

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**

*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Tecniche e Gestione dell'Edilizia del Territorio

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Tesi di laurea

**SAPR e gestione sostenibile del territorio:  
dai rilievi aerei alle elaborazioni  
fotogrammetriche**

Relatore: Prof. Salvatore Pappalardo

Laureando: Luca Gaspari



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA





## Abstract

La fotogrammetria aerea rappresenta un insieme di tecniche e metodologie fondamentali per l'acquisizione e l'analisi di dati geospaziali in vari settori. Questa tesi si propone di esplorare l'evoluzione, le applicazioni moderne e le sfide associate all'utilizzo di dati telerilevati di "prossimità" in ambito civile, edile ed ambientale. L'obiettivo principale di questo studio è fornire una panoramica completa sull'utilizzo crescente degli *Unmanned Aerial Systems* (UAS) con particolare attenzione agli strumenti ed alle metodologie utilizzate per rilievi in ambito urbano e edilizio, in particolare UAS "inoffensivi" – ossia di massa complessiva inferiore ai 250 g - e software di elaborazione dei dati fotogrammetrici, evidenziandone le caratteristiche e le applicazioni pratiche. La ricerca si basa sull'esperienza diretta acquisita durante il percorso di tirocinio formativo nel settore. Per l'acquisizione di dati è stato impiegato un UAS "inoffensivo" (DJI Mini 3 Pro); per l'elaborazione fotogrammetrica dei dati è stato testato il software X-Pad Office Fusion. La tesi illustra, con esempi pratici, la funzionalità e l'efficacia delle moderne tecnologie UAS, evidenziando come consentano il rilevamento e la rappresentazione sia su scala edificio che su quella territoriale. Questo può consentire ai tecnici del settore di aumentare l'efficienza dell'acquisizione di dati sul campo, di incrementare la sostenibilità territoriale e di fornire strumenti innovativi per la pianificazione e la gestione del territorio.



# INDICE

1 – Introduzione .....	5
1A – Aerofotogrammetria: storia e sviluppo tecnologico .....	5
1B - Strumenti .....	7
1B.1 - Il concetto di Digital Earth .....	8
1B.2 - I Sistemi a Pilotaggio Remoto (SAPR) .....	9
1B.3 - I sensori fotografici.....	11
1C - Ambiti di utilizzo e opportunità .....	12
1D – Rilievi aerei con UAS: il Regolamento europeo EASA.....	17
2- Materiali, strumenti e metodi.....	21
2A - Materiali .....	21
2B - Obiettivi.....	21
2C – SAPR per il rilievo aereo: caratteristiche e operazioni di volo .....	22
2D – Rilievo SAPR: metodologia e flusso di lavoro .....	26
2E – Software per elaborazioni fotogrammetriche: X-Pad Office Fusion.....	30
3 - Risultati.....	35
3A - Contesto e premesse.....	35
3B - Caso studio 1 .....	36
3C - Caso studio 2 .....	40
3D - Discussione .....	44
4 - Conclusioni.....	47
Bibliografia .....	49
Sitografia.....	51



# 1 – Introduzione

## 1A – Aerofotogrammetria: storia e sviluppo tecnologico

Nel contesto della storia delle scienze geodetiche e topografiche, Umberto Nistri emerge come figura di spicco nell'aerofotogrammetria, una disciplina estremamente utile nell'ambito delle rilevazioni geospaziali. I suoi studi, lavori e innovazioni hanno lasciato un segno importante nella storia dell'ingegneria topografica e più in generale nella storia delle innovazioni provenienti dal genio italiano, contribuendo alla diffusione e condivisione delle conoscenze sulle metodologie di rilevamento aereo. Il periodo storico in cui questo innovatore ha vissuto ed espresso il suo genio è stato oggetto di profondi cambiamenti tecnologici e militari, e una delle grandi cause può essere ritenuta la Prima Guerra Mondiale. Spesso l'essere umano dimostra la propria inventiva e il proprio estro nelle occasioni che più lo mettono alle strette, e a volte anche negli scenari più tragici. Ed è proprio in questo scenario che Nistri riuscì a ritagliarsi un ruolo fondamentale come fotografo osservatore all'interno della 35° squadriglia aerea, un'occasione che ha sicuramente portato il giovane italiano ad interessarsi ed esplorare le potenzialità delle immagini aeree per scopi di rilevamento topografico. Segno del destino è sicuramente il luogo di nascita di Nistri, nato infatti a Roma, non distante da Monte Mario, sede dell'osservatorio astronomico e allora sede della sezione fotografica e degli aerostieri del battaglione specialisti del genio militare. A causa della poca disponibilità economica della famiglia non ebbe la possibilità di continuare gli studi oltre il diploma, decise quindi di intraprendere la carriera militare arruolandosi e prendendo parte alla Prima Guerra Mondiale all'interno del reparto di artiglieria. L'anno che cambiò il corso della sua vita fu il 1917, quando decise di trasferirsi in Aeronautica come osservatore aereo e fotografo delle linee nemiche, ricordando che, già un decennio prima era nata una sezione speciale del Genio militare che aveva il compito di scattare foto dall'alto per localizzare le linee nemiche. Il rischio di perdere la vita era altissimo, e Nistri non era ancora a conoscenza della possibilità di rilevare e fare misurazioni dalle foto scattate. Già nei primi decenni del XIX secolo cominciarono a svilupparsi e crearsi i primi prototipi di strumenti in grado di creare rilievi topografici da fotografie, fino ad ottenere, qualche anno dopo la fine del conflitto mondiale, il "dispositivo per ottenere mappe topografiche da fotografie stereoscopiche aeree". Tale strumento, brevettato proprio da Nistri, diede vita ad una nuova era nella cartografia e nella topografia.

Precedentemente si è fatto riferimento ai primi strumenti in grado di rilevare topograficamente da foto che cominciarono a presentarsi nei primi anni del '900 e per i quali Edoardo De Orel è ritenuto tra i più grandi studiosi del tempo in nozioni ottiche, meccaniche e chimiche necessarie per la fotogrammetria. A lui si deve la creazione dello strumento “*Stereoautograph von Orel-Zeiss*”, che permetteva di misurare e restituire dei dati plano-altimetrici in modo continuo. Questo strumento permise di avvicinarsi ulteriormente alla fotogrammetria moderna, poiché rendeva possibile tracciare planimetrie e curve di livello; i dispositivi precedenti furono così superati. Inoltre, bisogna ringraziare l'ufficiale di marina austriaca per l'introduzione del “parallelogramma di Zeiss” il quale fu un'importante innovazione per i dispositivi analogici di fotogrammetria successivi, in quanto permetteva di restituire immagini oblique rispetto alla base di acquisizione. Così si potevano restituire i punti di interesse con precisione e senza che la geometria delle immagini influisse. Come descritto nelle precedenti righe, durante la Prima Guerra Mondiale, la fotogrammetria è cresciuta e si è sviluppata in maniera significativa, portando sia vantaggi che criticità. Sicuramente l'evoluzione delle scienze che studiano questo particolare argomento ha avuto in quegli anni una forte accelerazione, spinta dalla ricerca delle massime precisioni e dalla minimizzazione dei rischi e degli svantaggi. All'epoca uno dei vantaggi riconosciuti era quello del miglioramento delle mappe. Durante il conflitto, la necessità di mappe accurate era fondamentale per preparare e pianificare le operazioni militari sia di terra che navali. La fotogrammetria, in questo caso, ha permesso di creare mappe più dettagliate rispetto ai metodi tradizionali, con la possibilità di interpretare meglio il terreno di combattimento. Al tempo si era già scoperto un vantaggio che ancora oggi si invidia alla fotogrammetria, ovvero la riduzione del tempo e delle energie. Si potevano infatti raccogliere dati topografici in modo rapido ed efficiente rispetto agli altri metodi utilizzati, i quali si basavano su misurazioni dirette in campo, permettendo una produzione grafica veloce e allo stesso tempo precisa, fornendo così vantaggi tattici notevoli. Sul piano della sicurezza, è sicuramente comprensibile che una ripresa aerea è preferibile ad una in campo, a maggior ragione in territorio di conflitto, anche se il rischio era comunque estremamente alto a causa della poca innovazione dei mezzi aerei. Uno degli ultimi vantaggi è stato che, data la necessità e il bisogno di essere un passo avanti rispetto al nemico, lo sviluppo tecnologico fu molto intenso proprio in quegli anni, creando una solida base per le scoperte e le invenzioni degli anni seguenti. Tra gli aspetti negativi si può immaginare che, essendo la fotogrammetria una materia completamente nuova, lo studio e la comprensione di essa erano di complessità elevata e necessitavano di uno studio specifico per ogni suo dettaglio. I costi al tempo non erano sicuramente alla portata di tutti e solo un piccolo



numero di persone poteva avere la possibilità di studiare e informarsi sull'argomento, per un motivo di acquisto e mantenimento delle strumentazioni fotogrammetriche. Queste ultime, nonostante i notevoli progressi, avevano comunque delle evidenti limitazioni per quanto riguarda, ad esempio, la possibilità di rilevare il terreno con cieli coperti o con le ombre. Uno degli ultimi problemi poteva essere la corretta interpretazione delle foto e delle immagini scattate, infatti, veniva richiesto un addestramento specifico, e la cattiva interpretazione di esse poteva causare errori quando si volevano riportare dati o informazioni topografiche a chi le richiedeva.

Nonostante tutto, la fotogrammetria ha dimostrato, nel corso della Prima Guerra Mondiale e ancora oggi, che la sua evoluzione è destinata a proseguire, e che diventa sempre più disciplina utile ed essenziale in ambiti quali topografia, cartografia, urbanistica, geologia, architettura ed ingegneria.

## 1B - Strumenti

Come spiegato precedentemente, la nascita della fotogrammetria può essere collocata nei primi anni del XIX secolo, periodo in cui aveva uno scopo unicamente militare. La fotografia, d'altra parte, era già conosciuta dal pubblico nel secolo precedente, con uno sviluppo e un'origine ottocentesca. Le prime foto aeree venivano scattate da accovacciati con fotocamere durante il volo. Inizialmente, i primi strumenti in grado di acquisire ciò che l'operatore vedeva al momento, proiettavano un'immagine invertita su una superficie (non permanente), successivamente si è riusciti a stampare le immagini su lastre di vetro, rendendole permanenti. Purtroppo, i tempi di esposizione erano molto lunghi e queste lastre non erano nemmeno trasportabili. Con il passare degli anni, la scienza ha permesso di ottenere fotocamere sempre più all'avanguardia, trasportabili ed accessibili, fino ad arrivare a quelle dei giorni nostri capaci di offrire livelli elevati di qualità d'immagine a prezzi ridotti e a dimensioni più contenute. Questa premessa è fondamentale per comprendere che l'evoluzione dei droni procede di pari passo con le scoperte e le evoluzioni in campo fotografico e sensoristico, senza contare le discipline che si occupano di studiare la possibilità di aumentare la durata delle batterie che li alimentano riducendone lo spazio che occupano e consentendo quindi di avere droni di piccole dimensioni con elevate capacità fotografiche.

## 1B.1 - Il concetto di Digital Earth

Il concetto di Digital Earth trova un solido appoggio nell'aerofotogrammetria, la quale mira a rappresentare digitalmente il nostro pianeta in modo accurato, utilizzando dati geospaziali e informazioni geografiche all'interno di ambienti virtuali che permettono l'esplorazione e l'interrogazione dei nostri modelli digitali. Le radici di questo concetto risalgono agli anni '90, quando il presidente americano Al Gore iniziò a diffondere l'idea di una infrastruttura globale di informazioni per la fruizione di dati e informazioni ambientali. Gli obiettivi principali del Digital Earth sono di creare una rappresentazione digitale globale del pianeta, integrando dati da fonti satellitari, rilevamenti aerei e dati demografici. Esso si propone di garantire un accesso universale e di utilizzarlo come strumento di monitoraggio e analisi in ambito climatico, geologico, ambientale, supportando svariati settori per sostenere e conservare l'ambiente. Tuttavia, gli ostacoli alla diffusione globale sono di natura prevalentemente etica, legati alla sicurezza e alla privacy delle informazioni personali, all'accesso universale, alle comunità con risorse limitate, alla definizione di standard comuni per la raccolta dati e all'impatto ambientale dell'utilizzo del Digital Earth. Il concetto è sicuramente ambizioso, ma può migliorare la comprensione e la gestione del pianeta Terra da parte dell'essere umano, attraverso l'utilizzo di strumenti sempre più innovativi. Negli ultimi decenni il mercato dei SAPR ha avuto una grandissima esplosione non solo per quanto riguarda un loro utilizzo in campo militare e bellico, ma anche in campo commerciale e per attività ricreative. Un report redatto in collaborazione con Good Drone Lab presso l'Università di San Diego mira a comprendere qual è l'utilizzo prevalente dei droni, chi ne fa maggior uso e le zone del globo terrestre in cui è più diffuso. Vengono individuate sette categorie di utilizzatori: Organizzazioni Internazionali (organizzazioni che condividono responsabilità per tutti gli stati che ne fanno parte, Nazioni Unite), Governi (Istituzioni Statali), Business (Società private che generano profitti, Studi Tecnici), Accademie & Scienze (Scuole, Università), Gruppi Sociali Civili, Utenti Privati (chi ne fa uso prevalentemente ludico) e Utenti non Riconosciuti. I campi di utilizzo identificati in questo report sono quindici, ma è importante considerare che, con l'evoluzione tecnologica, questo numero potrebbe essere aumentato ancora. I droni possono essere utilizzati in una quantità di settori veramente ampia, come l'utilizzo personale, agricoltura, arte e intrattenimento, commercio, servizi di emergenza o disastri climatici, giornalismo, salute e pubblica Sicurezza, azioni collettive, sorveglianza, ricerche scientifiche, conservazione dell'ambiente e della fauna, contrasto alla criminalità, militare, polizia e molto altro. Questa

diversità di utilizzi sottolinea l'importanza del Digital Earth nell'unire e rendere accessibili dati e informazioni provenienti da diversi livelli e settori.

## 1B.2 - I Sistemi a Pilotaggio Remoto (SAPR)

Elementi fondamentali per ottenere risultati metricamente corretti sono i valori di GSD e GCP. La sigla GSD (*Ground Sample Distance*) si presenta in applicazioni di rilevamento topografico, cartografia, monitoraggio ambientale e geologia. La traduzione italiana della sigla è “distanza campionaria al suolo”, ed è uno dei concetti fondamentali in fotogrammetria e imaging remoto, e rappresenta la dimensione reale di un pixel di un'immagine rispetto alla superficie terrestre. Può quindi essere considerato valore critico, perché influenza direttamente la risoluzione dell'immagine e ci permette di catturare i dettagli più piccoli. Esso è influenzabile da vari fattori legati alle caratteristiche della fotocamera quali le dimensioni del sensore, la lunghezza focale dell'obiettivo, l'angolo di visione o anche la semplice distanza tra sensore e/o fotocamera dal nostro soggetto. Va da sé che, se l'intenzione è quella di avere un GSD piccolo per poter vedere e analizzare dettagli piccoli della nostra immagine uno dei primi dati da modificare è quello della distanza da ciò che si vuole rilevare. Come già detto, il *Ground Sample Distance* è un parametro fondamentale della fotogrammetria e la sua scelta dipende dalle proprietà della macchina fotografica, della sua distanza dal soggetto, ma anche dalle decisioni che può prendere l'operatore, dalle direttive provenienti da chi commissiona il lavoro, oppure dal fattore di scala del prodotto finale che si vuole ottenere. Il valore di questo parametro è molto spesso definito dal committente che affida un determinato lavoro di aerofotogrammetria, quindi, è una delle prime cose definite e conosciute. Quando invece non se ne è a conoscenza, è compito dell'operatore fare una serie di pensieri e scelte che permettano di svolgere un lavoro sostenibile e con un rapporto qualità/prezzo adeguato, in un contesto di completa sicurezza e nel rispetto delle normative (per un rilievo di terreni coltivabili, non avrà senso avere un GSD minore di 1 cm per pixel o più, perché non c'è interesse nell'individuare o misurare sulle foto o sul modello tridimensionale eventuali ciottoli di piccole dimensioni presenti all'interno dell'oggetto del rilievo). Gli altri elementi che permettono di rendere il lavoro aerofotogrammetrico metricamente corretto e sufficientemente utilizzabile e fedele al reale sono i GCP, *Ground Control Point* che sono punti d'appoggio (riferimento) utili a collegare il rilievo di cui fanno parte, alla parte fotogrammetrica, e ad ottenere dati geometrici corretti. Materialmente sono punti al centro di marker fisici cromaticamente ben visibili, appoggiati e fissati sulla superficie di nostro interesse, la loro distribuzione nello spazio

tridimensionale può essere d'aiuto, per aumentare la qualità del risultato finale. Vi è un continuo studio sul colore e sul posizionamento, così da fare in modo che gli operatori che li utilizzano riescano ad ottenere i migliori risultati possibili. I GCP devono essere distribuiti in maniera omogenea nell'area oggetto di rilievo, devono essere collocati in punti strategici (e.g. dove abbiamo una differenza di quota elevata, dove non ci sono ostacoli) e infine sceglierne una quantità sufficiente. Tali punti di interesse dopo essere stati individuati vengono misurati con i vari tipi di strumentazione per il rilevamento topografico che l'operatore sceglie di utilizzare (stazione GNSS, stazione totale), questo è uno dei processi più importanti perché una cattiva misurazione influisce notevolmente sul prodotto finale. Sono stati utilizzati vari termini per chiamare quei dispositivi che permettono all'essere umano, anche con poche conoscenze di volo, di poter avere una visione aerea di qualsiasi elemento di suo interesse. Comunemente vengono chiamati droni, ma, attualmente, ci sono varie terminologie che indentificano questo genere di dispositivi volanti.

- APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto)
- SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto)
- UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)
- UAS (*Unmanned Aerial Systems*)

Le caratteristiche di ogni UAV possono variare, inclusi fattori come batterie, peso e tipologia di fotocamera. La distinzione principale che si fa tra uno e l'altro riguarda il tipo di sistema di volo che possiedono, suddivisi in tre: multi-rotori, ala fissa, droni ibridi. I multi-rotori, sono tra i più diffusi e hanno la caratteristica di avere dei rotori a raggiera (da 3 a 8) che permettono all'UAV di stazionare in un punto ad una determinata quota (ad esempio per variare l'angolo di ripresa). Altri vantaggi nell'utilizzare questa tipologia di droni sono quelli di avere una grande capacità di trasporto pesi (10 Kg) e la facilità di decollo, sia considerando la poca manualità da parte dell'operatore, sia il poco spazio necessario. Anche la possibilità di essere guidato da chiunque, grazie all'estrema facilità di pilotaggio, e la possibilità di svolgere voli che hanno uno sviluppo prevalentemente verticale (pareti rocciose), può essere considerata una caratteristica interessante e facilmente sfruttabile. Tra i peggiori svantaggi si trovano sicuramente le difficoltà legate all'autonomia di volo piuttosto limitata (10-30 minuti) che però con il continuo progresso delle tecnologie e con il passare degli anni può essere via via aumentata. I droni ad ala fissa hanno come grandissimo punto di forza la possibilità, dato il

loro peso ridotto, di avere un'autonomia di volo molto più grande dei multi-rotore (più del doppio, in alcuni casi), questo è dovuto anche alla loro grande aerodinamicità che permette loro di svolgere voli ad alte velocità mantenendo comunque una qualità delle immagini scattate elevata. Come principali svantaggi possiamo citare la necessità di decollare orizzontalmente, la scarsa possibilità di carico e l'impossibilità di poter stare in hovering (stazionare in aria). Infine, negli ultimi anni, anche se la loro diffusione è in via di sviluppo e non sono ancora molto conosciuti, ci sono gli UAV che combinano le caratteristiche di uno e dell'altro (ala fissa, multi-rotore) e sono quelli ibridi, i quali cercano di coniugare i vantaggi di entrambi. Nelle normative solitamente non vengono fatte delle suddivisioni tra i droni in base alla loro forma o al tipo di sistema di volo, ma in base alla portata in kg del carico che sono in grado di trasportare (*Payload*).

### 1B.3 - I sensori fotografici

Le nuove tecnologie, come l'intelligenza artificiale e la fotografia computazionale, stanno scrivendo il futuro della fotografia rendendola sempre più accessibile e creativa. Uno dei componenti fondamentali delle fotocamere digitali è sicuramente il sensore fotografico, un dispositivo elettronico in grado di acquisire l'immagine desiderata attraverso l'obiettivo della fotocamera, utilizzando la luce esterna come segnale elettronico elaborabile per generare la fotografia digitale. Rispetto all'essere umano, possiamo pensare di paragonare il sensore fotografico come il nostro organo visivo, ovvero l'occhio. I sensori più utilizzati e comuni: sensori CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) e sensori CCD (*Charge-Coupled Device*). Tra i due non c'è molta differenza; entrambi funzionano in modo simile, le parti in cui differiscono riguardano principalmente la tecnologia di accumulo della carica elettrica. I sensori CCD offrono ottimi livelli di qualità d'immagine e migliore sensibilità alla luce in condizioni di scarsa illuminazione, ma la loro produzione ha costo elevato e consuma molta energia. Al contrario, i CMOS sono più diffusi sia per le fotocamere digitali che per gli smartphone e offrono un numero di pixel (elementi fotosensibili) che acquisiscono la luce e generano una carica elettrica (come i sensori precedenti) proporzionale all'intensità della luce stessa. La fotocamera deve convertire i segnali digitali generati dalle cariche elettriche nell'immagine finale. Sicuramente, il tipo di sensore influenza la qualità delle immagini, ma è altrettanto importante riconoscere che le dimensioni e le risoluzioni di un determinato sensore hanno un ruolo cruciale. Gli sviluppi tecnologici in continuo progresso introducono

caratteristiche come la stabilizzazione dell'immagine o la riduzione del rumore, consentendo agli operatori di ottenere risultati sempre migliori.

## 1C - Ambiti di utilizzo e opportunità

Come già discusso, l'utilizzo dell'aerofotogrammetria nasce e trova il suo primo utilizzo nei primi anni del Novecento in ambito principalmente militare. Se ci riferiamo all'aerofotogrammetria da droni si apre un mondo in gran parte inesplorato o perlomeno ancora poco conosciuto al grande pubblico, ma che lascia senza parole per le infinite possibilità di utilizzo, eccone alcune:

- Ricerche Scientifiche;
- Ambiente e Conservazione della Fauna Selvatica;
- Commercio;
- Personale;
- Forze dell'ordine;
- Servizi di Emergenza e Calamità Naturali;
- Salute e Pubblica Sicurezza;
- Sorveglianza;
- Giornalismo;
- Militare;
- Arte e Intrattenimento;
- Movimenti e Rappresentanze Sociali;

Il campo delle ricerche scientifiche ha l'uso più diffuso e viene riferito a tutte quelle azioni svolte in campo accademico che comprendono sia l'ambito di ricerca e studio di fenomeni del mondo naturale, che la ricerca di sviluppo degli UAS e lo studio delle metodologie di rilievo tridimensionale, ma anche per puri scopi di insegnamento e diffusione di informazioni alle nuove generazioni di studenti. Uno degli altri utilizzi più diffusi è sicuramente quello che tratta la protezione dell'ambiente e dell'ecosistema, e del monitoraggio nel tempo dei processi naturali, riferito a queste tematiche di grande aiuto è stata la continua sensibilizzazione delle autorità riguardo i cambiamenti climatici che influiscono non solo nella distruzione dell'ambiente che ci circonda, ma anche nella conservazione della fauna selvatica che si riduce a causa di eventi catastrofici o attività umane non correttamente regolate. Per quanto possa

essere interessante e innovativo il mondo degli UAS, le loro molteplici possibilità di utilizzo, è anche il caso di inserire un pensiero di carattere etico generale; l'essere umano sta affrontando un periodo storico dove le scoperte tecnologiche non si prefissano come solo scopo quello di aiutare i lavoratori nello svolgere le proprie mansioni, ma spesso sostituiscono il personale, che si trova a far fronte o ad un cambio lavoro o ad uno studio o ad un processo di istruzione legato alla gestione delle nuove tecnologie. Questo può essere, ad esempio, il caso di droni utilizzati nell'ambito delle attività commerciali che possono trovare grandissimo utilizzo nell'immediato futuro, sia per quanto riguarda i lavori manifatturieri che per i servizi di delivery. Amazon e altre compagnie di "*packing delivery*" in questi anni hanno testato vari droni che svolgono propri questi servizi (Amazon, ad esempio, ha individuato il 2024 come anno di inizio per le consegne con UAS). Per quanto riguarda i droni utilizzati nella categoria di uso personale e hobbistico, troviamo che si posizionano al quarto posto per diffusione e continueranno ad aumentare nel futuro grazie alla possibilità di avere a prezzi accessibili i droni "*consumer*" tecnologicamente avanzati e facilmente manovrabili, provenienti dalle compagnie prevalentemente asiatiche, come DJI. Bisogna fare attenzione che gli UAS non vanno intesi come i soli mezzi volanti senza equipaggio e facilmente manovrabili da terra (le tipologie elencate al paragrafo precedente sono riferite a droni utilizzati per aerofotogrammetria), sono diffusi anche droni che lavorano su terra e subacquei. Proprio queste tipologie di UAS vengono utilizzate negli ambiti di servizi di emergenza e catastrofi climatiche e dalle forze dell'ordine. Gli esempi sono i più disparati; questi dispositivi possono essere utilizzati per semplici scatti fotografici durante scene del crimine, a casi di massima allerta terroristica, alla ricerca, ricognizione e riconoscimento di ostaggi. Nel caso dei servizi di emergenza risultano fondamentali nella ricerca di feriti e dispersi in luoghi non raggiungibili per l'essere umano. In questi precisi campi è opportuno ricordare ancora una volta come i progressi tecnologici, sia per gli UAS, che per la sensoristica svolgano un ruolo importante e permettano uno sviluppo e una diffusione negli utilizzi sempre maggiore (sensori termici in grado di individuare e rilevare in maniera più tempestiva il calore umano rispetto l'ambiente). Ad esempio, gli UAS vengono sempre più considerati per affrontare sfide di trasporto di beni medici, rifornimenti di sangue in caso d'emergenza, vaccini, medicinali comuni, talvolta persino organi, in particolare quando si tratta di voli che coprono il chilometro e mezzo. La sfida degli ultimi anni (parzialmente vinta) è stata sicuramente quella di dimostrare che il drone è in grado di completare senza intoppi il volo, presentando però dei problemi riguardo la sua integrazione all'interno dei sistemi sanitari e la sua sostenibilità a lungo termine. La sfida futura sarà indubbiamente quella di integrare questi strumenti nei vari sistemi sanitari e farne un utilizzo su grande scala. L'azienda Matternet

ha fatto vari test in Svizzera, prima di trasportare regolarmente campioni di laboratorio all'interno del proprio sistema sanitario (Carolina del Nord), dopo anni di prova anche Wing di Alphabet consegnerà con UAV farmaci da banco. Questa serie di progetti porta con sé, anche dei problemi per quanto riguarda la diffusione e pubblicazione delle decisioni prese per integrare gli UAV nei sistemi sanitari esistenti e dell'impatto che possono avere su di essi. Questi progetti cercano di diffondere e condividere informazioni a riguardo, però le risorse riguardo l'attivazione di questi progetti di consegna, sono poche e nessuna valuta l'impatto e la vera e propria fattibilità dell'aggiunta di questa innovazione in un sistema sanitario generale. Se si vuole andare più a fondo, si scopre che, una delle prime difficoltà, come qualsiasi nuovo prodotto, è quella di inserirlo in un sistema sanitario causando un sovraccarico della forza lavoro sanitaria; vi è poi il problema riguardo ai costi di gestione (ancora sconosciuti). Essi dipendono infatti da distanza di volo e quantità di peso e presentano un ostacolo rispetto ai costi di gestione logistica tradizionale che tengono conto di vari fattori. Un rapporto (2019) costi-benefici per chi utilizza l'APR, non tiene conto ancora del personale e dei costi opportunità. Quindi, la prossima sfida sarà quella di trovare il corretto equilibrio a livello normativo tra le molteplici istituzioni che operano nei settori pubblici e privati.

A livello archeologico l'utilizzo dei droni non è sconosciuto, uno dei vantaggi più conosciuti è quello di far volare l'UAS a quote elevate e differenti, con vari tipi di sensori e scattare immagini "aeree" per avere una documentazione archeologica estremamente dettagliata e di alta qualità. I dati che si possono estrapolare dagli UAS poi, possono aver una bontà metrica molto vantaggiosa, 1-2 cm/pixel contro i circa 40 cm/pixel delle foto ad alta risoluzione scattate dal satellite. In questo ambito bisogna sempre tenere conto ciò che si vuole ottenere e fare una riflessione sul fatto che, a degli scatti fatti ad altissima risoluzione, non corrisponde un modello tridimensionale perfetto, perché magari la geometria delle prese/sovrapposizioni non sono state fatte correttamente influenzando così la correttezza metrica del prodotto finale. Interessanti saranno i risultati di test con il compito di evidenziare le differenze nell'utilizzare diverse tipologie di sensoristica, tra cui le camere sferiche che all'interno di spazi stretti e difficili da raggiungere, hanno la capacità di poter ridurre il numero di immagini da acquisire grazie al loro campo visivo di 360°, avendo però problemi di non uniformità per quanto riguarda la precisione sul campo (GSD). Sarà estremamente complicato, ma allo stesso tempo interessante e utile, trovare le differenze e i vantaggi fra i vari sensori, valutarne l'utilità, migliorare e azzerare, se possibile, le problematiche dei sensori ottici sferici e in aggiunta provare a fare



delle sperimentazioni non più fotogrammetriche, bensì “videogrammetriche” con drone. Dal 2007 si sono fatti passi da giganti e se ne continueranno a fare, sia per la continua evoluzione in campo tecnologico per quanto riguarda gli UAS e i dispositivi a loro collegati (sensori, batterie ...), sia per quanto riguarda l’ambito aerofotogrammetrico nei siti archeologici che per qualsiasi altro ambito, vi è stato un grandissimo sviluppo per quanto riguarda la durata delle batterie che al giorno d’oggi ci permettono di sorvolare porzioni di territorio piuttosto ampie in maniera completa. Oggi abbiamo anche la possibilità di fare una programmazione del volo direttamente in studio e ridurre il più possibile i tempi del rilievo, riuscendo a mantenere sia l’UAS che gli altri valori chiamati in causa (ad esempio GSD e altezza di volo), stabili; nel campo archeologico ora è utilzzatissimo uno strumento come il laser scanner che potenzialmente può lavorare assieme alla aerofotogrammetria per ottenere un risultato ancor più corretto e completo, con costi e tempi sempre più ridotti. I campi di utilizzo degli UAS sono moltissimi, grazie alla loro facilità di impiego, vari articoli parlano dell’uso di queste innovazioni nell’agricoltura di precisione, in Italia si prende molto spunto dai modelli americani che hanno come obiettivo principale quello di migliorare la gestione dei terreni agricoli utilizzando processi, tecnologie e approcci operativi che rientrano nell’agricoltura di precisione. La definizione di questo ultimo termine mette in risalto l’automazione della gestione di porzioni di terreno e territorio attraverso tecnologie informatiche e pratiche agronomiche, viene evidenziata la capacità di gestire in maniera automatica varie aspetti specifici del terreno, adattando e scegliendo operazioni agricole specifiche, migliori per le caratteristiche del terreno. Nell’ articolo troviamo che il lavoro di monitoraggio risulta essere fondamentale e chiave suddiviso in ambientale, operativo e colturale, riconoscendo le difficoltà che si incontrano soprattutto per quanto riguarda il monitoraggio colturale tramite tecnologie di rilevamento tradizionali, come ad esempio la bassa risoluzione spaziale e temporale dei dati provenienti da satelliti o aerei che influisce negativamente nel monitoraggio soprattutto per quanto riguarda la visione dettagliata delle colture. E proprio qui l’utilizzo dei droni viene in grande aiuto, perché offrono una grande flessibilità, tempestività, alta risoluzione spaziale, capacità di carico di diverse tipologie di sensori, camere multispettrali, iperspettrali, termiche e laser scanner. Le difficoltà nel loro utilizzo soprattutto in Italia, sono legate alla scarsa durata delle batterie, l’utilizzo di sensori di alta qualità, la conformità alle normative dell’ENAC, il necessario sviluppo dei software di gestione dati e la stretta collaborazione tra i professionisti agricoli che sono in grado di interpretare correttamente i dati e indirizzare e suggerire la strada da percorrere per fornire indicazioni ottimali di gestione delle coltivazioni.

A livello paesaggistico si vuole citare il progetto FoGLIE (*Fruition of Goods Landscape in Interactive Environment*) che mira a valorizzare il patrimonio artistico e ambientale della regione Lombardia attraverso un approccio innovativo tra tecnologie avanzate e partecipazione attiva della comunità, con principale finalità la trasformazione di fruizione dei beni culturali in un'esperienza interattiva e collaborativa. Il progetto punta a siti di interesse distribuiti in modo eterogeneo nel territorio, spesso difficilmente accessibili come cascate remote e aree soggette a cambiamenti significativi nell'arco degli anni, e poi proporre un sistema audiovisuale di guida multimediale con video, rendering 3D, riprese ad alta risoluzione e realtà virtuale dei luoghi culturali. L'innovazione principale sta nell'integrazione dei processi di monitoraggio con quelli di fruizione, rendendo i visitatori partecipanti attivi nella salvaguardia del nostro patrimonio culturale e ambientale, utilizzando supporti mobili avanzati con funzionalità di connessione e posizionamento, potendo così segnalare zone problematiche e appunto, contribuire attivamente nel monitoraggio del territorio. Questo è sicuramente un obiettivo e punto fondamentale di questo progetto, trasformare un utente qualsiasi da fruitore passivo a collaboratore attivo sensibilizzando il proprio rapporto con il patrimonio ambientale e culturale. Il fenomeno degli UAV ha grande diffusione, come è già stato detto, sia nell'ambito puramente ludico che nell'ambito professionale; in quest'ultimo caso i droni vengono maggiormente utilizzati in geomatica, che riunisce sotto di sé l'analisi e la gestione dei dati metrici relativi alla Terra, infrastrutture e patrimonio architettonico. Vengono incluse anche le scienze di Fotogrammetria, Telerilevamento e rilievo LIDAR, famosi per l'utilizzo di dati metrici/tematici provenienti da immagini o sensori; poi la Cartografia, i Sistemi Informativi Territoriali e la Geologia sono delle vere e proprie tipologie di applicazione reale della geomatica. Parlando di utilizzo professionale di UAV, possiamo dividerlo in maniera chiara in due famiglie: impiegarli come strumento per ottenere un punto di vista così detto "privilegiato" (ispezione) o come strumento di raccolta dati mediante sensori a bordo di varie tipologie (misure). Le ispezioni richiedono solitamente voli manuali con il ruolo dell'operatore di importanza notevole soprattutto per quanto riguarda le sue capacità (*skills*) di volo, per quanto riguarda le misure solitamente si trattano di voli automatici, che richiedono una maggior conoscenza e competenze riguardo la progettazione del volo e nell'elaborazione dei dati, le varie misure possono essere suddivise a loro volta in acquisizione dati metrici e acquisizione di caratteristiche fisiche tramite sensori speciali come termocamere. Bisogna evidenziare, soprattutto in campo professionale, che le competenze necessarie per sfruttare al massimo le potenzialità dei droni non sono presenti in tutte le figure professionali che li utilizzano; la "colpa", se la si vuole definire così, può essere data al fatto di essere una tecnologia accessibile

e a basso costo che fa dimenticare l'importanza delle competenze che permettono di acquisire ed elaborare i dati in maniera corretta. A livello geologico la fotogrammetria proveniente da UAV permette di acquisire prodotti cartografici dettagliati, modelli digitale del terreno, delle superfici e ortofoto, trovando impieghi nello studio di eventi di qualsiasi tipo, franosi, erosivi, stabilità di parete rocciose e monitoraggi multi-temporali, solo per citarne alcuni. La normativa vigente detta i limiti da considerare, evidenziando la necessità di un approccio consapevole a queste tecnologie, a prescindere dal fatto che la fotogrammetria da drone offra rapidità e economicità nella fase di acquisizione e delle necessarie attenzioni e competenze che si rivolgono proprio in questa fase e nel processo fotogrammetrico. Come ultimo esempio di utilizzo di UAV, si è deciso di portare un articolo che tratta tecniche aerofotogrammetriche e LIDAR in aree urbane soggette a rischio sismico, la ricerca pone la sua attenzione sullo sviluppare metodologie innovative utilizzando dati aerospaziali e monitorare e valutare se gli edifici della città, possono reputarsi vulnerabili ad un evento critico che può essere un sisma. Si mira a caratterizzare in maniera dettagliata il tessuto urbano utilizzando sia rilievi aerofotogrammetrici che LIDAR, sono fondamentali l'utilizzo di strumenti efficaci per analizzare il costruito, date le percentuali delle abitazioni senza adeguati standard sismici. Le metodologie utilizzate servono ad ottenere una rappresentazione 3D degli edifici e del terreno, dato il fatto di utilizzare sia dati aerofotogrammetrici che LIDAR, viene fatta poi un'analisi e un confronto dei due, scoprendo che la seconda offre dei risultati maggiormente precisi soprattutto nelle zone dense. Oltretutto la ricerca presenta la vera efficacia delle metodologie nell'analisi e gestione della vulnerabilità sismica urbana.

## 1D – Rilievi aerei con UAS: il Regolamento europeo EASA

L'esplosione nella diffusione dei droni in moltissimi campi come abbiamo spiegato nel paragrafo precedente, ha fatto nascere ed evidenziato la necessità di avere delle regolamentazioni che mirano a garantire sicurezza e privacy per ridurre al minimo i rischi legati al loro utilizzo. A livello globale, molte nazioni seguono le linee guide stabilite dall'*International Civil Aviation Organization* (ICAO), agenzia delle nazioni unite che stabilisce gli standard internazionali per l'aviazione civile. Essa fornisce orientamenti sulla registrazione dei droni, sulla formazione degli operatori e sulle operazioni sicure; tuttavia, le specifiche normative possono da paese a paese, a volte anche in maniera significativa. In Italia, l'Agenzia Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), ha la responsabilità di regolamentare

l'utilizzo dei SAPR, con obiettivo di garantire l'incolumità pubblica e la sicurezza aerea, oltre a proteggere la privacy dei cittadini (argomento caldissimo in molti contesti dei giorni nostri), più importante ancora e in generale il più corretto da seguire e studiare sarebbe il Regolamento europeo EASA. Alcune delle regole imposte da questo regolamento europeo possono essere l'ottenimento di un'apposita autorizzazione per utilizzare i droni a scopo professionale, che valuta la competenza tecnica dell'operatore rispetto delle norme di sicurezza, esistono regole specifiche per le operazioni notturne, e per la responsabilità civile dell'operatore. Le normative possono essere soggette a cambiamenti, quindi è importante rimanere aggiornati sulle disposizioni locali, le violazioni di queste possono comportare multe, sanzioni e addirittura procedimenti penali, ecco l'importanza di essere consapevoli e di rispettare le regole attive per essere prima di tutto sicuri di non recare danno agli altri ma anche a sé stessi. Negli ultimi anni oltre ad aver avuto una crescita esponenziale nella diffusione dei droni, comincia a diffondersi una nuova innovazione destinata a modificare il nostro presente ma lasciare un segno indelebile nel nostro futuro, l'Intelligenza Artificiale. La sua integrazione con i UAV solleva considerazioni etiche e normative a livello globale, l'IA senza dubbio potenzia notevolmente l'efficienza delle funzionalità avanzate come può essere la navigazione autonoma e il riconoscimento di determinati oggetti, ma rende necessario stabilire regolamentazioni che ne limitino l'uso a favore di un utilizzo più responsabile possibile. Proprio per questo sia l'EASA che l'ICAO devono affrontare la sfida di adattare le normative esistenti all'impatto dell'IA sui droni, in modo che rispetti i principi di sicurezza, privacy e trasparenza approcciandosi alle regolamentazioni in toto. Data la recentissima esplosione di questa innovazione vi è una continua ricerca nell'aggiornare le normative esistenti, cercando di puntare fortemente sulla sicurezza e fornire linee guida chiare per le formazioni degli operatori tramite la collaborazione con esperti del settore e le organizzazioni internazionali, continuando a monitorare gli sviluppi di questa tecnologia così di avere un insieme di normative sempre aggiornate e al passo con i tempi. Alcuni esempi di offerte dell'IA potrebbero essere la facilità di riconoscere eventuali ostacoli, capire eventuali cambiamenti climatici o anche potenziare ulteriormente il volo automatico. Per capire quanto può essere complicato, delicato e ancora di difficile interpretazione questo argomento proviamo farci una domanda: "In caso di incidente, chi ha responsabilità?"; Questo può essere un problema grosso da risolvere a livello normativo anche se la domanda che ci siamo posti possiamo considerarla abbastanza banale, qui si ritorna alla fondamentale importanza delle regolamentazioni che oltre ad essere chiare, devono cercare di essere il più possibile flessibili ed evolutive sia a livello nazionale che globale mantenendo l'equilibrio tra innovazione e sicurezza. La sfida fondamentale ora quindi è trovare una

regolamentazione ponderata con la collaborazione di tutti gli enti con potere di standardizzare i processi di utilizzo di questa tecnologia pronta a cambiare il nostro modo di vivere e di pensare. Per quanto riguarda la responsabilità associata all'utilizzo degli UAV, alcuni testi presentano l'idea che questa responsabilità non va associata al solo operatore ma suddivisa in varie figure, "figure di *front-end*" e "operatore di *back-end*" con ruoli diversi a livello di definizione e gestione dell'operatività e funzionamento dell'IA. Il primo può essere considerato come il soggetto (fisico o giuridico) che viene coinvolto nelle operazioni quotidiane e di utilizzo pratico del sistema di IA, l'altro invece è considerato come progettista e fornitore dei componenti del sistema ed ha una responsabilità più ampia. Per rispettare al meglio la privacy di terzi la normativa del Regolamento europeo EASA ci fornisce varie linee guida per volare in sicurezza e non incorrere in spiacevoli sanzioni. Una delle prime procedure da svolgere è quella di registrare il drone (dipende dal peso del drone), poi richiedere (se necessario) eventuali autorizzazioni, conoscere le varie limitazioni di volo (altezza di volo, distanze minime, proibizione di volo in determinate aree ecc.), evitare di sorvolare proprietà private senza consenso e scattare foto o video di persone senza il consenso, avere un'assicurazione di responsabilità civile (comprendo così eventuali danni a proprietà o persone a causa dell'urto con drone), possedere un attestato di idoneità (se necessario, anche qui dipende dal peso del UAV). Le difficoltà nascono quando si cerca di districarsi tra le varie regole a seconda del drone in utilizzo, perché come spiegato precedentemente alcune disposizioni date dall'ENAC dipendono proprio da questo; ad esempio, l'UAV utilizzato durante il periodo di tirocinio (DJI Mini 3 Pro) aveva un peso complessivo minore di 250 grammi che permetteva di volare e utilizzare l'APR senza l'obbligo di possedere un attestato pilota ("patentino") e lo collocava nella categoria C0.



## 2- Materiali, strumenti e metodi

### 2A - Materiali

La ricerca di materiale scientifico è un passo essenziale nel processo di studio e di approfondimento di argomenti come la fotogrammetria, la storia, i sistemi di acquisizione e restituzione delle informazioni spaziali e il rilevamento tridimensionale. Esistono numerosi siti e piattaforme online specializzati che offrono una vasta gamma di paper scientifici, articoli accademici e pubblicazioni specializzate in questi campi. Riguardo la fotogrammetria si trovano documenti che spiegano argomenti come le tecniche di acquisizione delle immagini, la calibrazione delle fotocamere, la creazione di modelli digitali del terreno (DTM) e modelli digitali di elevazione (DEM), nonché l'applicazione della fotogrammetria aerea in settori come l'ingegneria civile, l'archeologia, geologia e molto altro ancora.

La conoscenza storica della nascita di questa innovazione è aiutata dalla presenza di articoli in grado di stuzzicare il lettore su temi come la storia sociale, la politica economica, la scienza e le idee visionarie del tempo. Per conoscere al meglio i vari software utilizzati sono stati importanti i manuali d'uso che le società produttrici hanno messo a disposizione al pubblico, ma ha avuto un ruolo fondamentale l'esperienza ottenuta durante i vari casi pratici riusciti e quelli non riusciti che hanno permesso di istruire sull'utilizzo della maggior parte dei comandi all'interno dei software.

### 2B - Obiettivi

Gli obiettivi prefissati per questa tesi di laurea mirano a esplorare in profondità la storia e l'evoluzione dell'utilizzo degli UAV nell'ambito dell'edilizia. Partendo dalle origini di questa tecnologia e seguendone lo sviluppo tecnologico nel corso degli anni, si intende tracciare un percorso che illustri chiaramente come gli UAV abbiano gradualmente guadagnato un ruolo di rilievo nel settore edile e nelle applicazioni tecnologiche ad esso collegate. Si prevede di analizzare e descrivere diverse tipologie di UAV disponibili sul mercato, evidenziando le loro caratteristiche distintive e le possibilità di impiego in vari campi tecnologici. Questo permetterà di conoscere e comprendere appieno il potenziale di questa tecnologia e le molteplici opportunità che offre in diversi settori (edilizia, topografia, agricoltura, sorveglianza e molto

altro). Sarà posta particolare attenzione all'UAV utilizzato durante il periodo di tirocinio, fornendo una descrizione tecnica delle sue capacità e delle sue potenzialità, così da avere una visione chiara degli strumenti concretamente impiegati sul campo. Un altro obiettivo cruciale della tesi è quello di presentare in modo dettagliato l'iter di rilievo aerofotogrammetrico, illustrandone tutte le fasi che lo compongono, dalla pianificazione all'elaborazione dei dati con software dedicati. Proprio in questo ultimo contesto si intende esporre il software di elaborazione fotogrammetrica utilizzato cercando di presentare varie possibilità offerte, così da avere una panoramica completa di metodologie e strumenti impiegati. Alla fine della tesi si ha come obiettivo quello di presentare due esempi pratici di rilievo aerofotogrammetrico svolti durante il tirocinio, dove sono esposti gli output ottenuti in maniera più chiara possibile. Attraverso immagini e riflessioni sui risultati ottenuti, si cercherà di evidenziare l'efficacia e l'utilità della tecnologia UAV nell'abito edile e di dimostrare il suo valore pratico e le sue potenzialità innovative.

## 2C – SAPR per il rilievo aereo: caratteristiche e operazioni di volo

In questa sezione ci vuole procedere con maggiore dettaglio, nel fornire una descrizione approfondita dell'UAV utilizzato nel percorso di tirocinio. In particolare, saranno illustrate specifiche tecniche, funzionalità avanzate e l'impatto del DJI Mini 3 Pro sull'esecuzione dei monitoraggi e rilevamenti svolti nel contesto di ricerche personali fatte. La normativa che regola l'utilizzo dei droni sotto i 250 grammi è sicuramente una specifica a cui bisogna fare attenzione e che è necessario capire e comprendere. Possono essere individuati cinque punti principali:

- **Registrazione del drone:** In Italia, è obbligatoria la registrazione dei droni che hanno peso inferiore ai 250 g sul portale D-Flight, che altro non è che una piattaforma che permette la registrazione dell'UAV, gestisce il traffico aereo e fornisce informazioni sugli spazi aerei e le regolamentazioni vigenti. La piattaforma è gestita e controllata dall'Agenzia Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), che garantisce con le sue normative la sicurezza e la conformità delle operazioni degli UAV. Bisogna dotarsi del QR Code di D-Flight e posizionarlo sul drone così da poter permettere di identificare il proprietario con dati personali (nome, e-mail e numero di telefono), in caso di smarrimento.



- Spazio aereo: i droni definiti "leggeri" possono volare ad un'altitudine massima di 120 metri sopra il suolo, a meno che non siano autorizzati diversamente. È vietato volare vicino aeroporti, eliporti o altre strutture critiche senza autorizzazioni specifiche.
- Regole di volo: Per i droni di peso inferiore a 250 grammi, sono applicabili specifiche regole di volo, anche se possono essere considerati inoffensivi. Queste includono il volo solo durante il giorno, mantenendo sempre il drone a vista (VLOS - *Visual Line of Sight*), evitando il volo sopra aree affollate o eventi pubblici e richiedendo l'autorizzazione per sorvolare la proprietà privata.
- Privacy e sicurezza: È fondamentale rispettare la privacy delle persone e le norme di sicurezza durante l'utilizzo dei droni. Non è consentito riprendere o sorvolare aree private senza il consenso dei proprietari e devono essere evitate situazioni che possano mettere a rischio le persone o causare danni a beni o strutture.
- Assicurazione: In Italia, l'assicurazione responsabilità civile per l'utilizzo dei droni è obbligatoria per quelli con peso inferiore a 250 grammi. Si consiglia di dotarsi di una polizza di assicurazione per coprire eventuali danni causati durante il volo del drone. C'è la possibilità di stipulare assicurazioni annuali, ma ci sono inoltre possibilità di stipulare assicurazioni a giornata per chi non utilizza il drone quotidianamente.

La grandissima diffusione e domanda degli UAV, ha generato un aumento notevole nella produzione e della nascita di società e aziende che si pongono l'obiettivo di creare un proprio marchio nella produzione di questi strumenti. Il Mini 3 Pro rispondeva alla necessità di avere un drone con un rapporto qualità-prezzo tra i migliori del settore e affidarsi ad una delle aziende più conosciute e importanti del settore, la DJI. Il DJI Mini 3 Pro sembrava essere l'UAV Consumer più adatto per lo scopo per cui voleva essere utilizzato, principalmente ispezioni e documentazioni fotografiche; l'idea ulteriore era quella di sfruttare le ore personali per esplorare e fare dei test nell'ambito dell'aerofotogrammetria, data la quasi totale mancanza di conoscenza della metodologia. Il drone è sia molto potente che molto piccolo e portatile, ha un peso inferiore a 249 g e un sensore CMOS di 1/1.3" che garantisce funzionalità elevate e viene considerato come uno dei più sicuri del settore. Altro punto di forza è la leggerezza e l'autonomia delle batterie (34 minuti), molto utile quando viene fatto un volo manuale, il livello di qualità video e foto è altissimo con video in 4K e foto RAW da 48 MP; un'altra funzionalità sicuramente molto utile è la possibilità di rilevare attivamente gli ostacoli grazie ai doppi sensori anteriori e a quelli posteriori e inferiori. Il Mini 3 Pro è compatibile con vari tipi di

controller: DJI RC-N1, DJI RC (acquistato), DJI RC Pro. Avendo a disposizione il DJ RC con display, ci sono state difficoltà nei test di volo automatici o meglio, non sono mai stati fatti voli automatici. Questo è dovuto al fatto che l'idea della società DJI era quella di non fornire i *Software Development Kit* (SDK), fondamentali per poter far volare in maniera automatica l'UAV, per nessuno dei controller messi a disposizione da DJI, rendendo così possibile il volo esclusivamente manuale. Sostanzialmente gli SDK sono degli strumenti, risorse che mettono a disposizione gli sviluppatori dei droni per permettere ai programmatori di creare applicazioni personalizzate e in grado di interagire con gli APR in modo più avanzato. Essi forniscono un'interfaccia di programmazione dove gli sviluppatori possono scrivere codici che permettono di controllare varie funzionalità dei droni: decollo, atterraggio, altezza di volo, telemetria del drone, controllare la fotocamera (zoom, orientamento), gestione della batteria, pianificazione dei percorsi, utilizzare altre applicazioni. Le scelte fatte dall'azienda DJI non ha penalizzato molto l'ambito dei *content-creator* e i creatori di video (artistici musicali) o comunque di ispezione fotografica (questi ambiti difficilmente richiedono una progettazione del volo), ma hanno penalizzato tutti coloro che al momento della presentazione dell'APR, ha scelto di investire il denaro sul Mini 3 Pro in combinazione con il controller RC per svolgere attività di aerofotogrammetria. Inizialmente gli SDK non sono stati messi a disposizione in nessuna configurazione per il Mini 3 Pro ma poi, dopo mesi dove la community di appassionati richiedeva insistentemente alla società cinese di implementare queste risorse all'interno dell'APR, gli SDK sono stati resi disponibili solo per chi avesse comprato il DJI RC-N1 o RC Pro, tra la grandissima delusione di chi aveva scelto di acquistare il DJI RC con display. Passando ora alle caratteristiche più tecniche, definiamo il DJI Mini 3 Pro come un APR di tipo consumer e non professionale come altri APR prodotti dalla DJI. Tra le caratteristiche tecniche troviamo:

- Fotocamera CMOS da 1/1.3": camera CMOS ad alta risoluzione da 48 MP, che permette all'APR di catturare immagini di alta qualità e video nitidi. Con distanza focale di 0,0024 mm e altezza e larghezza del sensore rispettivamente di 7,3 e 9,7 mm.
- Formati foto: Supporta i formati JPEG e RAW, offrendo flessibilità nella post-produzione delle immagini
- Batteria: la durata della batteria può essere sicuramente considerato come uno dei punti forti del Mini 3 Pro, perché nonostante il peso contenuto riesce a garantire un tempo di volo di circa 40 minuti, permettendo di fare sessioni di volo utilizzando una sola batteria.

- Peso e dimensioni: peso e dimensioni lo rendono estremamente maneggevole e trasportabile, sia per scopo lavorativo che per scopo puramente ludico.

Con questo APR è possibile acquistare tre tipologie di controller, li presentiamo in ordine non solo di costo ma anche di funzionalità offerte:

- DJI RC-N1: è il controller con costo più ridotto dei tre ed è da considerarsi come un vero e proprio joystick, con la possibilità di collegarsi e interfacciarsi tramite un cavetto con dispositivi mobile (smartphone) ed ha la possibilità di utilizzare applicazioni che aiutano l'operatore a gestire moltissime impostazioni di volo e programmare il volo anticipatamente.
- DJI RC: a differenza del primo non vi è la possibilità di collegare un dispositivo mobile e oltre alle funzionalità base di joystick possiede un display integrato che trasmette in tempo reale le immagini che registra l'APR (con il primo era possibile vedere solo se vi era un dispositivo collegato). Questo è stato il controller acquistato assieme all'APR e come grosso ostacolo c'è stata la non possibilità di scaricare applicazioni da terzi all'interno dell'RC per organizzare il volo automatico; questo ha voluto dire esclusivamente volo manuale.
- DJI RC Pro: questo è il controller più costoso (rischia di superare il costo dell'APR stesso), e altro non è che l'unione dei due precedentemente elencati, in sostanza ha oltre la possibilità di gestire il volo dell'APR come joystick normale, anche quella di avere un display che mostra le immagini come l'RC; la differenza sta nella possibilità ulteriore di scaricare e utilizzare applicazioni in grado di aiutarci a compiere voli automatici (Pix4d, Ugcs), è la perfetta fusione tra dispositivo mobile e joystick.

È ragionevole pensare che lo studio dove è stata svolta l'attività di tirocinio sia stata motivata ad acquistare l'APR e l'RC per avere in possesso un dispositivo consumer in grado di scattare foto aeree ad alta risoluzione per documentazioni fotografiche e presentazioni video di progetti completati. Lo scopo di rilevazioni geometriche tridimensionali ha avuto un ruolo secondario in fase di acquisto, il DJI Mini 3 Pro ha dimostrato di essere in grado di ottenere buoni risultati, grazie alla sua forza maggiore, ovvero la fotografia, nonostante le sue limitazioni e non essendo un APR *Professional*.

## 2D – Rilievo SAPR: metodologia e flusso di lavoro

In questo paragrafo verranno esposte e definite le fasi principali di un rilievo aerofotogrammetrico, sulla base delle esperienze di tirocinio, la richiesta nonché obiettivo di questo periodo era quella di provare a fare test e prove di rilevazioni aerofotogrammetriche con l'UAV in dotazione e poi la redazione di un manuale d'istruzioni per chi non è in possesso di competenze e conoscenze all'interno dell'ambiente di lavoro. Le tre grandi parti del rilievo aerofotogrammetrico possono essere individuate: Fase di pianificazione, di acquisizione e di elaborazione dei dati. La fase di pianificazione costituisce il fondamento del rilievo con drone, in cui vengono delineati tutti i passaggi successivi, può essere considerata una vera e propria raccolta di idee, dati e organizzazione delle fasi successive, ed è influenzata principalmente dall'esperienza dell'operatore:

- Raccolta delle Richieste del Committente: Si accoglie il committente per comprendere le esigenze e definire gli elaborati da produrre e consegnare.
- Sopralluogo: Viene fatta una visita sul sito per individuare criticità così da risolverle tempestivamente e non avere spiacevoli sorprese in fase di acquisizione.
- Conoscenze e limitazioni: si utilizzano gli strumenti messi a disposizione, dagli enti statali che riguardano sia restrizioni operative che normative (D-Flight).
- Richieste di Autorizzazioni di volo: se necessario, vengono avviate tutte le procedure di richiesta di eventuali documentazioni per volare in serenità.
- Definizione dei GCP: l'operatore comincia a ragionare sulla disposizione e sulla quantità dei *Ground Control Point*, elementi fondamentali per georiferire il rilievo.
- Tipologia e rotta di volo: si ragiona sull'altezza di volo in relazione al GSD richiesto, si scelgono le strategie di volo più adatte all'obiettivo del rilievo.
- Ultime scelte: viene preparato il drone e viene fatta la scelta della giornata, ma soprattutto l'arco della giornata scelto.

In questa parte l'operatore dedicherebbe maggior tempo alla creazione e gestione del volo automatico con le applicazioni o i software dedicati, ma questo non è il nostro caso perché non c'è stata la possibilità di utilizzare questi software con l'UAV in dotazione. Nella fase di pianificazione è essenziale considerare diversi aspetti tra cui, la visibilità dei GCP nelle foto, la loro posizione rispetto alle zone di maggior sovrapposizione e il fatto di evitare ostacoli o zone ad alta pendenza; i GCP possono essere considerati come i “grandi osservati” di questa

parte del rilievo perché come già spiegato possono condizionare notevolmente la buona riuscita del lavoro, quindi devono essere posizionati con cura. Senza dimenticare che uno degli ultimi controlli da fare è sul portale D-Flight per verificare eventuali aggiornamenti sull'area a livello normativo e limitazioni di volo. Nei giorni precedenti ad un rilievo vengono controllate le previsioni metereologiche per sfruttare al meglio anche i fattori di luminosità e di buon tempo, viene avvisato il proprietario degli orari e controllate e caricate tutte le strumentazioni per evitare inconvenienti il giorno del rilievo. Negli esempi che verranno proposti si è sempre scelto un orario intorno le 11:00 del mattino, per evitare una presenza di ombre marcata. Generalmente appena raggiunto il lotto oggetto di rilievo aerofotogrammetrico vengono posizionati i GCP nelle zone previste nella fase di pianificazione. Si cerca di posizionarli dove abbiamo cambi di pendenza evidenti, dove vi è un cambio di colore cromatico (vegetazione-asfalto), in maniera omogenea all'interno del lotto cercando di fare in modo che siano sempre ben visibili e non rimuovibili durante la fase di acquisizione. Finita la disposizione è buona norma procedere con il vero e proprio rilievo aerofotogrammetrico, la misurazione dei GCP con ricevitore GNSS e la scelta di altrettanti punti di controllo. Questi ultimi sono individuati in elementi ben riconoscibili, ad esempio nel primo esempio portato in questa tesi di laurea, all'interno del lotto vi è la grande presenza di tombini sono stati scelti quindi, prevalentemente questi elementi; e per non sbagliare si è scelto lo spigolo più a Nord-Ovest di ciascuno. La fase di acquisizione è la vera e propria fase operativa del rilievo, durante la quale vengono fatte le riprese e si rilevano i GCP, le attività includono:

- Controllo: viene controllato che le eventuali preoccupazioni o problemi viste in fase di sopralluogo siano state risolte o che non ne siano sorte ulteriori.
- Posizionamento e rilevamento GCP: vengono posizionati i GCP dove si era scelto in fase di pianificazione e si rilevano con strumentazione topografica.
- Punto di decollo: viene scelta un'area priva di ostacoli da assegnare come punto di decollo, vengono definiti come ostacoli sia in senso verticale (coperture) che orizzontale (vegetazione), ma anche ostacoli che possono presentarsi durante il rilievo (persone). Se necessario è consigliabile delimitare questa zona.
- Volo: Comincia il volo, nel volo automatico non c'è il caso di preoccuparsi, nel nostro caso invece dobbiamo stare attenti e concentrati per gestire correttamente le sovrapposizioni delle strisciate e avere un controllo dell'ambiente circostante.
- Atterraggio: Finite le operazioni di acquisizione non rimane che atterrare in sicurezza, e riporre le strumentazioni utilizzate (APR, GCP).

In questa parte tra l'operazione più importante è quella di rilevare i GCP con l'antenna GNSS, e poi si aggiunge l'acquisizione delle foto con volo manuale. Nei casi presentati in questa tesi la prima operazione è stata la rilevazione dei GCP con un'antenna GNSS di fondamentale importanza per geo riferire al meglio il rilievo aerofotogrammetrico. Il ricevitore GNSS utilizzato per i rilevamenti è il GEOMAX Zenith 40, dotato di un ricevitore, palina e un tablet con al suo interno proprio X-PAD Office Fusion che però utilizza solo il modulo dedicato al rilievo GNSS. Una volta preparata l'antenna si è individuato un punto (1000) come origine del sistema di riferimento locale del rilievo e poi è cominciata la vera e propria rilevazione di ciascuno dei GCP e dei punti di controllo scelti posizionando al centro la palina tenendola in bolla durante il processo di acquisizione delle coordinate piano altimetriche evitando errori di posizionamento in grado di danneggiare non solo il rilievo GPS ma anche il futuro rilievo aerofotogrammetrico. Il passaggio successivo è stato quello di far volare l'UAV e dare via al processo di acquisizione delle immagini. Come già presentato la difficoltà maggiore è stata quella di non avere la possibilità di fare un volo automatico, l'unica possibilità è stata quella di volare manualmente inserendo così l'errore dovuto all'operatore. Viene fatto un volo nadirale portando l'UAV all'altezza di circa 25 m nella punta nord del lotto, è stato impostato anche uno scatto a tempo di 3 sec, aiutandosi sia con la propria vista e alla mappa che offre il display del DJI RC si è cercato di viaggiare ad una velocità costante e di mantenere le linee della rotta il più parallele possibili fra loro. Non avendo applicazioni per gestire le sovrapposizioni si è escogitato un modo per garantire una sovrapposizione laterale di circa il 66% e di circa il 50% per quelle verticali. Il DJI RC è stato impostato per avere una griglia che divide il display in nove rettangoli, la difficoltà è stata proprio qui, farsi trovare ogni 3 secondi con all'interno del display (contemporaneamente) la parte nuova di superficie da riprendere e avere almeno 2/3 (orizzontale) e metà (verticale) di questa rappresentante la foto scattata precedentemente, il tutto ricordando sempre di mantenere la rotta parallela dell'APR. Il volo nadirale è durato all'incirca 20/25 minuti, proprio a causa di questi problemi e difficoltà, non serve spiegare che con un volo automatico il tempo impiegato sarebbe stato notevolmente al di sotto della metà. La tipologia di volo seguente è stata quella di un volo obliquo dove è stata seguita il più possibile la rotta del volo nadirale (inclinazione della camera 60°). Infine, è stato un fatto volo circolare con lo scopo di riprendere al meglio le facciate dell'edificio e anche qualche GCP. Si è così portati a termine la fase di acquisizione avendo lavorato per circa un paio di ore e consumando appieno due batterie, per un totale di mezzo migliaio di scatti. Nelle esperienze effettuate infatti si è notato un netto miglioramento con il passare del tempo; infatti, l'esperienza sembra essere una delle migliori armi contro gli errori in fase di sovrapposizione.

Nelle prime esperienze venivano fatti scatti singoli e il processo veniva fatto a rilento e talvolta venivano rifatti gli scatti, nelle ultime esperienze gli scatti erano a tempo e il tempo impegno nel volo era notevolmente ridotto. La fase di elaborazione dei dati è considerata l'ultima parte del rilievo fotogrammetrico e rappresenta il cuore del processo, durante il quale le immagini acquisite vengono elaborate per generare gli elementi tridimensionali:

- Importazione di dati e foto: Vengono spostate meccanicamente le foto scattate da drone a PC, se necessario vengono modificate con software dedicati (sovraesposizione), vengono importati ed elaborati i dati ottenuti dal rilevamento dei GCP.
- Orientamento camere e caricamento GCP: i software dedicati calcolano l'orientamento delle camere e si inseriscono i dati geometrici relativi ai GCP.
- Ottimizzazione GCP: i software selezionano automaticamente le foto che al suo interno presentano i GCP e l'operatore si occupa di ottimizzare e migliorare a video il posizionamento di essi.
- Nuvola di punti: il software genera la nuvola di punti, l'operatore si occupa di selezionare e scegliere le impostazioni di questo elaborato. Eliminazione di punti e Mesh: l'operatore si occupa di tagliare, pulire ed eliminare i punti della nuvola di punti che non servono ai fini degli elaborati, così da poter notevolmente snellire il processo di creazione della mesh.
- Esportazione di dati: ottenuti tutti gli elaborati richiesti vengono esportati e resi disponibili o per delle ulteriori modifiche con altri software o vengono messi a disposizione per essere interrogati e visionati.

In studio è cominciata la fase di elaborazione fotogrammetrica, per prima cosa viene esportato il file di rilievo GNSS e importato in X-PAD Office Fusion dove si fa un primo controllo di qualità dei punti presi. Il passo successivo è quello di scaricare dalla scheda SD dell'APR le foto scattate e salvarle all'interno del PC in una cartella dedicata alla specifica commessa. Viene poi copiato anche il file del rilievo GNSS in una cartella per poi utilizzarlo come base del file con all'interno anche l'elaborazione aerofotogrammetrica, producibile con il modulo X-PHOTO. Quest'ultimo modulo consente di visualizzare i dati telemetrici del DJI Mini 3 Pro, rotta e molto altro. Tramite il comando *Ground Control Point* si importano all'interno del modulo proprio i punti del rilievo GNSS (sia GCP che punti di controllo), avviato poi il calcolo dell'orientamento il software presenta una tabella con nome e tipologie di punto con le relative coordinate piano altimetriche, e anche una prima nuvola di punti grezza con la sessione di volo. Lo step successivo il programma consiglia di individuare almeno cinque foto per i primi tre

GCP e centrare rispetto ai target proprio il punto, così con le loro coordinate, le foto e i dati telemetrici riesce automaticamente a riferire le varie foto con all'interno lo specifico GCP, così da evitare all'operatore di passare tutte le foto scattate anche quelle che non hanno al loro interno i GCP. Una volta passati e centrati tutti i Ground Control Point e quelli di controllo non rimane che avviare il calcolo della precisione dell'orientamento dove i dati sono visibili in tabella. L'ultimo passaggio e quello più dispendioso in fatto di tempo materiale è quello della ricostruzione tridimensionale, il quale restituirà una nuvola di punti elaborata. A seconda delle richieste è possibile anche creare un'ortofoto, un DSM/DTM e Mesh 3D, un modello tridimensionale in OBJ, esportare la nuvola di punti in vari formati e anche un file kml per Google Earth. In questa fase è essenziale eseguire attentamente tutte le procedure indicate nei software, per garantire la precisione e l'affidabilità dei risultati finali. All'inizio del percorso lavorativo sono stati individuati come strumenti da utilizzare nel processo di ricerca personale il DJI Mini 3 Pro come UAV e X-PAD Office Fusion (plug in X-PHOTO) come software di fotogrammetria. X-PAD Office Fusion non è da considerarsi come solo software di fotogrammetria, ma come software in grado di gestire tipologie diverse di rilievo, dato che la casa madre di produzione dello stesso è la GEOMAX. Definito ciò, è ragionevole pensare che le difficoltà incontrate siano dovute al fatto che il software non sia programmato per svolgere elaborazioni esclusivamente di fotogrammetria, come possono essere *Meshroom*, *Reality Capture*, *WebODM*, *Agisoft Metashape* e *Cloud Compare*. Quest'ultimo non si limita all'elaborazione fotogrammetrica, ma risulta essere particolarmente utile per i cambi di formato, la visualizzazione dei prodotti finiti e molteplici altre applicazioni.

## 2E – Software per elaborazioni fotogrammetriche: X-Pad Office Fusion

Il panorama delle possibilità disponibili per un tecnico nel campo del rilevamento si è ampliato considerevolmente, e non solo grazie alla varietà di strumentazione disponibile, ma anche grazie alle diverse modalità di esecuzione degli elaborati; questo offre la flessibilità di considerare diversi parametri, come il trade-off tra precisione e velocità di esecuzione. Il rilievo di base scelto come punto di partenza è quello aerofotogrammetrico, motivato principalmente dalla rapidità di esecuzione e dell'interesse nell'uso di metodi innovativi per la rilevazione tridimensionale. In questo paragrafo verranno presentate diverse modalità di esecuzioni di elaborati utilizzando il programma X-PAD Office Fusion, impiegato per la post-elaborazione delle foto scattate. Il software offre la possibilità di integrare diverse tipologie di rilievo, come



TPS, GNSS e Laser Scanner, che però non verranno analizzati nello specifico, perché si avrà modo di parlare di più di alcuni software open-source in grado di aiutare l'operatore a svolgere delle particolari lavorazioni in fase di elaborazione dei dati (Cloud Compare). Ricapitolando, il paragrafo farà una prima esposizione del software X-Pad Office Fusion con a seguire la descrizione dei comandi più utili e interessanti da utilizzare per chi condivide l'obiettivo di lavorare con fotogrammi ottenuti da UAV. Di contorno ci saranno consigli e informazioni ottenute da esperienze personali sia nell'utilizzo del programma che nel rilievo aerofotogrammetrico, presentando altri software in grado di aiutare ad ottenere elaborati non ottenibili con X-Pad, tutto questo avendo come base delle esperienze personali. Come già discusso in precedenza, il programma integra dati geospaziali provenienti da strumenti di vario genere come TPS, GNSS e Laser Scanner in un ambiente di lavoro unificato, consentendo di gestire misurazioni, coordinate, disegni, nuvole di punti, mesh 3D, carte topografiche e altro ancora, attraverso un'interfaccia abbastanza intuitiva e facile da utilizzare. Il software si presenta sottoforma di programma *free*, e permette di acquistare moduli che permettono di svolgere operazioni esclusive a seconda di ciò che l'operatore ha intenzione di produrre. I moduli possono essere suddivisi in:

- GNSS Post Processing: viene permessa l'importazione e la gestione dei dati GNSS, inclusa la possibilità di fare modifiche e calcoli su ciò che viene importato.
- X-PHOTO: è il modulo che consente l'importazione e l'elaborazione di immagini provenienti da diversi dispositivi, quali SAPR, laser scanner, smartphone e fotocamere, generando nuvole di punti e superfici 3D.
- X-SCAN: lavora assieme ad X-PHOTO e permette di gestire e migliorare i dati derivanti dalle nuvole di punti, offrendo comandi intuitivi per un'elaborazione precisa e veloce.
- X-TOPO: importa e gestisce dati e misurazioni topografiche, inclusi stazioni totali e GNSS, fornendo un controllo accurato sulla qualità dei rilievi eseguiti.
- Modulo BIM Connect: offre la possibilità di caricare e gestire file IFC (Industry Foundation Classes) e confrontarli con le misurazioni effettuate sul campo.

Come moltissimi altri software, X-PAD si presenta con una finestra CAD dove sono visualizzati e lavorati tutti i dati importati, la barra degli strumenti che divide i comandi in macrocategorie e sottocategorie per facilitare l'accesso, il pannello di gestione del file sulla parte sinistra dello schermo che include il project manager per navigare tra i vari livelli del file ed infine il pannello di interrogazione sulla parte destra dello schermo che fornisce

informazioni dettagliate sulle proprietà degli elementi selezionati. L'inserimento delle foto costituisce una delle prime fasi cruciali all'interno del programma, essenziale per ottenere i risultati desiderati ed è affidato al comando Imaging (foto aeree), che dà accesso al modulo X-PHOTO dove vengono inserite le foto scattate dall'APR. La schermata è suddivisa in una sezione dove si copiano gli scatti, poi vi è una parte dove l'operatore può interrogare qualsiasi fotogramma di suo interesse e visualizzarne le proprietà e i dettagli, una sezione che mostra alcuni dati di navigazione e infine una sezione dove si può vedere la foto scattata a dimensioni più grandi. L'orientamento delle camere è un'operazione che viene fatta dal programma, il professionista attende che il software ricerchi i "tie points" previa scelta di alcune impostazioni. Lo step successivo è la ricostruzione tridimensionale, avviando il processo viene aperta una finestra che presenta una serie di elaborati in grado di produrre con varie possibilità di modifiche e diverse impostazioni di creazione (nuvole di punti, mesh 3d, ortofoto, DSM e mappa di sovrapposizione delle foto). Dopo aver atteso la realizzazione degli elaborati di nostro interesse, non rimane che controllare e fare delle considerazioni sui risultati ottenuti, se ciò che abbiamo ottenuto non è di nostro gradimento è possibile fare modifiche sulle impostazioni degli elaborati e riavviare i processi. X-PAD con le sue capacità di integrazione con altri software consente all'operatore di ottenere risultati anche da altri programmi per poi inserirli e fare alcune modifiche con X-PAD. Altri programmi utilizzati sono stati *Alice Vision Meshroom* (mesh 3d, Texture), *Cloud Compare* (pulizia, sezioni e rotazioni nuvola di punti), che offrano migliori soluzioni all'operatore.

Di seguito elencheremo alcuni dei comandi più utili e specifici all'interno del software X-PAD. L'importazione dei file avviene con un percorso molto comune ad altri tantissimi software, ovvero nella parte dedicata a file e importazione, ora si sta parlando di importazione di file esterni che possono essere dati topografici o elaborati creati con altri programmi non di foto per fotogrammetria. Se si volesse caricare ad esempio dei file di nuvole di punti (point cloud in inglese), i formati sono diversi (e57, las, ascii). La possibilità di controllare la bontà del prodotto eseguendo misurazioni sulle nuvole di punti, può essere considerato un grande ed interessante aiuto all'operatore, distanze tra due punti, misure degli angoli, aree e coordinate di un punto selezionato. Un comando estremamente interessante è "disegno stereo" che permette di scegliere su nuvola una particolare misurazione e se l'elaborazione è stata fatta all'interno del programma di specificare meglio su tutte le foto dove all'interno troviamo quel particolare elemento oggetto di misurazione di specificare in maniera più precisa i punti esatti.

Oltre a questo, altri comandi fondamentali possono essere quelli che permettono di creare superfici, calcolare volumi, creare clipbox e le proprietà di esportazione.

Verranno esposti in seguito dei casi pratici dove abbiamo utilizzato l'APR DJI Minni 3 Pro, Stazione GPS e poi abbiamo elaborato le immagini scattate con il software X-PAD e le prime esperienze fatte autonomamente, esponendo richieste e difficoltà.



## 3 - Risultati

### 3A - Contesto e premesse

Nel contesto delle nostre attività di sperimentazione ed elaborazione di dati geospaziali, ci siamo confrontati con una richiesta cruciale: trasformare una serie di fotografie in modelli sia tridimensionali che bidimensionali metricamente corretti, finalizzati alla ristrutturazione delle facciate di edifici esistenti. Questa richiesta si è trasformata poi in prove ed esperienze in rilievi aerofotogrammetrici con lo scopo di presentare e spiegare ai tecnici del settore come possono essere utilizzati degli strumenti innovativi come gli APR. Le strumentazioni messe a disposizione per raggiungere questo scopo trovano grandissimo spazio negli ambiti di rilevazione tridimensionale e si identificano nell'APR consumer DJI Mini 3 Pro per le acquisizioni video e fotografiche, il programma X-Pad Office Fusion che permette sia le elaborazioni fotogrammetriche grazie ai moduli X-PHOTO e X-SCAN che lavorazioni su altri rilievi (GNSS, TPS, Laser Scanner). Il software permette al tecnico che lo utilizza di interfacciarsi e lavorare su diverse tipologie di rilievo allo stesso momento senza utilizzare altri programmi, per esempio alcuni programmi open-source offrono un particolare tipo di elaborazione e non offrono un pacchetto completo. Proprio questa possibilità viene presentata nei casi pratici esposti nei prossimi paragrafi, che hanno in comune oltre al volo dell'APR anche un rilievo GNSS fatto da antenna Geomax Zenith 40 che aiuta a geo riferire il rilievo aerofotogrammetrico e permette al tecnico di avere una risposta riguardante la precisione ottenuta. Ora vengono introdotti i casi studio che verranno presentati nei prossimi paragrafi, il primo caso studio tratta di un rilievo aerofotogrammetrico su un lotto di circa 13000 mq ed include un edificio dismesso, delle ampie zone verdi e pavimentate (capannone demolito) e zona asfaltata; lo scopo era quello di mostrare al tutor aziendale il processo di esecuzione di un rilievo aerofotogrammetrico. Il secondo aveva come scopo iniziale una semplice documentazione fotografica che poi in campo si è trasformata in un ulteriore test di rilievo senza l'utilizzo dei target fisici (non erano in possesso) ma utilizzando dei particolari punti ben riconoscibili sia nelle foto che nella realtà, che fungessero da GCP.

### 3B - Caso studio 1

Il primo caso studio realizzato con un rilievo aereo da UAS ha come soggetto uno stabile abbandonato e le porzioni di terreno circostanti e facenti parte dello stesso lotto.

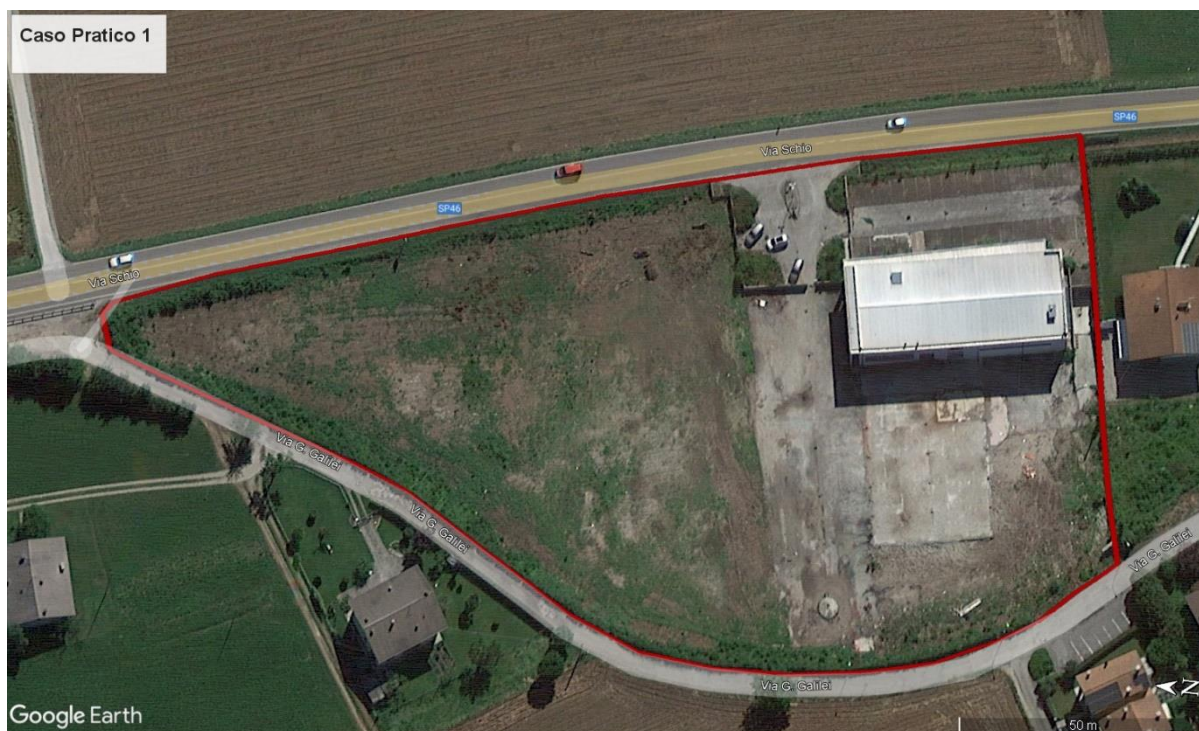


Figura 1 Visualizzazione del lotto su Google Earth Pro

Come spiegato in precedenza il modus operandi è quello, in primo luogo, di conoscere tramite sopralluoghi o indagini il sito, così da avere conferma della fattibilità del rilievo e poi di studiarne le particolarità e organizzare al meglio le strumentazioni con cui si è intenzionati a lavorare. Nel nostro caso particolare è stata fatta una analisi delle superfici da rilevare esclusivamente con Google Earth Pro (Figura 1), data la personale conoscenza del lotto. Gli spazi sono composti da terreno pianeggiante sia agricolo che parzialmente asfaltato o pavimentato (in passato vi era un capannone), con la presenza di uno stabile di grandi dimensioni, con uno spazio dedicato a parcheggi. Per quanto riguarda le criticità, si può evidenziare che la facciata sud-est dell'edificio è prevalentemente finestrata (Figura 2), le coperture sono del tipo lamierato lucido e piuttosto riflettente e nella parte di lotto con vegetazione poteva essere difficile posizionare dei GCP data l'altezza di essa.



Figura 2 Foto che ritrae l'edificio all'interno del lotto

Non avendo la possibilità di poter fare un volo automatico con il DJI Mini 3 Pro la fase di pianificazione di volo comprendeva la creazione di un'immagine dall'alto del lotto con una possibile distribuzione dei target (GCP). Per quanto riguarda il GSD l'altezza di volo è stata mediamente di 20/25 m e il valore poteva considerarsi sufficiente (sul 1 cm/pixel). Le altre considerazioni che sono state fatte in questa parte sono state nei confronti delle tipologie di volo, ovvero sono state scelte tre tipologie: volo nadirale, volo obliquo e volo intorno all'edificio per rilevare le facciate. Al termine dello studio e delle considerazioni fatte si è trovato che: il lotto può essere suddiviso in quattro parti (verde, zona di accesso, edificio e parte demolita) per un totale di circa 13000 mq, all'interno dei quali è stato previsto di distribuire 6 target 50x50 cm e con un'altezza di volo media di 20 m. Di seguito, troviamo delle figure che rappresentano all'interno di X-Pad Office Fusion la parte di individuazione dei GCP (Figura 3) e un ingrandimento della tabella che rappresenta gli errori di ciascuno di essi (Figura 4).

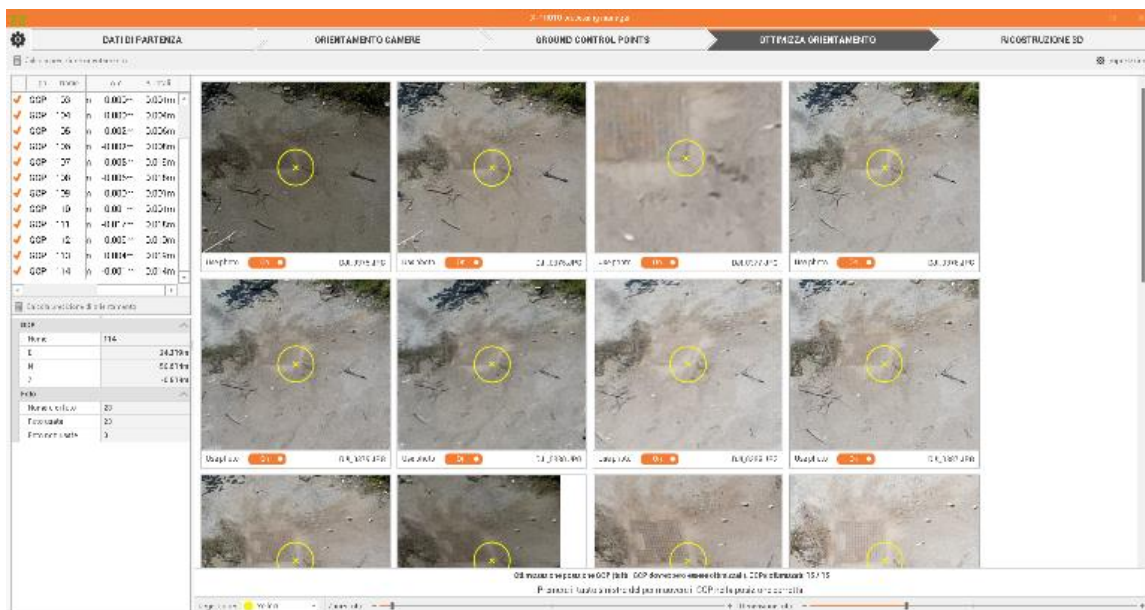


Figura 3 Ottimizzazione dei GCP

	Tipo	Nome		$\Delta Z$	$\Delta$ Totali
✓	GCP	103	n	0.000m	0.001m
✓	GCP	104	n	0.000m	0.004m
✓	GCP	105	n	0.002m	0.006m
✓	GCP	106	n	-0.002m	0.008m
✓	GCP	107	n	0.005m	0.019m
✓	GCP	108	n	-0.006m	0.018m
✓	GCP	109	n	0.000m	0.001m
✓	GCP	110	n	-0.001m	0.001m
✓	GCP	111	n	-0.017m	0.018m
✓	GCP	112	n	0.009m	0.010m
✓	GCP	113	n	0.004m	0.019m
✓	GCP	114	n	-0.001m	0.014m

Figura 4 Tabella delle precisioni ottenute su X-Pad

Di seguito, presentiamo la nuvola di punti, circa 12 milioni (in Figura 5 vediamo una visualizzazione all'interno del software *open-source* Cloud Compare).



Figura 5 Visualizzazione nuvola di punti



Ora, presentiamo in output il modello tridimensionale sempre all'interno di Cloud Compare (Figura 6).



*Figura 6 Visualizzazione modello tridimensionale*

Sia nella nuvola di punti che nel modello tridimensionale è possibile notare come il programma X-Pad Office Fusion abbia avuto difficoltà nella zona delle coperture a trovare i punti. Questo problema lo si era già previsto in fase di pianificazione perché si era a conoscenza del fatto che le coperture dell'edificio erano di tipo lamierato di colorazione chiara e riflettenti. È risaputo infatti che i programmi di elaborazione dei fotogrammi vanno in difficoltà quando si hanno pareti di colorazioni chiare e omogenee, ad influenzare ulteriormente questo problema è stata la scelta del giorno, infatti era molto soleggiato. Ora, presentiamo anche l'ortofoto (Figura 7), che conferma il problema appena accennato.

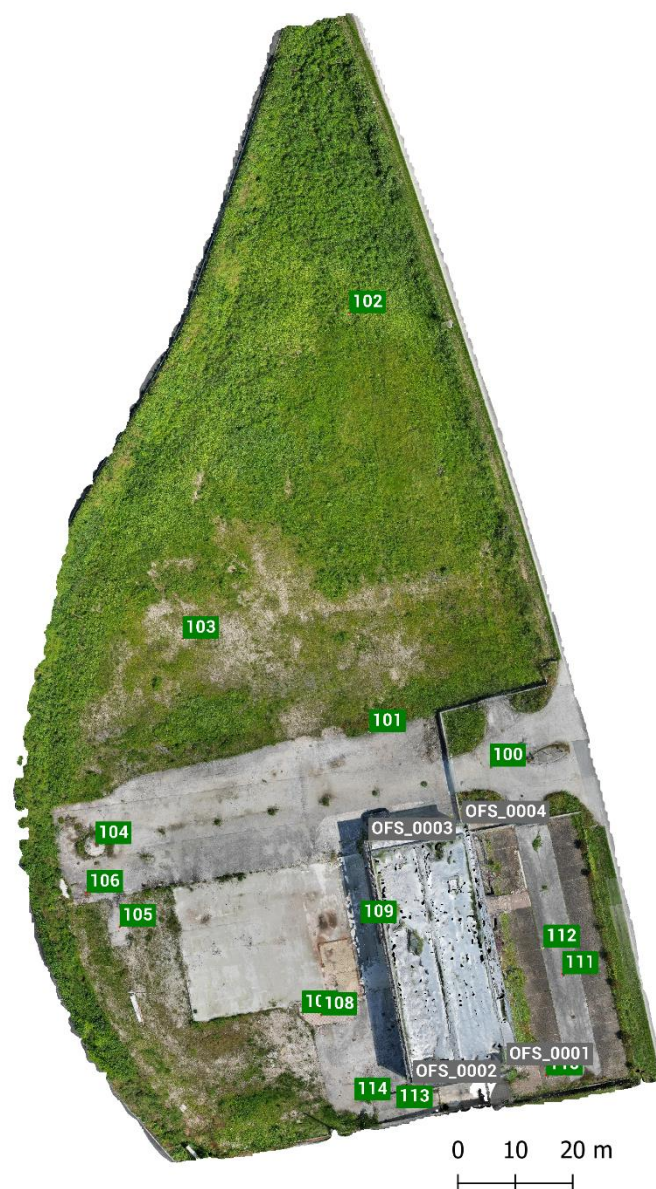


Figura 7 Ortofoto caso studio 1 con GCP

### 3C - Caso studio 2

Il secondo caso studio non ha avuto come scopo iniziale un rilievo aerofotogrammetrico, ma aveva lo scopo di offrire e svolgere una semplice documentazione fotografica (Figura 8) di una ristrutturazione tramite parziale demolizione, ricostruzione di un condominio. Facendo una breve descrizione dell'intervento, si trova che le unità immobiliare soggette a modifiche e lavorazioni sono tre, per le quali è richiesto un cambio d'uso da vani produttivi a uso residenziale. La documentazione fotografica era necessaria per le varie documentazioni tecniche e aver modo di controllare, nel caso fosse stato necessario, come le lavorazioni era

state portate a termine. In precedenza, un tecnico aveva preso dei punti specifici (GCP e punti di controllo) con antenna GNSS (Geomax Zenith 40) facenti parte di un particolare rilievo strumentale; da qui c'è stata la proposta di creare un modello tridimensionale dello stato dell'opera tramite rilievo aerofotogrammetrico da poter interrogare in caso di necessità di particolari misurazioni.



Figura 8 Foto che ritrae la zona di lavoro

Il processo di rilevamento è stato simile al primo caso studio, le differenze sostanziali sono riferite al mancato utilizzo dei target, bensì sono stati scelti dei punti strategici riconoscibili senza difficoltà dalle foto scattate da APR, poi i voli manuali fatti sono stati del tipo nadirale ed obliquo. In fase di elaborazione troviamo che le foto scattate sono circa 160 e una volta inserite all'interno del modulo X-PHOTO non rimane che inserire anche i GCP e i punti di controllo provenienti dal rilievo GNSS e conseguentemente tramite la sezione “*Ground Control Point*”, in ogni foto che li ritraggono vengono riposizionati in maniera più precisa per permettere poi al programma di calcolarne la precisione di orientamento. In Figura 9 vediamo proprio questo processo. Poi vediamo anche la tabella degli errori in Figura 10.

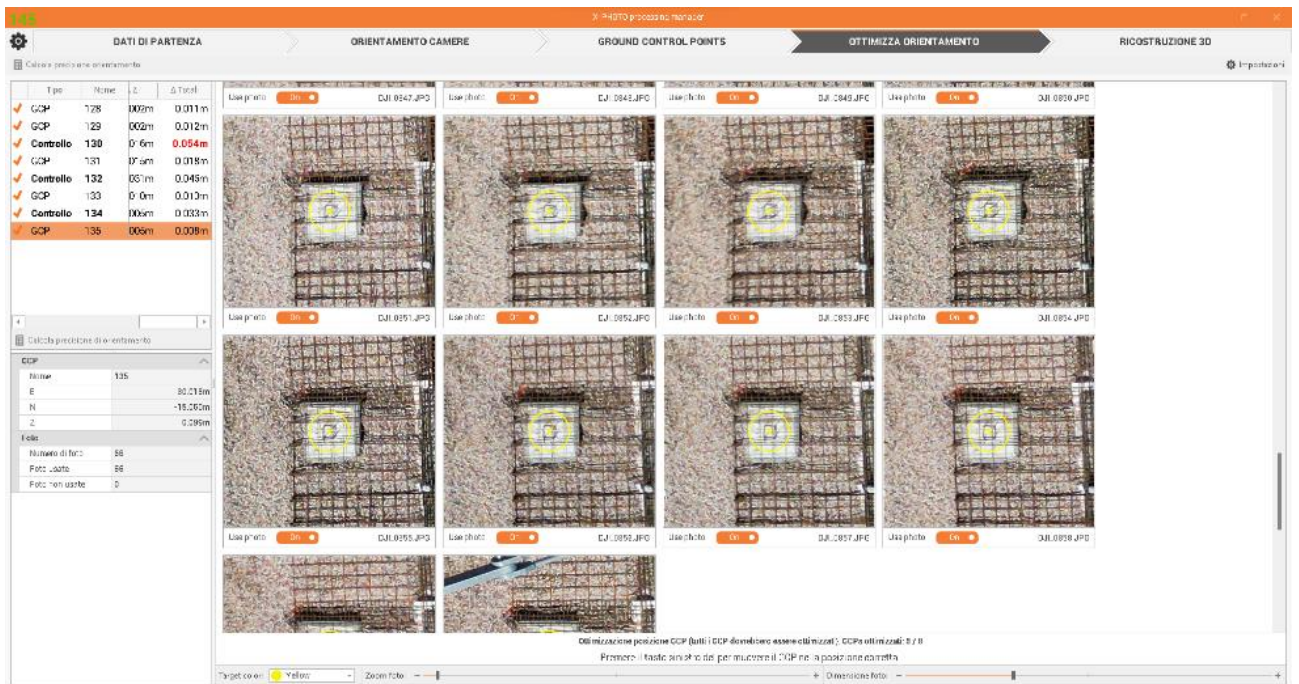


Figura 9 Ottimizzazione dei GCP

	Tipo	Nome	Z	Δ Totali
✓	GCP	128	002m	0.011m
✓	GCP	129	002m	0.012m
✓	<b>Controllo</b>	<b>130</b>	016m	<b>0.054m</b>
✓	GCP	131	015m	0.018m
✓	<b>Controllo</b>	<b>132</b>	031m	0.046m
✓	GCP	133	010m	0.010m
✓	<b>Controllo</b>	<b>134</b>	005m	0.033m
✓	GCP	135	005m	0.008m

Calcola precisione di orientamento

Figura 10 Tabella risultati di precisione su X-Pad

Di seguito, produciamo la nuvola di punti, circa sette milioni (Figura 11).



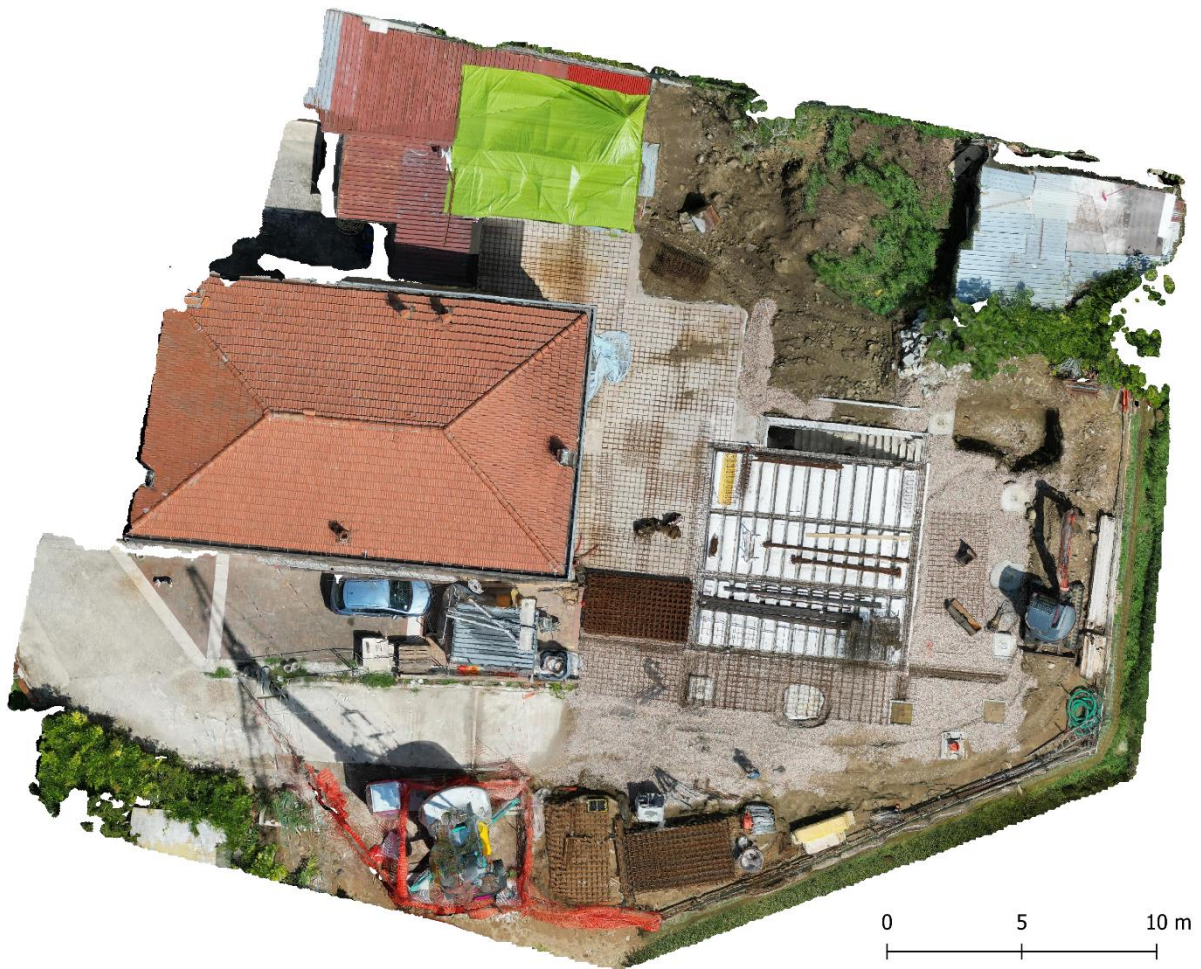
*Figura 11 Visualizzazione nuvola di punti*

Di seguito, anche il modello tridimensionale (Figura 12).



*Figura 12 Visualizzazione modello tridimensionale*

Infine, l'ortofoto del caso studio 2 (Figura 13).



*Figura 13 Ortofoto Caso studio 2*

### 3D - Discussione

Il rilievo aerofotogrammetrico con drone, abbinato all'utilizzo di strumentazioni come il ricevitore GNSS, ha dimostrato di essere una tecnologia estremamente versatile e potente nei casi studio sopra esposti, la durata totale si aggira al paio d'ore a fronte di una durata di un altro rilievo con, ad esempio, stazione totale che sarebbe stata di molto superiore. Bisogna ricordare inoltre, che il volo fatto dall'UAV è di tipo manuale e nel caso fosse stato automatico sarebbe stato probabilmente più preciso e avrebbe avuto una durata ancora inferiore, forse addirittura dimezzata. Nel primo caso le foto scattate sono circa 500 e comprendono tre tipologie differenti di volo, nel secondo sono circa 160; questa differenza è dovuta alle dimensioni dell'area

rilevata nel primo caso di 13000 mq a fronte di 1000 mq della seconda, può aver influito anche la differenza di altezza di volo.

Essendo in possesso di sei target si è cercato di utilizzarli (nel primo caso studio) nella loro totalità, cercando di posizionarli nella maniera più precisa e strategica possibile, nel primo caso sono stati collocati in maniera omogenea all'interno del lotto, nelle zone dove poteva esserci un cambio cromatico ben visibile (asfalto-vegetazione), nel secondo caso non vi è stata un vero e proprio ragionamento, bensì si è deciso sul campo avendo la meteorologia e il fattore tempo a favore di scegliere punti conosciuti e ben visibili. Questo ultimo aspetto dimostra ulteriormente la possibilità che possiede il tecnico, avendo un rilievo di base in suo possesso, di poter realizzare un rilievo aerofotogrammetrico geo riferito in pochi minuti e conseguentemente ottenere un modello tridimensionale dopo le fasi di elaborazione fotogrammetrica.

Venendo all'esposizione dei dati troviamo che nel primo caso studio abbiamo ottenuto un errore nella precisione di geo riferimento del modello aerofotogrammetrico di 2 cm, nel secondo caso studio invece possiamo notare che l'errore massimo che è stato ottenuto è di 0,054 m ovvero circa cinque centimetri e mezzo. Tutte le altre elaborazioni fatte, nuvola di punti, mesh tridimensionale e ortofoto sono andate a buon fine e senza intoppi. Considerando che il volo è stato fatto manualmente i risultati ottenuti possono considerarsi bassi, limitati, soddisfacenti comunque c'è la convinzione che possano essere ulteriormente ridotti con altre esperienze, ricercando costantemente la possibilità di migliorarsi.





## 4 - Conclusioni

In conclusione, il presente lavoro ha offerto un'analisi approfondita sull'evoluzione della fotogrammetria nel corso del XX secolo, evidenziando le sue radici storiche durante la Seconda Guerra Mondiale e le sue moderne applicazioni in una vasta gamma di settori. Attraverso lo studio delle figure chiave di Umberto Nistri e Edoardo De Orel, si è compreso il contributo significativo che studiosi e inventori hanno apportato alla disciplina, plasmando il suo sviluppo nel corso dei secoli. Una parte fondamentale della ricerca è stata dedicata all'analisi delle trasformazioni che hanno influenzato la fotogrammetria e che continuano a guidarne l'evoluzione. In particolare, l'avvento della tecnologia digitale e dei sensori fotografici hanno rivoluzionato il modo in cui acquisiamo e analizziamo i dati, aprendo nuove possibilità per l'affermazione del concetto di "Digital Earth". Un aspetto cruciale emerso dalla trattazione è stato l'ampio spettro di settori in cui la fotogrammetria trova applicazione, da quelli tradizionali come la topografia e l'ingegneria, fino a settori emergenti come la sanità e il commercio. Tuttavia, con l'aumento dell'utilizzo degli UAV, si sono poste anche nuove sfide etiche e pratiche, che richiedono un'attenzione costante e una regolamentazione adeguata a garantire sicurezza e protezione su temi importanti come la privacy delle persone. Si è discusso del ruolo sempre più rilevante dell'Intelligenza Artificiale nell'ambito fotogrammetrico, con le sue possibilità e sfide connesse. L'adozione di algoritmi e tecniche di machine learning promette di migliorare notevolmente l'efficienza e l'accuratezza delle analisi fotogrammetriche, ma richiede anche una gestione attenta dei dati e delle questioni etiche correlate. Infine, le esperienze pratiche e umane condotte durante il periodo di tirocinio hanno offerto un'opportunità preziosa per comprendere le sfide e le opportunità concrete nell'applicazione della fotogrammetria e dei software ad essa legati. Queste esperienze hanno contribuito ad arricchire la comprensione dell'ambito aerofotogrammetrico e hanno evidenziato la necessità di continuare ad esplorare e definire ulteriormente il campo. In definitiva il tema d'esame ha offerto una visione completa delle moderne pratiche e tecnologie fotogrammetriche, mettendo in luce le sfide e le opportunità che caratterizzano questo campo in continua evoluzione. Il futuro della fotogrammetria si prospetta ricco di possibilità, e sarà determinato dalla capacità del singolo di adattarsi alle tecnologie, alle esigenze etiche e alle sfide pratiche che inevitabilmente si presenteranno.



## Bibliografia

- Aber J. W. e Babb T. A. (2018). *The Challenges of Processing Kite Aerial Photography Imagery with Modern Photogrammetry Techniques*. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 5(2).
- Albeaino G., Gheisari M., Franz B. W. (2019). *A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain*. *ITcon*, 24, p. 381-405.
- Al Gore (1998). *The Digital Earth*. *Australian Surveyor*, 43 (2), p. 89-91
- Aliprandi S. (2017), *Il Fenomeno Open Data*. Ed. Ledizioni, Milano.
- Basile F. (2019), *Intelligenza Artificiale e diritto penale: quattro possibili percorsi di indagine*. *Diritto Penale Contemporaneo*, Milano.
- Bryson M., ...et al (2013). *Kite Aerial Photography for Low-Cost, Ultra-high Spatial Resolution Multi-Spectral Mapping of Intertidal Landscapes*. *PLoS ONE*, 8(9).
- Borfecchia F., ...et al (2008). *Tecniche LIDAR ed aerofotogrammetriche per la stima di parametri geometrici di edifici in aree urbanizzate soggette a rischio sismico*. In: *ATTI 11° Conferenza Nazionale Asita*.
- Calcante A. (2015), *Potenzialità dei droni*. <Intersezioni >, 2015/01/14.
- Choi-Fitzpatrick A., ...et al (2016). *Up in the Air: A Global Estimate of Non-Violent Drone Use 2009-2015*. < <https://digital.sandiego.edu/gdl2016report/1> >.
- Damiani E. (2021). *Privacy e utilizzo dei droni in ambito civile*. *European Journal of Privacy Law & Technologies*, 1, p. 157-179.
- Damiani E. (2021). *L'utilizzo dei droni e le inerenti ricadute sul diritto della privacy e della responsabilità civile*. Ed. Nuova Editrice Universitaria, Milano.
- De Caterini G., Zaffiro P. (2015). *Umberto Nistri, the Italian genius and the development of aerial photogrammetry*. *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 36, p. 60-62
- Eichleay M., ... et al (2019), *Using the Unmanned Aerial Vehicle Delivery Decision Tool to Consider Transporting Medical Supplies via Drone*. *Global Health: Science and Practice*, 7(4)
- Feurer D., ... et al (2018). *Using kites for 3-D mapping of gullies at decimetre-resolution over several square kilometres: a case study on the Kamech catchment, Tunisia*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (6), pp.1567 - 1582.

- Gini R., ...et al (2011), Utilizzo dei droni per la documentazione e la valorizzazione dei beni paesaggistici: il progetto FoGLIE. In: Atti 15° Conferenza Asita. Reggio di Colorno, p. 1195-1203.
- Goodchild M.F., ... et al (2012). *Next-generation Digital Earth*. PNAS, 109 (28), p. 11088-11094.
- Grossner K., Goodchild M., Clark K. (2008). *Defining a Digital Earth System*. *Transaction in GIS*, 12 (1), 145-160.
- Hassnain Mohsan S.A., Asghar Khan M., Ghandi Y.Y. (2023). *Editorial on the Advances, Innovations and Applications of UAV Technology for Remote Sensing*. *Remote Sens*, 15,5087.
- Lo Brutto M. (2016). I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche. *GEOLOGI DI SICILIA*, 2, p. 21-33.
- Lorenz D. R., Scheidt P. S. (2014), *Compact and inexpensive kite apparatus for geomorphological field aerial photography, with some remarks on operations*. *GeoResJ*, 3-4.
- Marris E. (2013). *Fly, and bring me data*. *Nature* 498, p. 156-158.
- Minucci E. (2018), APR e droni nella moderna ricerca archeologica: un primo approccio. *Newsletter di Archeologia CISA*, 9, 91-114.
- Norzailawati Mohd Noor, ... et al (2018). *Remote sensing UAV/drones and its applications for urban areas: a review*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 196.
- Pánek J., Pászto V., Perkins C. (2018). *Flying a kite: playful mapping in a multidisciplinary field-course*. *Journal of Geography in Higher Education*, 42(3), p. 317-336.
- Regine V., Salvini R., Tufarolo E. (2020), Rilievo Aerofotogrammetrico e Cartografia in Campo Archeologico: Casi Applicativi nel sito di UÅŸakli Höyük (Turchia). *Archeomatica*, 9(2), 6-13.
- Sarazzi D., ...et al (2011), Piattaforma UAV per l'acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica di immagini di scavi archeologici e strutture architettoniche. In: Atti 15° Conferenza Asita. Reggio di Colorno, p. 1933-1942.

## Sitografia

D-Flight, offre servizi per visualizzare regole per il traffico aereo a basse quote (febbraio 2023)

[D-Flight | Home](#)

DJI Mini 3 Pro, scheda tecnica e specifiche (dicembre 2022)

[DJI Mini 3 Pro - Specifiche - DJI](#)

Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, "Regolamento UAS-IT" (dicembre 2022)

[Regolamento UAS-IT \(enac.gov.it\)](#)

X-PAD Office Fusion, Software per elaborazione fotogrammetrica e rilievi (dicembre 2022)

[X-PAD Office Fusion | GeoMax \(geomax-positioning.com\)](#)

Regolamento europeo EASA:

<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu>.