesh texturizzata. I parametri di elaborazione dei dati sono stati mantenuti come quelli gia preimpostati dal software. Il tempo di elaborazione dei dati è di 7 minuti e 59 secondi.

[32] La Triangolazione Delaunay è un metodo introdotto nel 1934 dal matematico Boris Delaunay, che consiste nell'unire punti nello spazio 3D formando dei triangoli con facce piane. Al diminuire dell'area dei triangoli, il prodotto della mesh sarà più dettagliato e viceversa. (Spanò A. (2009) Dispense del Corso di Rilievo metrico 3D. Politecnico di Torino - DINSE)

L’insieme di queste elaborazioni permette di generare dei modelli raster come ortofoto, utili per successive analisi e verifiche della struttura oppure modelli altimetrici come ad esempio il Modello di Elevazione Digitale (DEM).

GENERAZIONE MODELLI ALTIMETRICI E ORTOFOTO

L’ultima operazione di elaborazione dei dati consiste prima nell’estrapolazione del Modello Digitale della Superficie (DSM) e successivamente nell’esportazione dell’ortomosaico dell’area di rilievo. Per quanto riguarda il primo, le impostazioni sono state mantenute con Proiezione Geografica con RDN2008/ UTM zone 32N (N-E) (EPSG::6707).

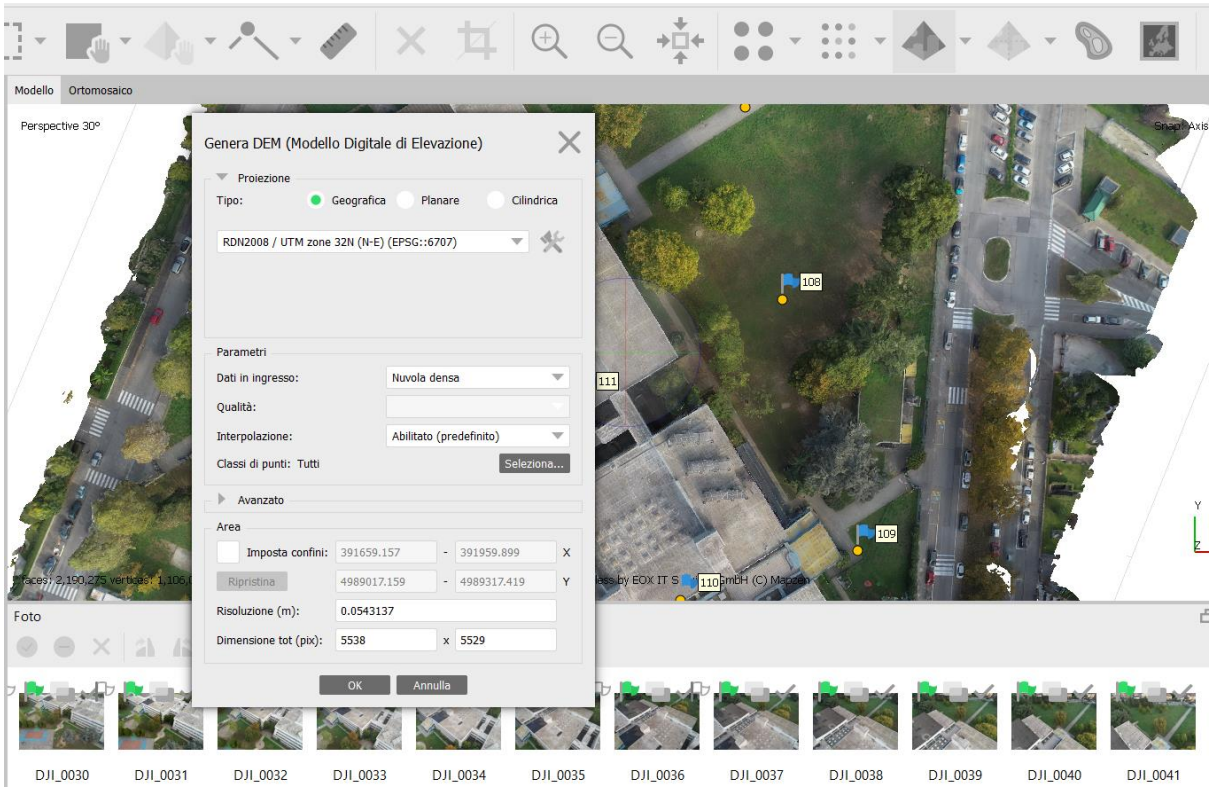


Figura 139 Impostazioni Modello Digitale della Superficie (DSM)

Una volta generato il DSM con un tempo di elaborazione di 21 secondi, è possibile andare ad eliminare l’ombreggiatura visibile in Fig.140 e modificare le impostazioni della tavolozza dei colori DEM in modo da poter facilitare la lettura del modello tridimensionale.

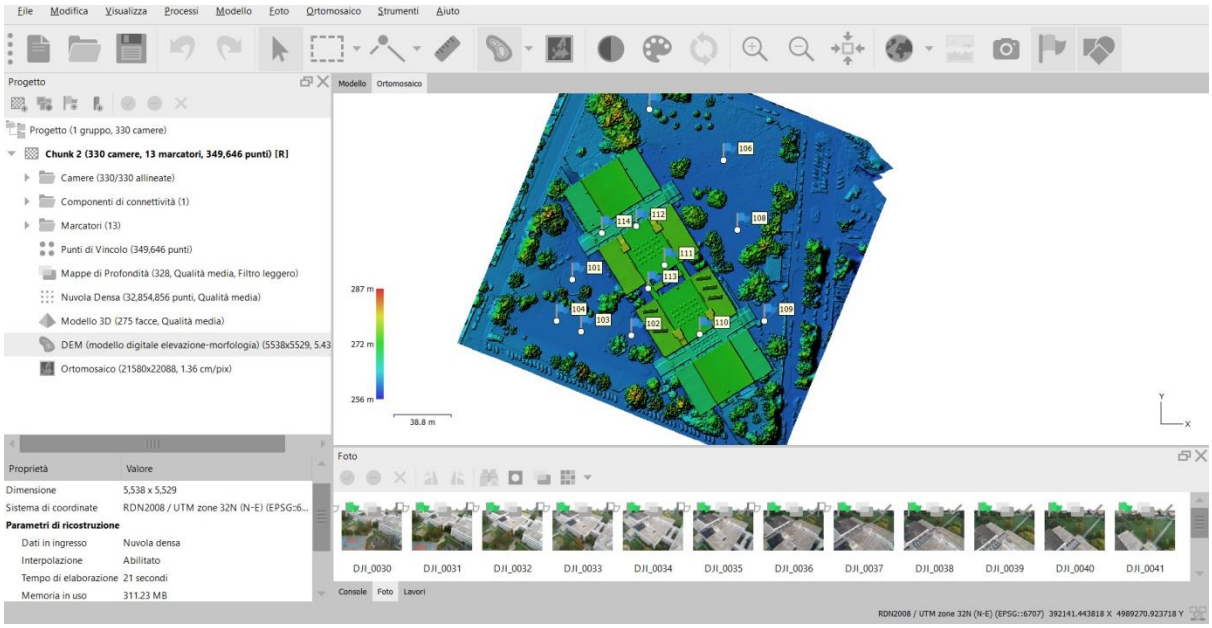


Figura 140 Impostazioni Modello Digitale della Superficie (DSM)

Il prodotto ottenuto è una planimetria con una scala di colori che cambia dal blu scuro dove la quota misurata è di 256m al rosso dove la quota si aggira sui 288m. Per verificare le diverse quote rappresentate dalle diverse tonalità di colore, è possibile visualizzare all'interno del programma utilizzato, la quota associata dei diversi punti selezionati all'interno del modello tridimensionale generato.

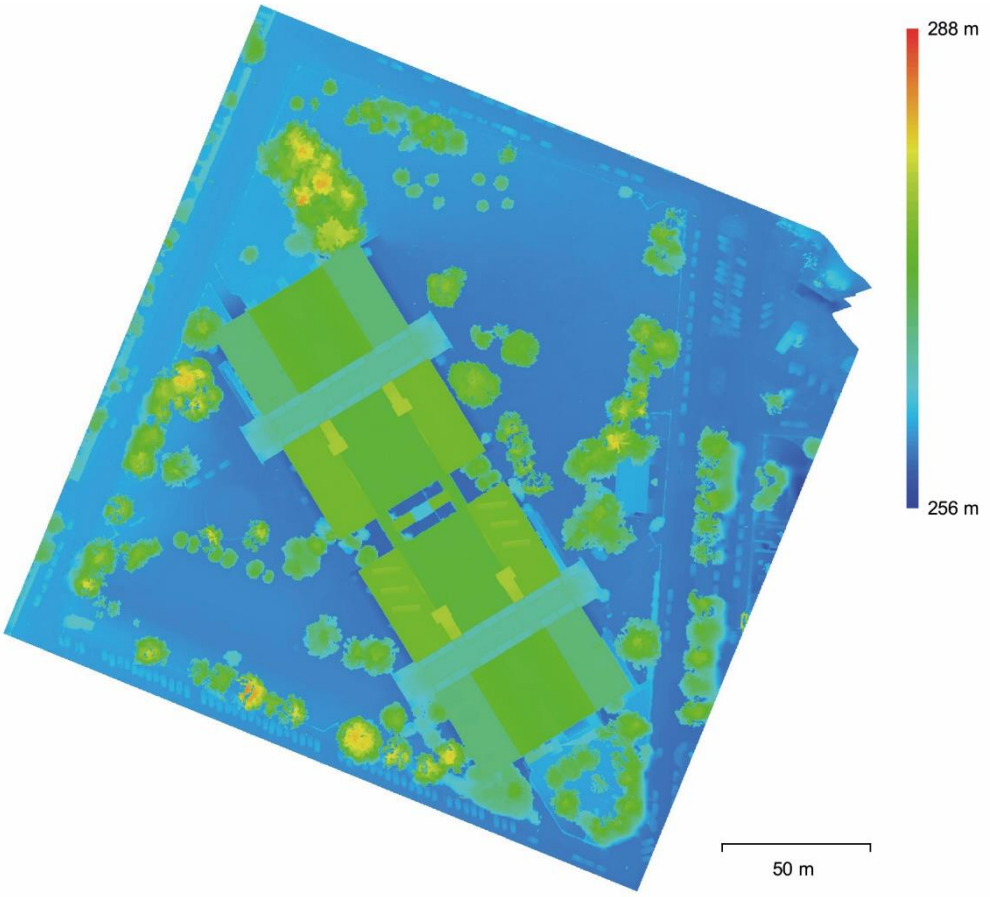


Figura 141 Modello Digitale della Superficie / Digital Surface Model (DSM)

L’ultima operazione effettuata è stata l’esportazione dell’ortomosaico in modo da poter confrontare il prodotto generato con il software Agisoft Metashape, con il prodotto generato con il software DJI Terra.

Per generare l’ortomosaico è stata impostata una proiezione di tipo *Geografica* con RDN2008/ UTM zone 32N (N-E) (EPSG::6707), parametri di superficie utilizzata impostati in DSM modalità di fusione impostata in Mosaico come visibile in Fig.139. Inoltre è stata lasciata attiva la casella che abilita il riempimento dei buchi, qualora il programma non riesca a ricostruire alcuni parti del modello tridimensionale a seconda della mancanza di informazioni nelle fotografie o in alcuni casi, a causa della qualità delle immagini che non permette una corretta ricostruzione. L’operazione di ricostruzione in questo caso è stata effettuata in un tempo di elaborazione della durata di 10 minuti e 59 secondi, ottenendo un prodotto con una risoluzione di 1.37 cm/pix.

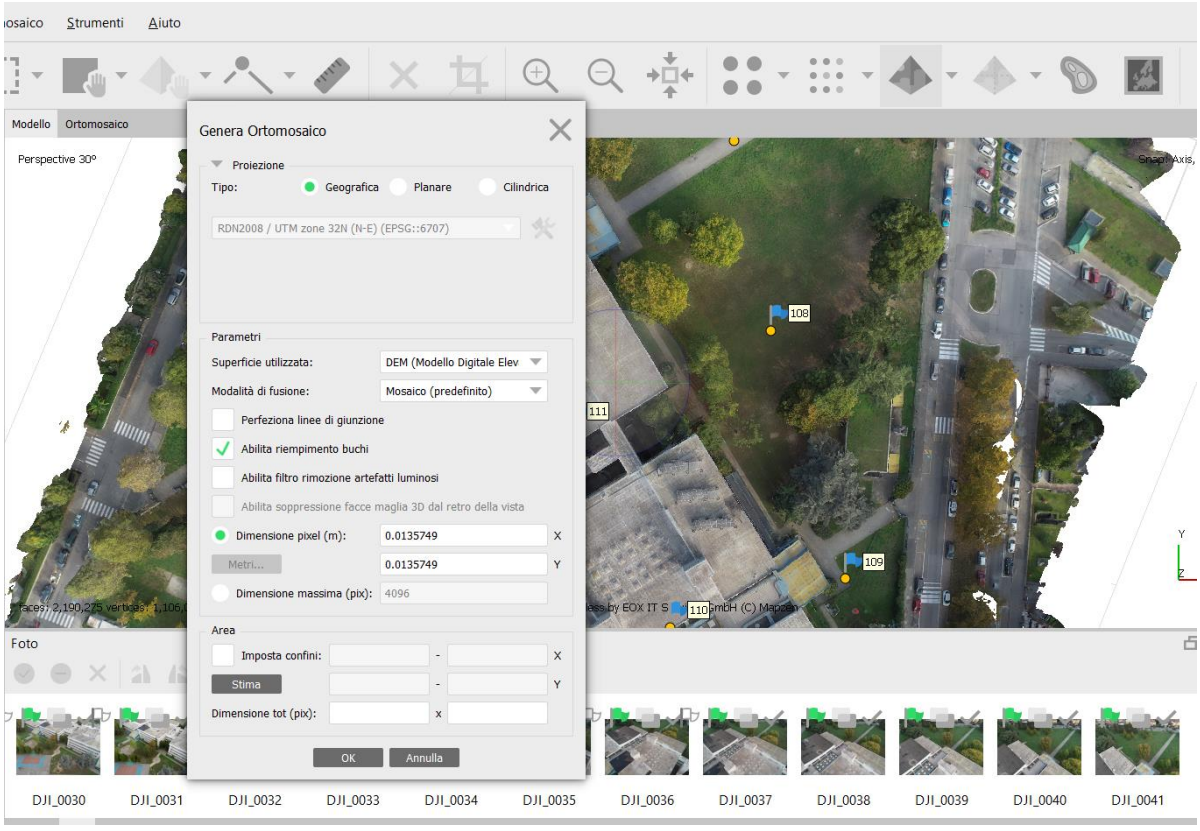


Figura 142 Impostazioni per generare Ortomosaico

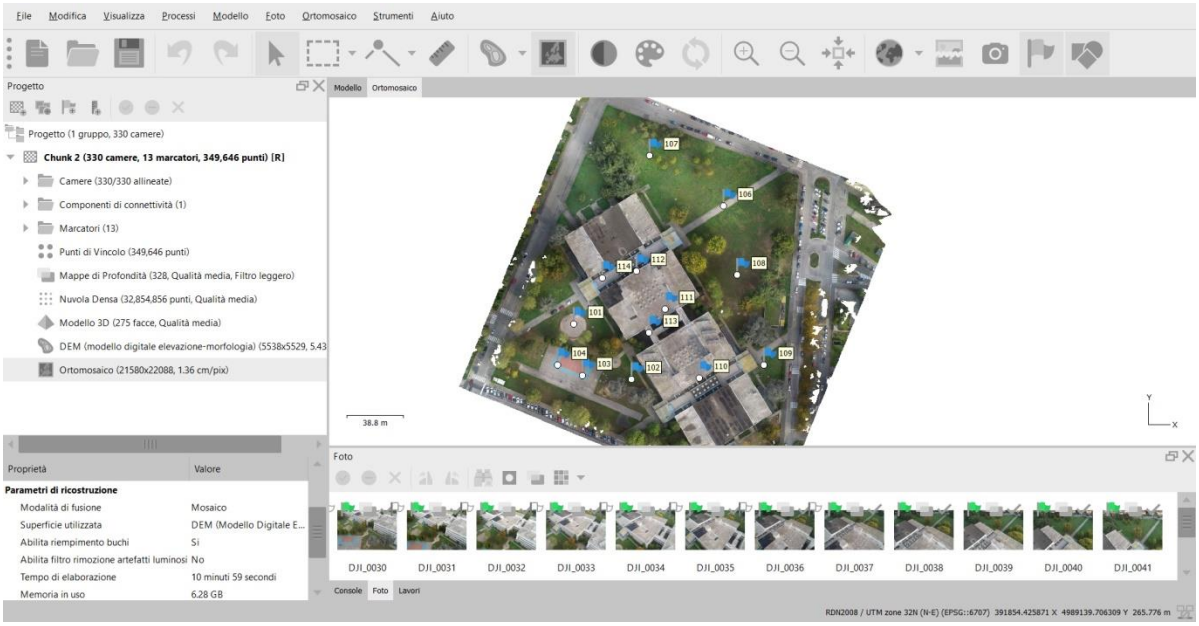


Figura 143 Impostazioni per generare Ortomosaico

Grazie alla qualità delle fotografie, al settaggio dei parametri di acquisizione e non per ultimo alla corretta pianificazione del volo, è stato possibile ottenere un prodotto di qualità elevata con un gran numero di dettagli sia dell'area che dell'edificio rilevato. Per poter verificare il prodotto finale è stato esportato l'ortomosaico in formato TIF mantenendo le impostazioni di esportazione invariate rispetto a quelle fornite dal programma con risoluzione di 21580 x 22088. È possibile modificare i parametri del file esportato per aumentare o diminuire la qualità del prodotto finale visibile in Fig.144.

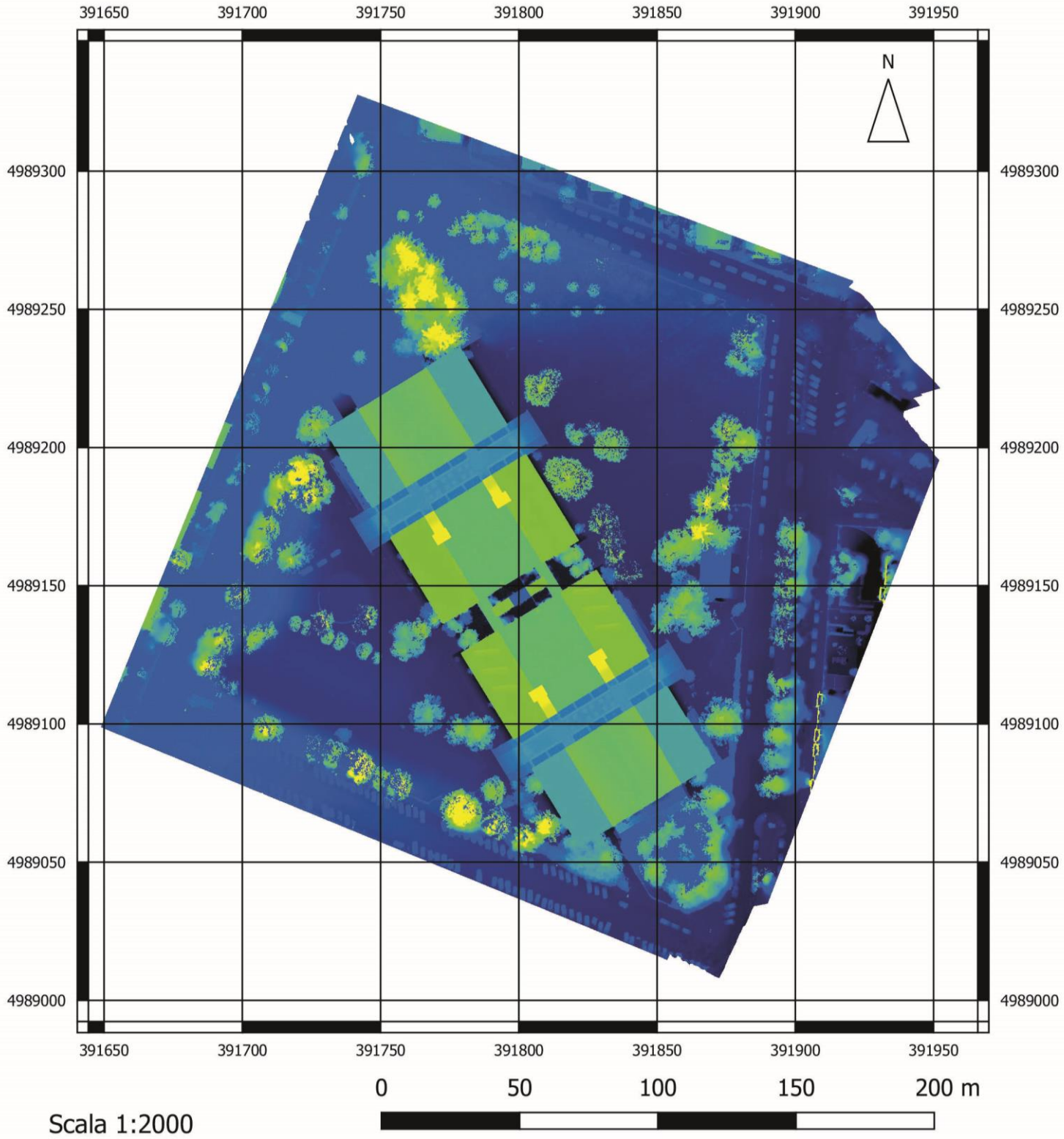


Figura 144 DSM realizzato con Agisoft Metashape e esportato con QGis con reticolo e scala

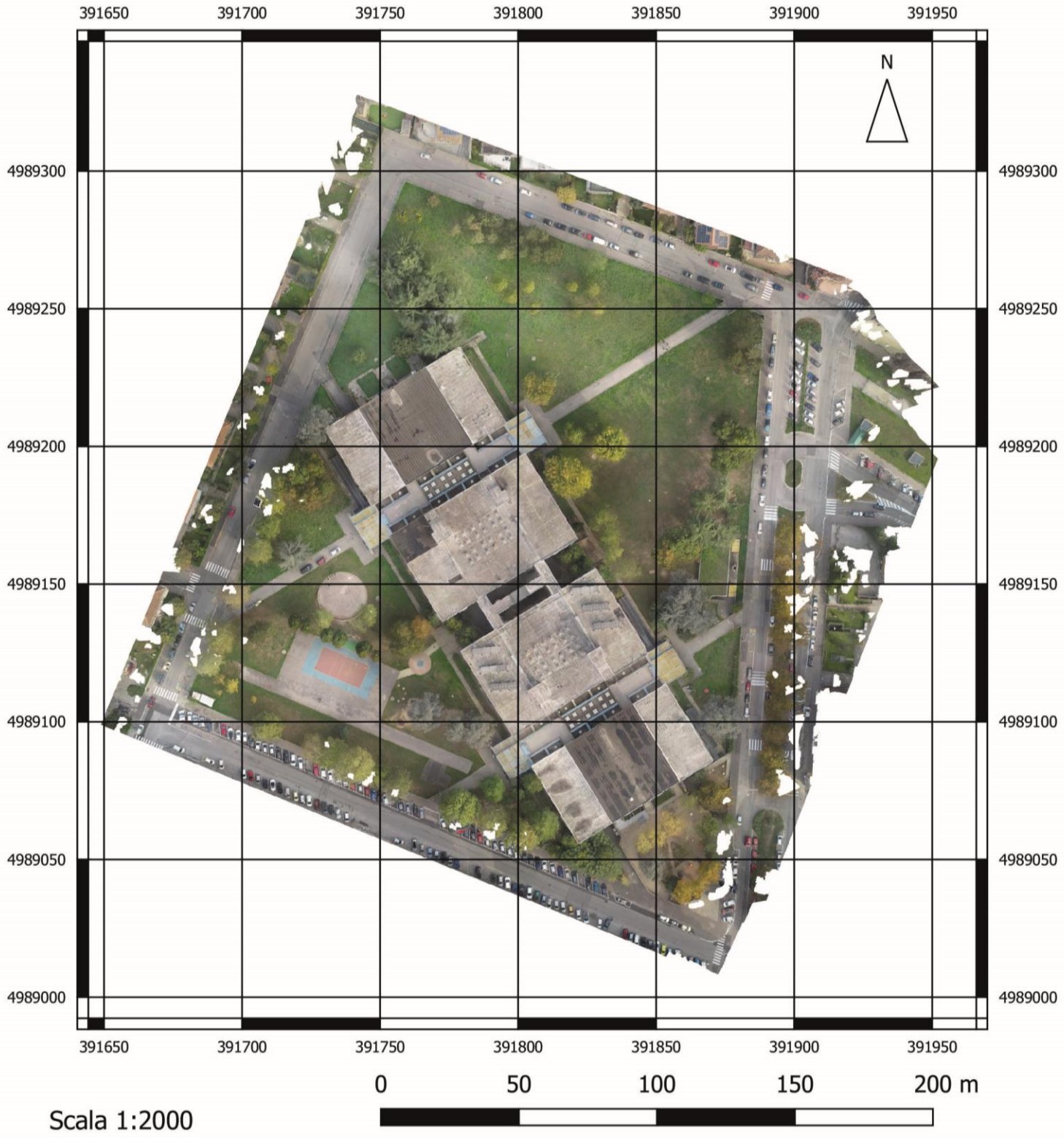


Figura 145 Ortomosaico realizzato con Agisoft Metashape esportato con QGis con reticolo e scala

OSSERVAZIONI

Da una prima analisi del prodotto ottenuto con il software Agisoft Metashape, è possibile effettuare delle considerazioni sul modello tridimensionale generato, dal quale è stato estrapolato l'ortomosaico dell'intera area di analisi. Osservando il file, la ricostruzione dell'intero fabbricato dell'Istituto risulta molto dettagliata così come gran parte del cortile di pertinenza grazie alle corrette impostazioni del piano di volo, dei parametri del sensore utilizzato e della corretta inclinazione. Anche l'integrazione dei punti di controllo a terra e dei punti di verifica e la loro corretta collimazione nelle immagini in cui sono visibili, hanno permesso grazie anche al software utilizzato, di ricostruire un modello tridimensionale utile per estrapolare differenti informazioni.

È possibile identificare in alcuni punti al di fuori del lotto, delle macchie bianche dovute alla minore quantità di dati disponibili e alle posizioni delle camere come visibile in Fig.145, in quanto il piano di volo è stato programmato esclusivamente al di sopra dell'area di rilievo. Un ulteriore analisi sarà effettuata confrontando le procedure e il prodotto ottenuto con il programma DJI Terra.

8.5.2 ELABORAZIONE CON DJI TERRA

Il secondo software utilizzato per l'elaborazione dei dati è DJI TERRA versione 3.0.0, sviluppato dall'azienda leader nella produzione di droni DJI. Il software realizzato per l'elaborazione di dati acquisiti con drone, è stato realizzato inoltre per fornire la possibilità agli utilizzatori di sistemi della stessa azienda, di pianificare missioni di rilievo o ispezioni, o semplicemente di elaborare un insieme di dati al fine di processarli per la ricostruzione di modelli 3D basati sulla tecnologia di fotogrammetria ed estrapolare ortomosaici 2D oppure modelli di elevazione digitale DEM. La possibilità di importare fotografie acquisite con droni e dati quali coordinate geoidiche, consentono di ottenere un modello georeferenziato e ricostruito in modo più accurato, grazie alla collimazione sui target qualora fossero presenti nelle fotografie, dei Ground Control Points-GCP e Check Points-CP. Inoltre la possibilità di settare alcuni dei parametri all'interno del software permette di ottenere modelli più o meno accurati a seconda della qualità desiderata e di estrapolarli in diversi formati utili per il rilievo e la mappatura del territorio.

Il primo step consiste nella scelta del prodotto finale che si vuole ottenere attraverso la ricostruzione, scegliendo il Modello 3D dal quale successivamente saranno estrapolati il modello DEM e l'ortomosaico dell'area rilevata. Lo step successivo consiste nella scelta della cartella contenente tutti i 330 fotogrammi di cui 177 con inclinazione nadirale e 153 con inclinazione obliqua a 45°, precedentemente rielaborati tramite il software Adobe Photoshop Lightroom a causa della differente esposizione. Le immagini come già specificato nella precedente elaborazione con il software Metashape, si divideranno in quelle non elaborate che rimarranno con le coordinate GPS già incluse, e quelle con esposizione modificata dove il dato delle coordinate gps non sarà incluso a causa dell'esportazione non editabile all'interno del software. Il secondo step consiste nell'allineamento automatico delle immagini o aerotriangolazione dove a differenza del primo software utilizzato, non sono presenti opzioni per settare la qualità o altri parametri necessari per perfezionare il modello tridimensionale. Come illustrato in Fig.146, è possibile visualizzare un primo risultato di allineamento ottenendo una nuvola sparsa con le prese nadirali divise in strisciate perpendicolari alla facciata sud-ovest dell'edificio e strisciate parallele alla strada adiacente a ovest.

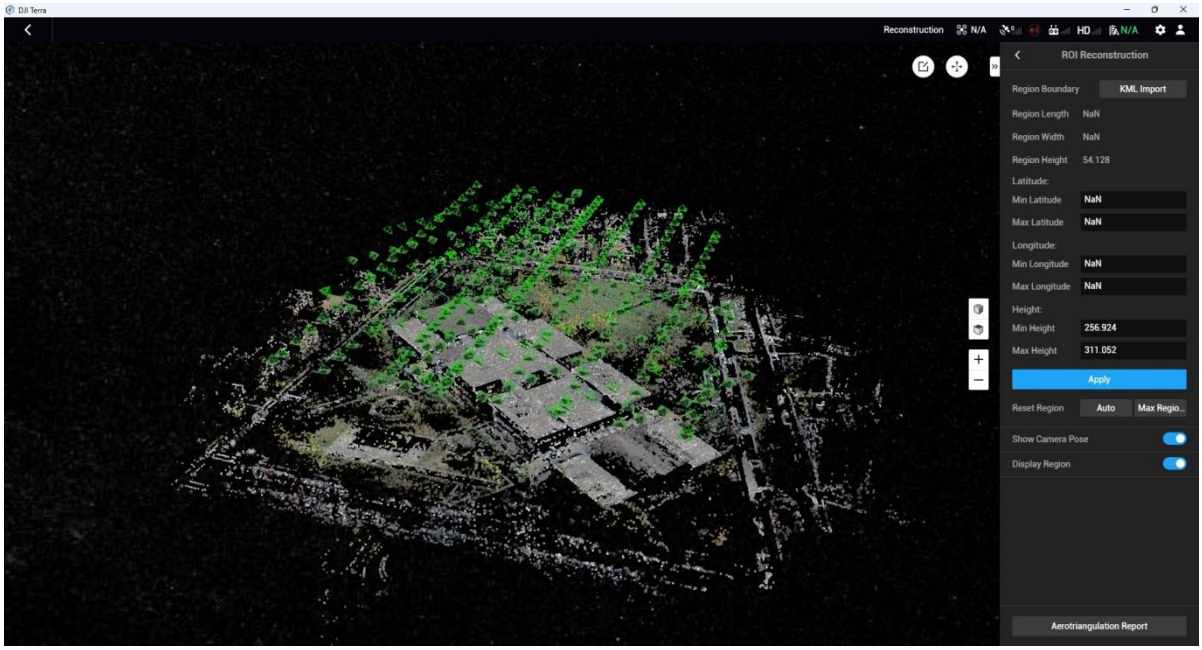


Figura 146 Aerotriangolazione nel software DJI TERRA

Come l'elaborazione precedente, è stato utilizzato lo stesso Computer con procesore Intel i9-12900k 12th Gen, memoria RAM da 64 GB e scheda video Nvidia RTX A5000 con 24 GB. La potenza di calcolo ottimale consente in ambedue le elaborazioni di diminuire i tempi dell'intero processo e di poter gestire meglio i dati elaborati e i prodotti finali.

Il processo di allineamento e di elaborazione della nuvola di punti effettuato attraverso l'approccio SfM (Structure From Motion), è stato eseguito 8 min e 29 secondi.

Dopo avere verificato il corretto posizionamento delle prese e delle in strisciate, si passa allo step successivo che consiste nell'inserimento delle coordinate precedentemente rilevate con il rover GNSS/GPS. Le coordinate già trasformate in geoidiche tramite il software ConveRgo_ge, sono state importate nel programma per poter procedere alla successiva fase di collimazione.

Il processo quindi, consiste nell'assegnare i punti precedentemente rilevati ai relativi target, qualora fossero visibili nelle immagini. Importante in questa fase è assegnare lo stesso numero di punti collimati allo stesso numero di immagini individuate nel software Metashape. Questo processo è fondamentale per avere un sistema di confronto uguale utilizzando lo stesso numero di punti assegnati. In questo caso vengono assegnati gli stessi 9 Ground Control Points - GCP individuati e rimanenti 4 Check Points - CP. Questo procedimento consentirà di ottenere una ricostruzione migliore del modello 3D e un insieme di dati di confronto. Sicuramente è importante inoltre il processo di individuazione dei punti in quanto più il target è visibile (Fig.147), maggiore sarà l'accuratezza nel collimare il relativo punto, che a sua volta incide sulla qualità del prodotto finale.

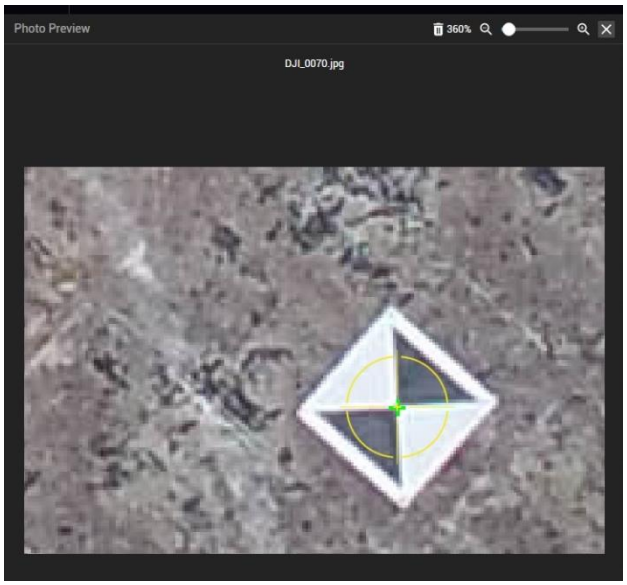


Figura 147 Collimazione punti

Durante l'inserimento dei GCP e dei CP è stato impostato il sistema di coordinate su WGS 84 / UTM zone 32N come impostato anche sul software precedentemente utilizzato. Infine per poter orientare e scalare correttamente il modello, è stata eseguita l'ottimizzazione della nuvola (Fig.148).

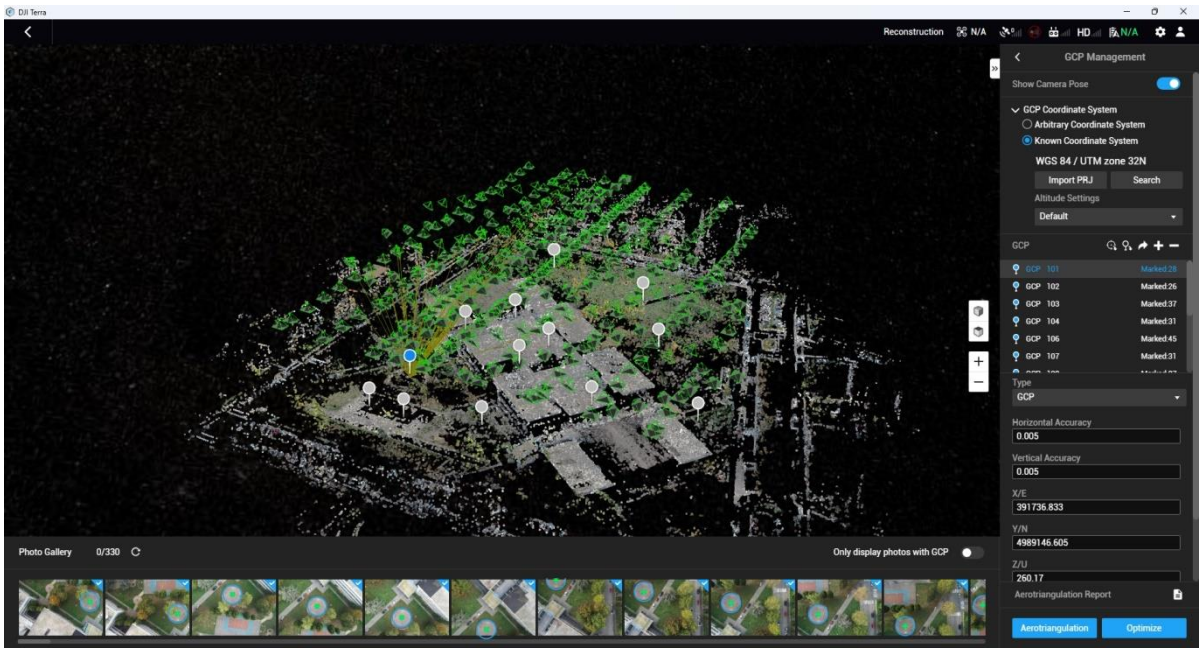


Figura 148 Ottimizzazione nuvola di punti

Per quanto riguarda l'ottimizzazione del prodotto finale, il software nella fase di elaborazione di triangolazione esegue la calibrazione delle immagini e la calibrazione del sensore utilizzato, ottenendo dal report generato i dati presenti nelle seguenti tabelle.

Sensore :	FC6310 (8.8mm)	Immagini :	330
Risoluzione:	5472 x 3648	Lunghezza Focale:	8,8 mm
Dimensione Pixel :	2.41 x 2.41 µm		

Tabella 13 Tabella ottimizzazione dei coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione

Item	Focal	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
Initial	3666.00	2736.00	1824.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized	3644.37	2742.47	1838.80	-0.0001	-0.011	0.010	-0.0006	-0.0003

Tabella 14 Coefficienti e matrice di correlazione

	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	0.027	1.000	0.018	-0.273	-0.382	0.360	-0.321	0.034	-0.007
Cx	0.021	0.018	1.000	-0.016	0.009	-0.005	0.003	-0.014	0.809
Cy	0.019	-0.273	-0.016	1.000	-0.007	-0.011	0.013	0.562	0.007
K1	0.000	-0.382	0.009	-0.007	1.000	-0.966	0.913	-0.036	0.012
K2	0.000	0.360	-0.005	-0.011	-0.966	1.000	-0.983	-0.003	-0.012
K3	0.000	-0.321	0.003	0.013	0.913	-0.983	1.000	0.008	0.013
P1	0.000	0.034	-0.014	0.562	-0.036	-0.003	0.008	1.000	-0.009
P2	0.000	-0.007	0.809	0.007	0.012	-0.012	0.013	-0.009	1.000

Come già specificato, sono stati scelti 9 GCP per georeferenziare e scalare correttamente il modello successivamente generato e 4 CP utili per stimare l'accuratezza generale del rilievo. Dal report generato a seguito della collimazione dei punti e dell'ottimizzazione della nuvola di punti, sono state generate tabelle per i GPC e CP con gli errori stimati e gli errori stimati totali.

GROUND CONTROL POINT _ errori stimati

Tabella 15 Errori stimati in m nei Ground Control Point nelle elaborazioni della Camera Front

ID	dx(m)	dy(m)	dz(m)
102	0.017	-0.021	-0.007
104	-0.0006	0.001	0.007
106	0.012	-0.006	-0.006
107	0.004	-0.004	0.011
108	0.007	-0.030	0.008
110	0.002	-0.030	0.014
111	-0.005	0.004	-0.002
112	-0.003	0.007	-0.004
113	-0.005	-0.016	0.002

GROUND CONTROL POINT _ errori stimati totali

Tabella 16 Errori stimati totali in cm nei Ground Control Points nelle elaborazioni della Camera Front

dx(m)	dy(m)	dz(m)
0.008	0.017	0.008

CHECK POINT _ errori stimati

Tabella 17 Errori stimati in m nei Ground Control Point nelle elaborazioni della Camera Front

ID	dx(m)	dy(m)	dz(m)
101	0.006	-0.001	-0.011
103	-0.0009	0.004	0.006
109	0.006	-0.033	0.023
114	0.006	0.008	-0.003

CHECK POINT _ errori stimati totali

Tabella 18 Errori stimati totali in cm nei Ground Control Points nelle elaborazioni della Camera Front

dx(m)	dy(m)	dz(m)
0.005	0.017	0.013

A seguito dell'ottimizzazione della nuvola di punti, si passa all'ultima fase che consiste nella ricostruzione del modello 3D. Il software DJI TERRA a differenza del software Metashape, non consente di inserire tutte le fasi di elaborazione tra cui generazione *nuvola densa, maglia 3D triangolazione* e *texture*, ma offre la possibilità di selezionare le caratteristiche del prodotto finale da generare. Per avere un base di confronto, sono state scelte le seguenti impostazioni uguali laddove possibile, a quelle del software precedente, di cui :

TYPE (Tipologia di modello) : modello 3D

Scena (Mapping Scenes) : normale

Risoluzione (Resolution) : alta

La risoluzione è stata impostata in qualità alta, al fine di ottenere un modello più accurato possibile, come prodotto invece è risultata una nuvola di punti in formato PNTS e LAS, e modello nei formati B3DM e OBJ (Fig.149), utili per la fase successiva di confronto.

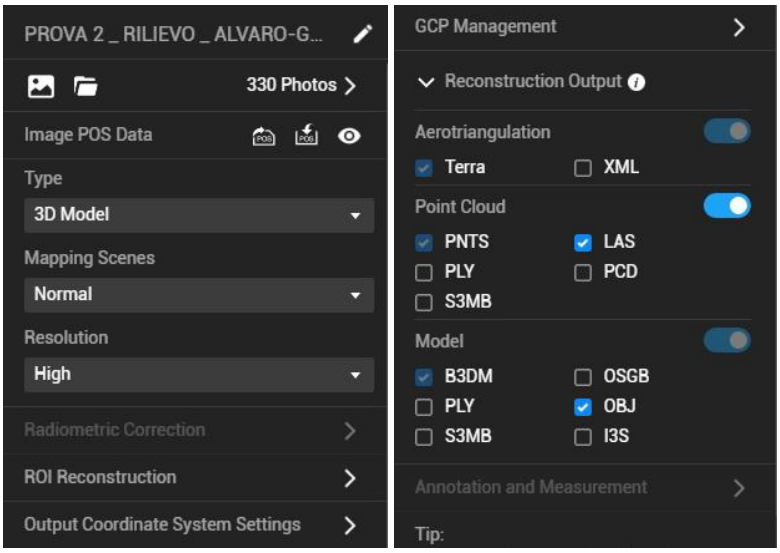


Figura 149 Impostazioni ricostrizione modello 3D e prodotti

Come già specificato, tutte le fasi intermedie di ricostruzione vengono già eseguite di default dal programma e quindi qualora dovesse esserci un problema, sarà individuabile solo a fine elaborazione, a differenza del software Metashape che ci consente di seguire i vari step di ricostruzione e avere un maggior controllo sulle impostazioni.

A seguito dalle impostazioni precedentemente illustrare nella Fig.149, è stata eseguita la ricostruzione finale. Il processo di elaborazione ha impiegato 55 minuti e ha dato come risultato un modello 3D dell'area di rilievo e del fabbricato come visibile in Fig.150, una nuvola di punti RGB visibile in Fig.151 e infine un model DEM visibile in Fig.152.

Figura 150 Modello 3D generato a seguito della ricostruzione

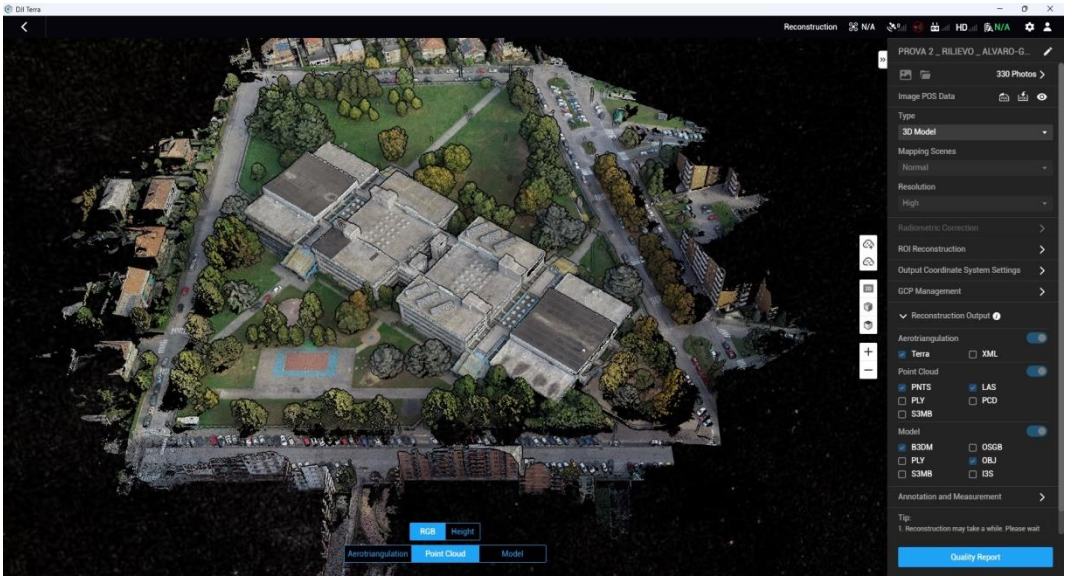


Figura 151 Nuvola di punti RGB generata a seguito della ricostruzione

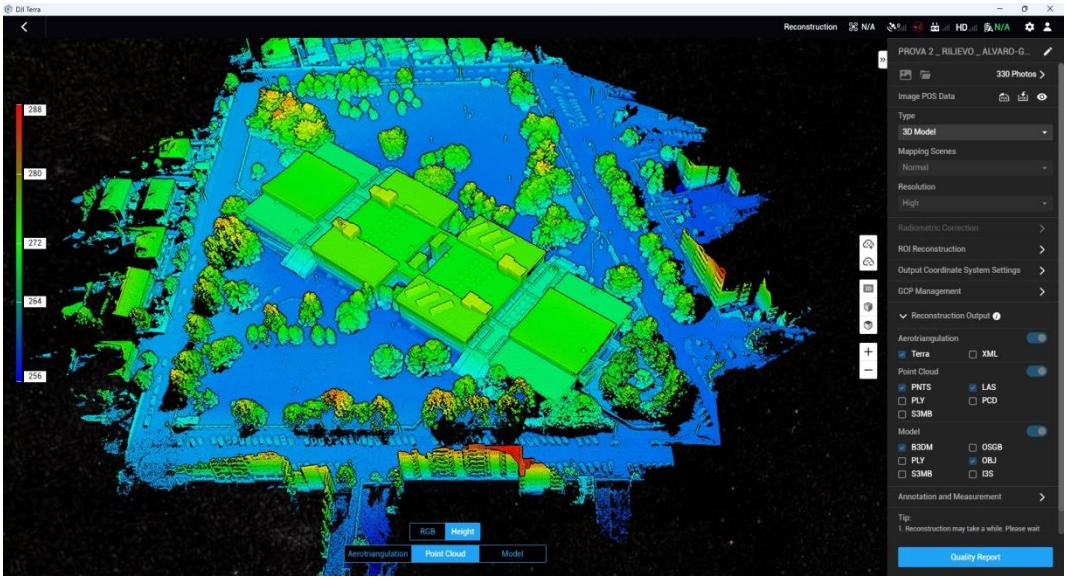


Figura 152 Modello DEM generato a seguito della ricostruzione

Dopo aver generato il modello 3D, è stato generato l'ortomosaico 2D Map mantenendo le impostazioni della precedente elaborazione, e modificando quelle riguardanti la scena e la risoluzione del prodotto. Poiché l'area di rilievo è localizzata in un contesto urbano piuttosto complesso con la presenza di terreni, fabbricati e vegetazione di diverse tipologie e altezze, è stata impostata la scena in Urban. La qualità invece è stata impostata su High (massima), come le impostazioni utilizzate sul software di comparazione Metashape.

Dopo aver eseguito l'elaborazione dei dati, il prodotto ottenuto presentava incongruenze causate dalla presenza di rettangoli di colore nero, lungo la parte centrale dell'ortomosaico e in alcuni punti ai lati (Fig.153).

Figura 153 Ortomosaico ottenuto dalla prima elaborazione

Per verificare quale potrebbe essere stato il problema, sono stati analizzati il modello 3D, così come la nuvola di punti e il modello DEM, senza però identificare problematiche che possono andare ad alterare la generazione dell'ortomosaico. È stata effettuata una verifica anche alle impostazioni precedentemente scelte sia per quanto riguarda il modello 3D, che per il modello 2D. Infine sono stati analizzati i punti collimati dei GCP e CP e tutte le fotografie, in modo particolare quelle presenti nella aree interessate da rettangoli.

Per verificare se il problema fosse causato dalle precedenti elaborazioni, è stata eseguita un'elaborazione a parte solo per la restituzione dell'ortomosaico, senza inserire i GCP e i CP ed impostando la qualità bassa per velocizzare il processo. Anche in questo caso, il risultato non ha portato a una soluzione. Un ulteriore tentativo è stato eseguito inserendo le foto non modificate per verificare se la causa potesse essere dovuta all'elaborazione nei software di fotografia, mantenendo sempre le impostazioni più basse. In questo caso, il prodotto ottenuto non ha presentato nessun problema, consentendo così di effettuare una verifica delle fotografie elaborate. Dopo un'attenta analisi delle informazioni presenti nelle fotografie, è stato individuato che quelle elaborate non contenevano le informazioni riguardanti le coordinate GPS, al contrario di quelle grezze. Per evitare quindi che si verifichi nuovamente il problema riscontrato nell'ortomosaico, tutte e 330 le fotografie sono state importate all'interno del software Lightroom, e salvate in una cartella a parte in modo da essere tutte sprovviste di informazioni delle coordinate GPS. In questo caso è opportuno sottolineare che il software Lightroom alla versione attualmente utilizzata, non permette di salvare

le fotografie con le informazioni GPS. Dopo aver eseguito nuovamente i passaggi per l'allineamento, la collimazione e assegnazione dei GCP e CP con la successiva ottimizzazione, la ricostruzione 3D del modello e esportazione dei file con le relative impostazioni, è stato generato l'ortomosaico in 9 minuti con una risoluzione di 1.10 cm/pix.

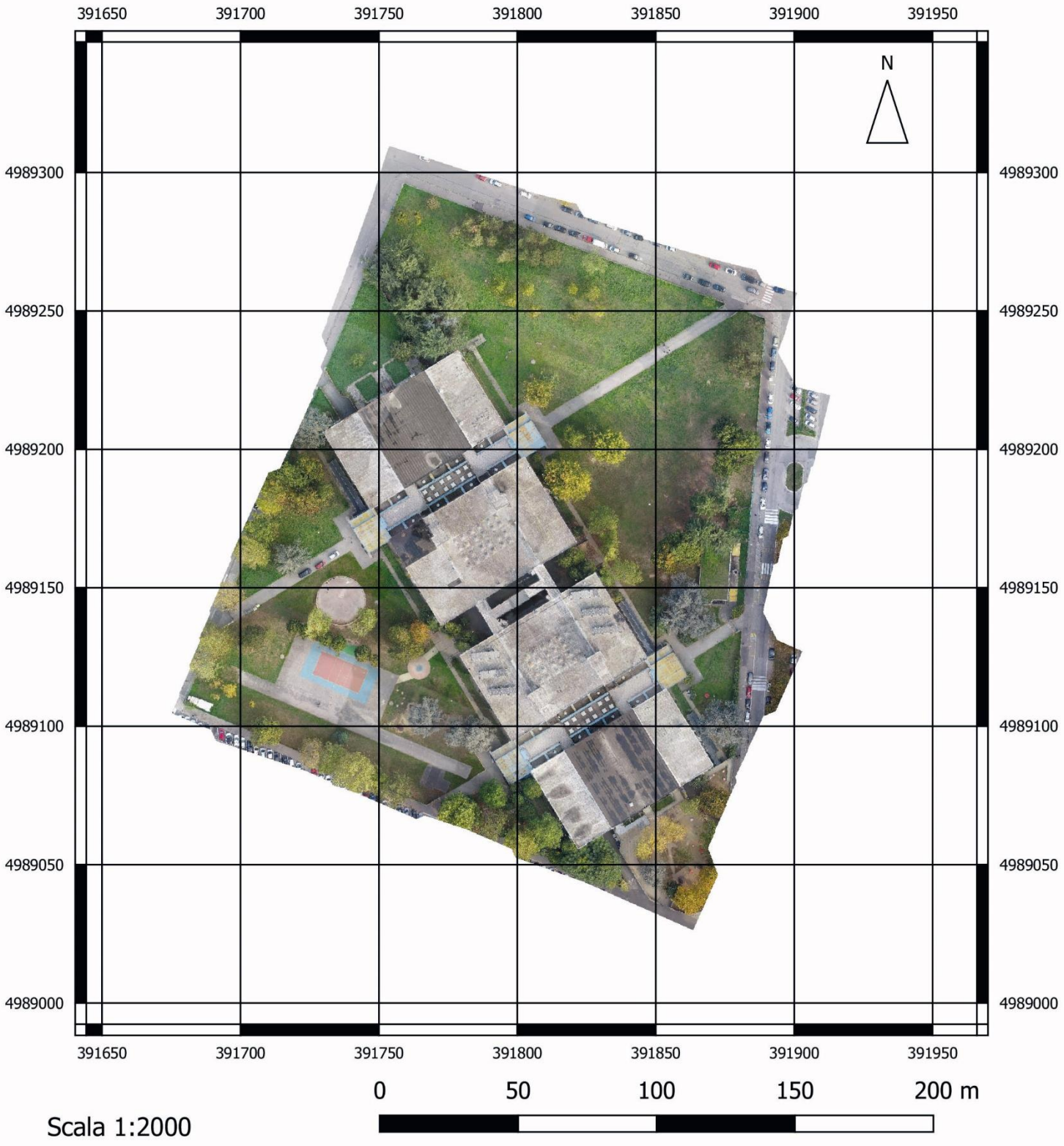


Figura 154 Ortomosaico generato con DJI TERRA e esportato con QGis con reticolo e scala

Questo modello viene esportato in formato JPEG, e con esso viene generato un file di testo word all'interno del quale sono presenti tutte le informazioni utili per georeferenziare e scalare correttamente l'immagine all'interno del software QGis.

Come già specificato anche per il modello ottenuto con il software Metashape, il modello esportato in questione (Fig.154) è un Modello Digitale della Superficie (DSM) in quanto comprende sia il terreno che l'edificio rilevato.
È possibile attraverso software dedicati andare a classificare le differenti superfici in modo da escludere le vegetazioni o i fabbricati, generando così un Modello Digitale del Terreno (DTM).

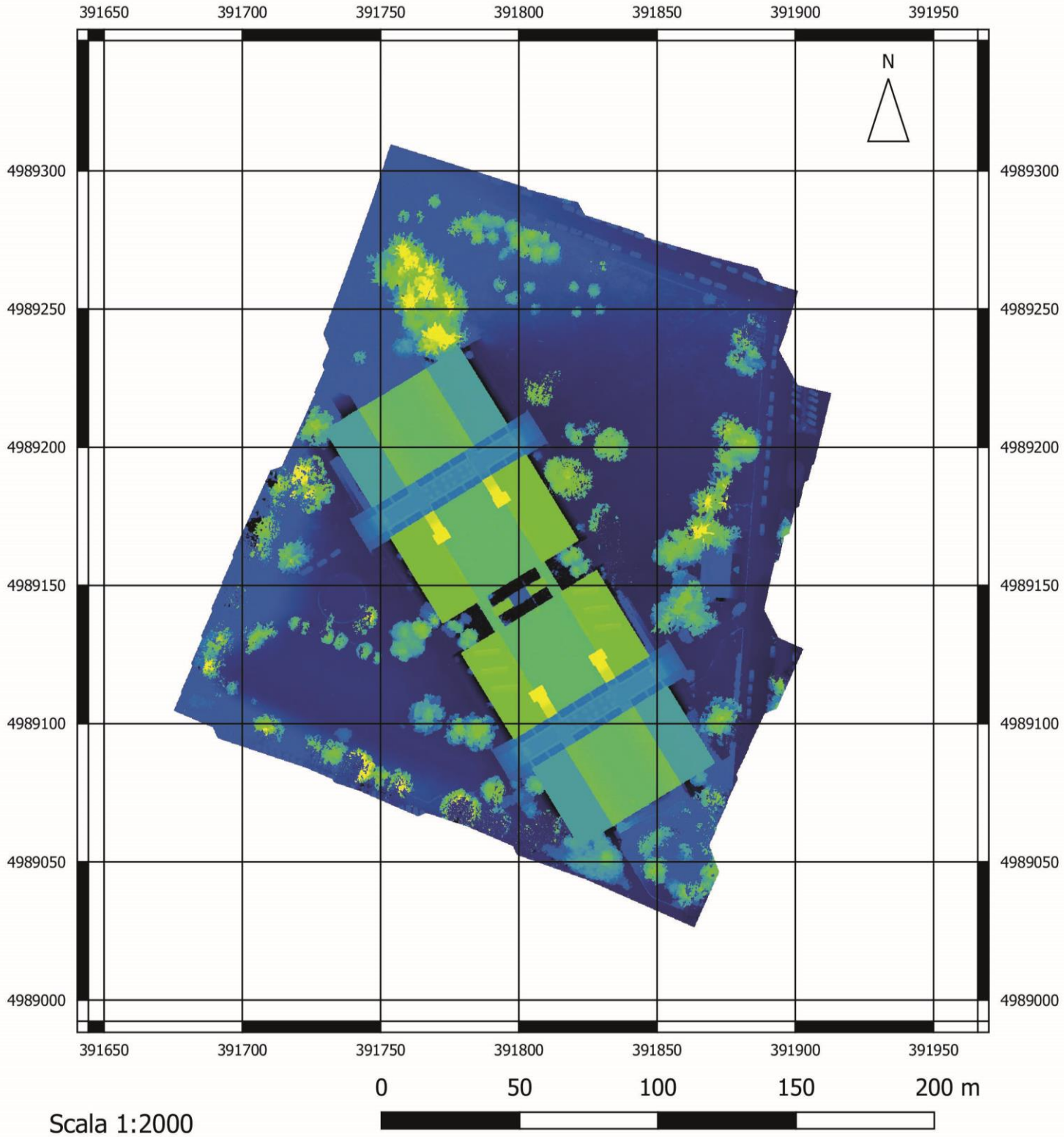


Figura 155 DSM realizzato con Agisoft Metashape e esportato con QGis con reticolo e scala

Infine dal report generato è possibile osservare in Fig.156 che anche il programma DJI TERRA, identifica un ottimo overlap nella parte centrale un'ottima sovrapposizione delle immagini identificata dal colore viola, che cambia verso il rosso visibile ai lati dove il numero di acquisizioni è inferiore, dovuto anche dal piano di volo preimpostato e dalle limitazioni imposte dagli enti locali nell'effettuare la missione di volo all'interno del perimetro del lotto rilevato.

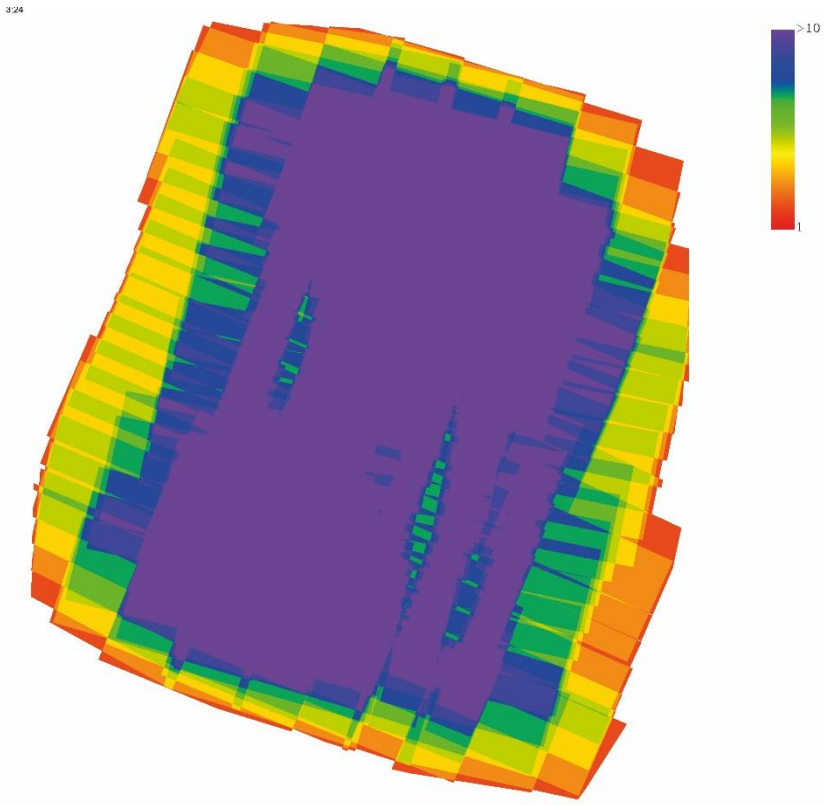


Figura 156 Sovrapposizione punti di scatto DJI TERRA

OSSERVAZIONI

A seguito dell'elaborazione dei dati, sono stati riscontrati alcuni problemi riguardo le immagini acquisite con il drone, dovute all'impostazioni in modalità automatica. Per rimediare a questo, è stata effettuata una post-produzione nel software Adobe Photoshop Lightroom in modo da uniformare l'esposizione di tutte le immagini. La prima elaborazione effettuata è stata eseguita nel software Agisoft Metashape, all'interno del quale sono state importate le immagini e il file delle coordinate trasformate da geoidiche a elissoidiche. È stato eseguito un primo allineamento delle immagini e successivamente la collimazione dei relativi punti visibili nelle immagini. Successivamente sono state eseguiti i singoli processi di elaborazioni di cui generazione della Nuvola Densa, Maglia 3D(Triangolazione), Texture e DEM, mantenendo tutte le impostazioni in qualità HIGH. Tra un processo e l'altro sono state effettuate analisi per verificare il corretto processo di

elaborazione. Dall'elaborazione sono stati esportati il file nel formato ".las" della nuvola di punti e l'ortomosaico. Lo stesso procedimento è stato eseguito con il software DJI TERRA a differenza che i passaggi per generare Nuvola Densa, Maglia 3D(Triangolazione), Texture e DEM, non sono eseguibili singolarmente e questo non permette di effettuare controlli sulle elaborazioni. Infatti, a seguito di una prima elaborazione, dall'ortomosaico ricavato sono stati individuati dei rettangoli neri presenti in alcuni punti dell'immagine. A seguito delle indagini, questo problema risulta essere causato dalle coordinate GPS assenti in alcune delle immagini precedentemente elaborate nel software Adobe Photoshop Lightroom. È stata eseguita una seconda elaborazione di tutte le immagini nel software di elaborazione fotografica e ripetuto il procedimento di elaborazione nel software DJI TERRA, ottenendo un ortomosaico corretto e la nuvola di punti.

Dai prodotto finali è possibile definire che la nuvola di punti generata con Agisoft Metashape costituita da 129'032'598 punti sarà molto più densa rispetto alla nuvola generata con DJI TERRA costituita da 11'586'850 punti. Per verificare l'accuratezza dei due prodotti si procederà all'analisi e il confronto all'interno del software Cloud Compare.

9. CONFRONTO TRA I DUE METODI

La fase finale oggetto di ricerca di questa tesi è il confronto dei dati ricavati con i software di fotogrammetria Agisoft Metashape e DJI Terra. In questo capitolo sarà effettuata un'analisi accurata delle nuvole di punti generate dai due software. Il confronto sarà eseguito utilizzando il software Cloud Comprare v2.12.4, nel quale saranno importate le nuvole di punti generate con i software di fotogrammetria, andando ad estrapolare i dati relativi a tutti i punti identificati dai marker, per poi confrontarli con i dati rilevati con il rover GPS/GNSS. Sarà fatta un'analisi sui valori ottenuti identificando i valori massimi, minimi e la media. Lo stesso procedimento sarà effettuato per entrambe le nuvole generate dai diversi software in modo da analizzare l'accuratezza dei due prodotti. Un ulteriore confronto tra i dati delle nuvole di punti, consentirà di verificare la differenza tra i dati generati. A seguito delle sezioni realizzate corrispondenza dei punti rilevati con GPS/GNSS, verrà effettuata una verifica della distanza tra il punto rilevato e il punto del target sulla nuvola. Infine, l'ultimo passaggio sarà quello di fare un confronto automatico tra le due nuvole per verificare l'accuratezza dei due prodotti, estrapolando un istogramma delle distanze tra i punti. Per dimostrare l'accuratezza delle due nuvole generate nei differenti software, è stato scelto di esportare il prodotto in qualità HIGH.

9.1 ANALISI NUVOLA DI PUNTI DJI TERRA

Per la fase di analisi dei dati, il file *"cloud.las"* dalla dimensione 287 MB e formata da 11'586'850 punti è stato importato nel software Cloud Compare insieme al file contenente i dati delle coordinate dei punti rilevati denominato *"Gobetti_Rtkmarker_U00-32_geo _ PUNTI COMPARAZIONE"* (Fig.157 e Fig.158).

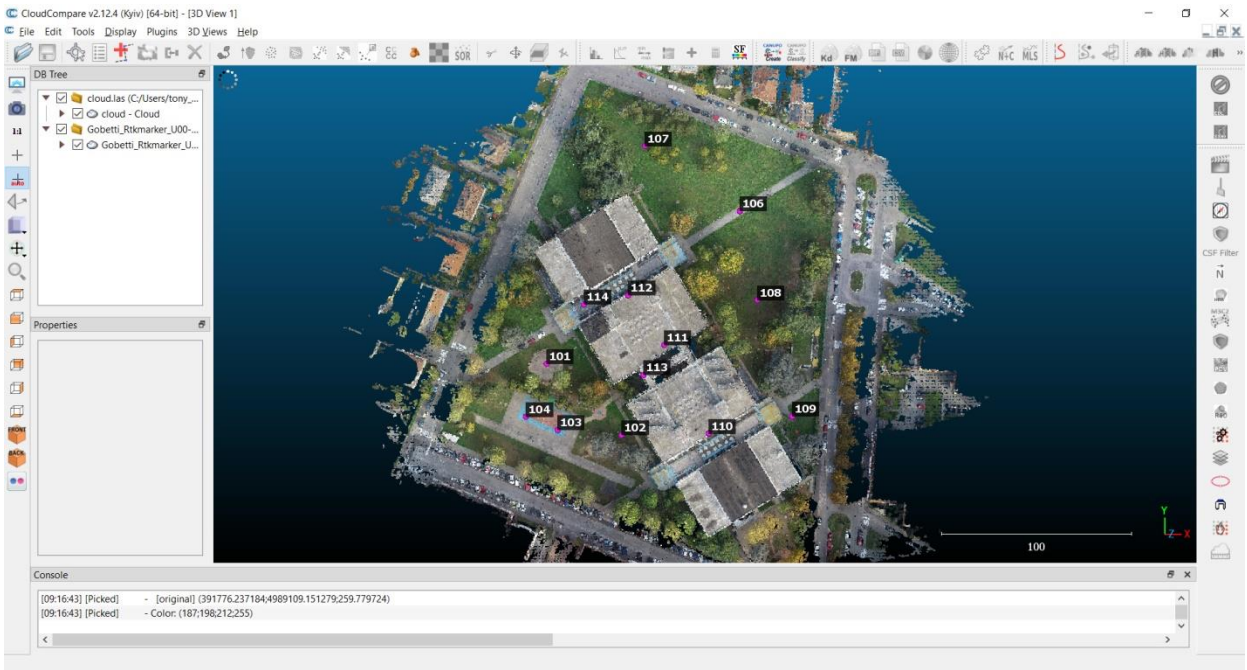


Figura 157 Importazione nuvola di punti e coordinate marker

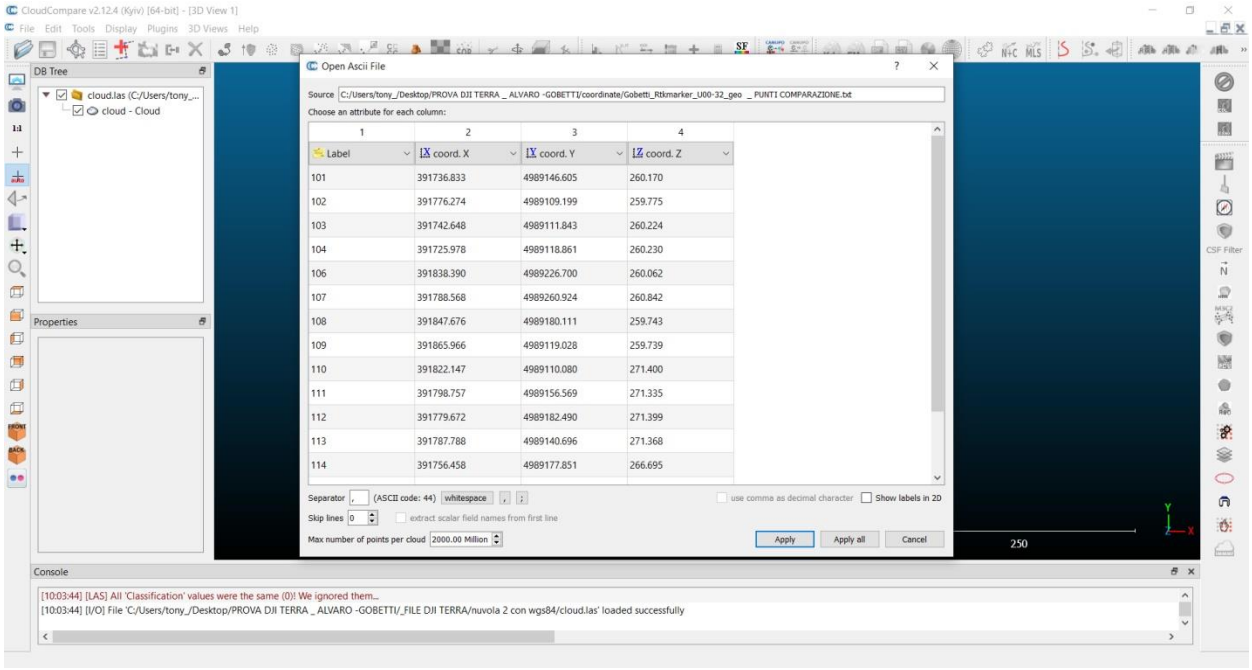


Figura 158 Importazione nuvola di punti e coordinate marker

Dopo aver verificato che i punti importati corrispondono ai marker visibili sulla nuvola di punti, è stata disattivata la casella del file delle coordinate, in modo da poter procedere all'individuazione dei marker sulla nuvola e lettura delle sue coordinate attraverso il comando Point Picking (Fig.159).

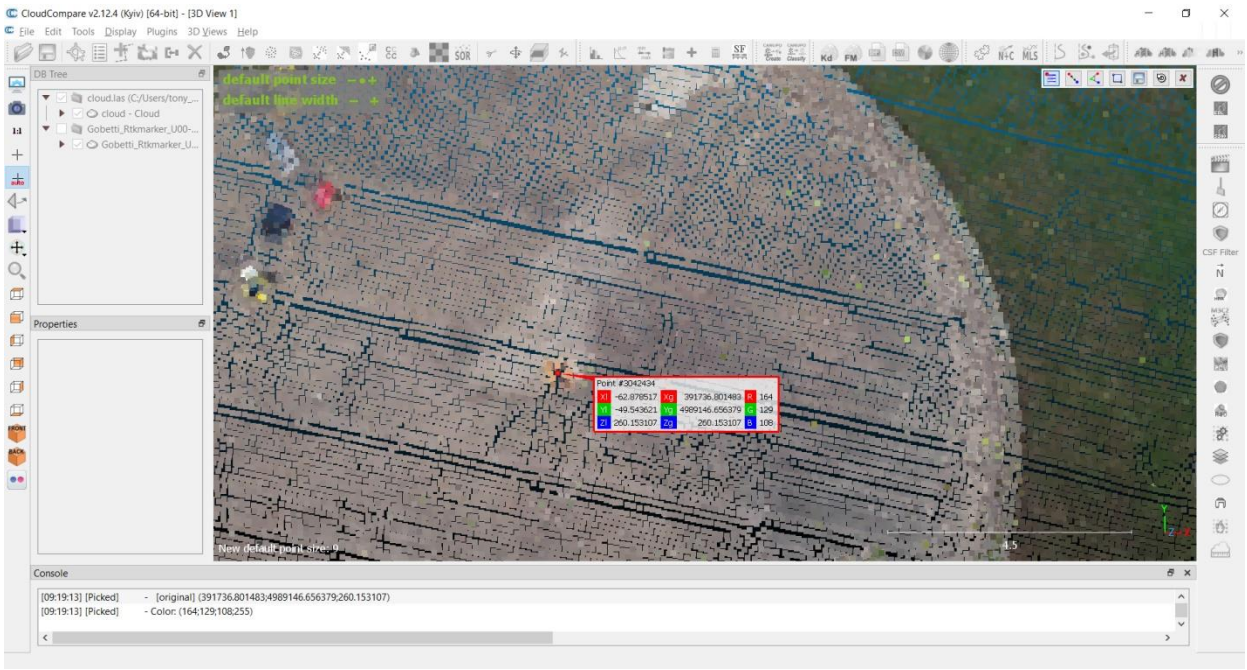


Figura 159 Point Picking delle coordinate del punto che individua il marker

Il procedimento è risultato complicato a causa del basso numero di punti presenti sulla nuvola, rallentando il processo di identificazione. È stata realizzata una tabella excel contenente sia i dati dei marker rilevati con il rover GPS/GNSS, sia i dati rilevati sulla nuvola di punti. Questo procedimento permetterà di ottenere dei dati di confronto per verificare i valori massimi, i valori minimi e la media tra

le due tipologie di dati. Sono stati importati all'interno del software Microsoft Excel tutti i dati relativi alle coordinate rilevate con il GPS/GNSS visibili in Tab.19, e successivamente tutti i dati relativi ai marker rilevati sulla nuvola di punti visibili in Tab.20.

Tabella 19 Tabella coordinate rilevate con rover GPS/GNSS

RILIEVO GPS _ ALVARO-GOBETTI			
NOME	X	Y	Z
101	391736.833	4989146.605	260.170
102	391776.274	4989109.199	259.775
103	391742.648	4989111.843	260.224
104	391725.978	4989118.861	260.230
106	391838.390	4989226.700	260.062
107	391788.568	4989260.924	260.842
108	391847.676	4989180.111	259.743
109	391865.966	4989119.028	259.739
110	391822.147	4989110.080	271.400
111	391798.757	4989156.569	271.335
112	391779.672	4989182.490	271.399
113	391787.788	4989140.696	271.368
114	391756.458	4989177.851	266.695

Tabella 20 Tabella coordinate rilevate dalla nuvola di punti _ DJI TERRA

DJI TERRA _ CLOUD COMPARE			
NOME	X	Y	Z
101	391736.801	4989146.656	260.153
102	391776.344	4989109.116	259.779
103	391742.611	4989111.892	260.232
104	391726.057	4989118.943	260.228
106	391838.377	4989226.669	260.050
107	391788.521	4989260.858	260.887
108	391847.681	4989180.037	259.766
109	391865.931	4989118.993	259.767
110	391822.073	4989110.063	271.413
111	391798.774	4989156.548	271.329
112	391779.674	4989182.519	271.390
113	391787.838	4989140.659	271.373
114	391756.471	4989177.886	266.729

Per quanto riguarda i dati acquisiti dalla nuvola di punti, è opportuno specificare che è possibile avere un errore che può essere dovuto all'accuratezza della nuvola di punti, alla densità della nuvola e alla fine all'operatore che identifica il punto. Dopo aver ricavato i dati dalla nuvola di punti, è stato effettuato in confronto per differenza tra tutti i valori visibile in Tab.21, in modo da verificare l'accuratezza dei dati. Inoltre sono stati eseguiti: il comando "=MEDIAN(H20:H32)" per verificare la media dei valori, il

comando “=MAX(H20:H32)” per verificare il punto con maggiore differenza sull’asse ed infine il comando “=MIN(H20:H32)” per verificare punto con maggiore differenza negativa sul relativo asse.

Tabella 21 Differenza di quote tra rilievo e dati nuvola di punti DJI TERRA

DIFFERENZA DI QUOTE TRA RILIEVO E DATI DJI TERRA			
NOME	X	Y	Z
101	0.032	-0.051	0.017
102	-0.070	0.083	-0.004
103	0.037	-0.049	-0.008
104	-0.079	-0.082	0.002
106	0.013	0.031	0.012
107	0.047	0.066	-0.045
108	-0.005	0.074	-0.023
109	0.035	0.035	-0.028
110	0.074	0.017	-0.013
111	-0.017	0.021	0.006
112	-0.002	-0.029	0.009
113	-0.050	0.037	-0.005
114	-0.013	-0.035	-0.034
MEDIA	-0.002	0.021	-0.005
MAX	0.074	0.083	0.017
MIN	-0.079	-0.082	-0.045

Analizzando i valori nella tabella precedentemente ricavata, è possibile individuare che ad esempio sull’asse Z, il punto 107 è quello che presenta una differenza di valore più alta rispetto agli altri punti. Per verificare in modo più approfondito questo dato è possibile effettuare una verifica tra il punto rilevato tramite GPS/GNSS e il punto rilevato sulla nuvola di punti. In questo caso è stato scelto di effettuare una sezione sulla nuvola di punti, in corrispondenza del punto 107 come visibile in Fig.160.

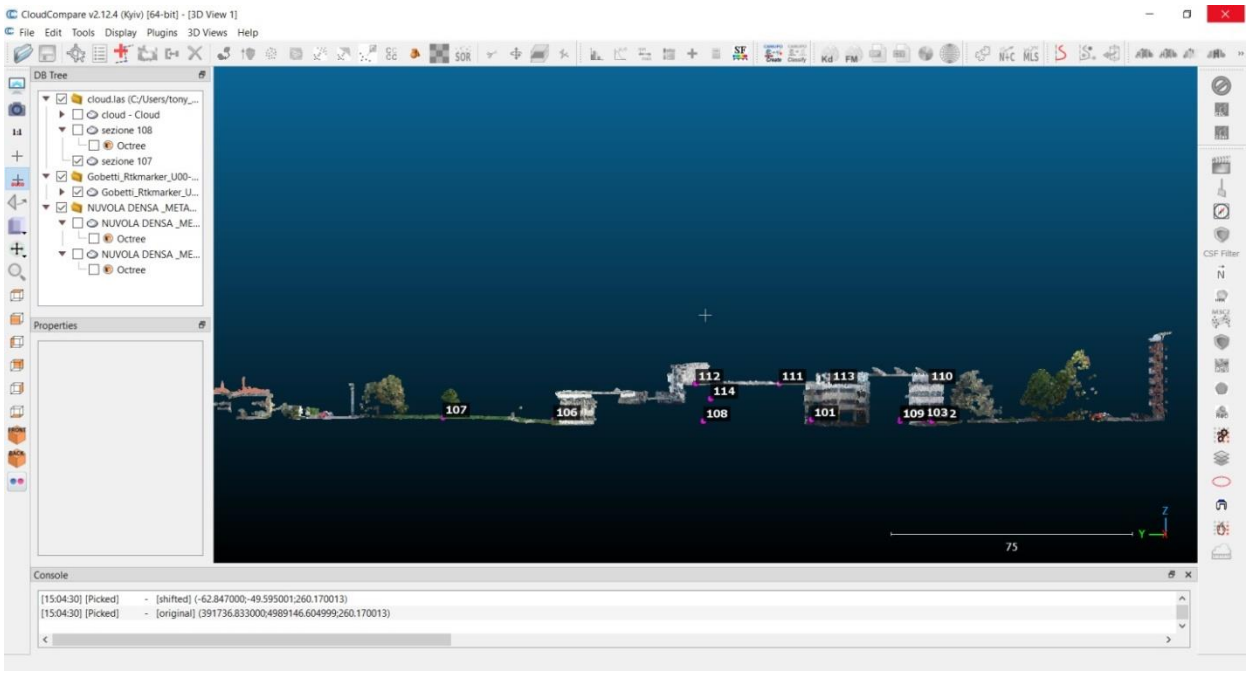


Figura 160 Sezione della nuvola di punti in corrispondenza del punto 107

Per indagare in dettaglio è stata effettuata l'analisi andando a verificare la vicinanza del punto rilevato con la strumentazione ai punti visibili sulla nuvola di punti. Dalla Fig.161 è visibile che in asse al punto 107, non sono presenti molti punti e oltretutto sono distanti rispetto al punto rilevato con GPS/GNSS.

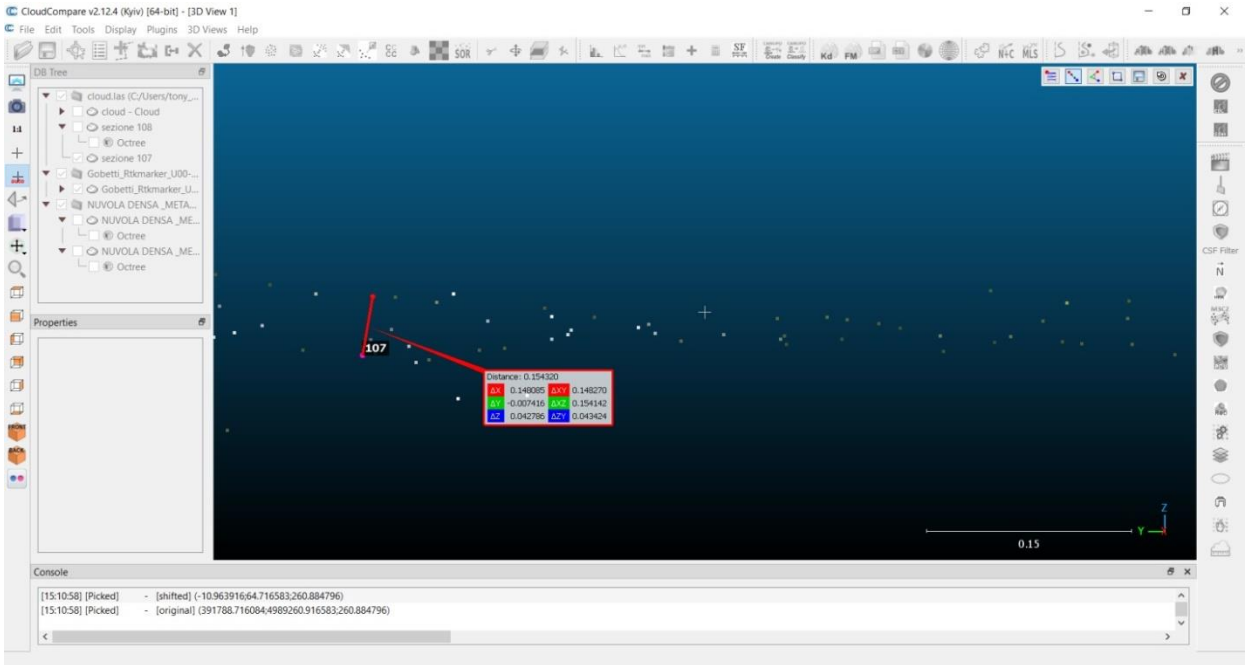


Figura 161 Verifica distanza sull'asse Z del punto 107 tra punto GPS/GNSS e nuvola di punti

Dall'osservazione della Fig.161 è possibile stabilire che per mancanza di dati in quel determinato punto, vi è una differenza tra i valori analizzati in tabella. L'assenza di dati può essere causata da diversi fattori come ad esempio la mancanza di fotogrammi utili per la restituzione nei programmi di fotogrammetria, la qualità bassa delle immagini dovuta a impostazioni errate o scarsa illuminazione, la capacità di

elaborazione dei dati da parte dei software o le limitate opzioni di impostazioni, l'errata collimazione dei punti da parte dell'operatore o l'errato rilievo dei punti con il GPS/GNSS. Poiché il dato può essere compromesso da uno dei fattori precedentemente elencati, si procede in questo caso all'analisi dei dati che abbiamo e al successivo confronto con i dati del secondo software utilizzato.

Per verificare se il problema può essere causato dal software si procede alla verifica della densità della nuvola di punti attraverso l'analisi di essa. Con il comando Point Picking e Select 2 point è possibile verificare la distanza tra i singoli punti (Fig.162).

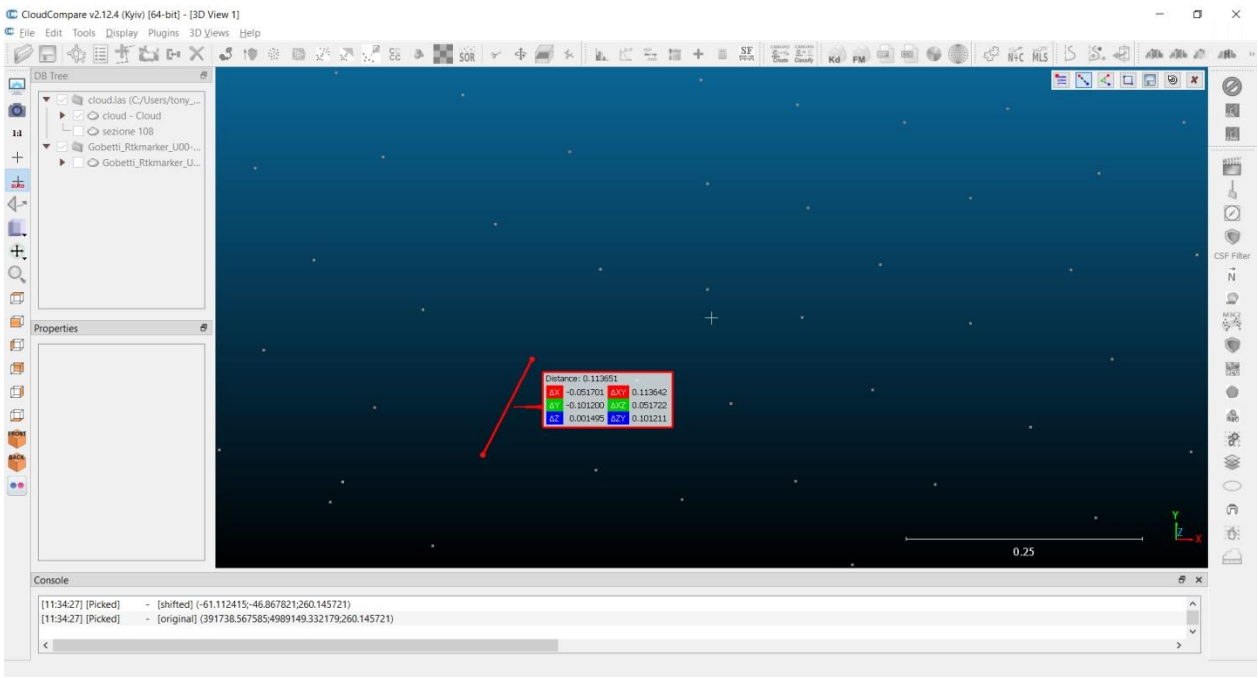


Figura 162 Misura distanza tra i punti della Nuvola di Punti DJI TERRA

Dall'analisi è possibile verificare che la distanza tra due punti è di circa 0.11 m (11 cm) e questo dato è importante in quanto tra un punto e l'altro la nuvola di punti è priva di informazioni. In questo caso, è opportuno fare il confronto anche con i dati della nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape per verificare l'accuratezza delle due nuvole di punti.

Da una prima analisi dei dati ottenuti è possibile stabilire che la MEDIA delle differenze tra i dati rilevati di tutti i punti con il GPS/GNSS e i dati ottenuti dalla nuvola di punti generata con il software DJI TERRA, ha una differenza di -0.002 m sulla asse X, di 0,021 m sull'asse Y e di -0,005 m sull'asse Z come visibile in Tab.22.

Tabella 22 Accuratezza DJI TERRA

NOME	X	Y	Z
MEDIA	-0.002	0.021	-0.005

Questo dato permette di stabilire che la nuvola di punti generata ha un'accuratezza di 1-2 cm nonostante la distanza tra un punto e l'altro della nuvola è di circa 11cm.

9.2 ANALISI NUVOLA DI PUNTI AGISOFT METASHAPE

La seconda analisi è stata effettuata sulla nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape con le impostazioni in qualità *HIGH*, in modo da avere un prodotto simile a quello generato dal software DJI Terra, utile per l'analisi e il confronto dei dati.

A differenza del primo file generato con il software DJI Terra, in questo caso nonostante le opzioni di esportazione della qualità siano state impostate alla stessa qualità, il prodotto generato dal software Agisoft Metashape risulta di dimensioni 3600 MB (3,6 GB) formata da 129'032'598 punti. Già dal numero di punti della nuvola è possibile identificare che essa sarà sicuramente più densa rispetto alla prima. Prima però bisogna analizzare i dati per verificare se risulta accurata quanto quella generata con il primo software.

Per l'elaborazione viene importato il "NUVOLA DENSA _ METASHAPE" all'interno della stessa schermata del programma Cloud Compare, dove sono già presenti la nuvola di punti generata con il software DJI TERRA e le coordinate rilevate con il rover GPS/GNSS. Avere entrambi i file all'interno del software sarà utile per la fase finale di confronto tra le due nuvole.

Anche in questo caso, prima di procedere, viene effettuata una verifica del corretto posizionamento della nuvola di punti e dei punti che identificano i marker. Verificata la corrispondenza di essi, come nel primo caso, dopo aver "spento" il file contenete le coordinate dei punti rilevati, è stato effettuato lo stesso procedimento di estrapolazione dei dati dai punti che identificano i marker (Fig.163).

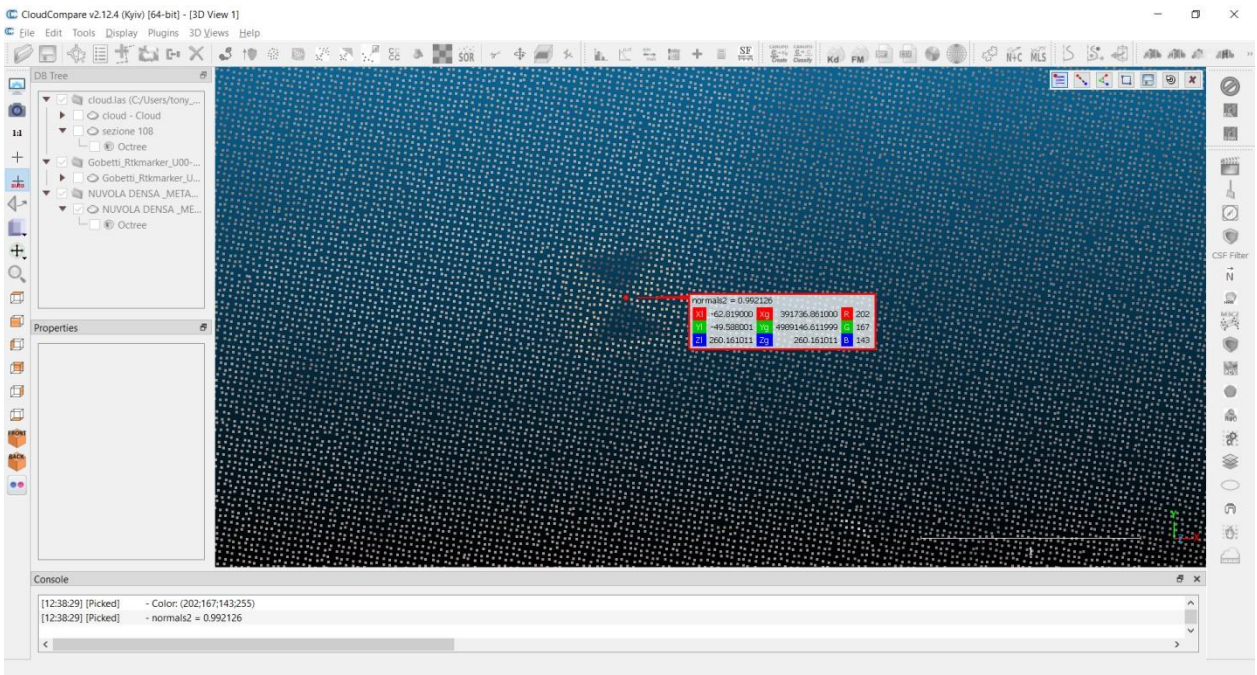


Figura 163 Point Picking delle coordinate del punto che individua il marker

Già da una prima osservazione è possibile notare che a differenza della prima nuvola generata con il software DJI Terra, questa risulta molto più densa, rendendo molto più facile e più accurata l'individuazione del centro del marker e quindi l'individuazione del punto per l'estrapolazione dei dati come visibili nella seguente Tab.23.

Tabella 23 Tabella coordinate rilevate dalla nuvola di punti _ Agisoft Metashape

METASHAPE _ CLOUD COMPARE			
NOME	X	Y	Z
101	391736.835	4989146.619	260.161
102	391776.299	4989109.194	259.773
103	391742.658	4989111.851	260.234
104	391725.990	4989118.868	260.247
106	391838.398	4989226.691	260.047
107	391788.542	4989260.924	260.854
108	391847.693	4989180.079	259.751
109	391865.981	4989119.012	259.770
110	391822.156	4989110.072	271.416
111	391798.766	4989156.587	271.328
112	391779.690	4989182.501	271.388
113	391787.786	4989140.670	271.366
114	391756.478	4989177.876	266.693

Come già specificato nel primo caso, l'errore dei dati acquisti può essere dovuto sia all'accuratezza della nuvola di punti, alla sua densità e alla precisione dell'operatore. In questo caso, il procedimento di rilievo dei punti nel software Cloud Compare è stato eseguito più velocemente grazie alla densità della nuvola, consentendo di individuare in modo più accurato il punto che identifica il centro del marker. Per verificare l'accuratezza della nuvola è stato eseguito lo stesso procedimento di confronto con i dati rilevati con il GPS/GNSS.

Tabella 24 Differenza di quote tra rilievo e dati nuvola di punti Metashape

DIFFERENZA DI QUOTE TRA RILIEVO E DATI METASHAPE			
NOME	X	Y	Z
101	-0.002	-0.014	0.009
102	-0.025	0.005	0.002
103	-0.010	-0.008	-0.010
104	-0.012	-0.007	-0.017
106	-0.008	0.009	0.015
107	0.026	0.000	-0.012
108	-0.017	0.032	-0.008
109	-0.015	0.016	-0.031
110	-0.009	0.008	-0.016
111	-0.009	-0.018	0.007
112	-0.018	-0.011	0.011
113	0.002	0.026	0.002
114	-0.020	-0.025	0.002
MEDIA	-0.010	0.000	0.002
MAX	0.026	0.032	0.015
MIN	-0.025	-0.025	-0.031

Dall'analisi dei dati precedentemente ricavati è possibile osservare che il punto 109 sull'asse Z presenta una differenza di quota di 0.031 m (circa 3 cm). In questo caso è possibile verificare anche in questo caso facendo una sezione (Fig.164) in corrispondenza del punto 109, in modo da verificare la distanza di tra la quota del punto e il punto più vicino che individua il marker.

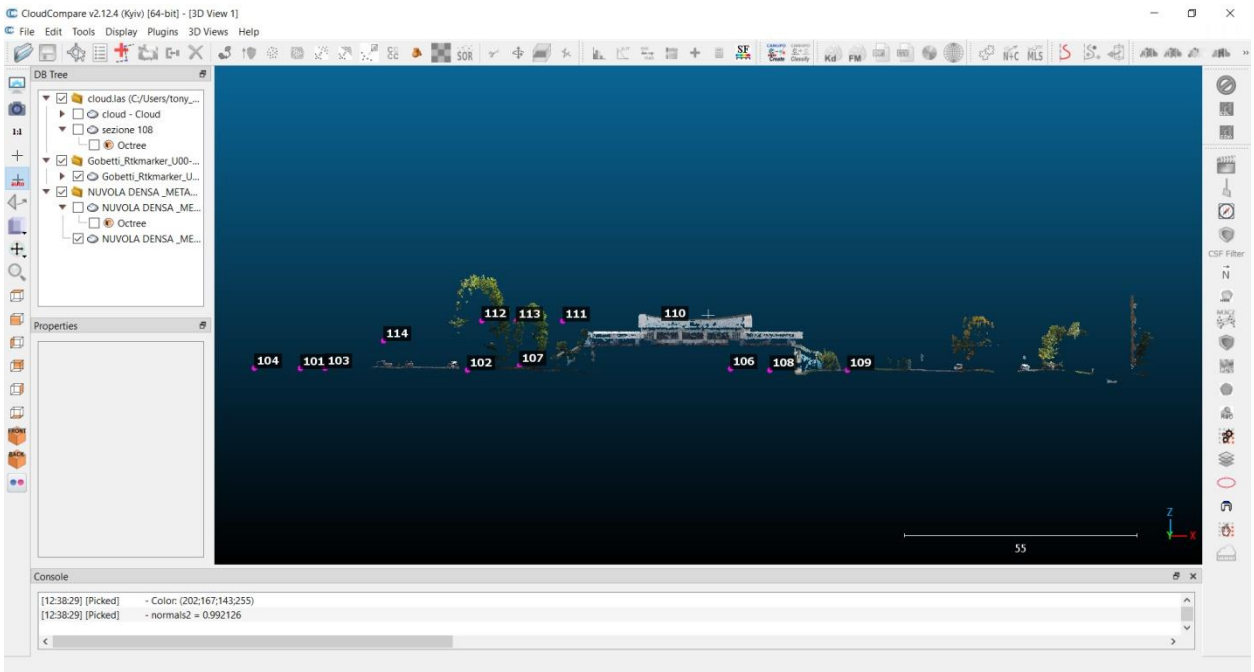


Figura 164 Sezione in corrispondenza del punto 109 _ Agisoft Metashape

Dall'analisi dei dati, è possibile osservare che il punto 109 rilevato con il GPS/GNSS risulta al di sotto dei punti della nuvola generata con il software. In questo caso l'errore di 3 cm è giustificabile dalla quantità di nuvola di punti visibile al di sopra del punto 109 (Fig.165).

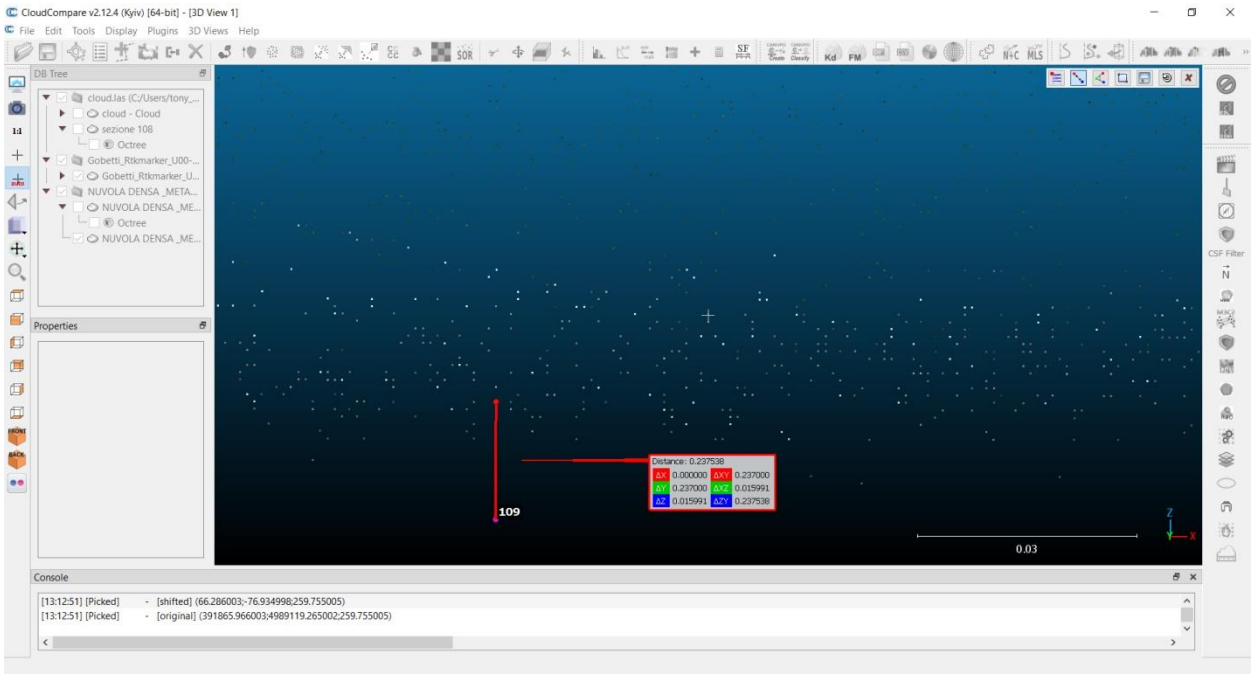


Figura 165 Verifica distanza sull'asse Z del punto 109 tra punto GPS/GNSS e nuvola di punti

In questo caso come già specificato prima la differenza tra il punto rilevato e la nuvola di punti può essere causata o dal programma o dalla collimazione dei punti da parte dell'operatore. Un ulteriore osservazione può essere effettuata sulla quantità di immagini acquisite di quella porzione di area andando a verificare la mappa che rappresenta la sovrapposizione delle camere. Confrontando gli altri punti, la differenza con i dati rilevati con il GPS/GNSS risulta molto più bassa, consentendo di ottenere un valore medio tra i dati di 0.002 m.

Un'ulteriore verifica può essere effettuata sulla densità dalla nuvola di punti che come già descritto, risulta molto più densa rispetto a quel generata con il software precedentemente utilizzato, di cui 129'032'598 punti contro 11'586'850 punti della nuvola di DJI TERRA. Per verificare se questo dato è confermato, è possibile andare a misurare la distanza tra due punti della nuvola (Fig.166).

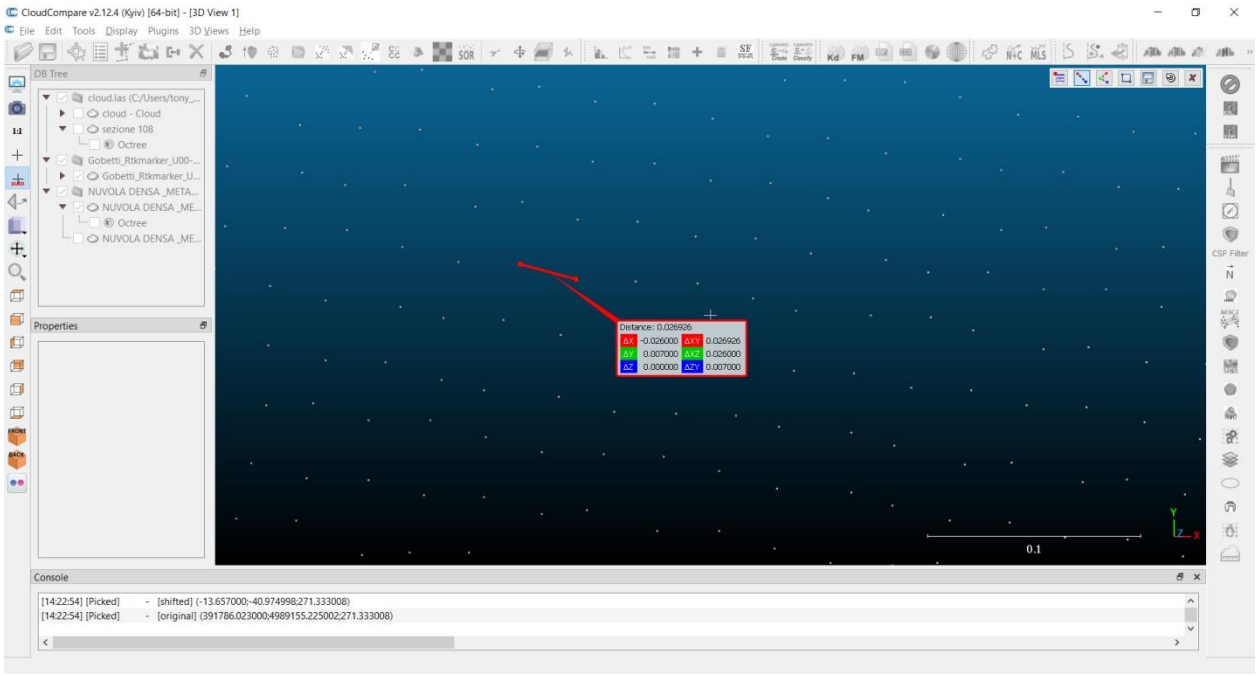


Figura 166 Misura distanza tra i punti della Nuvola di Punti Agisoft Metashape

Sempre attraverso il comando Point Picking e Select 2 Points è stato verificato, andando a selezionare diversi punti, che la distanza tra due punti è di circa 0.026 m (2.6 cm). In questo caso confrontando il dato ottenuto dalla nuvola di punti elaborata con il software DJI TERRA dove la distanza tra un punto è l'altro è di 0.11 m, è possibile confermare che la nuvola ottenuta con Agisoft Metashape è circa quattro volte più dettagliata rispetto alla prima. Nonostante questo dato, la ricerca di questa tesi è il confronto dei dati ottenuti con i due software e la verifica dell'accuratezza delle nuvole di punti. Proprio in questo caso è stata verificata la MEDIA delle differenze tra i dati rilevati di tutti i punti con il GPS/GNSS e i dati ottenuti dalla nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape.

Sull'asse X la differenza è di - 0.010 m, sull'asse Y è di 0,000 m e sull'asse Z è di -0,002 m come visibile nella seguente Tab.25.

Tabella 25 Accuratezza _ Agisoft Metashape

NOME	X	Y	Z
MEDIA	-0.010	0.000	0.002

Questo dato permette di stabilire che la nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape ha un'accuratezza che si aggira attorno a 1 cm.

Dai dati fino ad ora ricavati è possibile definire che, sia nel caso della nuvola di punti generata con il software DJI Terra, sia in quella generata con il software Agisoft Metashape, i prodotti risultano con un'accuratezza di 1-2 cm per quanto riguarda la prima e di 1 cm per quanto riguarda la seconda (Tab.26).

Tabella 26 Accuratezza nuvola di punti DJI TERRA e AGISOFT METASHAPE

NOME	X	Y	Z
MEDIA	-0.002	0.021	-0.005
MEDIA	-0.010	0.000	0.002

Un ulteriore osservazione può essere effettuata sulle coordinate ricavate dalle due nuvole di punti, andando a verificare la differenza tra i valori della Tab.25 e della Tab.26 precedentemente illustrate. In media la differenza tra i punti è all'incirca tra 1-2 cm (Tab.27).

Tabella 27 Differenza di quote tra nuvola di punti di Agisoft Metashape(metodo 1) e DJI TERRA(metodo 2)

DIFFERENZA DI QUOTE TRA METASHAPE e DJI TERRA			
NOME	X	Y	Z
101	0.034	-0.037	0.008
102	-0.045	0.078	-0.006
103	0.047	-0.041	0.002
104	-0.067	-0.075	0.019
106	0.021	0.022	-0.003
107	0.021	0.066	-0.033
108	0.012	0.042	-0.015
109	0.050	0.019	0.003
110	0.083	0.009	0.003
111	-0.008	0.039	-0.001
112	0.016	-0.019	-0.002
113	-0.052	0.011	-0.007
114	0.007	-0.010	-0.036
MEDIA	0.016	0.011	-0.002
MAX	0.083	0.078	0.019
MIN	-0.067	-0.075	-0.036

Oltre ai dati analizzati è possibile infine effettuare un confronto delle due nuvole di punti attraverso il processo automatizzato *Compute cloud/cloud distance* all'interno del software Cloud Compare. Questo processo permette di confrontare i due modelli impostando come nuvola di riferimento la nuvola di punti più densa (in questo caso quella di generata con il software Agisoft Metashape) e come nuvola di comparazione quella generata con DJI TERRA, come visibile in Fig.169. L'elaborazione dei dati porterà ad estrapolare un Istogramma utile per analizzare l'accuratezza tra entrambe le nuvole. È inoltre possibile impostare il passaggio inverso nel quale, come nuvola di riferimento, è possibile inserire la nuvola generata con DJI TERRA e come nuvola di comparazione quella generata con Agisoft Metashape.

Dall'istogramma ricavato a seguito dell'elaborazione (Fig.167), è possibile verificare che i valori della distanza assoluta tra le due nuvole sono molto vicini a 0 e questo conferma che le due nuvole di punti sono molto accurate.

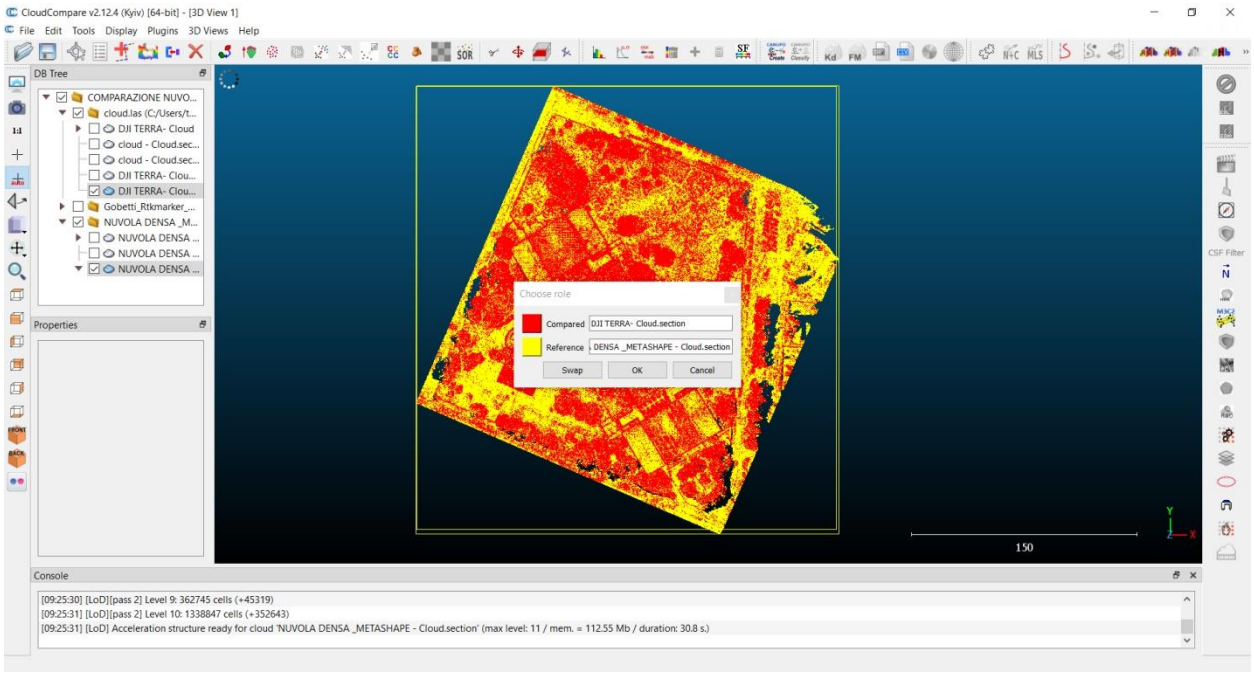


Figura 167 Confronto delle due nuvole di punti attraverso il processo *Compute cloud/cloud distance*

A seguito del processo di elaborazione è stato generato un istogramma (Fig.168) dove sull'asse delle ascisse (x) sono rappresentati i valori delle distanze assolute compresi tra 0.00 cm e 3.6 cm, mentre sull'asse delle ordinate (Y) sono rappresentati il numero dei punti.

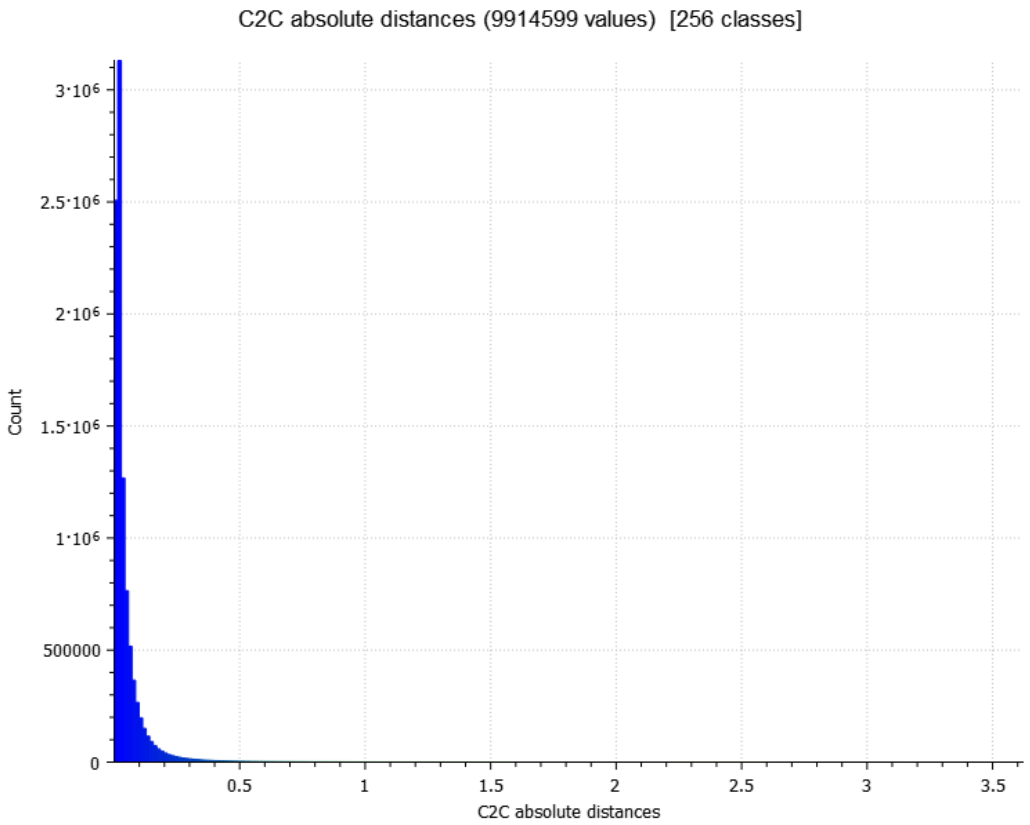


Figura 168 Istogramma generato dalla comparazione della nuvola DJI TERRA con riferimento alla Nuvola generata con Agisoft Metashape

Tabella 28 Dati istogramma

Class	Value	Class start	Class end
1	2506845	0	0.014
2	3130781	0.014	0.028
3	1267763	0.028	0.043
4	765037	0.043	0.057
5	517051	0.057	0.071
6	365682	0.071	0.085
7	266670	0.085	0.099
8	197771	0.099	0.113
9	150532	0.113	0.127
10	115881	0.127	0.142
11	90842	0.142	0.156
12	72998	0.156	0.17
13	58806	0.17	0.184
14	48495	0.184	0.198
15	40326	0.198	0.212
16	33791	0.212	0.226
17	28602	0.226	0.241
18	24631	0.241	0.255
19	21331	0.255	0.269
20	18425	0.269	0.283
21	16248	0.283	0.297
22	14336	0.297	0.311
23	12681	0.311	0.325
24	11282	0.325	0.34
25	10103	0.34	0.354
26	9030	0.354	0.368
27	8314	0.368	0.382
28	7374	0.382	0.396
29	6551	0.396	0.41
30	6232	0.41	0.424
31	5627	0.424	0.439
32	5129	0.439	0.453
33	4626	0.453	0.467
34	4358	0.467	0.481
35	4129	0.481	0.495
36	3704	0.495	0.509
37	3515	0.509	0.523
38	3182	0.523	0.538
39	3042	0.538	0.552
40	2826	0.552	0.566
41	2634	0.566	0.58
42	2477	0.58	0.594
43	2357	0.594	0.608
44	2191	0.608	0.622
45	2082	0.622	0.637
46	1860	0.637	0.651
47	1806	0.651	0.665
48	1650	0.665	0.679
49	1550	0.679	0.693
50	1544	0.693	0.707
51	1348	0.707	0.721
52	1266	0.721	0.736
53	1245	0.736	0.75
54	1190	0.75	0.764
55	1084	0.764	0.778
56	1039	0.778	0.792
57	961	0.792	0.806
58	935	0.806	0.82
59	889	0.82	0.835
60	868	0.835	0.849
61	822	0.849	0.863
62	802	0.863	0.877
63	785	0.877	0.891
64	738	0.891	0.905
65	714	0.905	0.919
66	653	0.919	0.934
67	597	0.934	0.948
68	599	0.948	0.962
69	563	0.962	0.976
70	530	0.976	0.99
71	498	0.99	1.004
72	451	1.004	1.018
73	416	1.018	1.033
74	396	1.033	1.047
75	364	1.047	1.061
76	331	1.061	1.075
77	339	1.075	1.089
78	370	1.089	1.103
79	317	1.103	1.117
80	272	1.117	1.132
81	293	1.132	1.146
82	272	1.146	1.16
83	279	1.16	1.174
84	278	1.174	1.188
85	286	1.188	1.202
86	291	1.202	1.216
87	274	1.216	1.231
88	247	1.231	1.245
89	217	1.245	1.259
90	218	1.259	1.273
91	184	1.273	1.287
92	203	1.287	1.301
93	200	1.301	1.315
94	169	1.315	1.33
95	156	1.33	1.344
96	166	1.344	1.358
97	173	1.358	1.372
98	162	1.372	1.386
99	153	1.386	1.4
100	150	1.4	1.414
101	153	1.414	1.429
102	134	1.429	1.443
103	142	1.443	1.457
104	119	1.457	1.471
105	130	1.471	1.485
106	120	1.485	1.499
107	112	1.499	1.513
108	118	1.513	1.528
109	118	1.528	1.542
110	118	1.542	1.556
111	125	1.556	1.57
112	109	1.57	1.584
113	90	1.584	1.598
114	97	1.598	1.612
115	87	1.612	1.627
116	74	1.627	1.641
117	98	1.641	1.655
118	81	1.655	1.669
119	87	1.669	1.683
120	79	1.683	1.697
121	68	1.697	1.711
122	79	1.711	1.726
123	81	1.726	1.74
124	84	1.74	1.754
125	68	1.754	1.768
126	59	1.768	1.782
127	82	1.782	1.796
128	58	1.796	1.81
129	74	1.81	1.825
130	47	1.825	1.839
131	58	1.839	1.853
132	45	1.853	1.867
133	40	1.867	1.881

Tabella 29 Dati istogramma

134	43	1.881	1.895
135	40	1.895	1.91
136	40	1.91	1.924
137	25	1.924	1.938
138	37	1.938	1.952
139	33	1.952	1.966
140	20	1.966	1.98
141	30	1.98	1.994
142	18	1.994	2.009
143	18	2.009	2.023
144	21	2.023	2.037
145	18	2.037	2.051
146	18	2.051	2.065
147	20	2.065	2.079
148	11	2.079	2.093
149	14	2.093	2.108
150	20	2.108	2.122
151	25	2.122	2.136
152	12	2.136	2.15
153	19	2.15	2.164
154	14	2.164	2.178
155	10	2.178	2.192
156	12	2.192	2.207
157	13	2.207	2.221
158	18	2.221	2.235
159	16	2.235	2.249
160	26	2.249	2.263
161	16	2.263	2.277
162	16	2.277	2.291
163	11	2.291	2.306
164	21	2.306	2.32
165	15	2.32	2.334
166	17	2.334	2.348
167	13	2.348	2.362
168	14	2.362	2.376
169	19	2.376	2.39
170	13	2.39	2.405
171	12	2.405	2.419
172	12	2.419	2.433
173	18	2.433	2.447
174	20	2.447	2.461
175	12	2.461	2.475
176	6	2.475	2.489
177	9	2.489	2.504
178	11	2.504	2.518
179	8	2.518	2.532
180	9	2.532	2.546
181	5	2.546	2.56
182	7	2.56	2.574
183	9	2.574	2.588
184	7	2.588	2.603
185	8	2.603	2.617
186	5	2.617	2.631
187	9	2.631	2.645
188	10	2.645	2.659
189	6	2.659	2.673
190	2	2.673	2.687
191	7	2.687	2.702
192	9	2.702	2.716
193	10	2.716	2.73
194	8	2.73	2.744
195	5	2.744	2.758
196	3	2.758	2.772
197	5	2.772	2.786
198	6	2.786	2.801
199	5	2.801	2.815
200	8	2.815	2.829
201	3	2.829	2.843
202	11	2.843	2.857
203	5	2.857	2.871
204	3	2.871	2.885
205	7	2.885	2.9
206	3	2.9	2.914
207	6	2.914	2.928
208	3	2.928	2.942
209	4	2.942	2.956
210	8	2.956	2.97
211	6	2.97	2.984
212	5	2.984	2.999
213	3	2.999	3.013
214	2	3.013	3.027
215	2	3.027	3.041
216	6	3.041	3.055
217	0	3.055	3.069
218	1	3.069	3.083
219	3	3.083	3.098
220	2	3.098	3.112
221	3	3.112	3.126
222	3	3.126	3.14
223	0	3.14	3.154
224	0	3.154	3.168
225	0	3.168	3.182
226	3	3.182	3.197
227	3	3.197	3.211
228	2	3.211	3.225
229	1	3.225	3.239
230	1	3.239	3.253
231	1	3.253	3.267
232	1	3.267	3.281
233	0	3.281	3.296
234	2	3.296	3.31
235	0	3.31	3.324
236	2	3.324	3.338
237	2	3.338	3.352
238	1	3.352	3.366
239	0	3.366	3.38
240	0	3.38	3.395
241	1	3.395	3.409
242	0	3.409	3.423
243	2	3.423	3.437
244	1	3.437	3.451
245	1	3.451	3.465
246	0	3.465	3.479
247	0	3.479	3.494
248	0	3.494	3.508
249	0	3.508	3.522
250	0	3.522	3.536
251	0	3.536	3.55
252	0	3.55	3.564
253	0	3.564	3.578
254	1	3.578	3.593
255	0	3.593	3.607
256	1	3.607	3.621

Da una prima analisi dei dati presenti nella Tab.28 e 29 e del grafico in Fig.169, è possibile osservare in quest'ultimo che il numero di punti è maggiore quando la distanza assoluta è minore e tende ad abbassarsi verso lo 0 all'aumentare della distanza assoluta. L'andamento della curva tende ad abbassarsi man mano che il valore della distanza assoluta passa da 0.1 cm a 0.5 cm. Per verificare meglio l'andamento della curva, è stato preso un campione di valori della distanza assoluta che varia da 0.000 cm a 0.269 cm (Tab.28 e Tab.29).

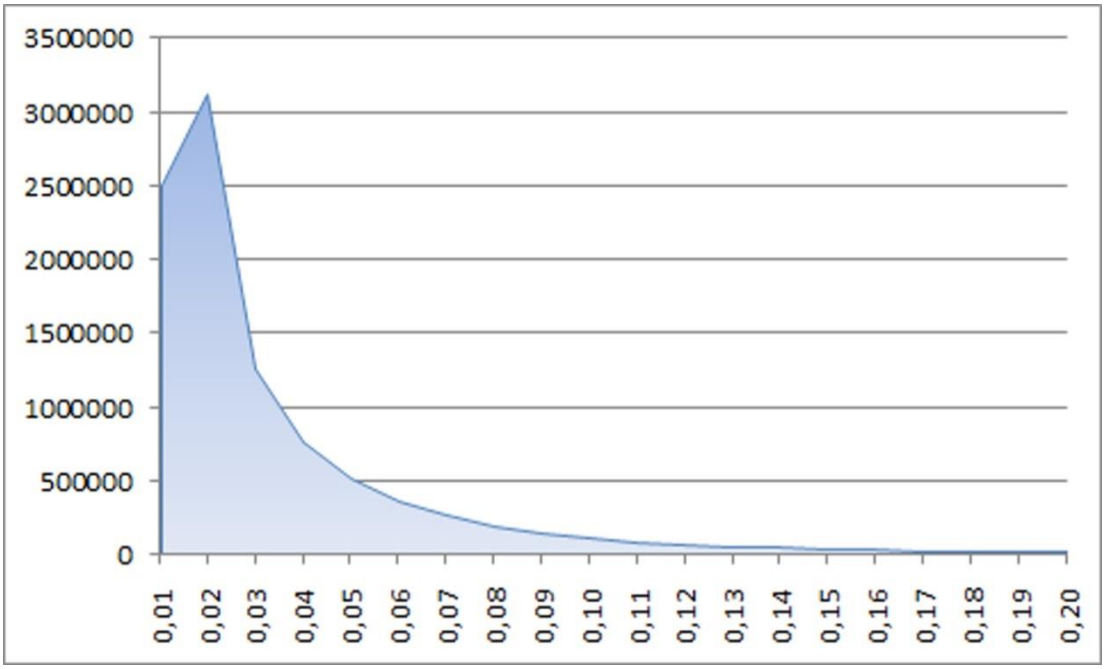


Figura 169 Istogramma DJI TERRA generato da Nuvola di riferimento Agisoft Metashape comparando la Nuvola DJI TERRA

Tabella 30 Tabella confronto nuvola di punti DJI TERRA - AGISOFT METASHAPE

Class	Value	Class start	Class end
1	2506845	0.000	0.014
2	3130781	0.014	0.028
3	1267763	0.028	0.043
4	765037	0.043	0.057
5	517051	0.057	0.071
6	365682	0.071	0.085
7	266670	0.085	0.099
8	197771	0.099	0.113
9	150532	0.113	0.127
10	115881	0.127	0.142
11	90842	0.142	0.156
12	72998	0.156	0.170
13	58806	0.170	0.184
14	48495	0.184	0.198
15	40326	0.198	0.212
16	33791	0.212	0.226
17	28602	0.226	0.241
18	24631	0.241	0.255
19	21331	0.255	0.269
20	18425	0.269	0.283

Analizzando l'istogramma precedentemente realizzato (Fig.169) e il campione di dati scelto, è possibile stabilire che nella sezione compresa tra i valori 0.01 cm e 0.02 cm della distanza assoluta, il numero di valori tende ad aumentare, mentre dal valore 0.02 cm fino al valore 0,10 cm diminuisce gradualmente. Questo grafico indica che il maggior numero di valori è concentrato nelle distanze assolute comprese tra 0.01 cm e 0.10 cm circa. In questo caso è possibile stabilire che la nuvola di punti generata con il software DJI TERRA comparata con la nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape, hanno una distanza tra di loro compresa tra 0.01 cm e 0,10 cm.

Infine, a seguito di questa elaborazione è possibile effettuare un'ulteriore analisi su una o più sezioni delle nuvole di punti, in corrispondenza dei punti rilevati con GPS/GNSS per verificare la qualità e la densità delle nuvole. In questo caso sono stati scelti i punti di riferimento 103 e il 104, essendo molto vicini e sullo stesso piano. Come visibile in Fig.170, a seguito della modifica dei colori delle due nuvole di punti, è possibile osservare l'accuratezza di entrambe rispetto al punto 103 e 104. Inoltre è possibile stabilire che la nuvola di punti realizzata con Agisoft Metashape identificata dal colore blu, è molto più dettagliata rispetto a quella realizzata con DJI TERRA identificata dal colore giallo.

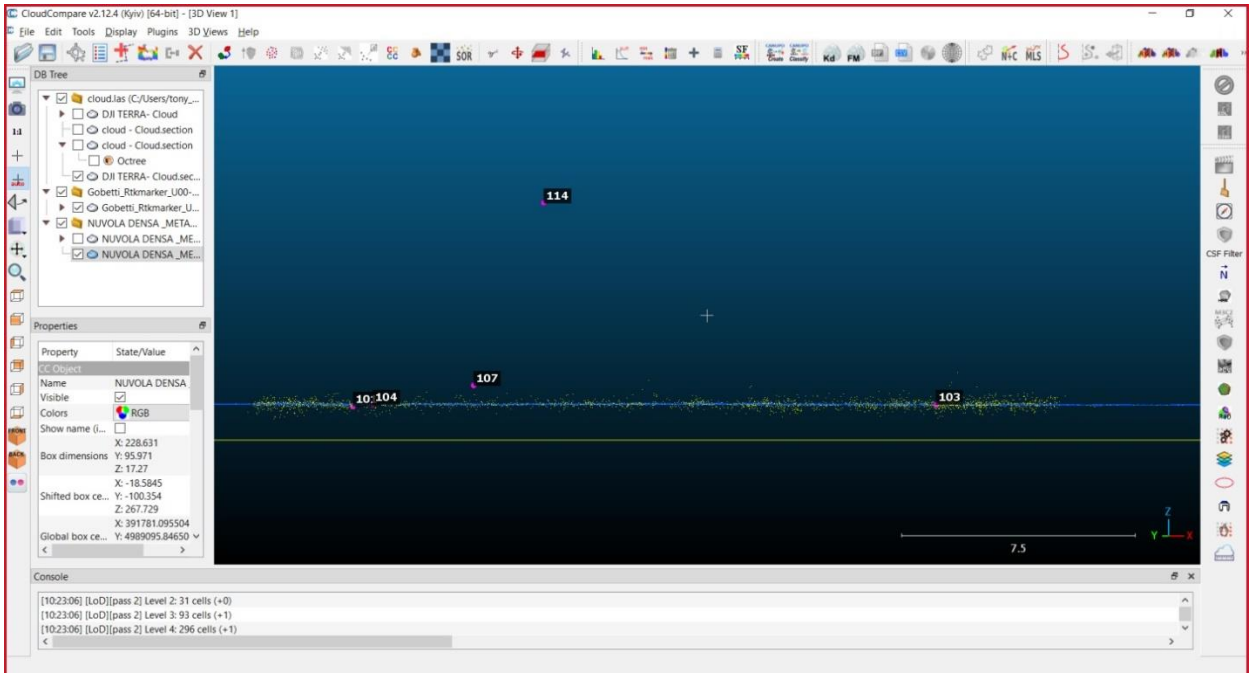


Figura 170 Analisi di una sezione lungo il punto 103 e 104 delle due nuvole di punti

OSSERVAZIONI SUI DATI

È possibile stabilire che a seguito dei dati osservati precedentemente, ottenuti dalla comparazione tra i punti rilevati con il rover GPS/GNSS e le nuvole di punti, in ambedue i casi le nuvole risultano molto accurate. In questo caso, grazie all'accuratezza maggiore verificata dalla media dei valori tra le nuvole di punti e i punti rilevate, è stata scelta come base di confronto la nuvola generata con il software Agisoft

Metashape grazie al valore medio dell'accuratezza e alla densità tra i punti di cui 11 cm per la nuvola generata con DJI TERRA e 2.6 cm per la nuvola generata con Agisoft Metashape (Tab.31).

Tabella 31 Accuratezza nuvola di punti DJI TERRA e AGISOFT METASHAPE (m)

NOME	X	Y	Z
MEDIA	-0.002	0.021	-0.005
MEDIA	-0.010	0.000	0.002

Dai dati ricavati nella tabella e dal grafico precedentemente presentato in Fig.169, è possibile stabilire che nonostante la differenza tra le due nuvole di punti, in entrambi i casi risultano con un'accuratezza rispetto ai dati rilevati, compresa tra 1-2 cm. Dal confronto tra le nuvole di punti e dalla verifica dell'istogramma, è possibile notare come al diminuire della distanza assoluta tra le nuvole, aumentano i il numero di punti, e viceversa all'aumentare della distanza. In questo caso è possibile stabile che il numero di punti è maggiore nel caso in cui la distanza è compresa tra 0.01 cm e 0.1 cm, confermandone così l'accuratezza del prodotto comparato di DJI TERRA.

9.3 ANALISI DATI CLOUD COMPARE _ sezione trasversale e facciata fabbricato

Per analizzare la qualità dei due prodotti generati con i software di restituzione fotogrammetrica, sono stati presi in esame due parti delle nuvole di punti del fabbricato rilevato, di cui un modulo della facciata e una sezione trasversale, per analizzare la ricostruzione tridimensionale delle superfici verticali delle due nuvole di punti. Le analisi saranno effettuate prima sulla singola nuvola di punti, verificando la rumorosità e successivamente la densità su una superficie di 1 mq e la densità calcolata dal software Cloud Compare, sia per quanto riguarda il modulo della facciata che la sezione trasversale. Successivamente sarà fatto il confronto tra i due prodotti delle due nuvole di punti, tenendo come riferimento la nuvola più densa ed infine sarà condotta un'analisi con il software Cyclone 3DR sulla copertura del fabbricato, di entrambe le nuvole di punti.

- ANALISI DELLE NUVOLE DI PUNTI

Questo processo consiste nell'analisi delle caratteristiche delle singole nuvole di punti, ossia la rumorosità e la densità. È stato utilizzato il software Cloud Compare, all'interno del quale sono state importate la nuvola di punti generata con il software DJI TERRA e la nuvola di punti generata con il software AGISOFT METASHAPE. Per l'analisi dei dati sono state selezionare le stesse superfici su entrambe le nuvole di punti, identificate dalla sezione trasversale e dal modulo della facciata del fabbricato rilevato (Fig.171).

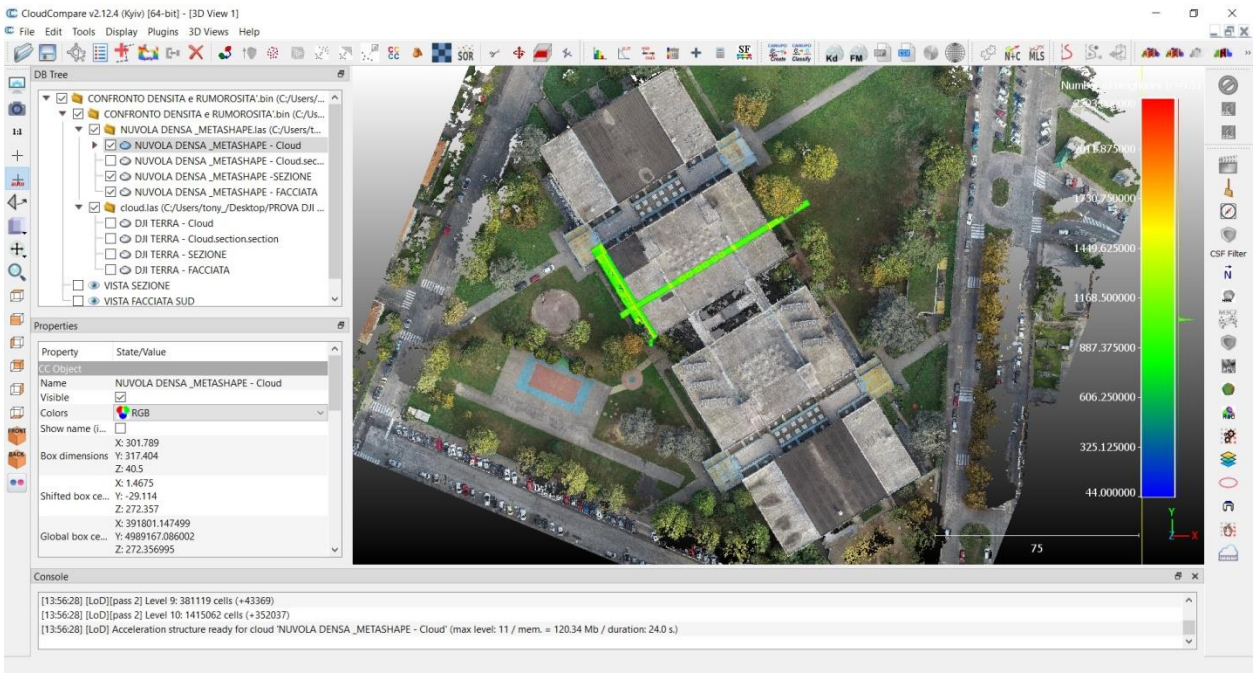


Figura 171 Sezione trasversale e prospetto sud/ovest _ Istituto Comprensivo " C. Alvaro - P. Gobetti "

- **NUVOLA AGISOFT METASHAPE _metodo 1**

Per verificare la densità dei due modelli generati, è stata analizzata la stessa superficie orizzontale della copertura dell'edificio dell'area di 1 mq (Fig.172).

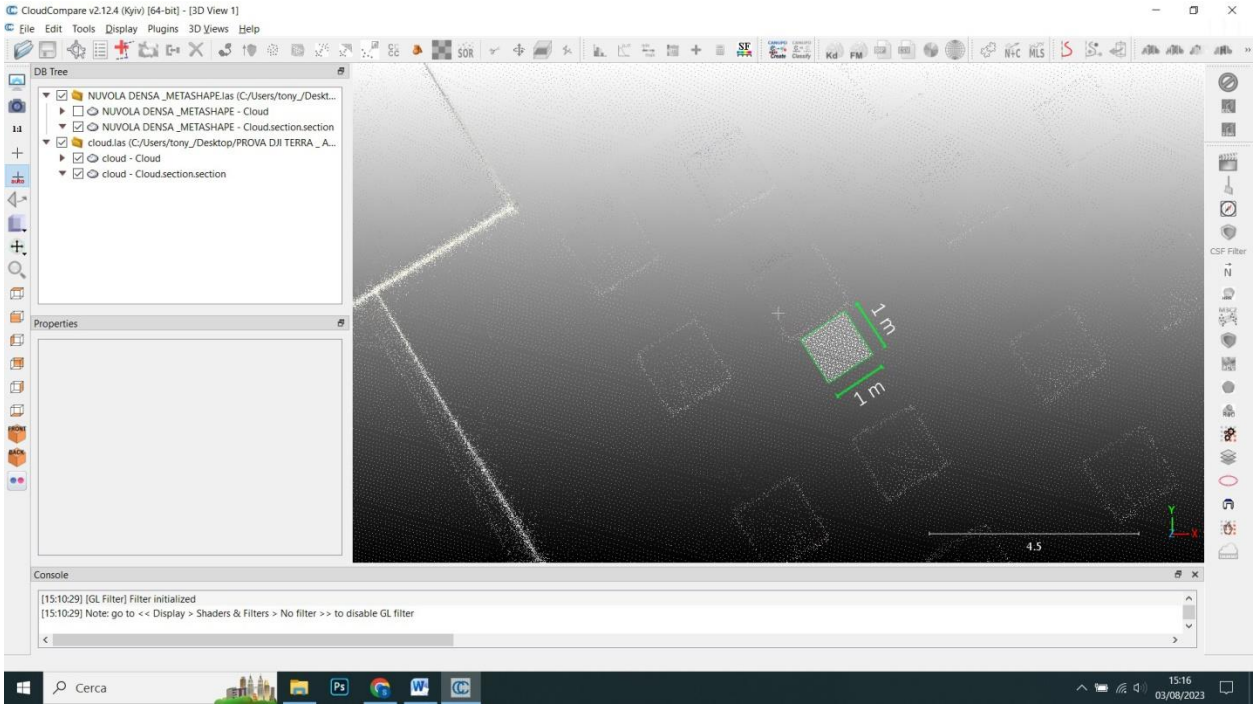


Figura 172 Superficie di analisi della densità su 1 mq

Per quanto riguarda il modello della nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape, all'interno della superficie analizzata di 1 mq, sono presenti 1687 punti (Fig.173).

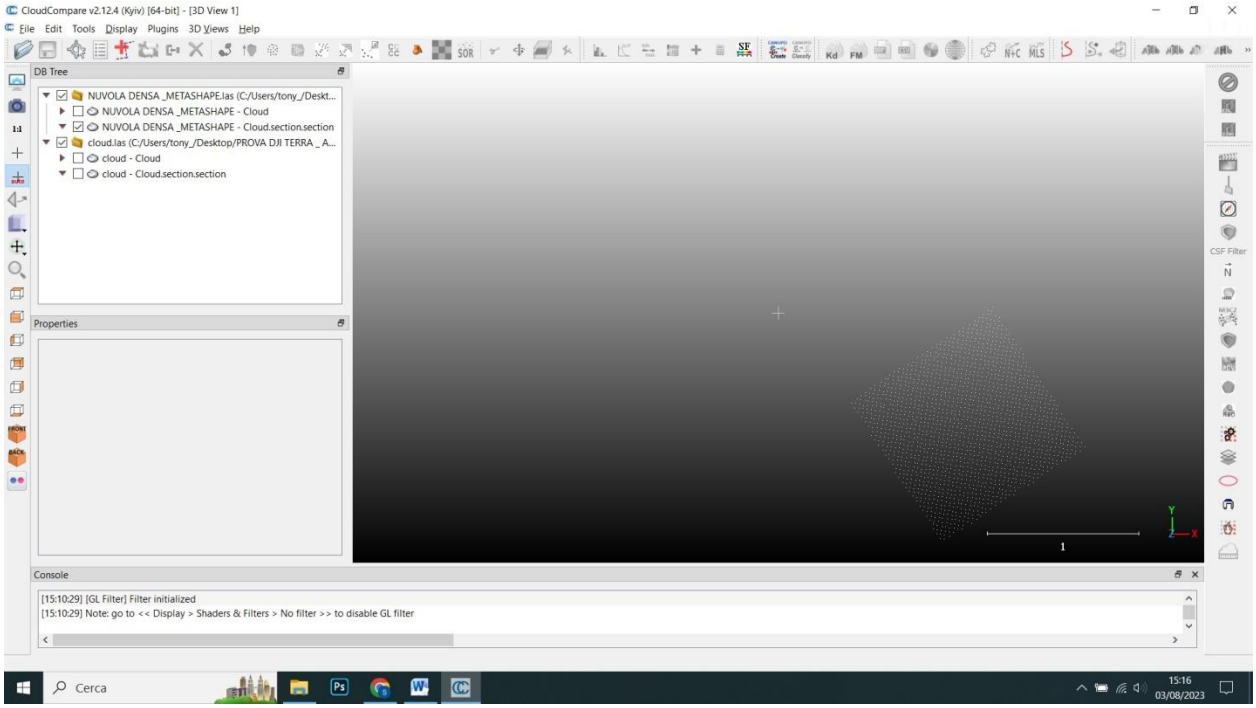
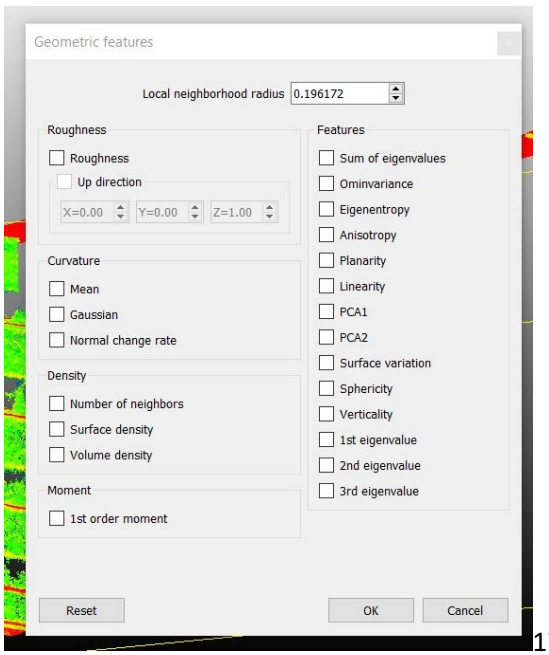
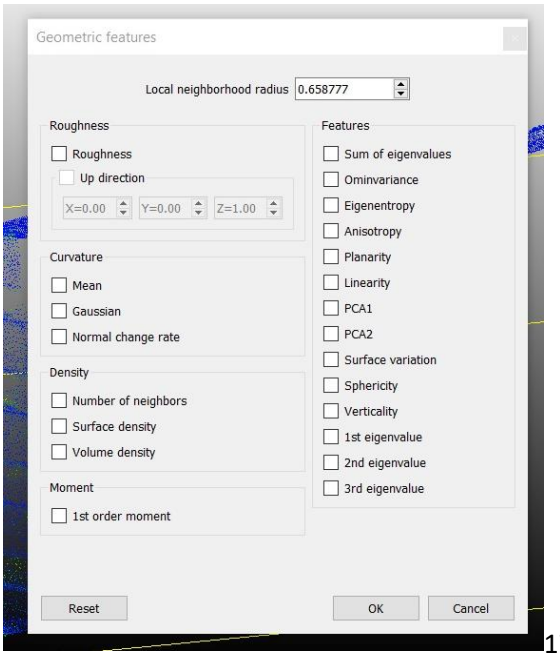


Figura 173 Densità su 1 mq di area _ Nuvola di punti Agisoft Metashape

Per ottenere dei parametri per l'analisi e il paragone tra le due nuvole di punti, è stata analizzata la **densità** attraverso il comando automatico "Density - Number of neighbors", espressa in punti nel raggio prestabilito dal programma, in base alla nuvola di punti. Per poter stabilire un valore medio per entrambe le nuvole, sono stati verificati i valori identificati dal software in base alla densità della nuvola di Metashape (Fig.174A) e della nuvola di DJI Terra (Fig.174B).



174A



174B

Figura 174A Raggio Metshape **e 174B** raggio DJI Terra

Nel caso della sezione della nuvola di punti di Metashape, il software individua un raggio di 0.19 m, mentre per quanto riguarda quello di DJI Terra il raggio è di 0.65 m. Per poter confrontare i due modelli è stato utilizzato il valore del raggio di 0.50 m (Fig.175).

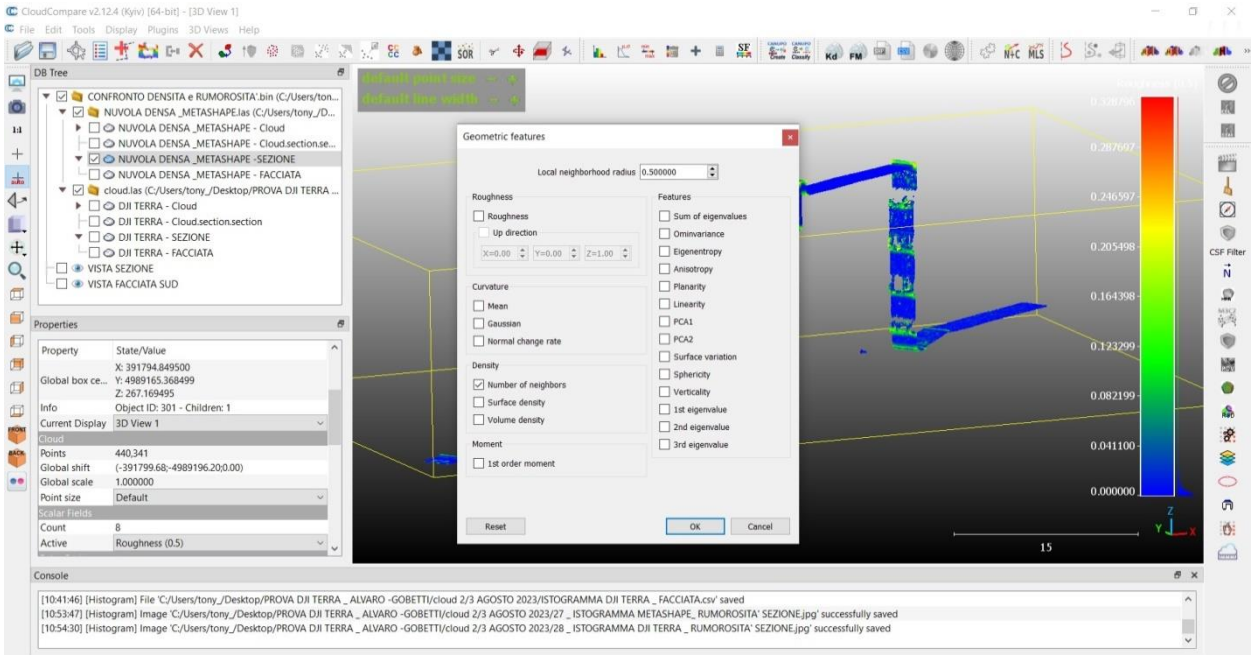


Figura 175 Valore del raggio impostato a 0.50m per la nuvola Metashape

Dopo aver inserito il valore del raggio precedentemente stabilito, sono stati calcolati i *Number of neighbors* per la sezione della nuvola di Metashape. Impostando il colore della sezione su *Scalar Field*, è possibile identificare che alcune parti del modello hanno tonalità che si distribuiscono dal blu al rosso, come nella scala di colori visibile a destra (Fig.176).

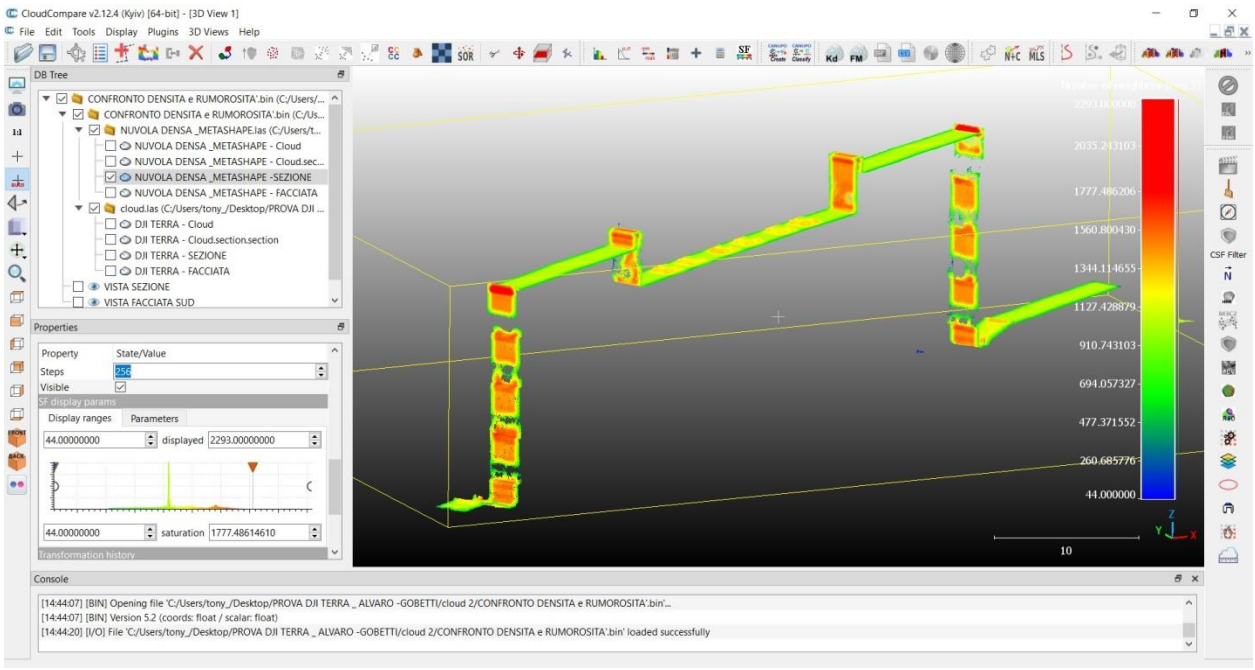


Figura 176 Modello densità (Number of neighbors) della sezione di Metashape

Per capire meglio i dati ottenuti è possibile esportare l'istogramma del calcolo dei *Number of neighbors,* e verificare la distribuzione della densità dei punti.

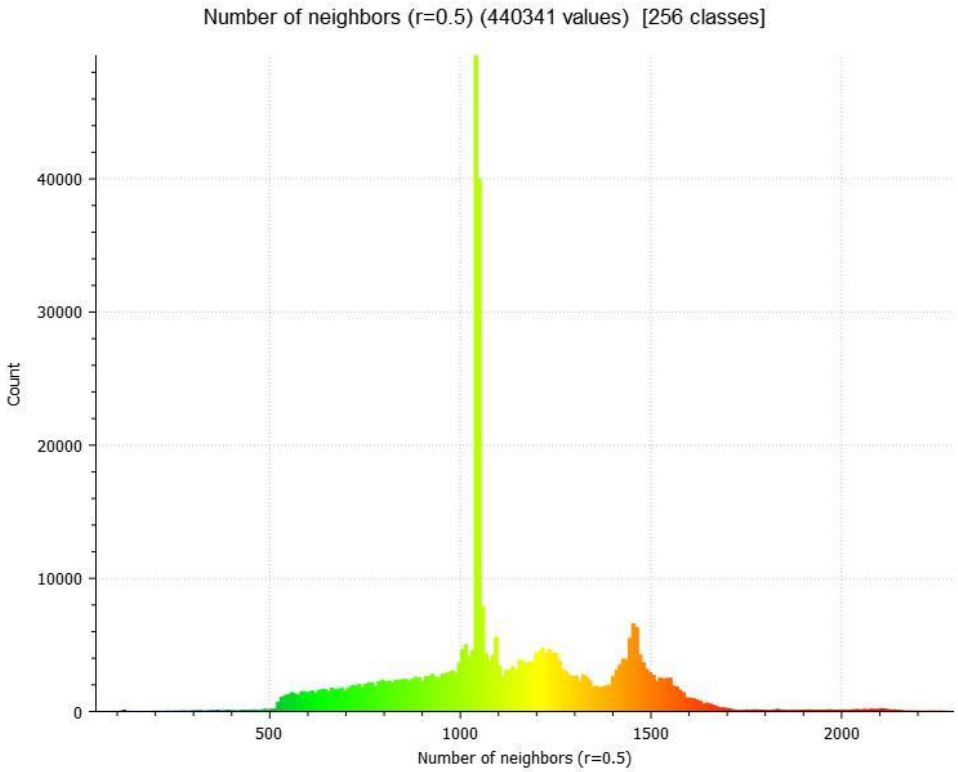


Figura 177 Istogramma densità _ sezione della nuvola di Metashape

Dalla tonalità dei colori visibili nel modello tridimensionale (Fig.176), è possibile stabilire che ci sono dei punti molto densi identificati dal colore verde principalmente visibile sulla copertura, e punti molto radi identificati dal colore rosso visibili sulla facciata, con un numero di valori totali pari a 440341 (Fig.177). Esportando il grafico della distribuzione Gaussiana, è possibile stabilire che nel raggio di 0.5m di un punto, ci sono in media 1118 punti vicini (Fig.178).

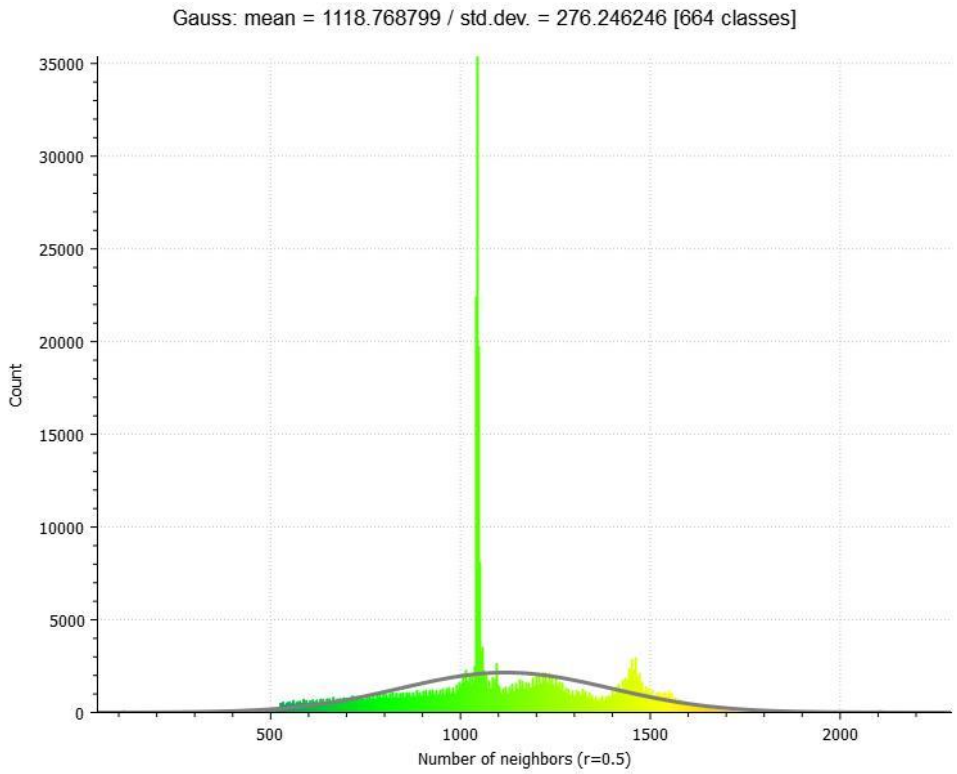


Figura 178 Distribuzione gaussiana della densità Metashape

Per verificare la **rumorosità** (roughness) della sezione della nuvola di punti di Metashape, è stato mantenuto lo stesso valore del raggio di 0.5m.

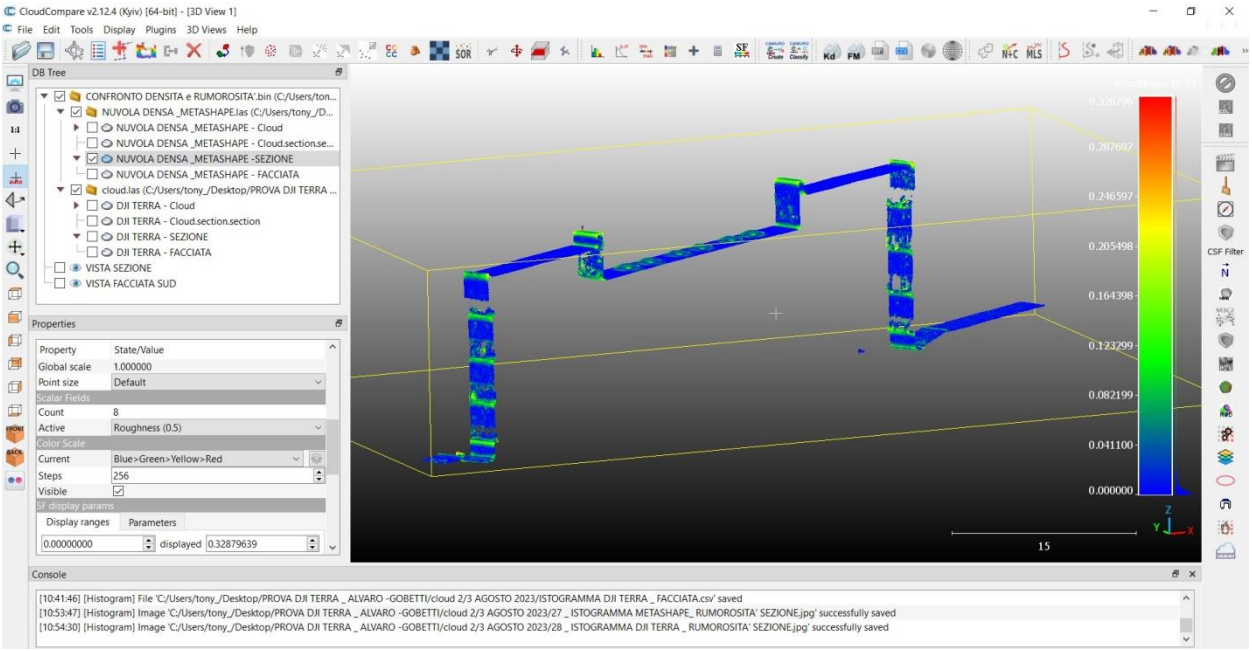


Figura 179 Modello rumorosità _ sezione Metashape

Il modello generato (Fig.179) ha una scala di colori che rappresenta in blu tutte le superfici verticali e orizzontali e in verde tutte quelle parti del fabbricato che riguardano dettagli come gli spigoli dei davanzali delle finestre o gli spigoli della copertura.

L'istogramma generato, rappresenta sull'asse delle ordinate il numero dei punti, mentre sull'asse delle ascisse la distanza espressa in metri. Il numero di punti è alto all'avvicinarsi della distanza verso 0, e tende ad abbassarsi all'aumentare della distanza. Osservando il modello tridimensionale e l'istogramma, i valori della rumorosità più evidenti sono quelli compresi tra 0.05m e 0.1m (Fig.180).

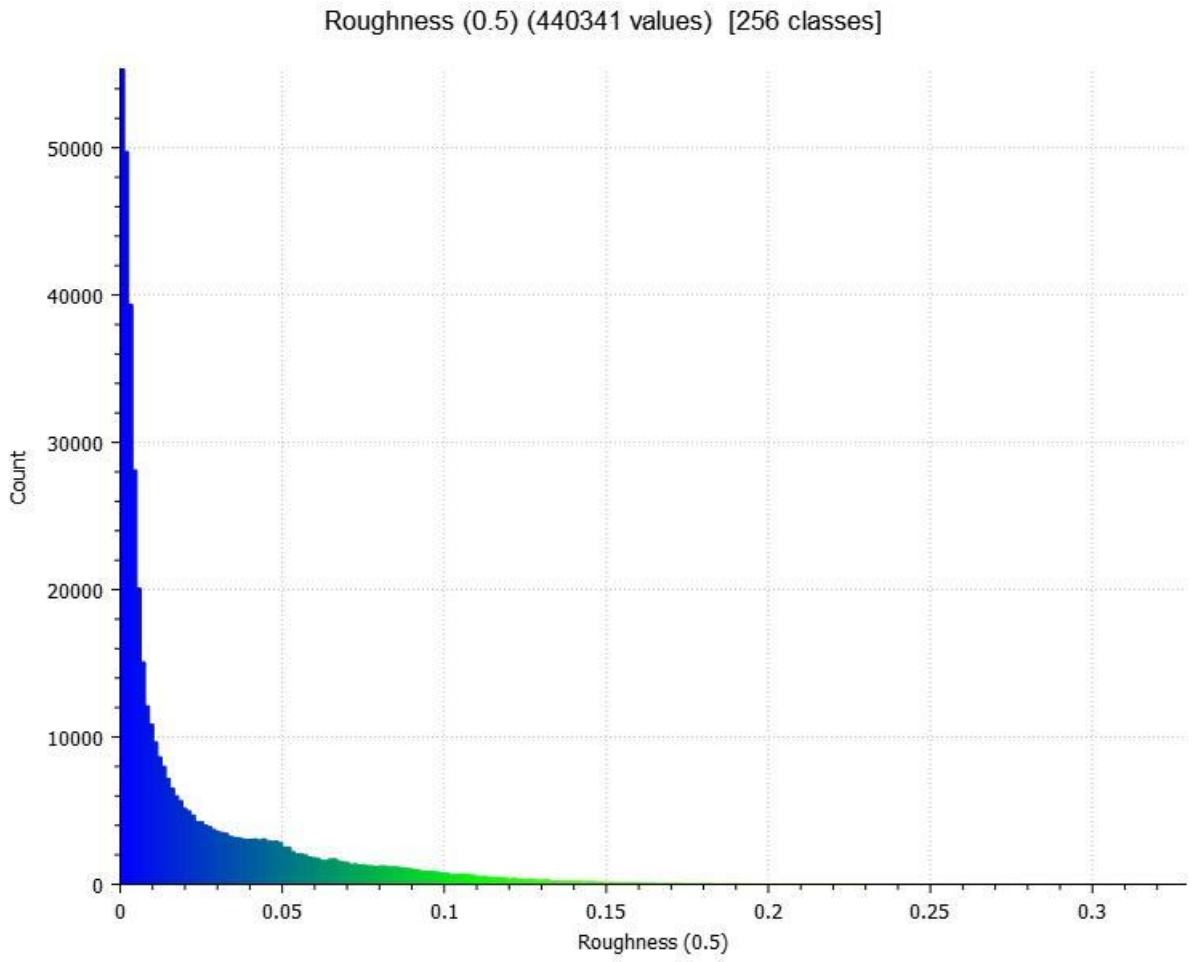


Figura 180 Istogramma rumorosità _ sezione Metashape

Lo stesso procedimento è stato eseguito per il calcolo della **densità** (number on neighbors) e della **rumorosità** con raggio di 0.5m, anche per li modulo della facciata della nuvola di punti di Metashape.

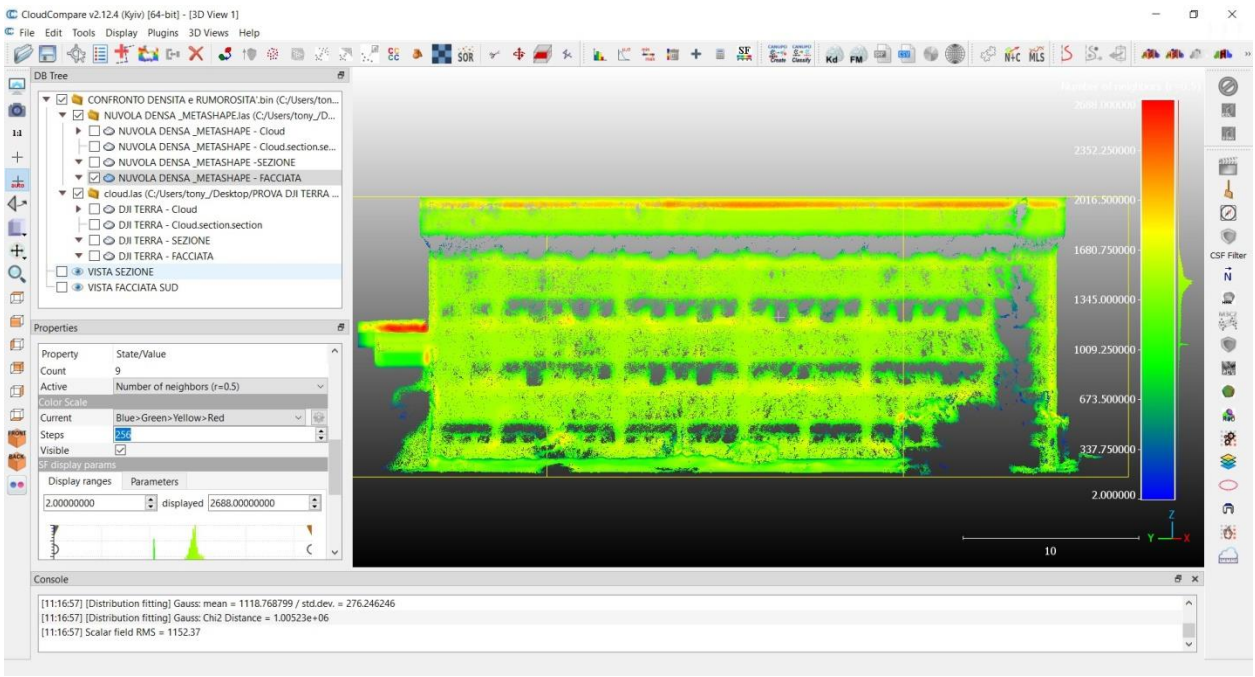


Figura 181 Modello densità (Number of neighbors) della facciata di Metashape

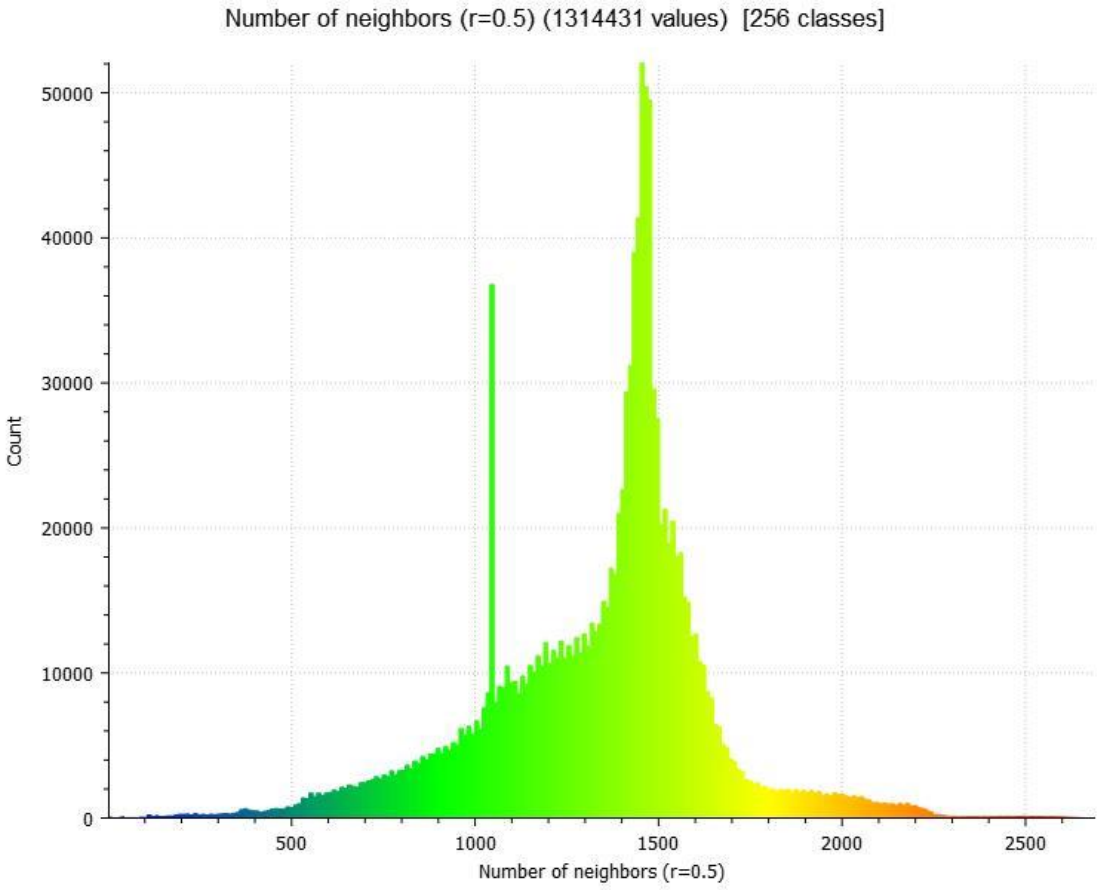


Figura 182 Istogramma densità _ sezione della nuvola di Metashape

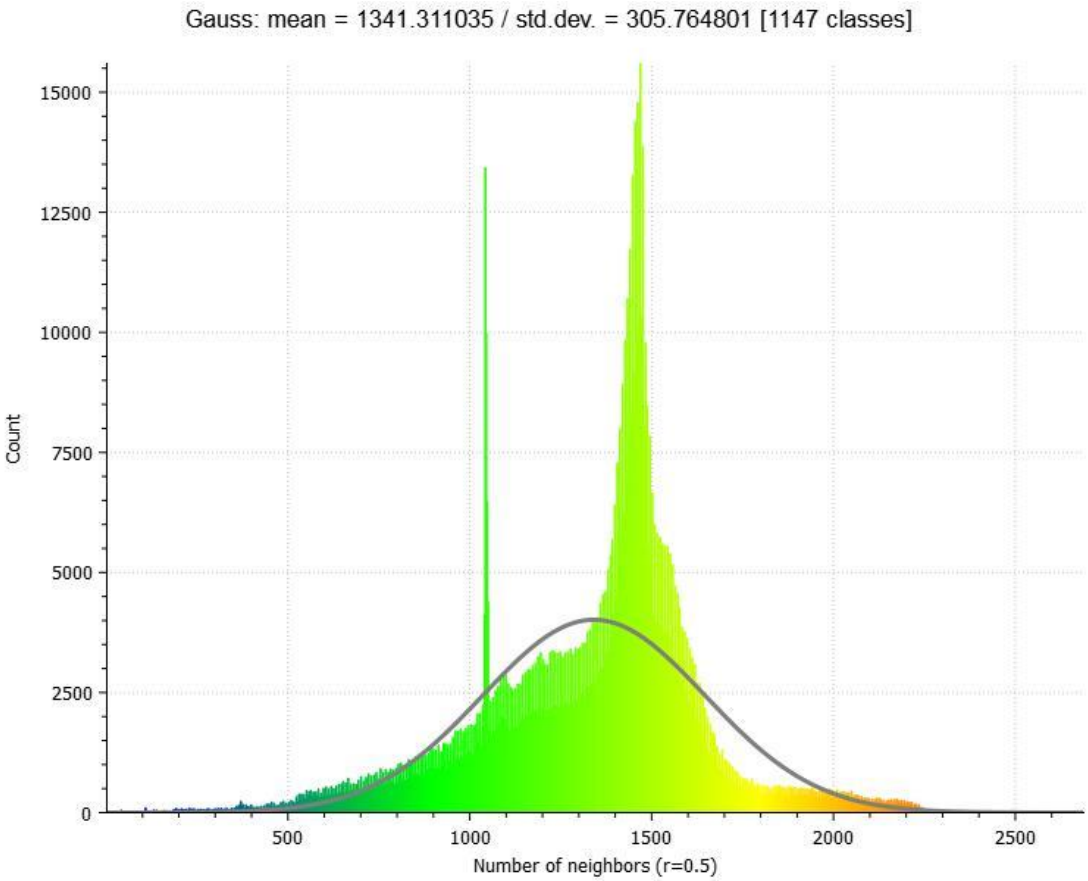


Figura 183 Distribuzione gaussiana della densità Metashape

Analizzando la nuvola di punti (Fig.181), è possibile osservare che le superfici piane della facciata hanno una **densità** costante identificata dal colore verde, senza contare i punti individuati dal colore rosso che rappresentano la superficie tra cornicione del tetto e la copertura. È possibile dichiarare che sulle superfici piane, la nuvola generata con Metashape ha una densità uniformemente distribuita e costante, con un totale di valori di 1314431(Fig.182) con una media di valori di 1341 punti per ogni raggio di 0.5m (Fig.183).

Per quanto riguarda la **rumorosità** invece, si nota come negli spigoli dei davanzali delle finestre l'effetto è molto evidente così come negli spigoli del perimetro della facciata (Fig.184). Dall'istogramma generato (Fig.185), gran parte dei punti individuati dal colore blu hanno una distanza vicina a 0, mentre da 0.05m a 0.15m la distanza diventa visibile dalla tonalità di colore verde.

Questo problema può essere causato dal software stesso di elaborazione dei dati, nonostante la qualità dei dati fosse impostata in *HIGH*, oppure potrebbe essere causato dai fotogrammi stessi, dall'illuminazione durante la fase di acquisizione, dalla complessità della struttura e non per ultima dalla quantità di dati. Un ulteriore verifica sarà effettuata anche sui dati elaborati con il software DJI Terra per poter confrontare i risultati.

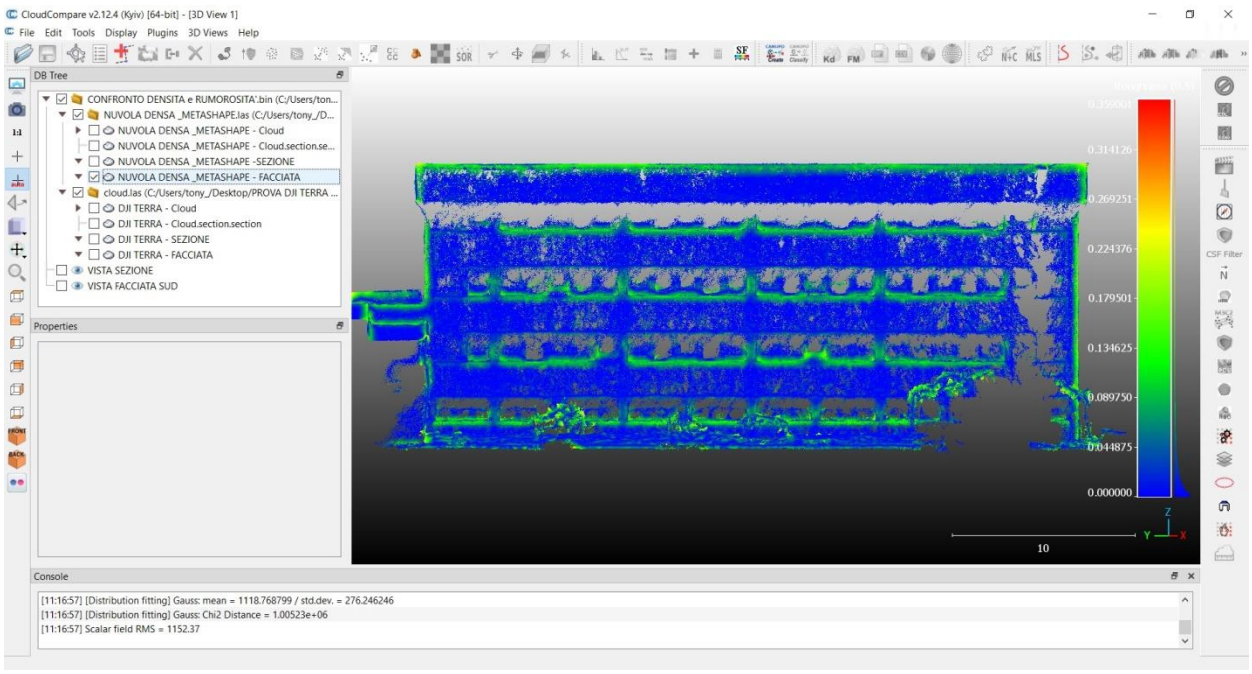


Figura 184 Modello rumorosità _ facciata Metashape

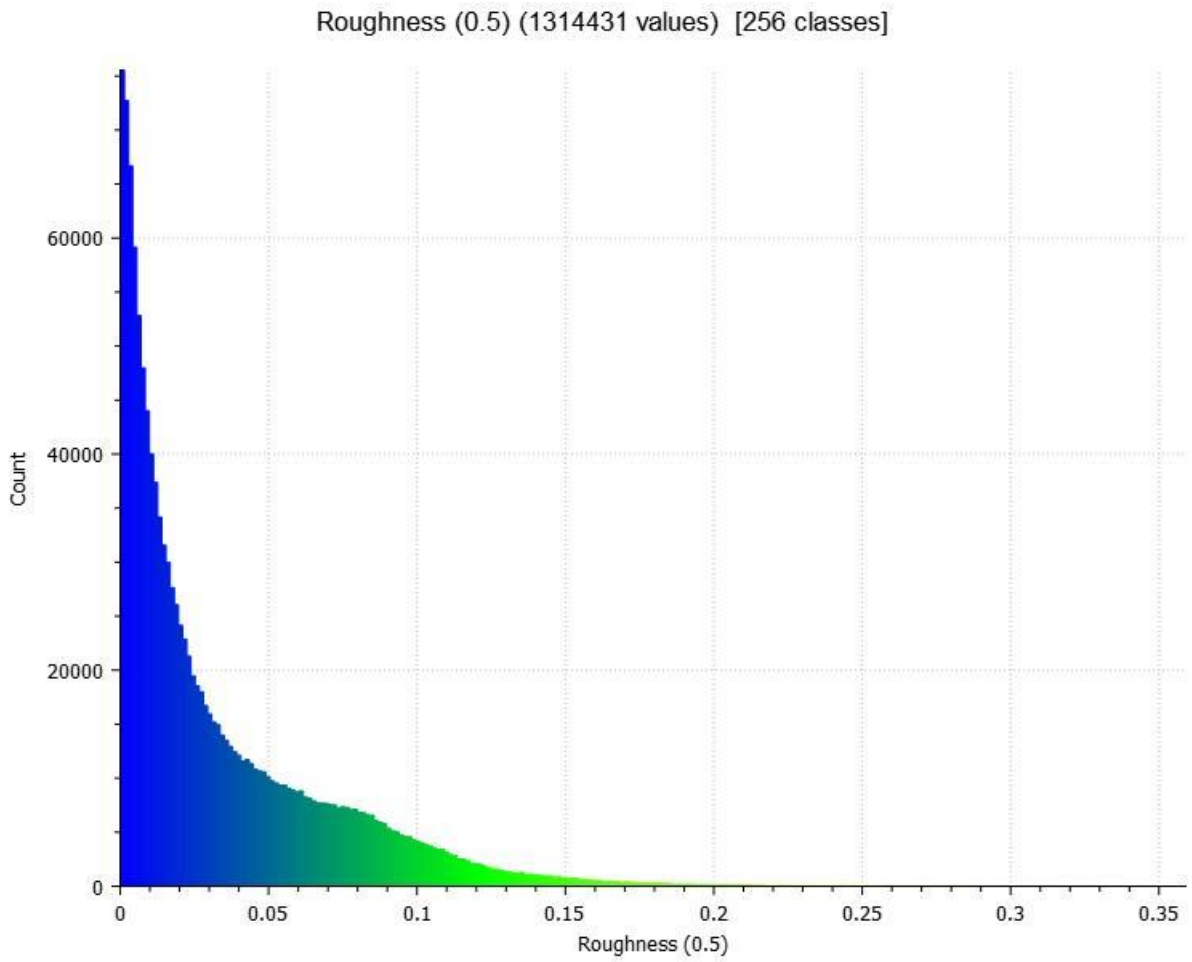


Figura 185 Istogramma rumorosità _ facciata Metashape

- **NUVOLA DJI TERRA _ metodo 2**

Per quanto riguarda il modello della nuvola di punti generata con il software DJI Terra, all'interno della superficie analizzata di 1 mq, sono presenti 184 punti contro i 1687 punti della nuvola di Metashape (Fig.186). Da questa prima verifica è possibile stabilire che la nuvola generata con il software Agisoft Metashape è circa 9 volte più densa rispetto a quella di DJI TERRA è in questo caso le informazioni presenti all'interno di essa sono maggiori. Per confrontare i dati fino ad adesso analizzati, sarà condotta la stessa verifica delle rumorosità e della densità attraverso il calcolo in Cloud Compare.

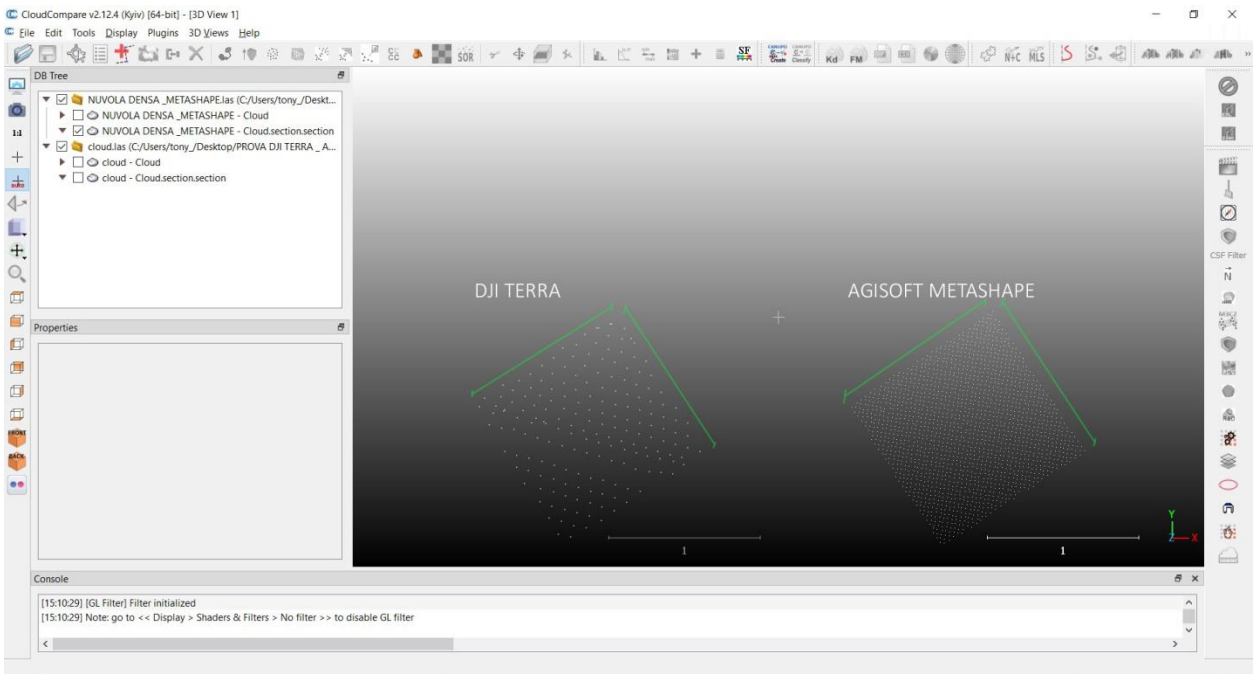


Figura 186 Confronto 1 mq tra nuvola DJI TERRA e nuvola AGISOFT METASHAPE

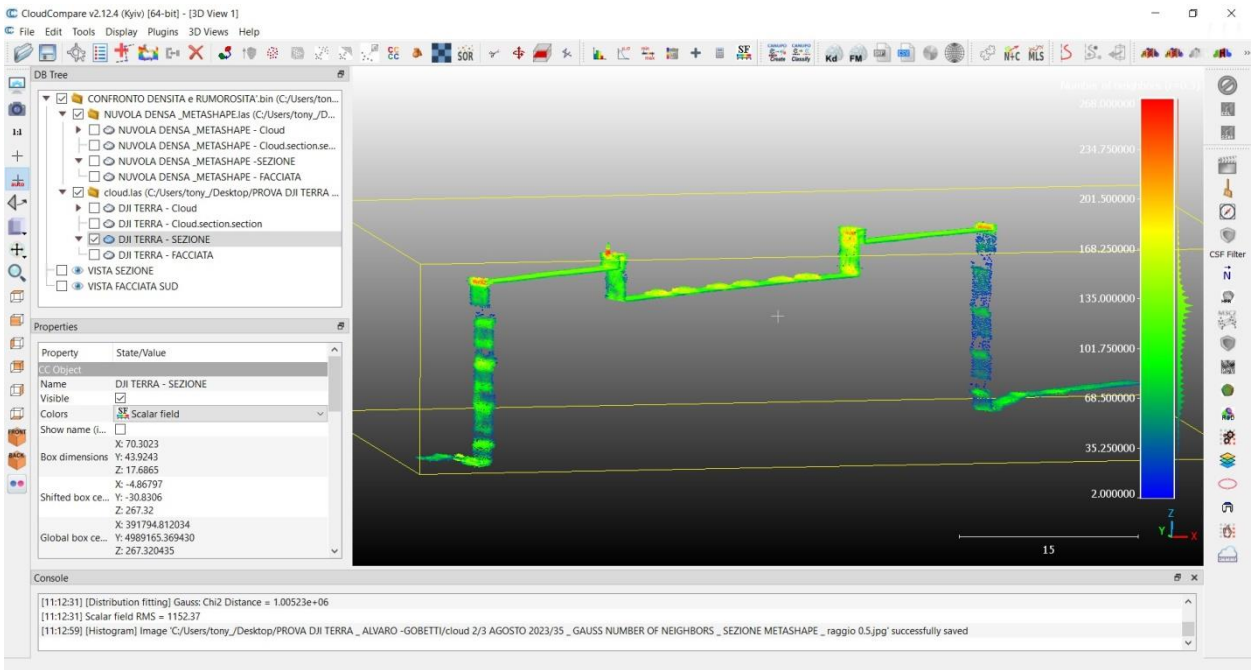


Figura 187 Modello densità (Number of neighbors) della sezione di DJI TERRA

Analizzando il modello della **densità** della sezione di DJI TERRA (Fig.187), è possibile individuare, come già verificato nel modello di Metashape, che le superfici orizzontali identificate dal colore verde sono molto più dense rispetto a quelle verticali, e che alcuni dei dettagli quali infissi, spigoli o cornici sono meno dense.

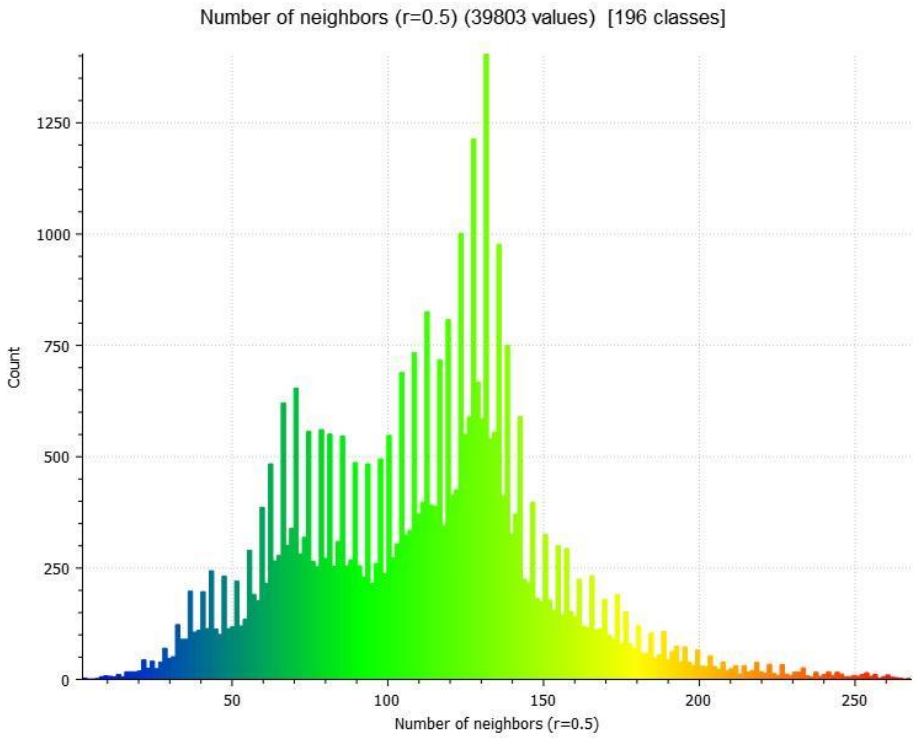


Figura 188 Istogramma densità _ sezione della nuvola di DJI Terra

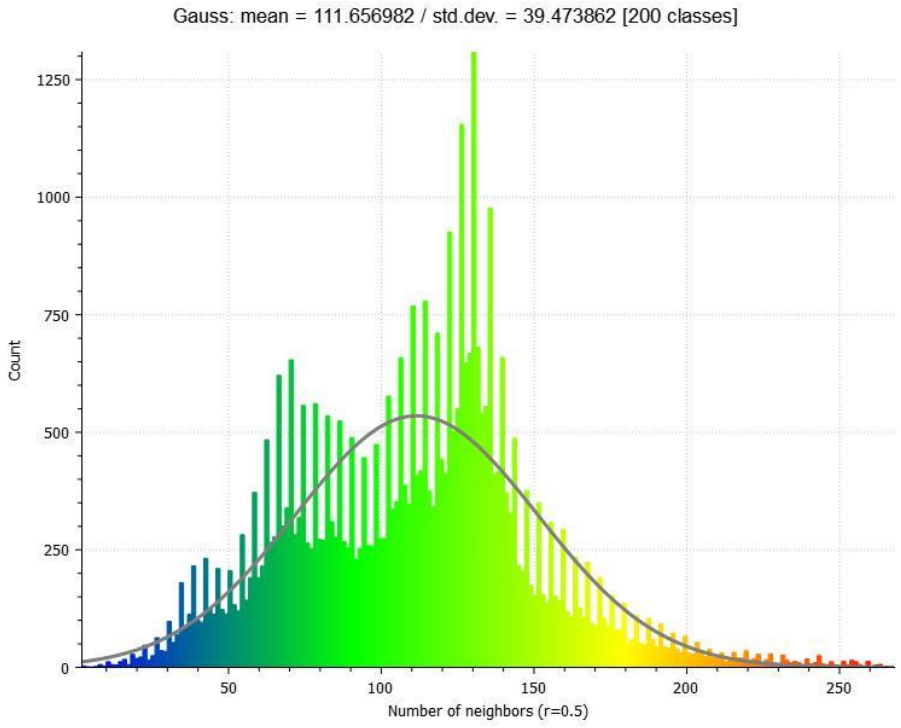


Figura 189 Distribuzione gaussiana della densità DJI Terra

Dall'analisi dell'Istogramma, i valori totali sono 39803 (Fig.188), mentre i numeri di punti per ogni raggio di 0.5m sono circa 111 (Fig.189), dato dovuto dalla nuvola meno densa generata da DJI TERRA.

La **rumorosità** è invece visibile in (Fig.190), nelle parti di fabbricato più complesse come spigoli, cornici delle finestre e negli angoli tra la copertura e le superfici verticali.

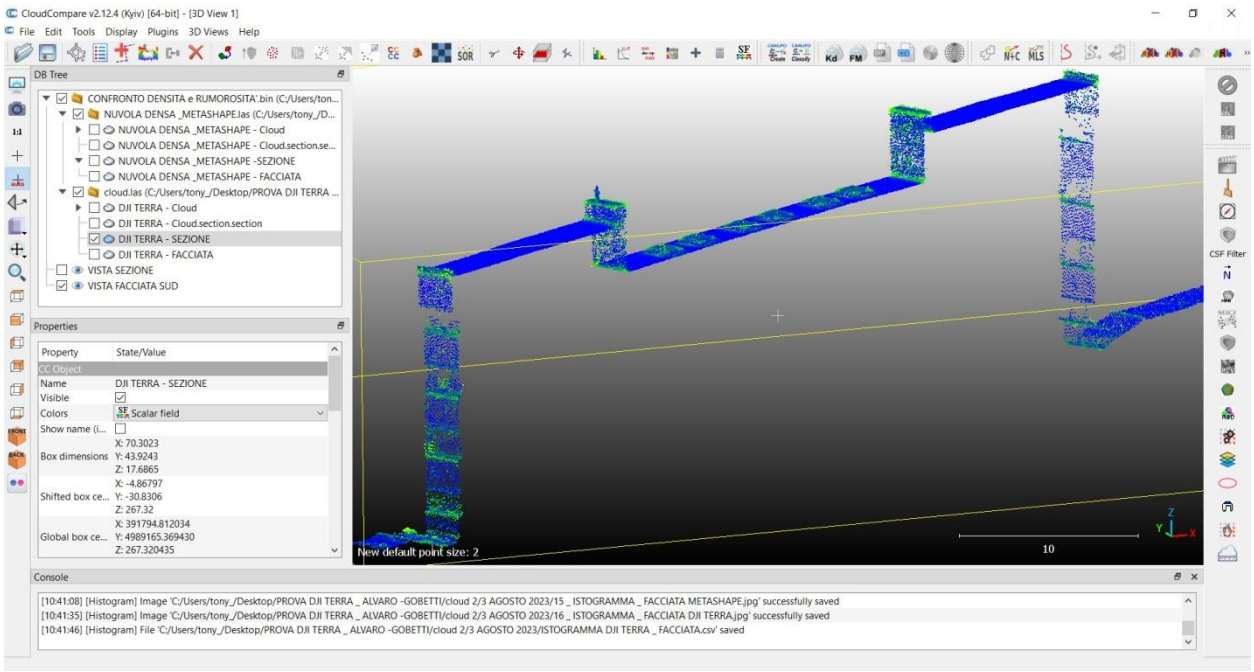


Figura 190 Modello rumorosità _ sezione DJI Terra

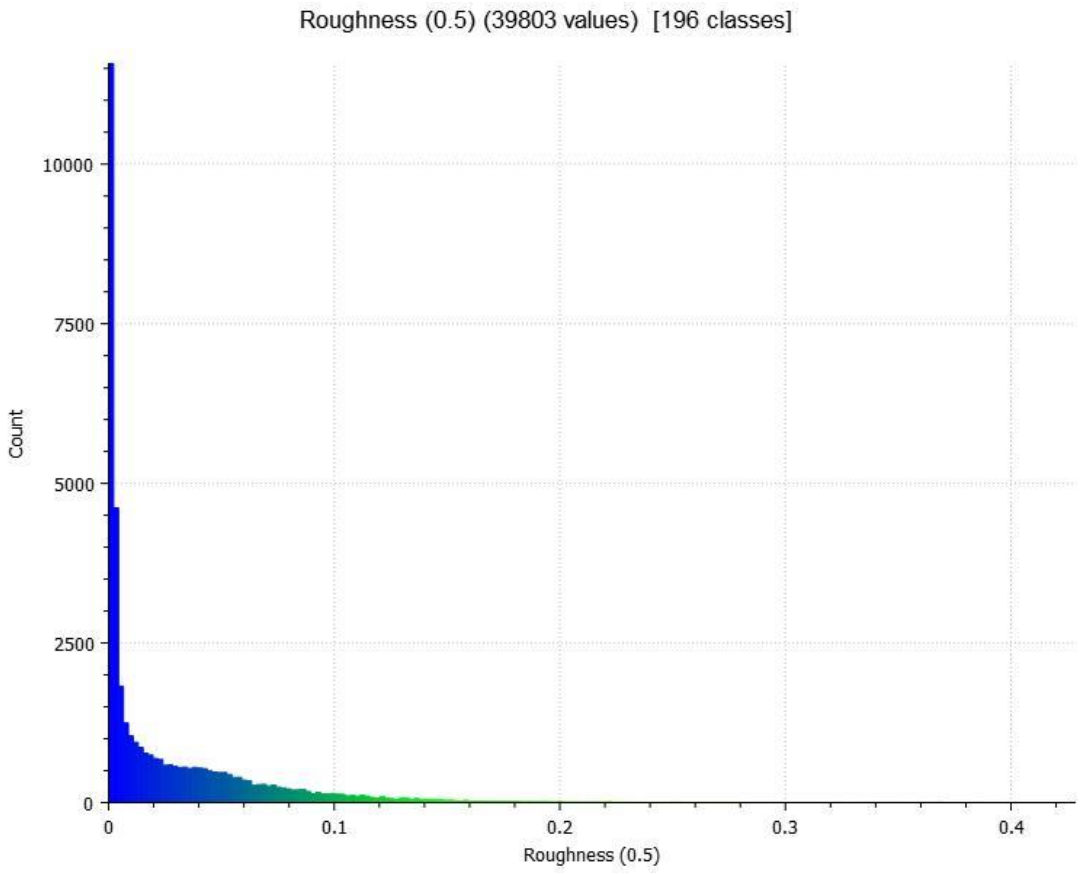


Figura 191 Istogramma rumorosità _ sezione DJI Terra

Dall'istogramma generato (Fig.191), è possibile notare che gran parte dei valori sono vicini a 0 mentre solo una piccola parte che rappresenta i punti presenti nelle parti complesse del fabbricato, hanno una distanza di che va da 0.02m a 0.1m. In punti individuati dal colore verde hanno una distanza da 0.1m fino a 0.2m.

Per quanto riguarda la **densità** della facciata della nuvola di punti di DJI TERRA (Fig.192), i punti individuati dal colore blu e verde sono quelli maggiormente visibili. Analizzando l'istogramma (Fig.193) generato, quelli blu individuano l'area meno densa della facciata, mentre quelli verdi quella più densa. Poiché si tratta di un rilievo con drone effettuato dall'alto, a quota inferiore di volo e con un maggior numero di fotogrammi orientati lungo le facciate del fabbricato, la densità sicuramente avrà valori differenti.

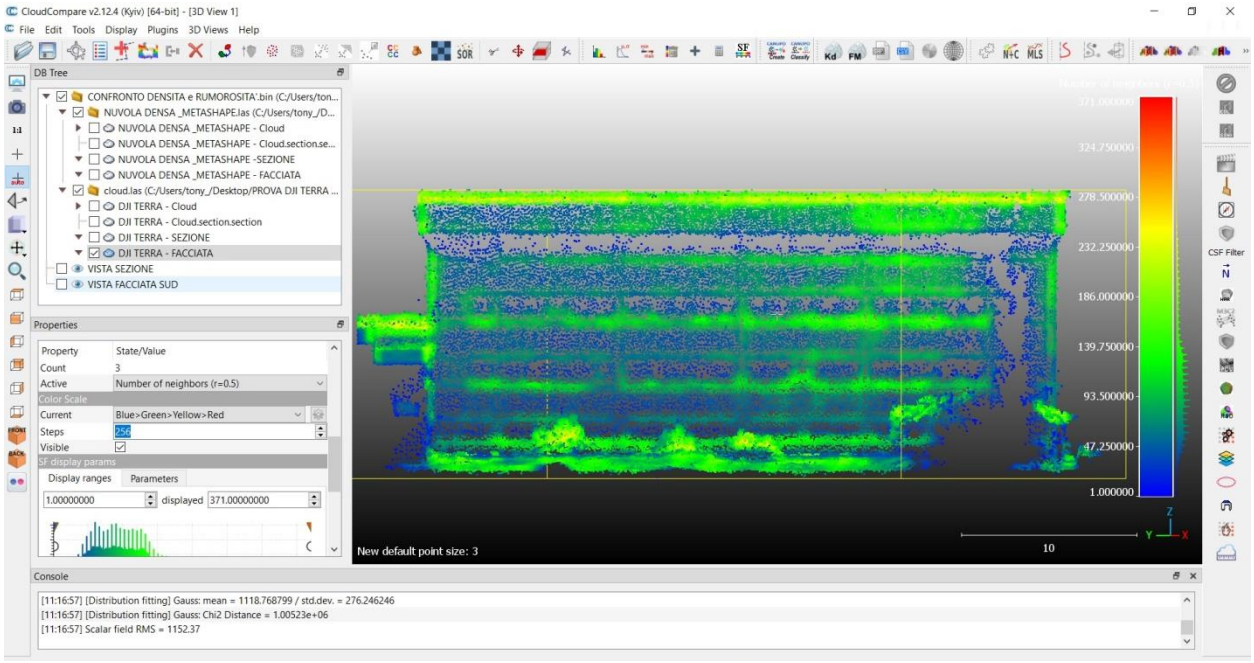


Figura 192

I valori identificati dal software per la facciata della nuvola di punti di DJI Terra, sono 94255 (Fig.193) mentre per quanto riguarda la media di valori individuati per ogni raggio di 0.5m, sono circa 113 (Fig.194).

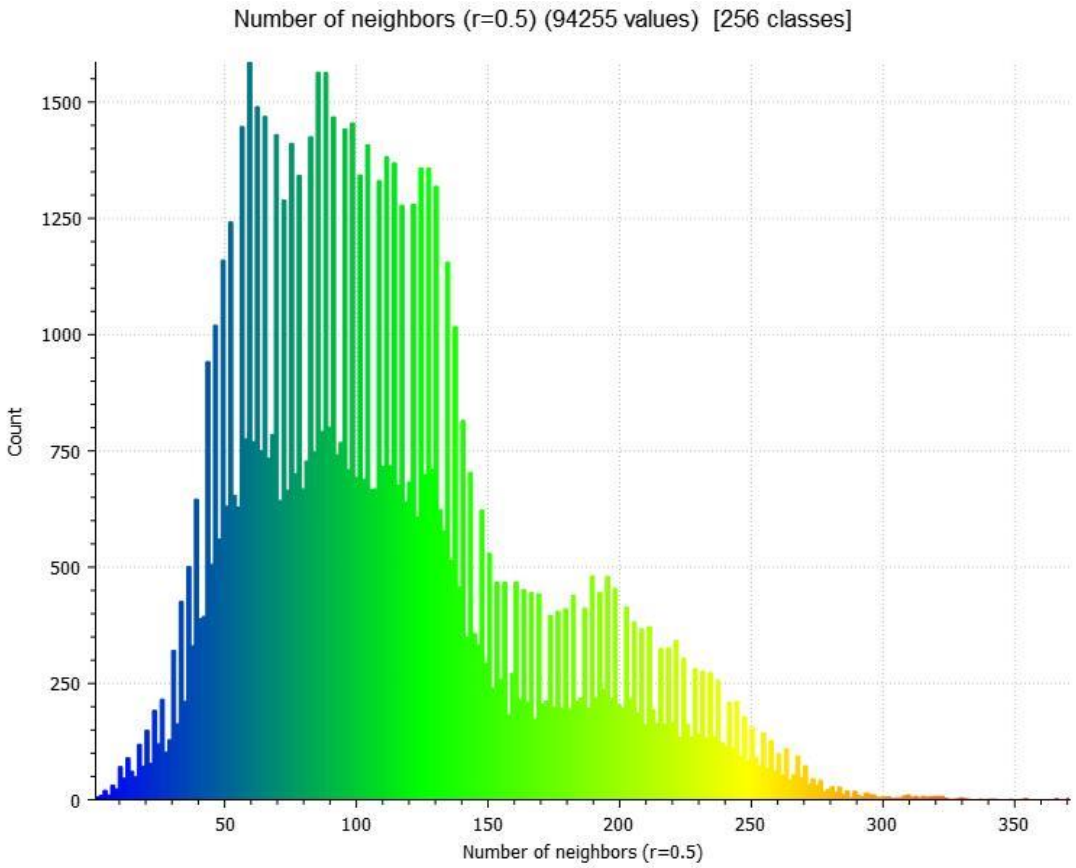


Figura 193 Istogramma densità _ facciata della nuvola di DJI Terra

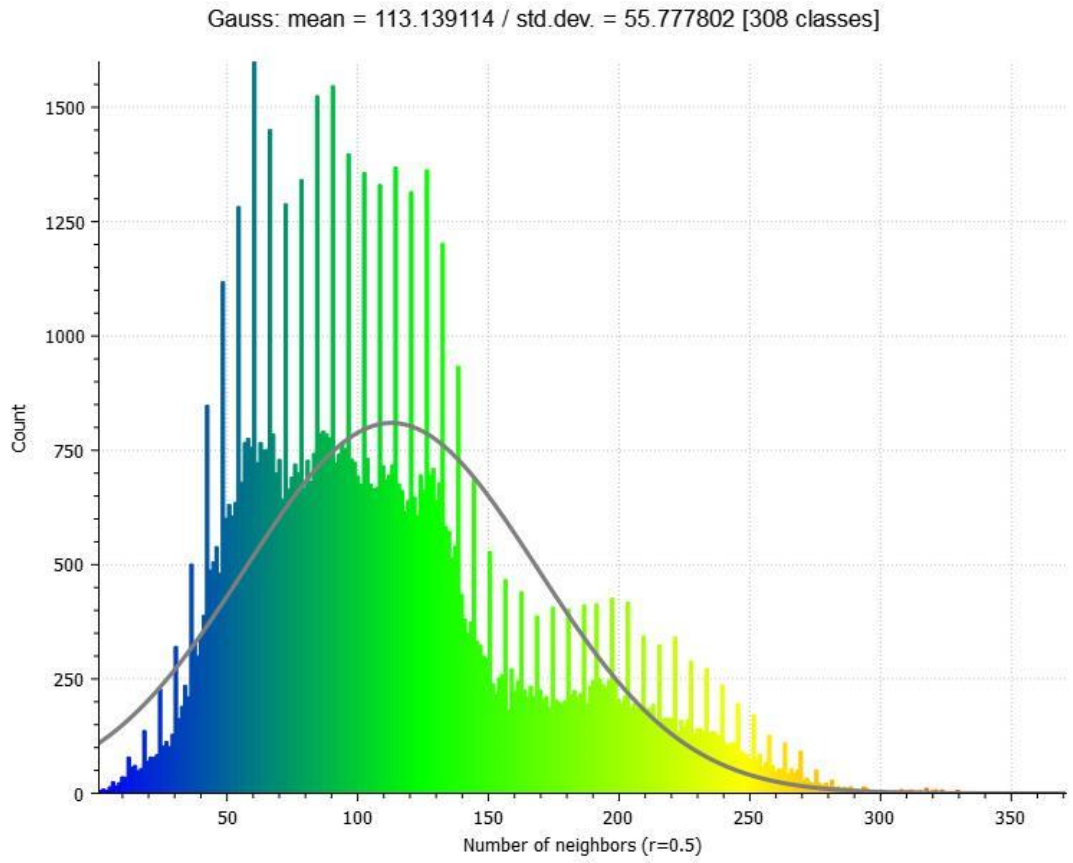


Figura 194 Distribuzione gaussiana della densità DJI Terra

L'ultima analisi effettuata è quella della **rumorosità** della facciata della nuvola di DJI Terra (Fig.195), individuata con il colore verde nelle parti di facciata più dettagliate di cui spigoli, davanzali finestre o negli angoli.

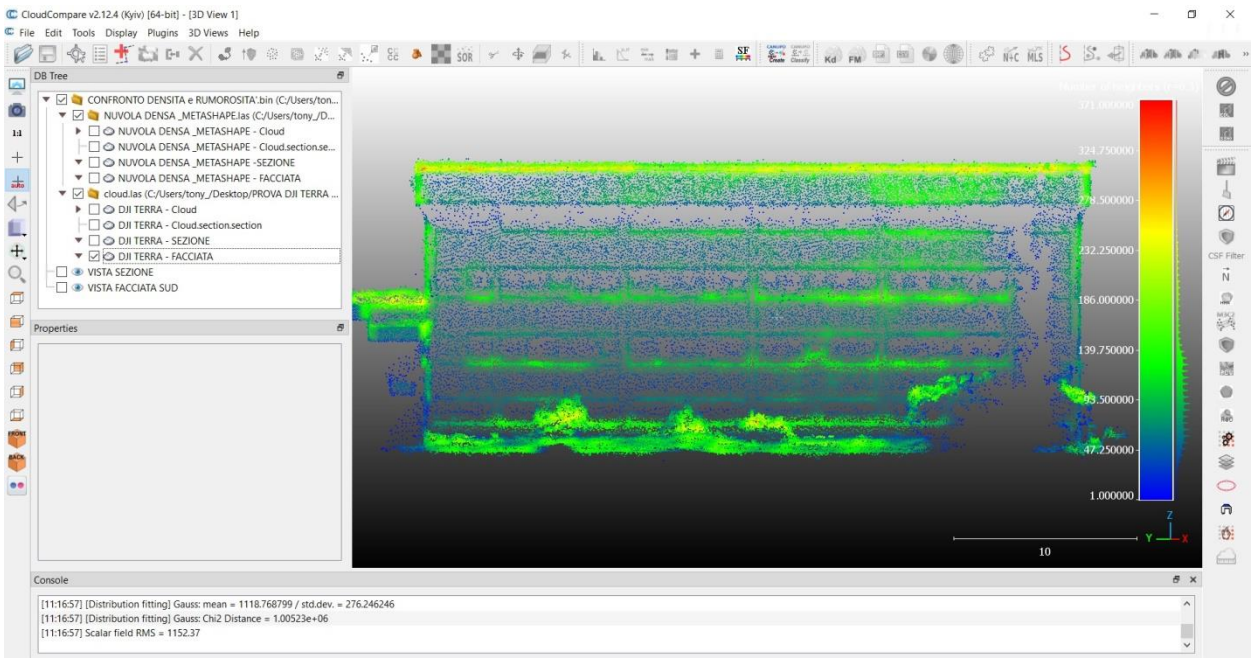


Figura 195 Modello rumorosità _ facciata DJI Terra

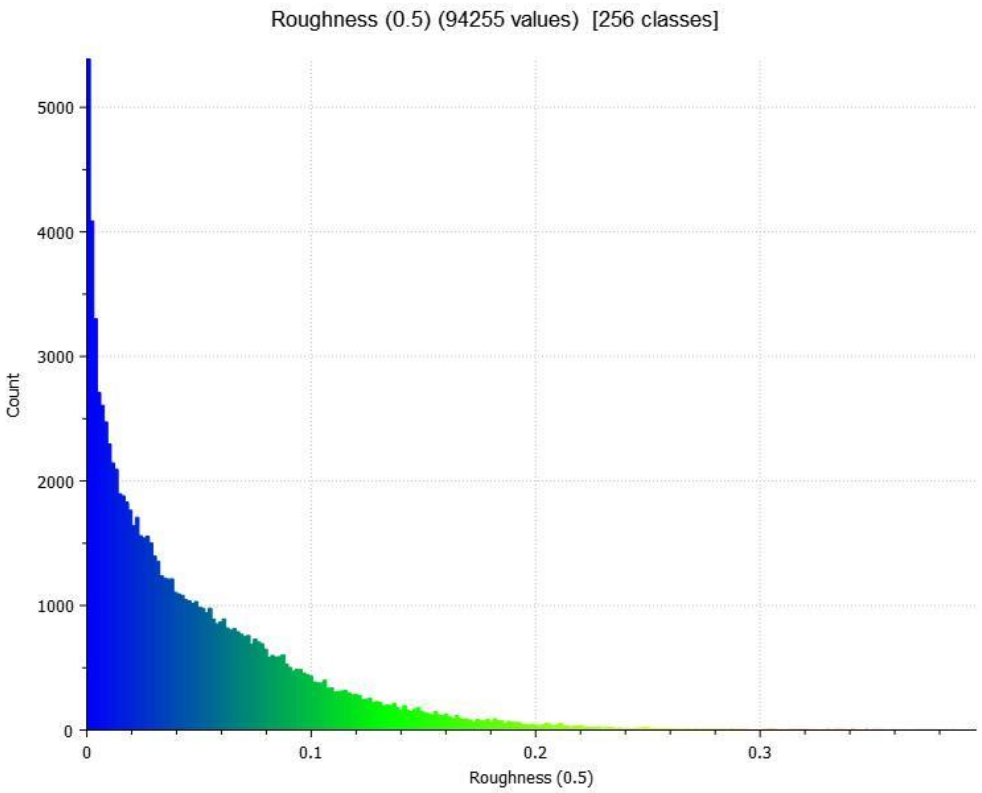


Figura 196 Istogramma rumorosità _ facciata DJI Terra

Dall'istogramma (Fig.196) si evince che gran parte dei punti sono vicini allo 0 mentre all'aumentare della distanza da 0.06 a 0.2, il colore verde identifica i punti con maggiore rumorosità.

9.3.1 CONFRONTO TRA METODO 1 (Agisoft Metashape) e METODO 2 (DJI TERRA)

ANALISI DEI DATI MODULO SEZIONE

Partendo dall'analisi delle sezioni delle due nuvole di punti, è possibile fare un confronto tra i dati della **densità** attraverso l'istogramma della nuvola di punti di DJI Terra e Agisoft Metashape (Fig.197). Il numero di valori della sezione di Metashape è 440341, ossia circa 11 volte di più rispetto ai valori della sezione di DJI Terra che sono 39803. Per Quanto riguarda i valori sull'istogramma, quelli di DJI Terra hanno una densità variabile identificata dall'asse delle ascisse, a differenza di quello di Metashape in cui la densità risulta più costante per i punti visibili in Fig.198. Inoltre, la media dei punti è di 111 per DJI Terra e 1118 per Agisoft Metashape.

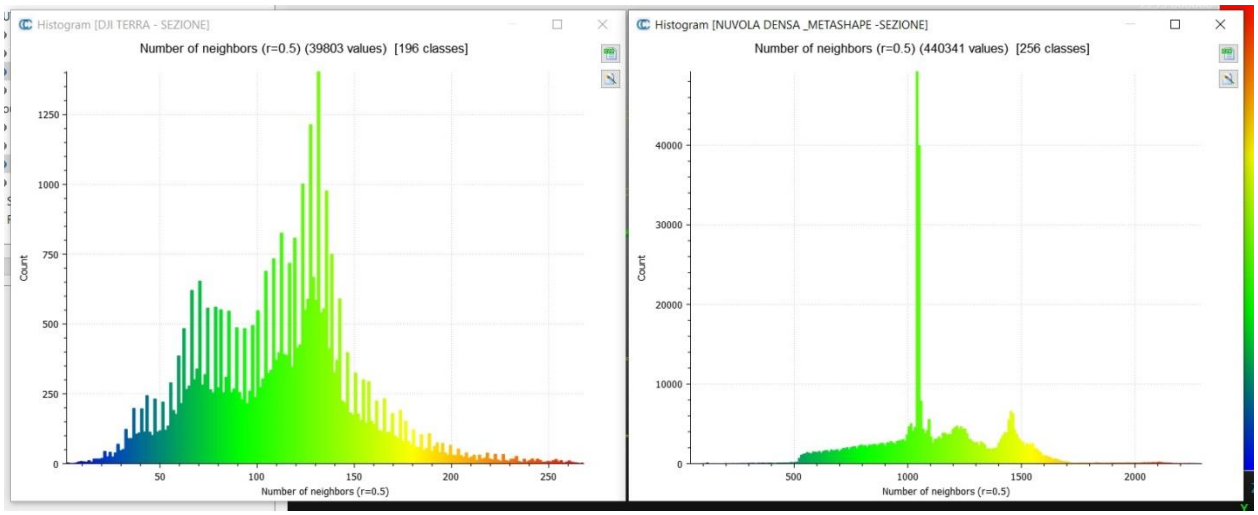


Figura 197 Istogramma DJI TERRA (a sinistra) e Istogramma Agisoft Metahsape (a destra)

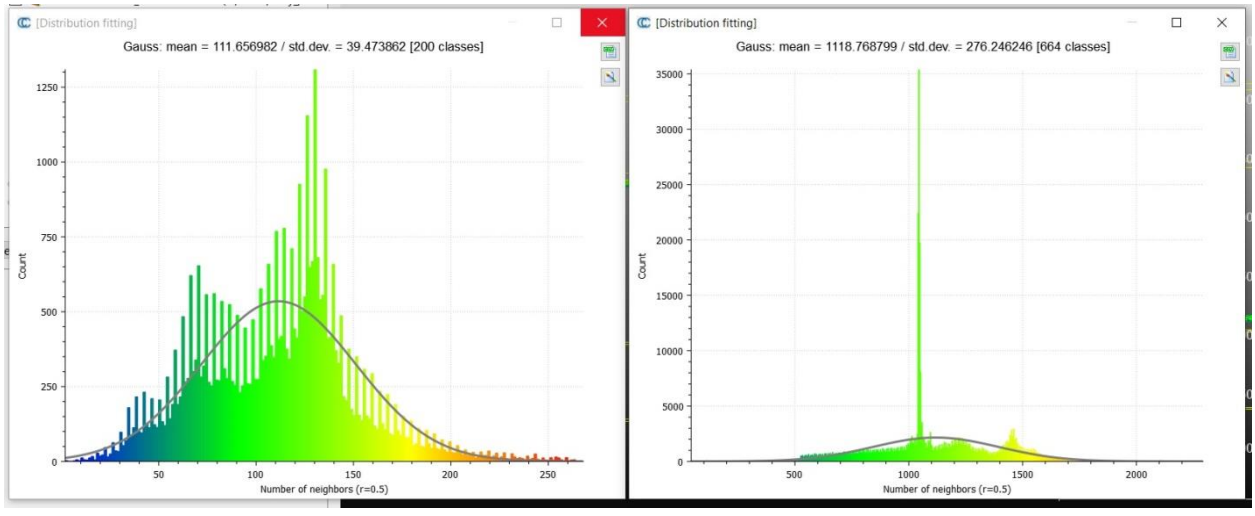


Figura 198 Distribuzione gaussiana della densità DJI Terra (sinistra) e Agisoft Metashape (destra)

Dal confronto dell'istogramma della **rumorosità** delle due sezioni si nota che l'andamento della curva è molto simile per entrambe le nuvole, così come la percentuale tra il numero dei punti e la distanza per i valori di 0.3m, 0.2m e 0.1m. (Fig. 199,200 e 201)

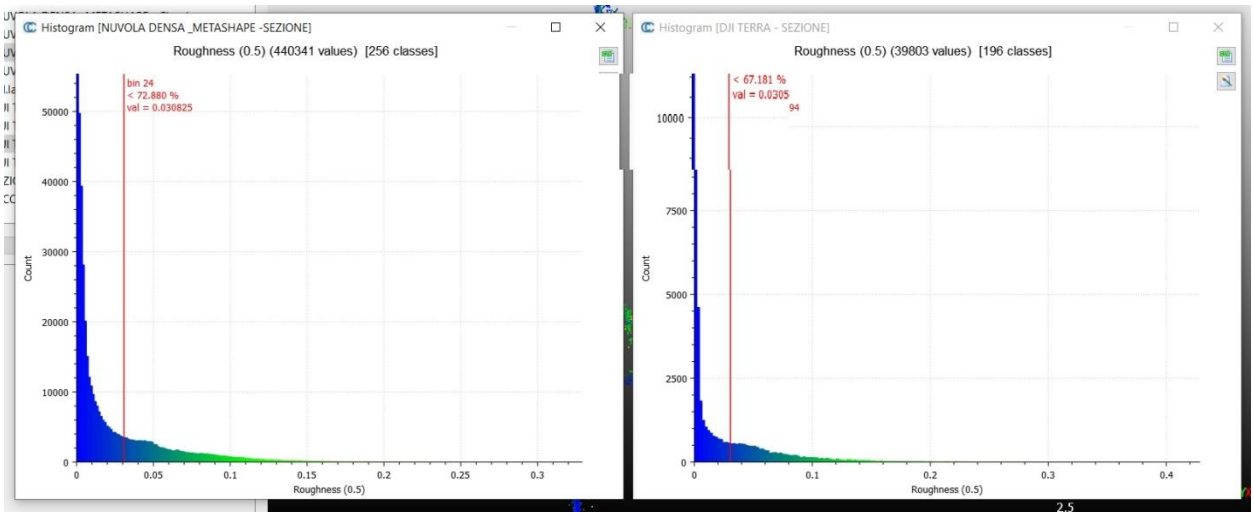


Figura 199 Istogramma rumorosità _ sezione Agisoft Metashape vs DJI Terra _ distanza 0.3m

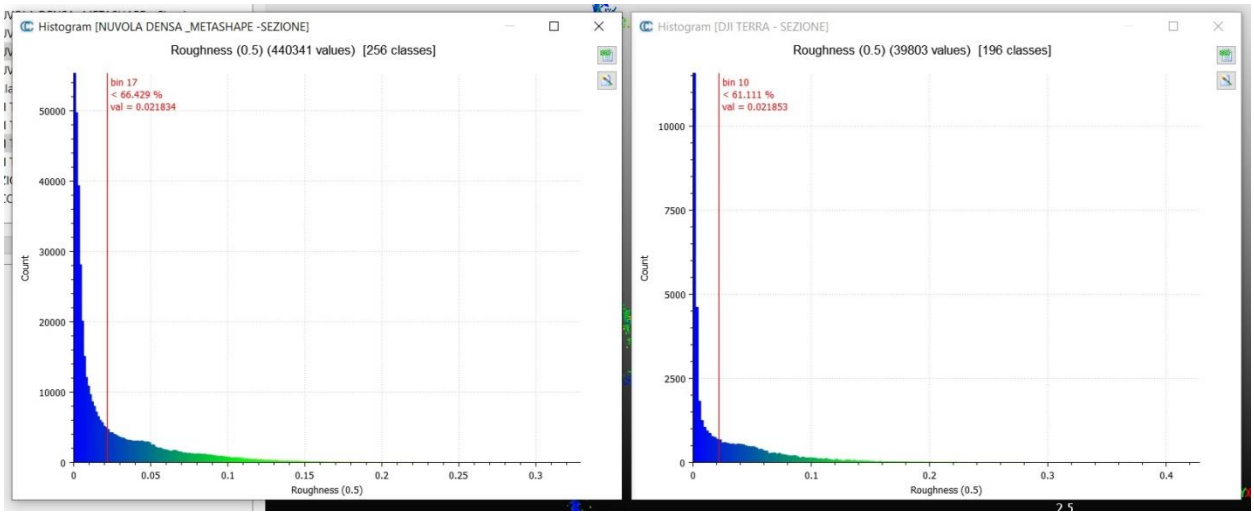


Figura 200 Istogramma rumorosità _ sezione Agisoft Metashape vs DJI Terra _ distanza 0.2m

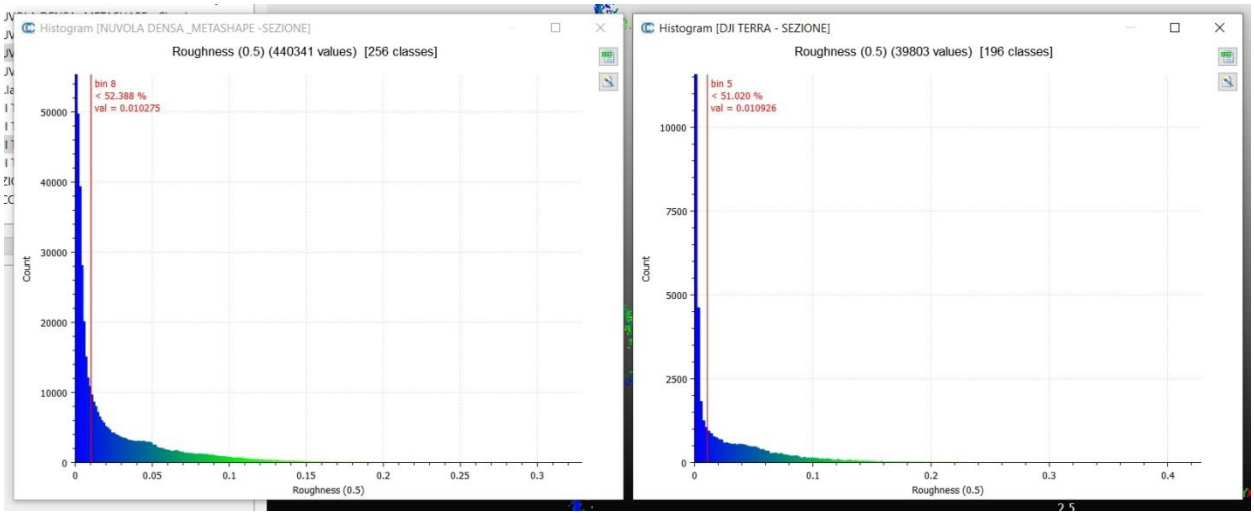


Figura 201 Istogramma rumorosità _ sezione Agisoft Metashape vs DJI Terra _ distanza 0.1m

ANALISI DATI DEL MODULO FACCIATA

Per quanto riguarda il confronto dei modelli della facciata tra le due nuvole di punti, i risultati sono simili a quelli dell'analisi della sezione delle due nuvole.

Confrontando i dati della **densità** attraverso l'istogramma della nuvola di punti di Agisoft Metashape e di DJI Terra (Fig.202), è possibile anche in questo caso stabilire che il numero dei punti della nuvola di Metashape (1314431 punti) è circa 13 volte più altro rispetto al numero di punti di DJI Terra (94255 punti). I punti della nuvola di Metashape hanno una densità uniforme visibile dal grafico, a differenza di quelli della nuvola di DJI Terra che hanno una densità variabile visibile sull'asse delle ascisse e nell'istogramma in Fig.203. La media dei punti presenti per ogni raggio di 0.5m è di 1341 punti per la nuvola di Agisoft Metashape contro i 113 punti della nuvola di DJI Terra.

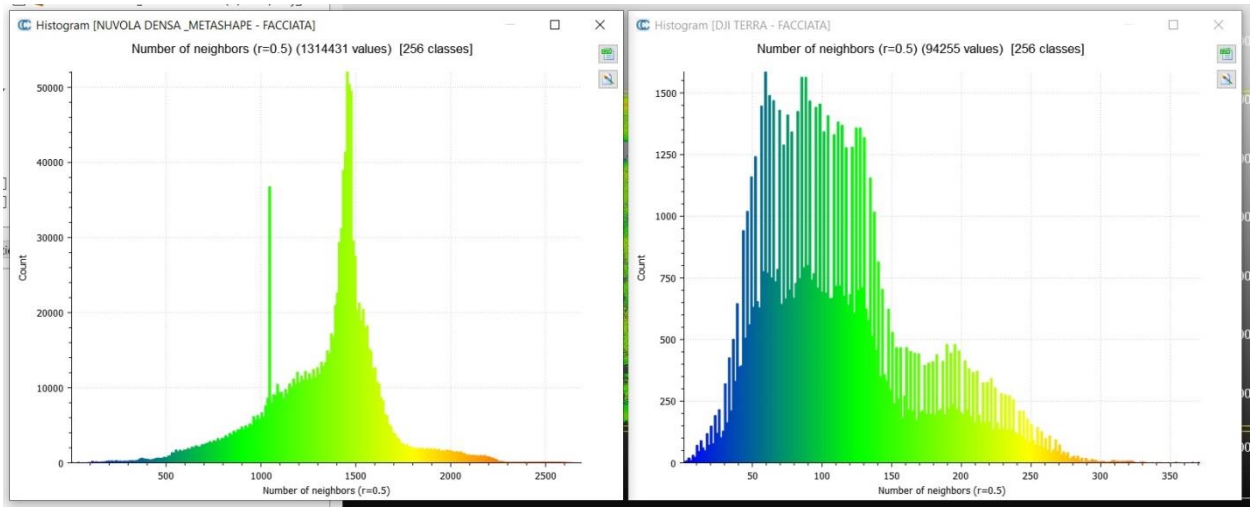


Figura 202 Istogramma Agisoft Metahsape (a sinistra) e Istogramma DJI TERRA (a destra)

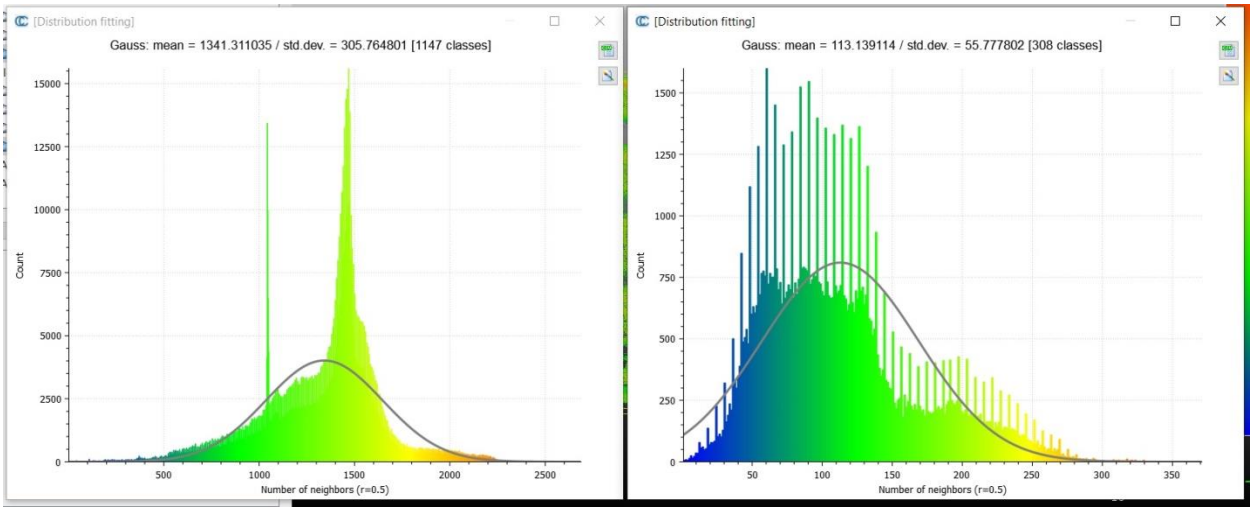


Figura 203 Distribuzione gaussiana della densità Agisoft Metashape (sinistra) e DJI Terra (destra)

Nel confronto dell'istogramma della **rumorosità** delle facciate delle due nuvole di punti (Fig.204), l'andamento della curva è simile a quello dell'istogramma della sezione.

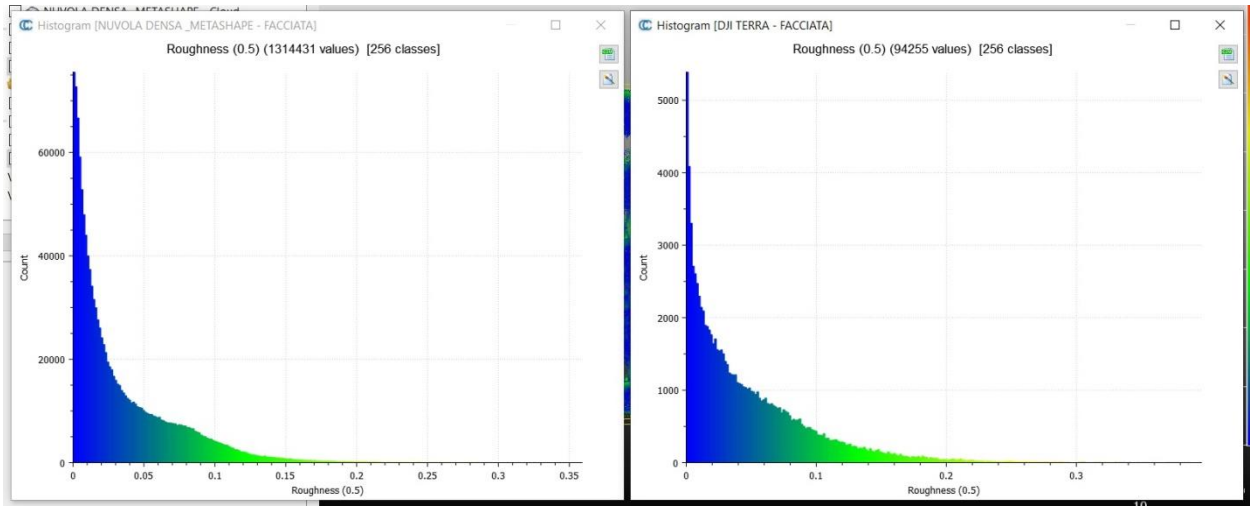


Figura 204 Istogramma rumorosità _ sezione Agisoft Metashape vs DJI Terra _ distanza 0.1m

Per verificare la capacità di restituzione del modello tridimensionale, l'analisi della rumorosità può essere effettuata su un particolare del fabbricato rilevato, come la sezione della copertura. Impostando la visualizzazione in vista prospettica, la nuvola di punti di Metashape risulta regolare con qualche piccola rumorosità identificabile dai punti verdi visibili ai lati della superficie verticale Fig.205. Per quanto riguarda le superfici orizzontali questo problema non si presenta.

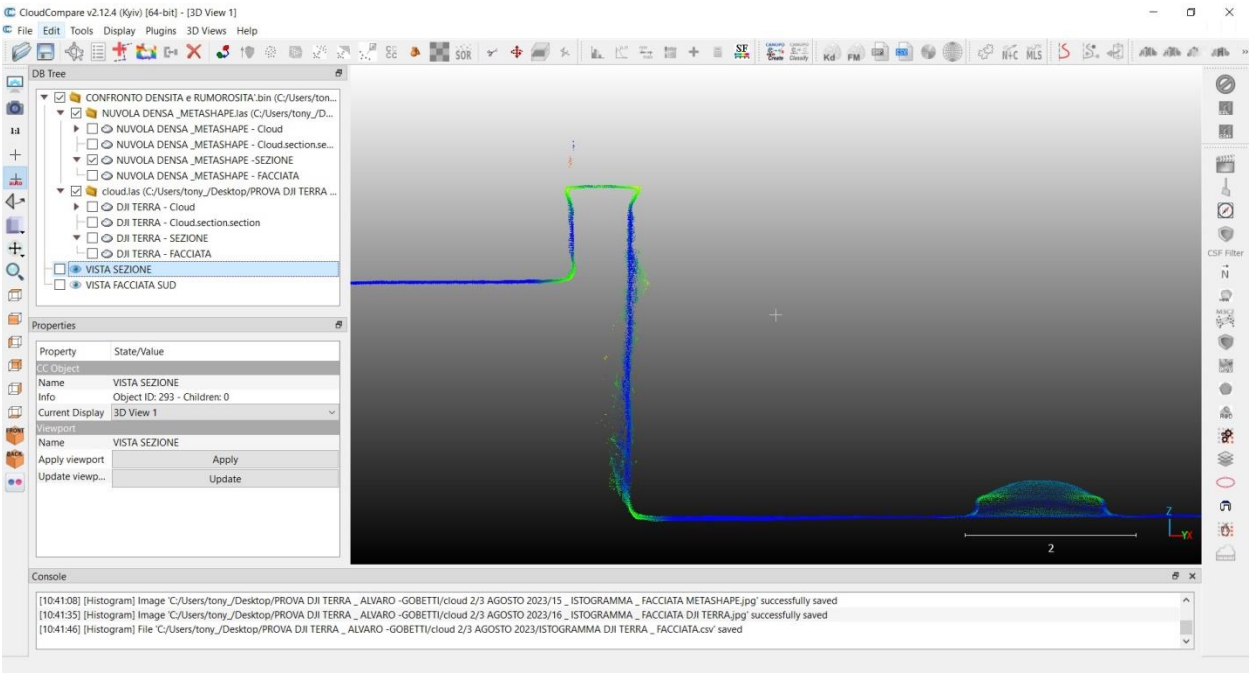


Figura 205 _ Rumorosità sezione Aagisoft Metashape

Nel caso della sezione della nuvola di punti di DJI Terra (Fig.206), la rumorosità è visibile sia per quanto riguarda le superfici verticali, sia per la ricostruzione dei dettagli come la superficie curva del lucernario.

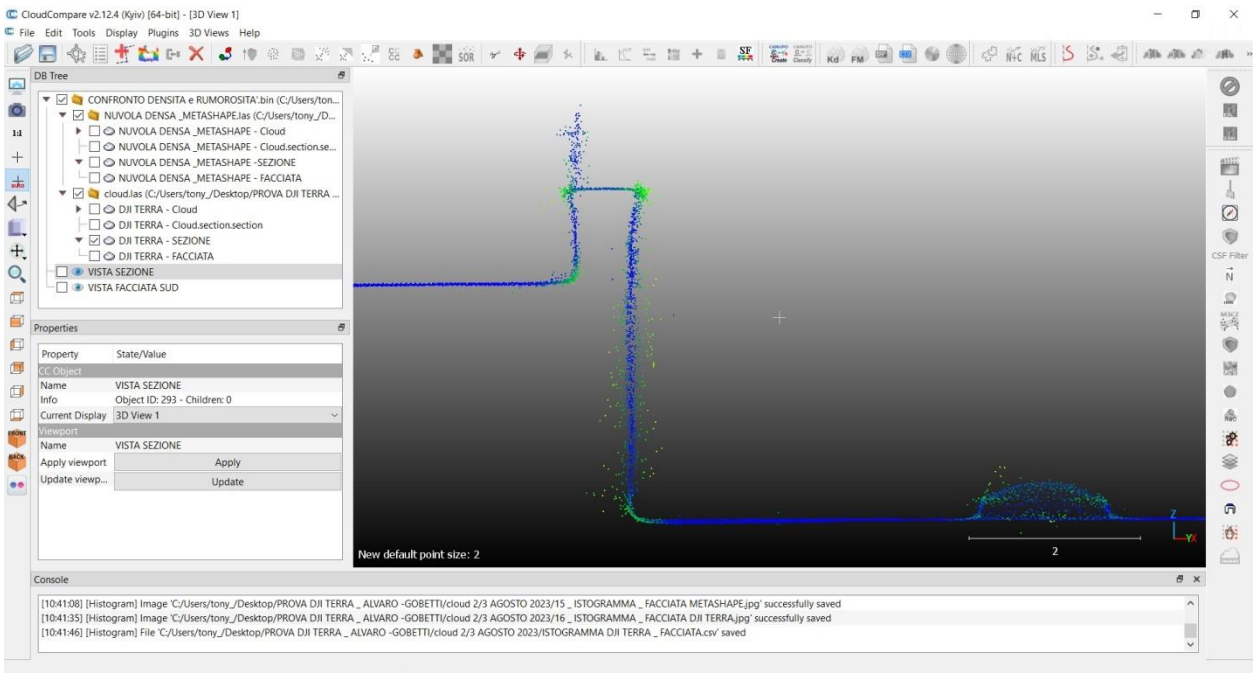


Figura 206 _ Rumorosità sezione DJI Terra

Dalle osservazioni fino ad ora eseguite, è possibile stabilire che la nuvola di punti di Metashape ha una densità maggiore e una rumorosità inferiore rispetto alla nuvola di punti generata con DJI Terra.

9.3.2 ANALISI TRA LE NUVOLE _ COMPUTE

A seguito delle osservazioni precedentemente effettuate, è possibile fare un ulteriore confronto del modulo della sezione e del modulo della facciata. L'analisi consiste nella comparazione tra le due nuvole per la verifica delle distanze (*cloud to cloud distance*) dove, per l'operazione sarà utilizzata come nuvola di riferimento quella con maggior numero di punti ricavata con il metodo 1 (Metashape), comparata a quella ricavata con il metodo 2 (di DJI Terra) (Fig.207).

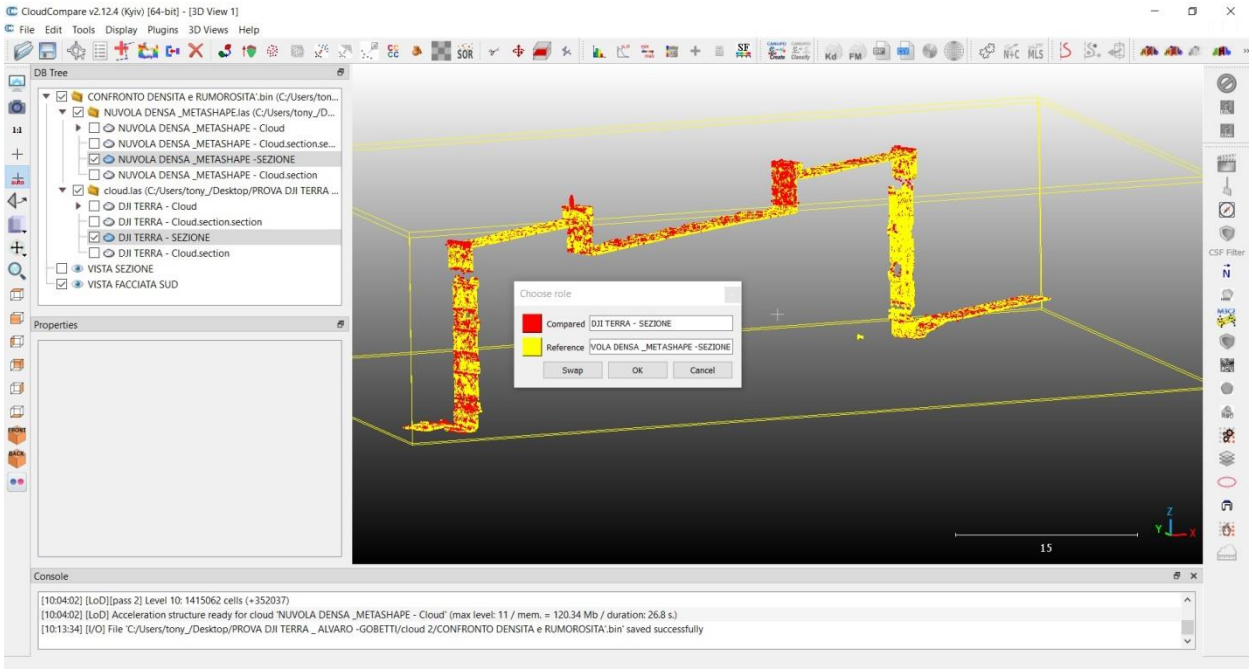


Figura 207 Comando Compute cloud to cloud distance

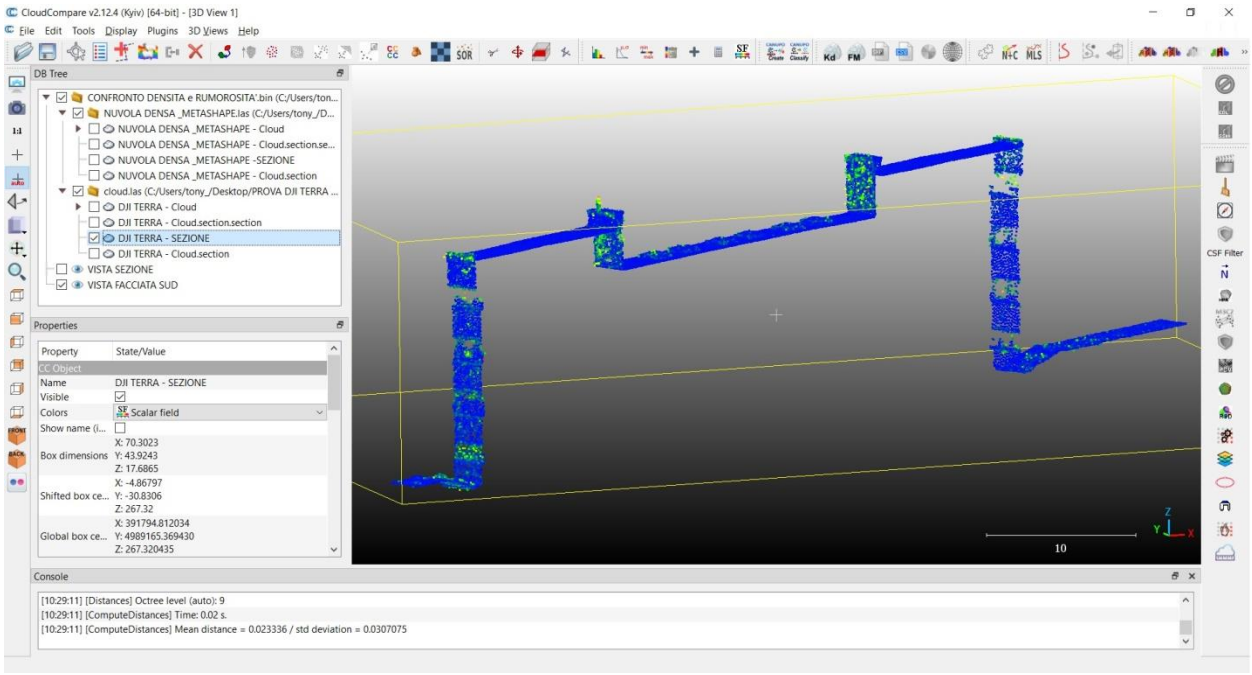


Figura 208 Nuvola DJI Terra

Il risultato ottenuto visibile in Fig.208, è una nuvola in cui il blu rappresenta i punti con una distanza assoluta minore tra la nuvola di riferimento (Metashape) e una distanza assoluta più alta per i punti identificati dal colore verde. Analizzando il grafico (Fig.209), gran parte dei punti sono concentrati nella distanza assoluta tra 0 e 0.02m. Tra 0.02m e 0.1m il numero di punti tende a diminuire, mentre da 0.1m a 0.2m i punti sono rappresentati in verde sulla nuvola (Fig.208)

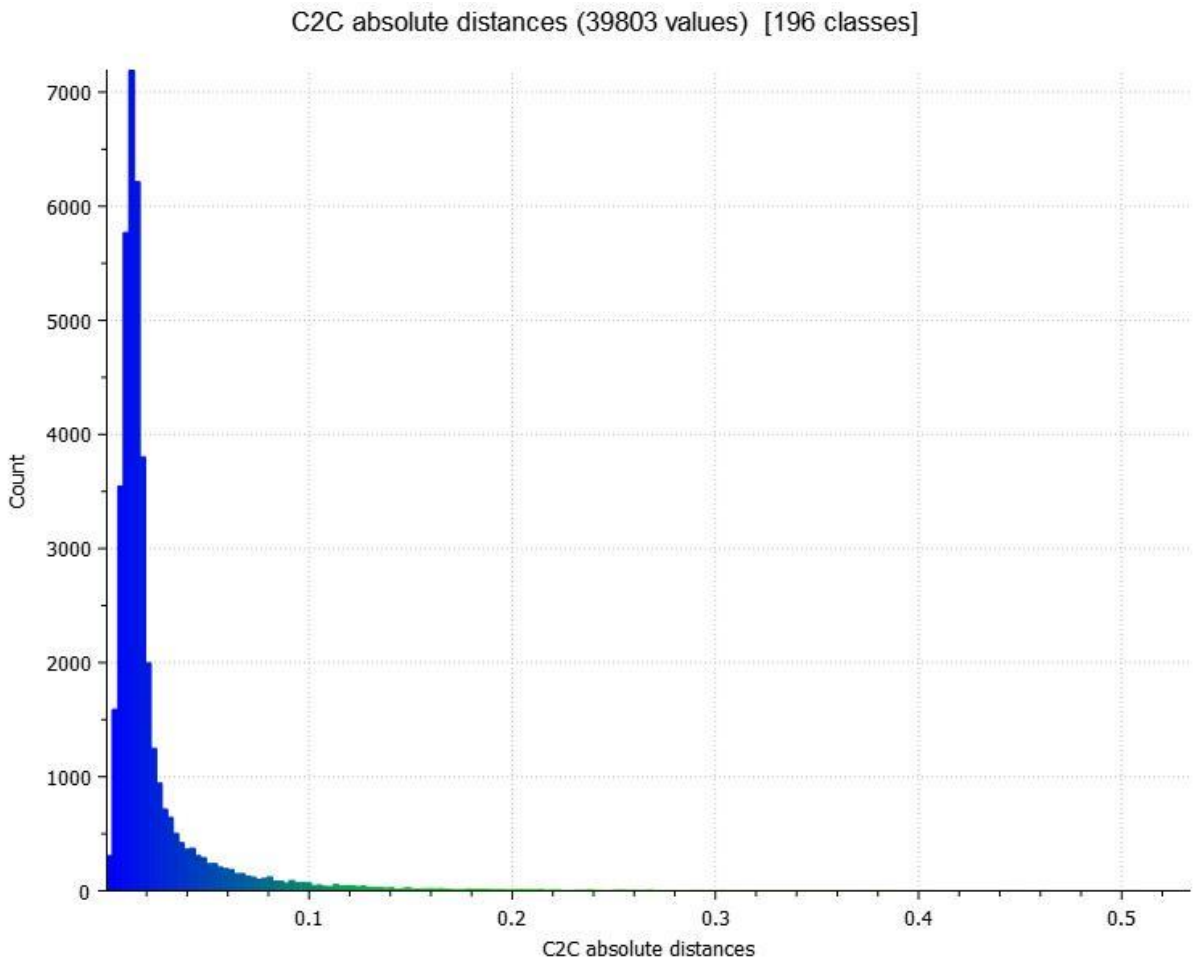


Figura 209 Grafico Cloud to Cloud distances

La stessa operazione è stata eseguita anche per il modulo della facciata (Fig.210), tenendo sempre come riferimento la nuvola di punti generata con Agisoft Metashape.

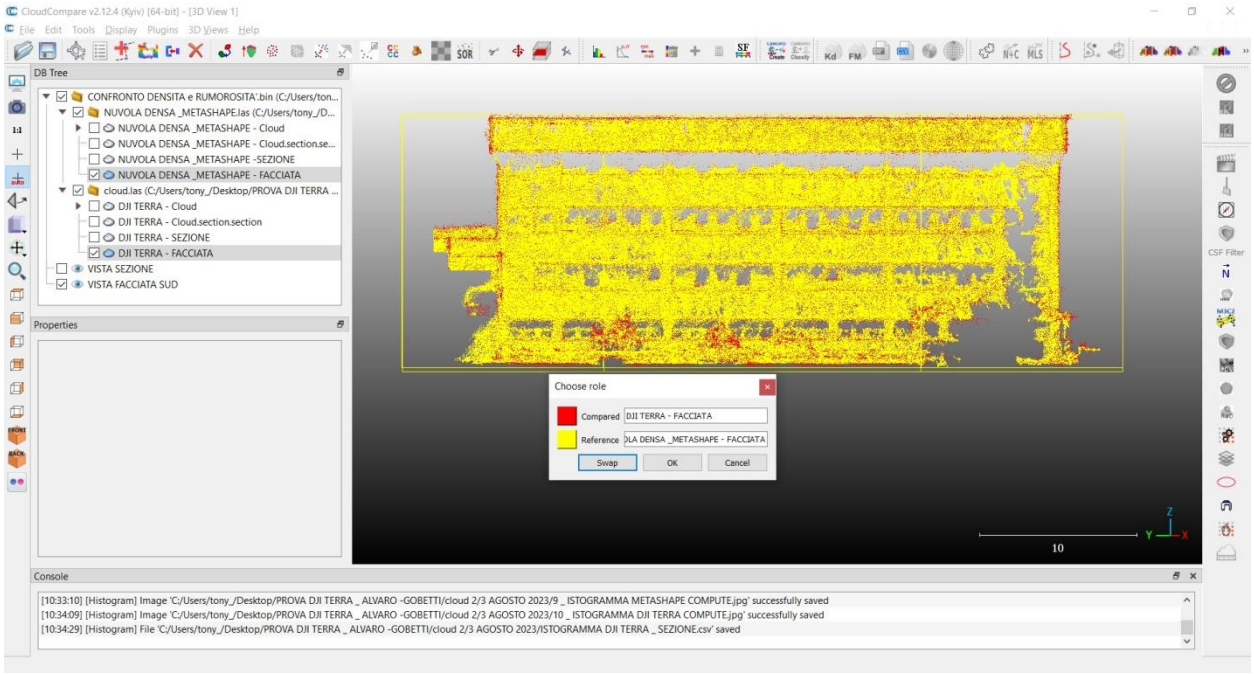


Figura 210 Comando Compute cloud to cloud distance

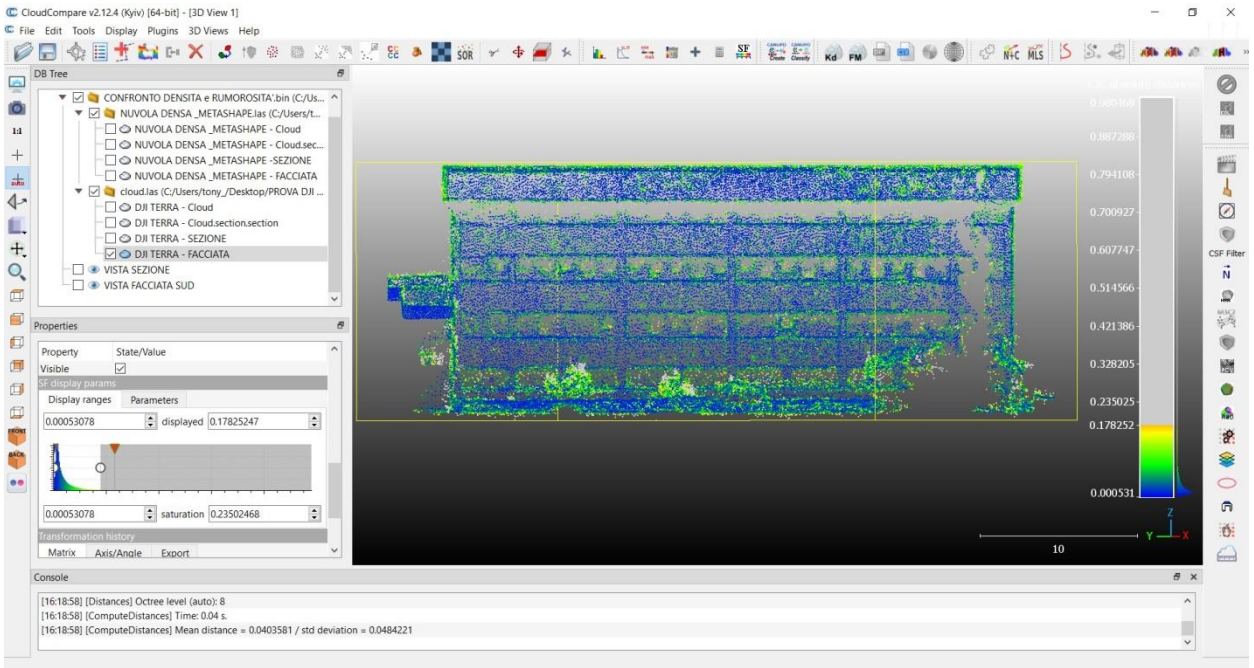


Figura 211 Nuvola DJI Terra

Modificando i valori della scala dei colori (Fig.211), è possibile visualizzare i punti con distanza assoluta maggiore identificati dal colore verde. Tali punti hanno una distanza che va da 0.05m a 0.2m (Fig.212) e sono localizzati principalmente sulle superfici riflettenti (infissi) e lungo gli spigoli del davanzale e del perimetro dell'edificio.

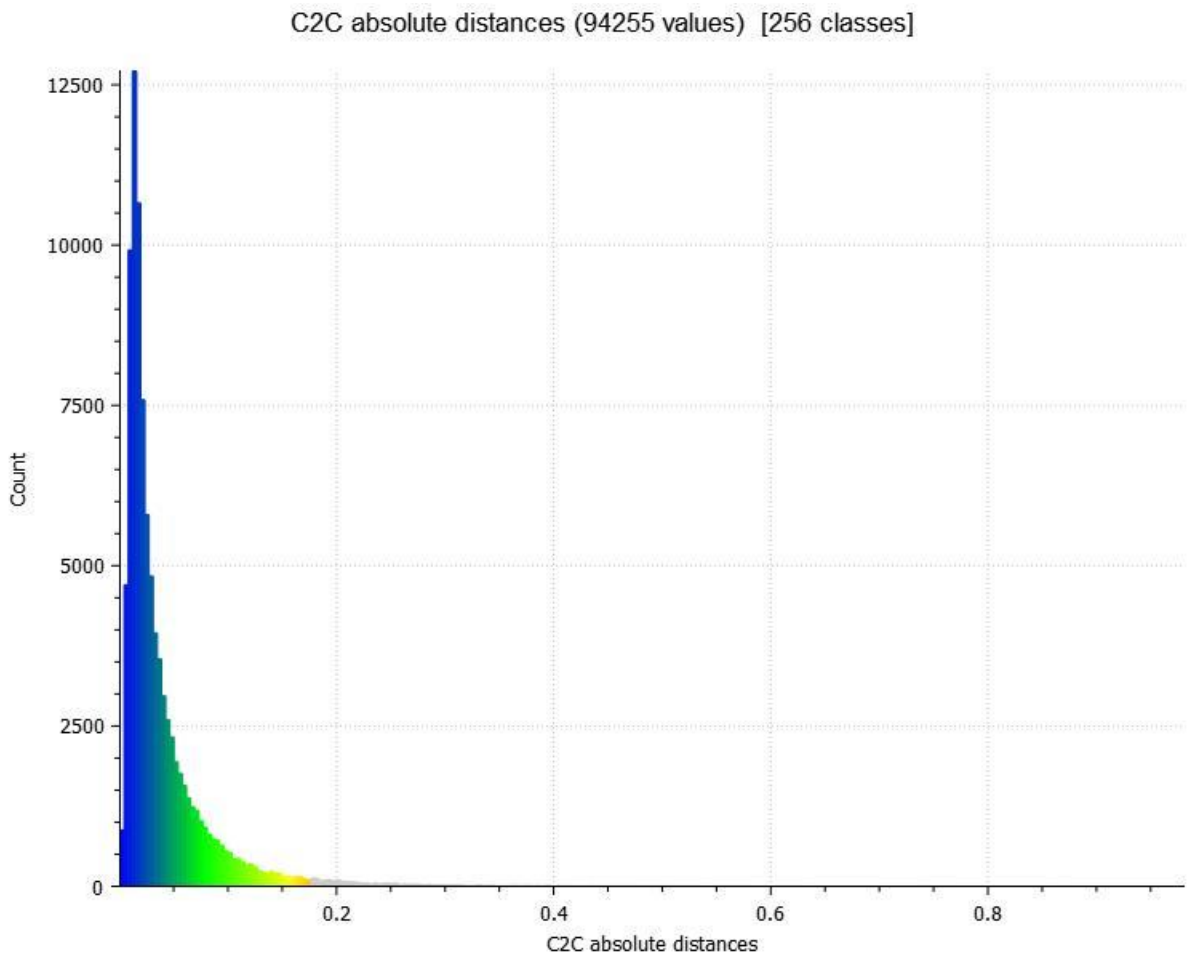


Figura 212 Grafico Cloud to Cloud distances

10. CAPACITA' DI ESTRARRE SUPERFICI PLANARI CON CYCLONE 3DR

L'ultima parte di elaborazione dei dati consiste nell'utilizzo del software Cyclone 3DR. Con questo programma saranno individuate le superfici planari dalle due nuvole di punti, analizzando l'inclinazione della copertura.

Dopo aver importato le due nuvole di punti all'interno del software e dopo aver scelto la copertura di analisi (Fig.213), il modello tridimensionale di entrambe le nuvole è stato semplificato ritagliando le parti non di analisi del modello tridimensionale.

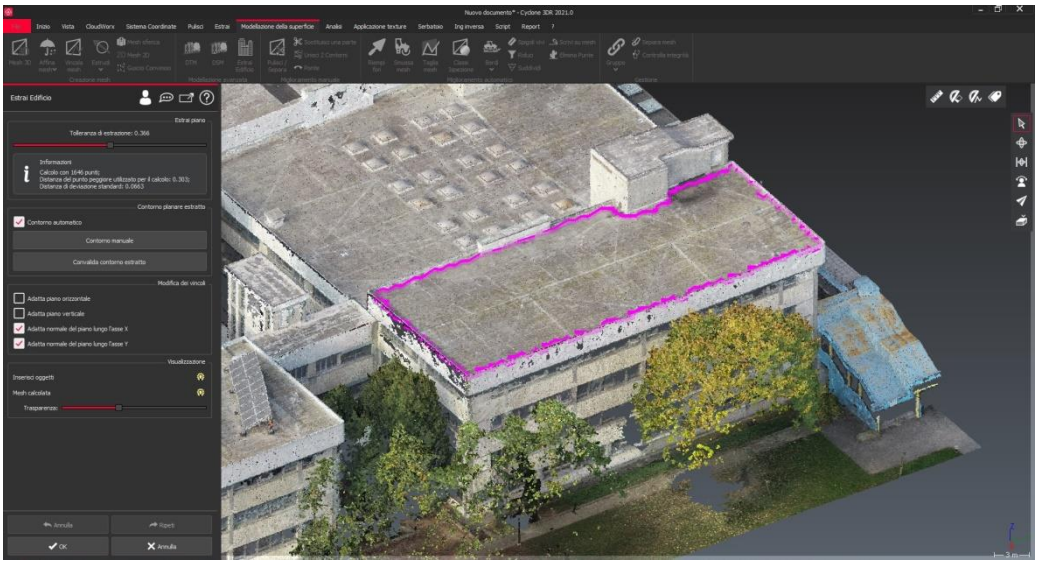


Figura 213 Individuazione superficie planare

Il processo di pulizia del modello tridimensionale è stato ulteriormente implementato eliminando anche le superfici verticali di entrambi i modelli (Fig.214). Con questo processo è possibile impostare in modo più preciso i valori delle quote successivamente ottimizzati.

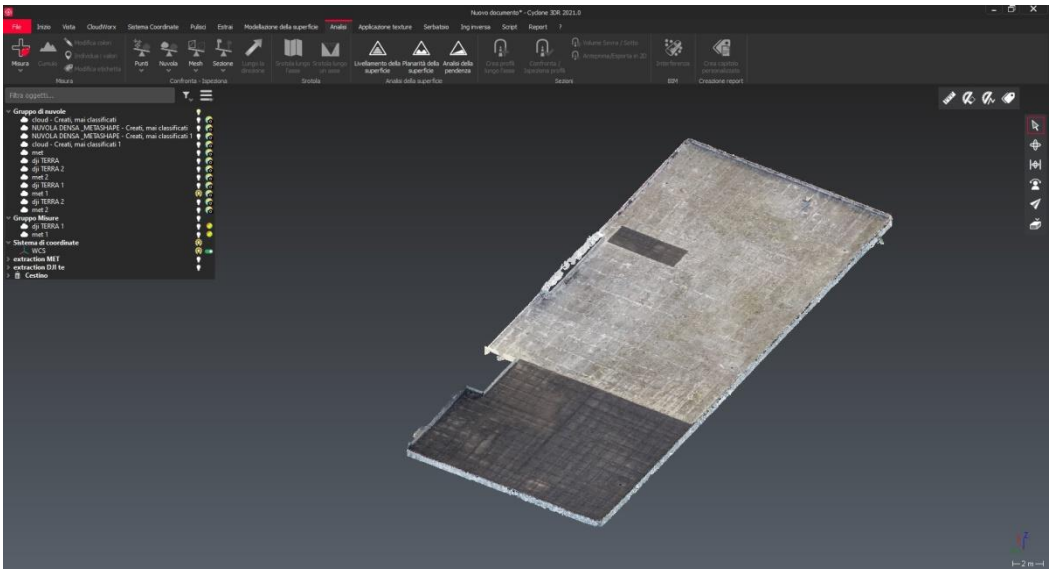


Figura 214 Superficie planare nuvola di punti Metashape e DJI Terra

Il procedimento successivo consiste nell'individuazione del contorno della superficie planare attraverso il riconoscimento automatico. Nel caso della nuvola di punti di DJI TERRA il contorno individuato dal software è identificato dalle linee irregolari di colore rosso visibili in Fig.215. Al contrario invece, per quanto riguarda la nuvola di punti di Agisoft Metashape, il software riconosce in modo molto più regolare la superficie planare individuata dalla linea bianca (Fig.215). Questo fatto è dovuto dalla densità delle singole nuvole come visibile in Fig.216 per la nuvola di DJI Terra e in Fig.217 per quella di Agisoft Metashape.

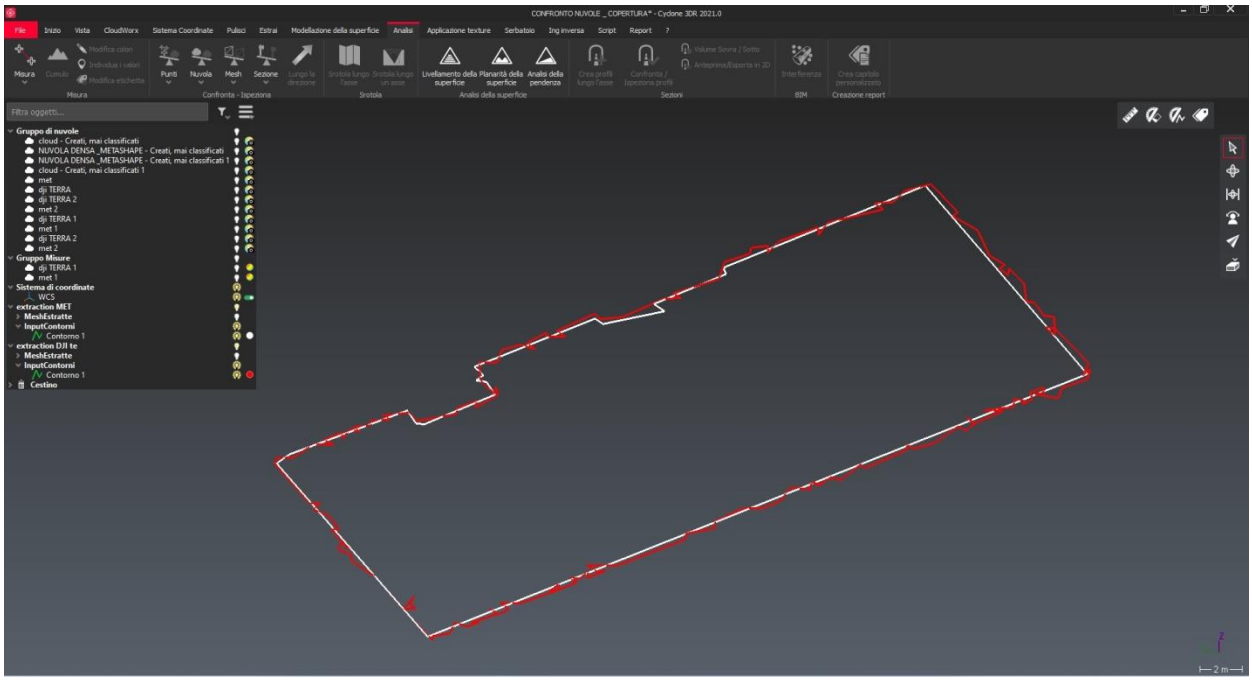


Figura 215 Riconoscimento automatico delle nuvole di punti

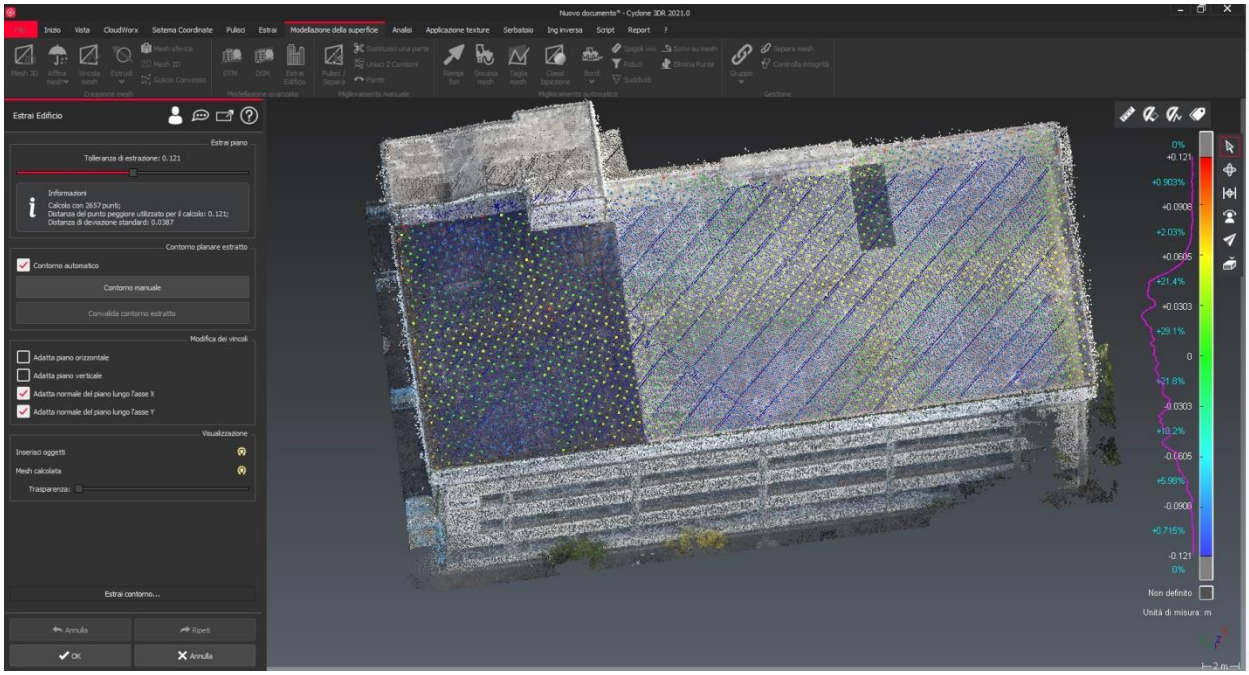


Figura 216 Densità nuvola di punti DJI Terra

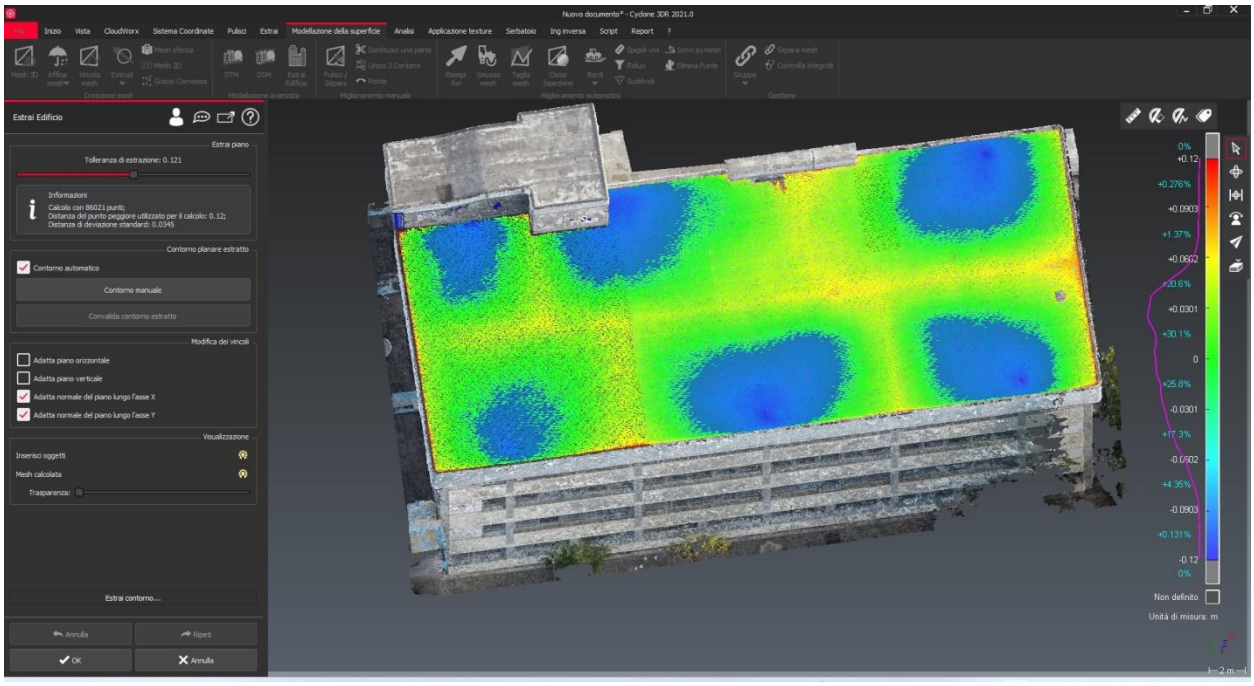


Figura 217 Densità nuvola di punti Agisoft Metashape

Attraverso il comando Analisi lungo la direzione, sono stati impostati i valori della scala dei colori con valore minimo di 273.9m identificato dal colore blu e valore massimo di 274.2m identificato dal colore rosso. Questi parametri permettono di individuare la conformazione della copertura analizzata, dovuta all'inclinazione, con una pendenza realizzata in modo tale da permettere il defluire dell'acqua piovana, come nei punti di colore blu visibili sia in Fig.218 della nuvola di DJI Terra sia nella che in Fig.219 della nuvola di Agisoft Metashape.

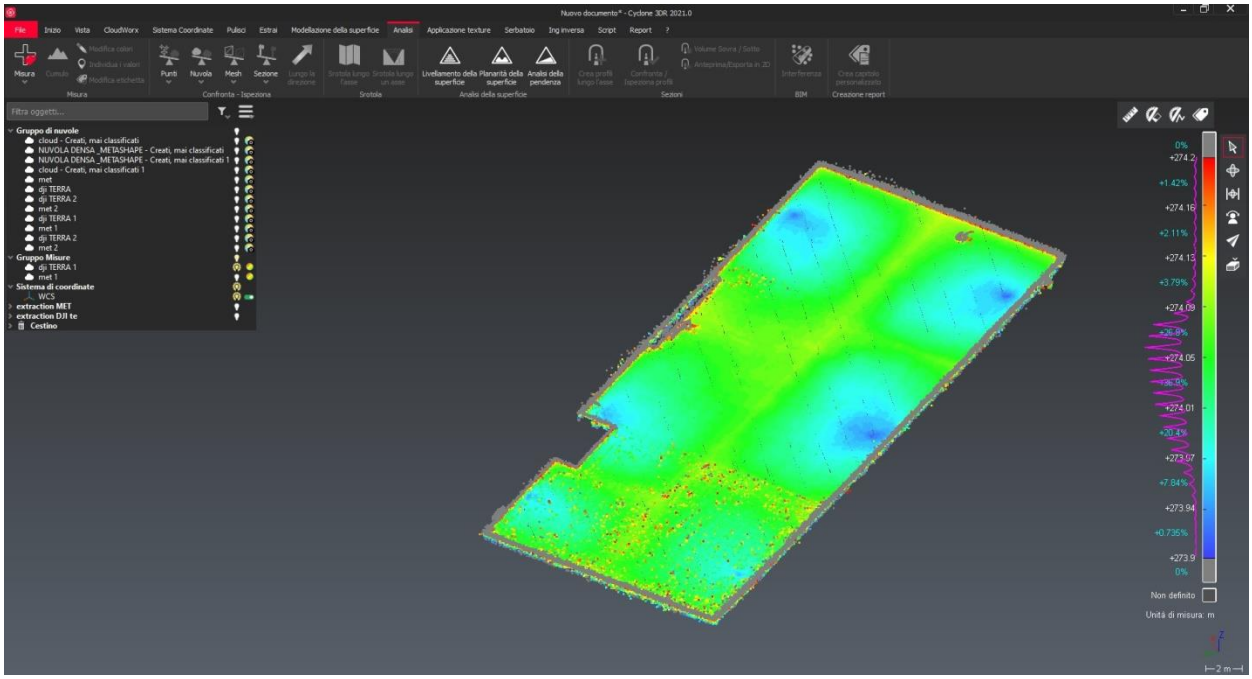


Figura 218 Analisi lungo la direzione della nuvola di DJI Terra

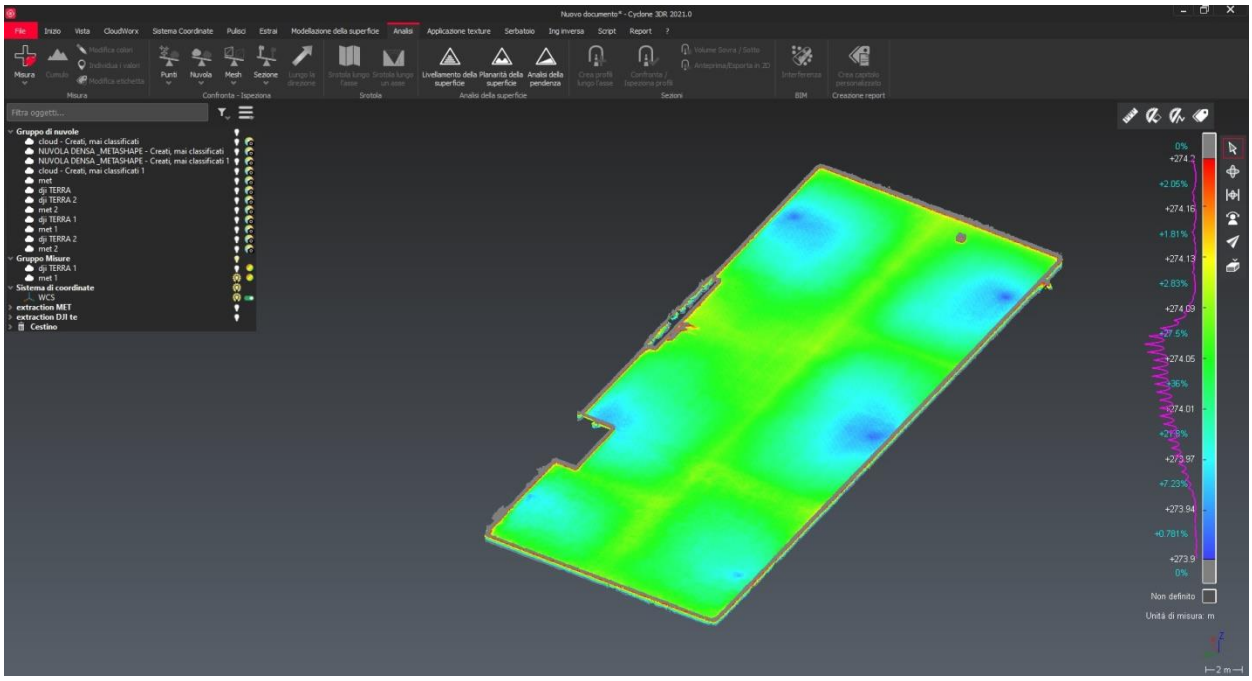


Figura 219 Analisi lungo la direzione della nuvola di Agisoft Metashape

Dall'analisi della Fig.218 della nuvola di punti di DJI Terra, si può notare la rumorosità della nuvola, dovuta al colore scuro della copertura visibile in Fig.216. Questo problema non è presente invece nella nuvola di Agisoft Metashape (Fig.219).

Inoltre è possibile dimostrare che grazie al rilievo aerofotogrammetrico, è possibile identificare dettagli come le variazioni di quota della superficie piana della copertura, difficilmente individuabili durante l'ispezione della struttura.

In conclusione ai dati analizzati, è possibile stabilire che la nuvola di punti generata con il software Agisoft Metashape ha una densità circa 10 volte più alta, poiché contiene più punti utili per l'analisi del fabbricato, per la realizzazione di modelli tridimensionali oppure per rappresentazioni grafiche, a differenza della nuvola di punti generata con il software DJI Terra. Quest'ultima, come visualizzato nella recente analisi, presenta dei problemi di rumorosità dovuti alle superfici riflettenti quali vetro o superfici scure come la copertura del tetto.

CONCLUSIONI

Questa tesi si basa sullo studio del drone come strumento utile per le acquisizioni aeree in ambito architettonico e sulla tipologia dei dati acquisiti attraverso le tecniche fotogrammetriche e operazioni di rapid mapping.

Nella prima parte è stato trattato l'argomento riguardante la *Storia del Drone*, dalla nascita dei primi velivoli a pilotaggio remoto utilizzati in ambito militare fino agli attuali droni impiegati in ambito civile. Come illustrato nel capitolo uno, è proprio nell'ultimo decennio che viene registrata una crescita esponenziale di utilizzo dei sistemi a pilotaggio remoto grazie al vantaggio nelle applicazioni in diversi ambiti e soprattutto ai prezzi contenuti accessibili ad un pubblico più vasto.

Nel capitolo successivo sono stati analizzati il termine drone e i differenti acronimi ad esso associati, effettuando un'analisi approfondita dello strumento, delle parti che lo compongono e delle diverse tipologie presenti sul mercato.
La ricerca prosegue con l'analisi delle diverse tipologie di sensori presenti sui droni, e le diverse tipologie di dati che è possibile ottenere attraverso il loro impiego. Sono stati analizzati i sensori RGB, i sensori termici, i sensori a visione notturna, i sensori LIDAR ed infine i sensori multispettrali. Nel capitolo dedicato alle applicazioni dei droni in ambito architettonico, sono stati esaminati alcuni casi di utilizzo dei velivoli equipaggiati con alcuni dei sensori precedentemente elencati, in sostituzione ai metodi di rilievo tradizionali, dimostrando la tipologia di analisi che è possibile effettuare e il tipo di dato ricavato.

Nel capitolo V, vengono approfonditi il tema della normativa a livello internazionale e nazionale, così come la documentazione necessaria per l'esecuzione di una missione di volo. Attualmente gli enti responsabili per la regolamentazione delle normative e del traffico aereo si sono adeguati alla normativa internazionale prodotta dall'EASA.
Un ulteriore capitolo è stato dedicato alla fotogrammetria, illustrandone le basi, l'applicazione e il processo di elaborazione dati, e la tipologia di prodotto ottenuto. Questo processo di elaborazione, attualmente sempre più utilizzato nell'ambito architettonico, permette di acquisire, elaborare ed ottenere informazioni e dati in tempi relativamente brevi e a costi ridotti. I prodotti generati con un'accuratezza alta, consentiranno a loro volta di effettuare analisi o misure sui modelli tridimensionali generati.

La seconda parte di questo elaborato è basata sull'utilizzo della tecnica del rilievo fotogrammetrico con drone dell'Istituto Comprensivo "C. Alvaro – P. Gobetti" di Torino, e la successiva realizzazione di un modello tridimensionale attraverso l'elaborazione dei fotogrammi acquisiti tramite due metodologie differenti e l'analisi dei dati ottenuti.

L’attività sperimentale è stata divisa in quattro parti differenti: la progettazione del piano di volo, l’esecuzione del rilievo, l’elaborazione dei dati e infine la comparazione dei prodotti ottenuti.

Il primo procedimento eseguito è stato lo studio dell’area di rilievo, per proseguire con la corretta progettazione del piano di volo, quest’ultimo ricavato attraverso l’utilizzo di formule specifiche, dalle quali sono stati ottenuti i parametri di altezza di volo, numero di fotogrammi, numero di strisciate e velocità del mezzo, in rapporto all’area da rilevare, alla struttura del fabbricato, alla tipologia di sensore utilizzato e al GSD.

Nella seconda parte è stata illustrata l’esecuzione del volo in rispetto a tutte le normative vigenti nell’area di rilievo, effettuato da un operatore qualificato in possesso di tutti i certificati necessari per il drone e la missione di volo. Come già specificato nella fase di acquisizione dei dati, sono stati effettuati due voli differenti di cui uno con inclinazione della fotocamera obliqua a 45° e uno con inclinazione nadirale. Sono state eseguite due strisciate di volo impostate perpendicolarmente al fabbricato e parallelamente alla strada adiacente a nord-ovest. Il volo è stato realizzato a seguito del posizionamento in modo uniforme di marker lungo l’intero lotto e in alcuni punti sulla copertura dell’edificio. Questi sono stati misurati con un rover GPS/GNSS, ottenendo i relativi dati in coordinate elissoidiche, successivamente trasformate nella fase di elaborazione in coordinate geoidiche.

La terza fase è quella di elaborazione dei dati acquisiti, a sua volta suddivisa in base alle due metodologie differenti. Le immagini precedentemente acquisite sono state elaborate all’interno del software Adobe Photoshop Lightroom, in modo da uniformare quelle con esposizioni differenti dovute all’impostazione automatica del sensore.

Il primo metodo utilizzato è stato quello con il software Agisoft Metashape, all’interno del quale sono state importate le immagini precedentemente elaborate. È stato quindi effettuato il primo processo di allineamento tra le immagini e successivamente importato il file contenente le coordinate dei punti rilevati in corrispondenza dei marker, impostando il sistema di coordinate utilizzato. Per georeferenziare e scalare correttamente il modello tridimensionale successivamente generato, sono stati collimati i punti dei relativi marker visibili nei fotogrammi. Il passaggio successivo è stato l’elaborazione della Nuvola Densa, della Maglia 3D (Triangolazione) e del DEM (Digital Elevation Model) che in questo caso sarà un DSM (Digital Surface Model) visto che il modello generato comprenderà sia il terreno che la struttura. La qualità dei prodotti finali è stata impostata in HIGH per ottenere un modello più accurato possibile. Sono stati generati due prodotti di cui l’ortomosaico e la nuvola di punti formata da 129'032'598 punti.

Il secondo metodo utilizzato è quello con il software DJI TERRA, seguendo le stesse procedure eseguite per il metodo 1 di cui importazione delle immagini, allineamento e importazione delle coordinate per la successiva collimazione dei marker presenti nelle fotografie. In questo caso, per avere una base di riferimento uguale, sono stati collimati lo stesso numero di punti sulle stesse immagini utilizzate nel software Agisoft Metashape.

Per quanto riguarda le impostazioni della qualità del prodotto finale, sono stati scelti anche in questo caso la qualità HIGH e il formato di esportazione del prodotto finale "file.las" che identifica la nuvola di punti. A differenza del primo software utilizzato, in questo caso l'elaborazione è stata effettuata senza la possibilità di controllare i singoli processi. Infatti, a seguito dell'esportazione dell'ortomosaico, sono stati riscontrati errori dovuti all'assenza delle coordinate GPS solo nelle immagini elaborate con il software Adobe Photoshop Lightroom. In questo caso è stata eseguita un'ulteriore elaborazione, questa volta di tutte le immagini, in modo da avere file esportati senza il dato delle coordinate GPS. A seguito dell'ultima elaborazione dei dati, nell'ortomosaico esportato non sono stati riscontrati problemi e la nuvola ottenuta è stata formata da 11'586'850 punti.

Nell'ultimo capitolo di questa tesi sono state effettuate le analisi delle nuvole di punti create con il software Cloud Compare. A seguito dell'importazione delle nuvole e delle coordinate all'interno del software, è stato possibile individuare le coordinate dei punti in corrispondenza dei marker visibili sulla nuvola. Con i dati ottenuti, sono state realizzate due tabelle differenti per verificare la differenza con i valori delle coordinate rilevate con il GPS/GNSS. Per quanto riguarda la nuvola generata con DJI TERRA, la media tra le differenze delle coordinate ricavate, ha un valore attorno a 1-2 cm, mentre per quanto riguarda Agisoft Metashape la media ha un valore di 1 cm.

Dai dati ottenuti, è stato possibile effettuare un'analisi anche sui punti con differenze più alte e verificare direttamente sulla nuvola la distanza tra il punto rilevato e il punto identificato dal marker delle singole nuvole. Per questa operazione è stata eseguita la sezione in corrispondenza del punto in questione, effettuando misurazioni in vista prospettica, tra il punto rilevato e i punti vicini al target.

L'insieme di dati ottenuti, ha permesso inoltre di fare un paragone tra le coordinate dei punti rilevati sulle due nuvole, ottenendo una differenza media tra le due di 0.00 cm sull'asse Z e di 1-2 cm sull'asse X e Y. Da quest'ultimo dato sull'asse X e Y è stata eseguita un ulteriore analisi della densità delle singole nuvole con un valore di 11 cm tra due punti per quella generata con DJI TERRA e di 2.6 cm per quella generata con Agisoft Metashape.

L'ultima verifica eseguita è stata effettuata tramite il processo di confronto automatico tra le nuvole *Compute cloud/cloud distance*, comparando la nuvola meno densa generata con DJI TERRA alla nuvola di

riferimento generata con Agisoft Metashape. Da questa elaborazione è stato ricavato un istogramma nel quale si nota che gran parte dei punti delle due nuvole hanno distanze comprese tra 0.01 e 0.2 cm.

Sono state condotte analisi più dettagliate di cui una sulla sezione trasversale che comprende la facciata e la copertura e una sulla facciata del fabbricato stesso, per eseguire un confronto più dettagliato riguardo la ricostruzione tridimensionale dei due metodi utilizzati, analizzando i valori della rumorosità e della densità. In entrambi i casi sono stati riscontrati dei problemi di ricostruzione del modello tridimensionale, nelle superfici verticali dell'edificio e nelle parti più dettagliate come ad esempio il nodo tra gli infissi e il davanzale oppure tra superfici verticali e orizzontali in copertura. Nel caso del modello realizzato con il metodo 1, la rumorosità analizzata risulta meno evidente rispetto a quella del metodo 2. Questo permette quindi una migliore individuazione delle superfici planari, come nell'analisi con il software Cyclone 3DR, dimostrando che il riconoscimento automatico del programma, risulta molto accurato per quanto riguarda il modello tridimensionale del metodo 1 (Agisoft Metashape) e viceversa per il metodo 2 (DJI TERRA).

Infine, sulla base di tutte le analisi, sono state realizzate tre tabelle differenti di confronto dei due metodi: quella con valutazioni da 1 (poco soddisfatto) a 5 (molto soddisfatto) per la Tab.32, quella di analisi dei pro e contro in Tab.33 e infine l'analisi dei tempi di elaborazione e dei dati di entrambi i prodotti finali in Tab.34.

Tabella 32 Confronto tra Metodo 1 e Metodo 2 con voti da 1(poco soddisfatto) a 5 (molto soddisfatto)

	AGISOFT METASHAPE _ metodo 1		DJI TERRA _ metodo 2
TIPOLOGIE DI PRODOTTI ESPORTABILI	5		2
IMPOSTAZIONI DISPONIBILI	5		3
LIVELLI DI QUALITA' IMPOSTABILE	5		3
FACILITA' DI UTILIZZO	4		4
INTERFACCIA	4		4
FORMATI DI ESPORTAZIONE	5		4
TEMPI DI ELABORAZIONE DEI DATI	5		5
IMPOSTAZIONE DEL WORKFLOW	5		3
DENSITA' DELLA NUVOLA	5		1
DIMENSIONE FILE	2		5
ACCURATEZZA DELLA NUVOLA	5		5
RUMOROSITA' DELLA NUVOLA	4		2
QUALITA' DELL'ORTOMOSAICO	5		5
QUALITA' DEL DSM	5		5
IMPOSTAZIONI QUALITA' FILE	5		2
VALORI MEDI	5		4

Tabella 33 Pro e contro del Metodo 1 e Metodo 2

	AGISOFT METASHAPE _ metodo 1	DJI TERRA _ metodo 2
PRO	USER FRIENDLY	USER FRIENDLY
	QUALITA' DEL PRODOTTO	QUALITA' DEL PRODOTTO
	ACCURATEZZA	ACCURATEZZA
	DENSITA	DIMENSIONE DEI FILE
	ESECUZIONE ELABORAZIONI SINGOLARMENTE	VELOCITA' ELABORAZIONE
	IMPOSTAZIONI QUALITA' SULLE SINGOLE ELABORAZIONI	
	ELABORAZIONE SIMULTANEA FOTO CON COORDINATE GPS E NON	
	ESPORTAZIONI FILE DIVERSI FORMATI	
	IMPOSTAZIONI OUTPUT FILE	

CONTRO	VELOCITA' ELABORAZIONE	DENSITA'
	DIMENSIONI DEI FILE	ELABORAZIONE SIMULTANEA FOTO CON COORDINATE GPS E NON
		ESECUZIONE SINGOLE ELABORAZIONI
		IMPOSTAZIONE QUALITA' ELABORAZIONI

Tabella 34 Tempo di elaborazione e dati prodotti generati

	AGISOFT METASHAPE _ metodo 1		DJI TERRA _ metodo 2
TEMPO ALLINEAMENTO IMMAGINI	5 min e 18 secondi		8 min e 29 secondi
GENERAZIONE SPARSE CLOUD	9 min e 20 secondi		
GENERAZIONE DENSE CLOUD	13 min e 7 secondi		55 min
GENERAZIONE MESH TRIANGOLATA	7 min e 43 secondi		
GENERAZIONE TEXTURE	7 min e 59 secondi		
GENERAZIONE DSM	21 secondi		
GENERAZIONE ORTOMOSAICO	10 min e 59 secondi		
NUVOLA DI PUNTI	129'032'598		11'586'850
DENSITA' NUVOLA 1 mq	1687 punti		184 punti
DIMENSIONE FILE	3.8 GB		0.33 GB

Dall'insieme delle verifiche e delle analisi eseguite sui prodotti generati, nonostante la differenza dei processi di elaborazione, della densità e della rumorosità, il Metodo 1 (Agisoft Metashape) risulta quello che dà un prodotto con rumorosità bassa e densità alta, utile all'esecuzione di indagini o al monitoraggio della struttura. Inoltre grazie al rilievo aerofotogrammetrico, possono essere identificati dettagli come le variazioni di quota della superficie piana della copertura, particolare difficilmente individuabile durante l'ispezione della struttura.

In conclusione, l'impiego dei droni per le acquisizioni aeree, permette di effettuare rilievi a vasta scala di terreni e fabbricati e con l'integrazione di punti rilevati con il GPS/GNSS, di ottenere nuvole di punti dettagliate, dalle quali è possibile ricavare le coordinate dei punti appartenenti agli oggetti, di estrapolare ortofotopiani, di effettuare misure, di fare analisi della struttura o delle coperture e di realizzare disegni e carte topografiche.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare in primis i miei colleghi architetti *Mixers,* per avermi supportato e incoraggiato durante questo percorso e soprattutto la Professoressa Giulia Sammartano, il Professor Filiberto Chiabrando e Giacomo, guide fondamentali per questa ricerca.

Ringrazio tutti i miei compagni di università divisi tra Cuneo, Ferrara e Roma, che sono stati amici, insegnanti e compagni di avventure durante i 5 anni di università. Vorrei ringraziare in particolare Alberto, per avermi sopportato nelle infinite chiamate.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, Teo ed Eli e a mia sorella Desi, per avermi sempre sostenuto anche nei momenti più difficili e per tutto quello che hanno fatto per permettermi di inseguire i miei sogni.

L'ultimo ringraziamento va alla mia ragazza Giulia, che è stata sempre al mio fianco e non ha mai smesso di credere in me. Sei stata e sei il pilastro più importante che mi aiuta a raggiungere i miei obiettivi.

DEFINIZIONI

APR : Aeromobili a Pilotaggio Remoto

SAPR : Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto

MAV : Micro Aerial Vehicles

RPAS : Remotely Piloted Aircraft Systems

RPA : Remotely Piloted Aircraft

RPV : Remotely Piloted Vehicle

ROA : Remotely Operated Aircraft

UAS : Unmanned Aircraft Systems

UAV : Unmanned Aerial Vehicle

UVS : Unmanned Vehicle Systems

LIDAR : Light Detection and Ranging

GNSS : Global Navigation Satellite System

RTK : Real Time Kinematic

NRTK : Network Real Time Kinematic

DEM : Digital Elevation Model

DTM : Digital Terrain Model

ATP - Automatic Tie Points

Tie Points - Punti di legami

GCP - Ground Control Points

CP - Check Points

GIS - Geographic Information System

MTOM / MOD - Massa massima al decollo / Massa Operativa al Decollo

ATZ - Aerodrome Traffic Zone / Zona di Traffico Aeroportuale

CTR - Control Zone / Zona di Controllo

IFR - Instrument Flight Rules

NOTAM - NOtices To AirMen

VLOS - Visual Line of Sight

EVLOS - Extended VLOS

BVLOS - Beyond VLOS

WGS84 - World Geodetic System 1984

SfM - Structure from Motion

ENTI

ICAO - International Civil Aviation Organization / Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile

AESA / EASA - European Union Aviation Safety Agency / Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea

ENAC - Ente Nazionale per l'Aviazione Civile

ENAV - Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo

ANSV - L'Agenzia nazionale per la sicurezza del volo

IGM - Istituto Geografico Militare

JAA - Joint Aviation Authorities

EUROCNOTROL - European Organisation for the Safety of Air Navigation

NASA - National Aeronautics and Space Administration

FAA - Federal Aviation Administration

USDoD - Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America

BIBLIOGRAFIA

- Slama C.C., Theurer. C. and Hendrikson S.W. (1980) *Manual of Photogrammetry. Fourth Edition*, American Society of Photogrammetry

- Kraus K. (1994) *Fotogrammetria Vol. 1-Teoria e Applicazioni*, Libreria Universitaria Levrotto & Bella - Torino

- Gomarasca M. A. (2004) *Elementi di Geomatica*, Associazione Italiana di Rilevamento (AIT)

- Remondino F., Fraser C., (2006) D*igital camera calibration methods: considerations and comparisons*. IAPRS Volume XXXVI, Part 5

- Crippa M. A., Zanzottera F., Boemi M. F. (2008) *Le terre dei folli - 150 anni di fotografia aerea per conoscere e contenere il consumo del territorio*. Fondazione Nimphe Castello di Padernello e Acherdo Edizioni

- Gomarasca M. A. (2009) *Basics of Geomatics*, Springer, 2009

- Reg A. (2010) *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, Somerser*. Wiley

- Roggero M. (2013) *Tecniche fotogrammetriche per il rilievo*, POLITO

- Luhman T., Robson S., Kyle S., Boehm J. (2014) *Close-Range photogrammetry and 3D imaging*, 2nd edition, Walter de Gruiter GmbH, Berlin/Boston

- Gheisari, M., Irizarry, J. & Walker, B. N. (2014) *UAS4SAFETY: The Potential of Unmanned Aerial System for Construction Safety Applications.* Atlanta, GE, USA, ASCE (American Society of Civil Engineers), pp. 1801-1810

- Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri W. (2014) *Misure, rilievo, progetto per Costruzioni, ambiente e territorio*. Zanichelli, IV ed, Vol. III, modulo online, Unità T1

- Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. (2015) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles.* Dalamagkidis, Konstantinos. «Aviation History and Unmanned Flight» p 57-81. Springer Science+Business Media Dordrecht

- ENAC (2016) *Regolamento mezzi aerei a pilotaggio remoto.* Edizione 2 del 16 luglio 2015, Emendamento 2 del 22 dicembre 2016

- Robinson R. (2017) *Droni nel cielo, Storia degli aeromobili a pilotaggio remoto*. Tricase (LE): Youcanprint Self-Pubblishing

- Spanò A.T., (2017/2018) Dispense Workshop "*Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per il rilievo di Beni Culturali*", POLITO

- EASA (2019) *Regolamento di esecuzione 2019/947*

- ENAC (2020) *Regolamento Mezzi aerei a pilotaggio remoto - APR_Edizione 3_Emendamento 1 del 14/07/2020*

- ENAC (2021) *Regolamento UAS-IT Edizione 1 del 4 gennaio 2021*

- Tal D., Altschuld J. (2021) *Drone Technology in Architecture, Engineering, and Construction, A Strategic Guide to Unmanned Aerial Vehicle Operation and Implementation*. John Wiley & Sons Inc.

TESI

- Cortese G., Prof.ssa Spanò A. T., Prof. Tonolo F.G. (2019) - *Integrazione innovativa di termografia e fotogrammetria aeree da UAV per l'analisi del costruito storico*

- Bellini M.C., Prof. Tonolo F.G. e Prof.ssa Spanò A.T. (2020) *Il ruolo della Geomatica a supporto della valutazione dei danni al territorio a seguito di eventi alluvionali. Il caso dell'alluvione di Ottobre 2020 a Limone Piemonte (CN).*

DISPENSE

- Spanò A.T. (2009) *Dispense del Corso di Rilievo metrico 3D*. Politecnico di Torino - DINSE

- Chiabrando. F., Lingua. A., Aicardi I. (2020/2021) *Dispense corso Droni per il rilievo territoriale e architettonico*

ARTICOLI SU RIVISTA

- Roma: Istituto Poligrafico dello Stato (1934) *Rivista del Catasto e dei Servizi tecnici Erariali / Ministero delle finanze n. 1*

- Irizarry J., Gheisari M. & Walker B. (2012) *Usability assessment of drone technology as safety inspection tools. Journal of Information Technology in Construction (ITcon),* Volume 17, pp. 194-212

- Ferrante F.C., Garnero G. (2016) *I droni nelle applicazioni catastali: possibili impieghi*

- Istituto di Ricerche Internazionali Archivio Disarmo – IRIAD (2017) *Droni militari: proliferazione o controllo.* Rapporto di ricerca Istituto di Ricerche Internazionali IRIAD

- Gaspari F., Ioli F., Barbieri F., Belcore E., Pinto L. (2022) *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, vol. Xliii-b2-2022*, "Integration of UAV-LIDAR and UAV-Photogrammetry for infrastructure monitoring and bridge assessment"

ARTICOLI SCIENTIFICI

- Chiabrando F., De Bernardi M. L., Roggero M. (2010) *Impiego di aerei ultraleggeri e camere di medio formato per la fotogrammetria aerea a grande scala.* Bollettino della societa italiana di Fotogrammetria e Topografia

- Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. (2013) Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topografy: the structure from motion approach on coastal environments. Remote sensing 5, pp. 6880-6898

- Aicardi I., Nyapwere N., Nex F., Gerke M., Lingua A.M., Koeva M.N. (2016) *Co-registration of multitemporal uav image datasets for monitoring applications: a new approach*, ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, pp-757-763

ARTICOLI WEB

- Manyoky M., Theiler P., Steudler D., Eisenbeiss H. (2011) *Unmanned aerial vehicle in cadastral applications*

- De Rosa A. (2013) *Gli aeromobili militari a pilotaggio remoto: evoluzione normativa e prospettive*, Intervento svolto nel corso del Seminario di studi: "Cyber warfare ed operazioni con aeromobili a pilotaggio remoto: problematiche giuridiche", organizzato dal Gruppo Italiano dell'International Society for Military Law and the Law of War, il 30 ottobre 2013, presso il Centro Alti Studi per la Difesa di Roma. Colonnello C.C.r.n. (A.M.)

- Wa Ode Sifatu (2020) *Binary Oppostion of Levi-Strauss in The World's First Kite (Kaghati Roo Kolope) on Community in District of Muna_* 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Harare, Zimbabwe

- Centro Studi Martino Martini (2021) *Kites-Aquiloni e Culture in Volo Tra Arte e Scienza, Mostra fotografica.* Pitture rupestri nell'Isola di Muna

- Manuale Agisoft Metashape 2.0 (2023)

SITI WEB

www.4mydrone.com/it/

www.uvs-international.org/

www.enac.gov.it

www.dji.it

www.gopro.it

www.canon.it

www.sony.it

https://en.wikipedia.org

https://www.google.it/maps/preview

http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=mappa

https://www.bpp.it

https://students.com/

https://droneii.com/infographics

www.d-flight.it

www.easa.europa.eu

www.enac.gov.it

www.icao.int

www.yuneec.com

www.horusdynamics.com

https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011

https://www.rc-zeppelin.com/dslr-aerial-photography-systems.html

http://fiducialmark.blogspot.com/2009/03/photogrammetry-meets-kite-aerial.html

https://blog.manawa.com/en/outdoor-activities/paragliding/paragliding-vs-hang-gliding-which-one-is-really-dominating-the-skies/

https://mugellogliding.aero/come-vola-un-aliante/

https://forum.flitetest.com/index.php?threads/cylinder-plane.15822/#lg=post-168827&slide=0

https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16967/1/CD- 3074.pdf

https://it.wikipedia.org/wiki/Paramotore#/media/File:Decollo_paramotore.jpg

https://www.sensefly.com/drone/ebee-x-fixed-wing-drone/

https://www.miniplanes.fr/fpv100-walkera-devo-f4-mode2

https://zerozero.tech/

https://www.hglrc.com/collections/fpv-racing-drone

https://www.quadricottero.com/2014/08/in-arrivo-i-nuovi-droni-multirotori.html

https://www.researchgate.net/figure/Aircraft-balance-of-forces-in-cruise_fig1_317401929

https://www.airsardiniavirtual.it/wp_alivirtuali/Airsardinia%20Academy/navigazione/lezioni/le-superfici-mobili/

http://www.ailf.com.cn/product_detail_en_793075.htm

https://fulldrone.com/should-i-buy-the-mavic-air/

https://matricepilots.com/threads/dji-pilot-margin.25217/

https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture

www.droneii.com

SOFTWARE

- AGISOFT METASHAPE 1.7.0
- DJI TERRA 3.0.0
- ConveRgo_ge
- Adobe Photoshop Lightroom Classic
- Cloud Compare
- DJI GO
- DJI PILOT
- PIX4D
- CYCLONE 3DR
- QGIS