

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI AUTOMATICA E INFORMATICA

Laurea Magistrale in Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

**Elaborazione di dati catturati
da SAPR e automazione del
task di cattura in Telecom
Italia**

Scouting di soluzioni per l'elaborazione del dato catturato da
SAPR e automazione dello svolgimento del task.



Relatori

Prof. Bartolomeo Montrucchio
Ing. Gaspardone Marco

Candidato

Roberto SANDRI

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

*A mia madre,
per sempre con me*

Abstract

Lo sviluppo ed il perfezionamento dei Sistemi di Aeromobili a Pilotaggio Remoto degli ultimi anni, ha portato ad un crescente interesse da parte delle aziende di svariati settori lavorativi nel cercare di sfruttare tale tecnologia nei propri processi lavorativi. Questo fenomeno apre una sfida riguardante come perfezionare il workflow di utilizzo di un SAPR e su come elaborare i dati raccolti per raggiungere al meglio gli obbiettivi di tali task.

La presente tesi, svolta per conto di TIM S.p.A, prende in esame il workflow riguardante l'impiego di un SAPR nello svolgimento di un generico task di cattura dati, focalizzandosi sulla parte di cattura ed elaborazione del dato. L'obbiettivo è stato infatti quello di studiare le potenzialità che i moderni applicativi di elaborazione offrono e quello di progettare un nuovo approccio di lavoro aumentando il grado di automatizzazione dei task successivi al volo. In particolare, nei primi due capitoli viene analizzato l'utilizzo dei SAPR nel mondo professionale, con particolare focus per l'ambito delle telecomunicazioni e successivamente vengono descritti i diversi step che compongono l'impiego di un SAPR. Analizzando tali fasi di lavoro, nell'ottica di automatizzare il più possibile il workflow, sono stati individuati due punti chiave che sono oggetto di ricerca e di sviluppo all'interno di Telecom Italia.

Il primo è il superamento delle limitazioni date dall'attuale collegamento radio tra aeromobile e base di controllo, implementando una connessione basata sulla nuova rete 5G di TIM.

Il secondo punto chiave è l'automazione del task di cattura e della fase di elaborazione dei dati, punto su cui maggiormente tale tesi si focalizza.

Alla luce di questo, la fase principale di ricerca si è concentrata sullo studio dello stato dell'arte degli applicativi presenti sul mercato che permettono

un'elaborazione dei dati tipicamente raccolti durante le fasi di volo: immagini e flussi video RGB, immagini catturate da sensori ad infrarosso e multispettrali e dati raccolti con sistemi LIDAR.

Tale ricerca è stata organizzata in tre step principali. Una prima fase di scouting in cui sono stati selezionati quattro applicativi (DJI Terra, Delair.Ai, Dronedeploy, Pix4D) per i quali è stato poi eseguito un approfondito studio sulle caratteristiche, peculiarità e limitazioni. In una seconda fase sono stati messi a confronto i dati raccolti ed è stata individuata la miglior soluzione dal punto di vista teorico, in base ai diversi casi d'uso. In uno step successivo sono stati testati i due applicativi ritenuti migliori dall'analisi fatta: Dronedeploy e Pix4D. Per questa fase di testing è stato fornito dall'azienda SEiKEY un apposito dataset di immagini, creato durante la mappatura di una stazione radio base di TIM. Sono state create poi diverse versioni del dataset, andando a modificare quantità e qualità delle immagini che lo compongono. Tali dataset sono stati poi fatti elaborare dai due applicativi per ottenere in output la ricostruzione di un modello poligonale della stazione radio. I risultati raggiunti sono stati analizzati e comparati, andando a definire come le due diverse soluzioni rispondono ad uguali input. Le conclusioni riguardanti questa fase di ricerca hanno messo in luce pregi e difetti dei due applicativi testati ma hanno anche evidenziato le caratteristiche che un dataset deve avere per poter ottenere in output un determinato livello qualitativo nel modello creato.

Nella fase finale di ricerca è stato analizzato come automatizzare, a livello teorico e di prototipazione, il task di elaborazione dei dati, cercando di ottimizzare le tempistiche per quanto concerne il necessario download dei dati dal APR all'elaboratore ed un eventuale successivo upload dall'elaboratore alle piattaforme di calcolo cloud based.

Indice

1	I SAPR ed il loro utilizzo	9
1.1	I campi di utilizzo	10
1.2	Drone connesso - L'utilizzo dei SAPR nel mondo delle telecomunicazioni	13
1.2.1	Limitazioni tecnologiche e regolamentative	14
1.3	I SAPR nelle reti mobili e 5G	16
1.3.1	Supporto per la copertura radiomobile	17
1.3.2	Supporto nell'architettura di una rete	17
1.3.3	Rete radiomobile per il tracking degli APR	18
1.4	L'uso dei SAPR in TIM	18
2	Il workflow di lavoro di un SAPR	21
2.1	Obiettivi della tesi	21
2.2	Gli step del workflow	22
2.2.1	Studio di fattibilità	23
2.2.2	Scelta degli strumenti	23
2.2.3	Pianificazione del volo	25
2.2.4	Operazione di volo	25
2.2.5	Trasferimento dati	26
2.2.6	Elaborazione e analisi del dato	26
3	Scouting e analisi degli applicativi di elaborazione dati	37
3.1	Individuazione delle metriche di valutazione	38
3.2	Ricerca delle principali soluzioni presenti sul mercato	40
3.3	Selezione di quattro delle soluzioni analizzate	42
3.4	Analisi e approfondimento delle soluzioni selezionate	43
3.4.1	DJI Terra	43
3.4.2	DelAir.Ai	47

3.4.3	DroneDeploy	50
3.4.4	Pix4D	56
3.5	Comparazione e analisi dei risultati raggiunti	61
3.5.1	Analisi dei dati	61
4	Testing e comparazione di Pix4D e DroneDeploy	67
4.1	Il dataset	67
4.1.1	Dataset secondario	69
4.2	Preparazione del dataset	69
4.3	Fase di test di Pix4D	70
4.3.1	Processo di elaborazione	70
4.3.2	Quality report	71
4.3.3	Elaborazione locale vs elaborazione in cloud	73
4.3.4	Pix4D test	74
4.4	Fase di test di DroneDeploy	88
4.4.1	Quality report	89
4.4.2	DroneDeploy test	90
5	Automazione dello step di elaborazione	99
5.1	I tool disponibili	100
5.2	Sviluppo del prototipo	100
5.2.1	Logica del processo di elaborazione	101
5.3	Valutazione prototipo	102
6	Conclusione e sviluppi futuri	103
6.1	Conclusioni	103
	Bibliografia	107
7	Notes	109

Capitolo 1

I SAPR ed il loro utilizzo

A partire dal 2006, anno in cui la Federal Aviation Administrator ha rilasciato i primi permessi nell'ambito dei droni commerciali, l'utilizzo dei sistemi di aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) ha visto una crescita esponenziale in svariati campi di utilizzo. Grazie alla costante miniaturizzazione della tecnologia, sviluppo di accumulatori sempre più preformanti e leggeri come quelli basati su polimeri di litio e grazie al generale interesse commerciale nell'ambito, i sistemi APR hanno assunto un'importanza sempre più rilevante come strumento di lavoro, portando anche allo sviluppo e miglioramento della sensoristica usata a bordo come payload. Da un'adeguata prospettiva infatti, il drone non è altro che un vettore con il compito di trasportare e permettere l'utilizzo di sensori e sistemi di raccolta dati in ambienti, situazioni e angolazioni altrimenti impossibili o difficili da gestire. Tra i principali vantaggi che tale tecnologia può offrire si possono certamente citarne i quattro principali, che verranno poi menzionati ed approfonditi anche nei capitoli successivi:

- Il risparmio di tempo, dato da una semplificazione del task e della immediatezza di utilizzo di un APR rispetto a soluzioni alternative come l'impiego di elicotteri, piattaforme elevatrici oppure gru.
- Un abbattimento generale dei costi dato dal risparmio in termini di tempo come sopraccitato e dall'impiego di meno personale specializzato per lo svolgimento del task, come nel caso di ispezioni a infrastrutture o nelle operazioni di primo soccorso.
- Maggior sicurezza durante lo svolgimento del task, grazie alla capacità dell'aeromobile di raggiungere posti e ambienti pericolosi per l'uomo

ed il poter evitare così presenza umana altrimenti necessaria.

- Relativa semplicità di pilotaggio e impiego di un SAPR, che richiede infatti un apprendimento immediato e facilmente raggiungibile.

È proprio grazie a questa dinamicità e potenzialità di utilizzo che i SAPR sono, al giorno d'oggi, usati in molti ambiti professionali in cui si cerca di sfruttarne i vantaggi, spesso con l'obiettivo di sostituire o migliorare tecniche e soluzioni già esistenti. Basti pensare che secondo una recente ricerca di mercato della International Data Corporation (IDC), la categoria dei droni prevede un tasso annuo di crescita CAGR del 32,6% per il quinquennio 2018-2023, raggiungendo le prime posizioni tra le nuove tecnologie emergenti.¹

1.1 I campi di utilizzo

Entrando nel dettaglio del mondo professionale degli APR, troviamo sei principali settori civili di maggior rilievo in cui tale tecnologia ha trovato una solida base di utilizzo:

- **Riprese nell'ambito cinematografico, pubblicitario o privato.** Grazie alla possibilità di poter trasportare camere sempre più preformanti e professionali, e grazie all'uso di sofisticati stabilizzatori elettronici che eliminano vibrazioni e movimenti indesiderati, il drone è ampiamente usato in questo settore aprendo così possibilità di riprese e movimenti di camera prima impossibili o difficoltose da realizzare. L'uso di un APR in tale campo può infatti sostituire svariate attrezzature, come carrelli, dolly, gru ed elicotteri.
- **Rilievi topografici e aerofotogrammetrici.** Nel campo della fotogrammetria digitale, il drone ha trovato un immediato successo di utilizzo, ciò è dato dal fatto che in tale impiego sono sfruttati al massimo i vantaggi sopra descritti. Il lavoro di fotogrammetria infatti, viene di molto semplificato potendo automatizzare varie parti del processo lavorativo come la pianificazione del volo, il task di cattura delle immagini ed il workflow di elaborazione. L'applicazione dei droni opera attraverso la creazione di modelli digitali del terreno e ortofoto, e produce rilievi architettonici di infrastrutture, edifici e terreni per la creazione di modelli 3D. Parallelamente a tale interesse nell'utilizzo del drone, il mercato offre software e servizi di elaborazione di immagini e

di ricostruzione di mappatura sempre più sofisticati e specializzati nel trattamento di immagini aeree catturate con un SAPR.² Tali aspetti verranno approfonditi nei capitoli successivi.

- **Pianificazione e ispezione delle attività agricole.** Un campo in cui esiste un interesse sempre più crescente nell'impiego dei SAPR, soprattutto in Paesi come la Cina o gli Stati Uniti d'America, è proprio quello agricolo dove i task richiesti da tale tecnologia vanno dalla semplice ispezione visiva delle coltivazioni fino allo svolgimento di veri e propri compiti di lavoro, nell'ottica di realizzare la cosiddetta agricoltura di precisione. In tale modello di agricoltura infatti, è previsto l'utilizzo di nuove tecnologie sul campo per la raccolta ed elaborazioni di dati che portino decisioni finalizzate alla produzione agricola, portando così un vantaggio sia per l'ambiente sia per l'agricoltore. Grazie ai dati raccolti da sensoristiche multispettrali e alla successiva elaborazione tramite specifici software, possono essere fatte previsioni di raccolto e resa del terreno, oltre a poter essere individuati problemi e necessità specifiche per ogni zona, in modo da effettuare una distribuzione mirata dei principali fattori della produzione come acqua, fertilizzanti e fitofarmaci.³
- **Ispezioni di infrastrutture e grandi impianti industriali.** Le caratteristiche sopracitate di un SAPR permettono di svolgere controlli visivi e approfonditi su una vasta varietà di edifici ed strutture, per verificarne lo stato di usura, eventuali danneggiamenti, individuare imperfezioni di costruzione e verificare il corretto funzionamento di particolari installazioni. Tramite sensori RGB ed infrarossi possono essere realizzate tali ispezioni su oleodotti, gasdotti, linee elettriche e ferroviarie, impianti fotovoltaici ed eolici e su strutture come ponti, edifici civili e industriali. Nell'ambito edilizio il drone viene ampiamente utilizzato durante la realizzazione di grandi cantieri per poter verificare l'avanzamento dei lavori, verificare la corretta realizzazione dell'opera come da progetto e calcolare statistiche e previsioni di avanzamento.
- **Supporto nell'ambito del primo soccorso ed emergenze.** Un ambito di interesse sociale nella quale la tecnologia degli SAPR sta trovando spazio è quello medico, dove i droni vengono sfruttati per il trasporto di defibrillatori DAE e trasporto di farmaci, sangue ed organi in situazioni di emergenza. Tale tipologia di impiego è una

realtà anche in Italia dove, infatti, la Croce Rossa Italiana ha avviato già da qualche anno il progetto di “Drone salvavita”. In tale progetto la CRI, in collaborazione con ENAC e altre aziende italiane, ha dato vita ad alcune unità operative composte da piloti SAPR e multicotteri equipaggiati con un DAE. Tali unità sono sfruttate per interventi di emergenza in Italia ma anche per alcune operazioni all'estero.⁴ Sempre nell'ambito del primo soccorso si citano altri importanti utilizzi degli APR come la ricerca di dispersi, ricerca di sopravvissuti dopo eventi gravi come terremoti e valanghe, prevenzione incendi e controllo frane. Corpi di soccorso come la Protezione Civile e Vigili del Fuoco prevedono sovente l'utilizzo di tale tecnologia di supporto.

- **Videosorveglianza e security.** Un campo di utilizzo che richiama l'uso militare dei droni (ambito in cui sono stati applicati per la prima volta) è quello della sicurezza e sorveglianza. In particolare, nell'ambito privato, l'aeromodello viene usato per integrare circuiti CCTV perimetrali o interni per avere un servizio di videosorveglianza esteso. Tale settore sta avendo un interesse sempre più crescente come testimonia la recente deposizione di un brevetto di Amazon per un servizio di videosorveglianza effettuato tramite la sua flotta di APR.⁵ Per la sicurezza di alto livello necessaria alle forze dell'ordine, i sistemi SAPR sono sfruttati anche per la ricerca e identificazione di persone all'interno di una folla per la prevenzione, controllo, accertamento e repressione di condotte criminali. Un esempio di tale utilizzo degli APR è dato dall'azienda francese DelAir che progetta e costruisce droni ad ala fissa oltre ad aver sviluppato un software di elaborazione del dato (Si veda il Capitolo 3). A partire dal 2012 tale azienda offre sul mercato sistemi per la sicurezza pubblica e privata in collaborazione con il dipartimento della difesa francese, i droni di DelAir possono infatti effettuare riconoscimenti facciali fino a 1.5 km di distanza, supportano un collegamento satellitare e comunicazioni cifrate, visione notturna e motion tracking.⁶

Alla luce dei molteplici campi di utilizzo sopra elencati, è facile intuire come questo settore stia portando investimenti e opportunità di business a livello globale. Il mercato dei droni commerciali in Europa ha, infatti, un impatto economico stimato di 10 milioni di euro annui per i prossimi 20 anni ma, studiando il fenomeno più da vicino, si delinea che il mercato europeo si sta sviluppando in forme differenti a causa di un regolamento

non unificato e diverso per i vari Stati membri. Esistono infatti regole differenti in base al peso del mezzo, in base al tipo di volo effettuato (VLOS o BVLOS) e in base alle diverse aree di restrizione del volo. Tali differenze hanno portato confusione e insicurezza nelle aziende del settore riguardo le possibilità o restrizioni che si hanno. Nonostante questo, l'Europa è al centro dello sviluppo tecnologico ed economico di questo settore e influenza il mercato a livello globale. Dopo il 2017, anno in cui EASA ha proposto un regolamento unificato per gli Stati membri, si è lavorato su come colmare tale frammentazione per realizzare così la stesura della prima versione del Regolamento Europeo in ambito droni che entrerà in vigore a luglio 2020. [1]

1.2 Drone connesso - L'utilizzo dei SAPR nel mondo delle telecomunicazioni

Come detto in precedenza, molte aziende si stanno attivando per trovare il modo migliore per poter costruire un business attorno al drone, anche realtà come Nokia si sono approcciate recentemente a questa tecnologia per la prima volta. In particolare Nokia, che si occupa anche di infrastrutture per la rete mobile, ha avviato una serie di sperimentazioni dell'utilizzo dei APR in tale campo. [9] Le sperimentazioni e le implementazioni degli APR che Nokia ha sviluppato nella sua azienda, rientrano in quelle che anche le aziende concorrenti hanno attuato:

- *Ispezioni di torri.* Il lavoro dello scalare le torri delle stazioni radio base della rete di comunicazione mobile è sempre stato considerato un lavoro rischioso. Sempre più i droni sono usati per tali ispezioni, potendo inviare dati in tempo reale durante il volo riguardanti l'infrastruttura, raccogliendo foto, video e altre tipologie di misurazioni. I dati raccolti con questa metodologia sono inoltre considerati più affidabili di quelli raccolti manualmente. Dal punto di vista dei costi, l'ispezione manuale di una torre ha un costo che può variare tra i 2000\$ e 5000\$ in base allo scopo dell'ispezione. L'utilizzo del drone si rileva dunque molto più economico, anche paragonato a velivoli più impegnativi come elicotteri o aeroplani. Un esempio di tale utilizzo degli APR lo si trova nell'azienda AT&T, che nel 2016 ha sperimentato

l'uso dei droni DJI Inspire per le ispezioni sulle proprie torri di trasmissione. Alla luce dei risultati raggiunti, l'azienda ha ufficialmente inserito nel proprio workflow questa metodologia di lavoro, diventando così una delle prime aziende a farlo. Oltre ad utilizzare i droni per installazioni, ispezioni e riparazioni, AT&T ha valutato l'utilità degli APR per il controllo dei nidi di voltatili. Attualmente infatti, AT&T ha limitazioni nel poter riparare o ispezionare le torri in caso di nidificazione attiva da parte di specie di uccelli protette.⁷

- *Pianificazione installazioni ponti radio e verifica della portata.* Con l'utilizzo di un APR è possibile calcolare e misurare la posizione e l'altezza ideale di una torre radio, andando a testare la portata in vari punti campione ed evitare di avere ostruzione da parte di alberi, strutture o colline.
- *Supporto alla rete mobile.* Un APR adeguatamente equipaggiato può essere sfruttato anche come nodo di rete nella comunicazione mobile, coprendo parte delle funzioni che tipicamente svolgono le stazioni radio base BTS. In caso di disastri ambientali, il drone può essere usato per ristabilire o creare un ponte di comunicazione e rimettere online una certa infrastruttura o zona specifica. Un esempio di tale utilizzo è stato realizzato durante l'uragano Maria nel 2017 nel bacino atlantico, nella quale alcuni droni equipaggiati con tecnologia LTE hanno permesso di ristabilire la connessione di alcuni portoricani con il resto del mondo dopo che questi erano stati impossibilitati a comunicare a causa dei danni alle infrastrutture causate dal disastro.⁸

1.2.1 Limitazioni tecnologiche e regolamentative

Molti altri campi di applicazione dei SAPR nel mondo industriale sono al giorno d'oggi limitati e poco diffusi per mancanza di supporto nel volo autonomo e dalle limitazioni che il classico collegamento radio, usato nei sistemi APR, comporta in termini di range d'azione. Il volo autonomo di un drone, necessario per tali task, e il superamento delle limitazioni date dall'attuale link tra drone e base di controllo, interesserebbe e necessiterebbe dello sviluppo e del supporto in parallelo dell'infrastruttura della rete mobile, ma le industrie non si sono buttate a capofitto nell'investire in questo ambito per una mancanza di chiarezza e supporto delle normative come accennato in precedenza. Tale regolamentazione deve, dall'altro

lato, essere supportata da una tecnologia e affidabile e sicura, e tale tecnologia riguarda le funzionalità di connessione alla rete mobile che ogni drone dovrebbe avere. Come ogni componente IoT, la funzionalità di un APR in volo autonomo è garantita se c'è comunicazione, e se c'è comunicazione è possibile di conseguenza avere una migliore organizzazione. [10] Un primo esempio di applicazione che si è scontrata con con tali limitazioni è l'uso del drone per valutare e implementare la qualità del servizio di rete mobile e scoprire le zone in ombra non coperte. Un task potenzialmente molto utile nell'ambito della telefonia mobile ma che ancora non ha trovato modo di svilupparsi a pieno. Un esempio di tale applicazione è il progetto DRNet di TIM che consiste in una serie di attività sperimentali nella città di Torino, il cui obiettivo è quello di effettuare rilevazioni con i droni per poter valutare da un lato la copertura radiomobile, dall'altro misurare le prestazioni al variare della distanza dal suolo. Tale sperimentazione, avviata a partire da novembre 2018, è stata la prima in Europa in un contesto urbano aprendo la strada verso futuri scenari nell'ottica di sviluppo di una Smart City.⁹

Un secondo esempio di utilizzo del drone che si è scontrato con le limitazioni date dal collegamento radio tra velivolo e stazione di terra, riguarda l'ispezione alla rete di distribuzione di energia elettrica in Cina e uno studio di fattibilità realizzato nel 2014. Nella sostituzione del lavoro manuale nelle ispezioni di linee elettriche, l'utilizzo degli APR ha portato un minor costo, maggiore affidabilità e facilità nello svolgimento del task, soprattutto in particolari condizioni geografiche come nel sud ovest delle Cina. Sempre più industrie energetiche si stanno muovendo nella direzione di utilizzare tale tecnologia e i differenti tipi di velivoli (Elicotteri, multicotteri o ala fissa) fanno in modo che per ogni situazione esista l'APR ideale. D'altra parte però, tale approccio incontra tre principali problematiche di seguito elencate, che verranno anche trattate nel Capitolo 2.

Uno dei primi problemi che l'applicazione di tale approccio incontra è il fatto che non esiste un mezzo che si possa adattare a tutti i tipi di linee elettriche e di situazioni. Se da una parte l'aeromobile ad ala fissa è veloce ed ha grande autonomia di volo, dall'altra non può cogliere dettagli e aspetti che un multirottore può catturare, quest'ultima tipologia di aeromodello presenta però limitazioni di autonomia di batteria o carburante. Un secondo problema riguarda l'adattabilità di un APR per il task in questione. Non esiste infatti una soluzione ufficiale per quanto riguarda la

trasmissione dei dati raccolti (come foto e video) verso la ground station. I due approcci principali nella gestione di tali dati sono la pianificazione in anticipo del volo e il download dei dati dal velivolo ad un computer una volta terminato il volo, oppure la trasmissione del segnale video in real time dall'aeromobile alla ground station, tramite una connessione radio a 2.5/5.8 Ghz. Tale tipo di comunicazione però, può essere utile solo per aiutare il pilota nel manovrare il mezzo, ma il segnale che si riceve non può essere usato come dato finale da elaborare in quanto questo è spesso degradato a causa delle caratteristiche della connessione e dell'effetto multipath dato dal rimbalzo del segnale, oltre ad essere soggetto e limitato in distanza. Un terzo problema è rappresentato dall'elaborazione del dato successiva alla cattura. Spesso tali dati sono analizzati da esperti del settore, dunque i video o le foto in alta qualità devono essere trasportati in una certa postazione di lavoro che può distare molti chilometri dalla zona di volo. Si ha così un dilatamento delle tempistiche di lavoro non indifferenti.

La soluzione che si propose in tale particolare situazione fu la realizzazione di una rete composta da tipologie differenti di droni, ognuno con il compito di ispezionare una parte specifica della rete di distribuzione elettrica. Questi SAPR comunicano con un'unica ground station e tale comunicazione avviene tramite un multicottero vincolato a terra che fa da nodo intermedio tra la base di terra e gli APR impiegati nell'ispezione. Le tempistiche di ispezione di una certa porzione di rete furono portate da 8 ore a 15 minuti impiegando solo 6 persone per il lavoro. [3]

1.3 I SAPR nelle reti mobili e 5G

Come descritto precedentemente, la necessità di superare le limitazioni date dal classico collegamento radio, tipicamente a 2.4 Ghz, e la necessità di realizzare voli automatizzati, hanno portato negli ultimi anni verso la soluzione di basare la comunicazione tra velivolo e base di comando sulla rete di telefonia mobile. L'attuale rete di droni e la comunicazione con essi ha portato a far emergere aree specifiche di ricerca e sviluppo orientate verso l'obiettivo di avere una comunicazione sempre più a maggior throughput, range d'azione sempre più esteso ed una copertura di tale rete sempre più estesa. Parallelamente, l'interesse delle grandi industrie verso questo mondo ha portato allo studio sull'integrazione sempre maggiore del drone

per il supporto alle attività lavorative tradizionali, risolvendo molti aspetti riguardanti la qualità del servizio, strategie di lavoro e comunicazioni sicure.

1.3.1 Supporto per la copertura radiomobile

Come citato in precedenza, nel mondo delle telecomunicazioni il drone è ampiamente usato per il trasporto di informazioni ai confini della rete e per lo sviluppo della rete Long Term Evolution (LTE). Sono inoltre considerati parte integrante della tecnologia 5G perché svolgono sempre più un ruolo importante nella copertura e miglioramento della capacità di rete. Tra le varie caratteristiche che una rete wireless basata su droni può avere, si citano la dinamicità, scalabilità, la robustezza della connessione punto-punto e i molti gradi di libertà nella progettazione e realizzazione. La prospettiva della connessione 5G è quella di poter supportare oltre 100 milioni di dispositivi online, gestire un importante volume di traffico di dati fino a 1 zetabyte mensile, volume previsto per il 2028, e la capacità di garantire caratteristiche fondamentali come affidabilità, sicurezza, latenza e bassi consumi, più di quanto l'attuale connessione 4G riesca a fare. Tuttavia, una rete basata solo su infrastrutture terrestri sarebbe difficile e onerosa da ripristinare in caso di catastrofi naturali, oltre ad essere poco dinamica e scalabile in modo non immediato. Ecco perché la strada che si sta intraprendendo è quella di reti ad architettura eterogenea e intelligente, basata anche sull'utilizzo dei droni. Tale architettura prevede l'utilizzo di un APR che trasporta una ricetrasmittente. Questa viene utilizzata per fornire i servizi di comunicazione in caso di assenza di supporto da terra, o per migliorare la capacità di tale servizio in caso di sovraccarico delle struttura (UAV-assisted communications). Tali droni possono anche consistere in veri e propri nodi della rete aerei permettendo così una vasta possibilità di applicazioni come la sorveglianza aerea o il trasporto di carichi. [6]

1.3.2 Supporto nell'architettura di una rete

Un argomento di grande interesse e sviluppo sono le reti FANET, ossia reti ad hoc formate da più droni in volo. Le tecniche e le specifiche di comunicazione in tale rete sono argomenti ancora aperti e non di facile soluzione, considerando l'alta dinamicità della rete. L'approccio che per

alcuni studi sembra più promettente è quello dell'utilizzo di protocolli basati su routing, che gestiscono meglio aspetti come throughput, ritardo end to end e il carico della rete. Una rete di questo tipo può avere delle implementazioni importanti sia in ambito civile che militare, come ad esempio il migliorare le operazioni di primo soccorso in eventi catastrofici o di pubblica sicurezza oppure il supporto nella navigazione, controllo e ricognizione di determinate aree. [2]

1.3.3 Rete radiomobile per il tracking degli APR

A marzo del 2019 Vodafone, in collaborazione con l'azienda aerospaziale Thales, è entrata a far parte del National Beyond visual line of Experimentation Corridor (NBEC), realizzata dall'università di Cranfield (UK) e dalla Blue Bear Research Systems. In tale corridoio sperimentale si sta sperimentando come sfruttare la connessione 4G e 5G dei droni per poter tracciare in tempo reale la posizione degli APR in volo, aspetto fondamentale per poter realizzare il volo in BVLOS in modo sicuro. Tale sistema permetterà di affiancare il già esistente sistema GPS per avere così una seconda misurazione della localizzazione del drone, più precisa, robusta e affidabile. Tale tecnologia troverà applicazioni nell'ambito della sorveglianza, delle ispezioni alle infrastrutture e nei servizi riguardanti la logistica e servizi di consegna. I benefici saranno dunque sia dal lato economico ma anche quello sociale.¹⁰

1.4 L'uso dei SAPR in TIM

La storica azienda italiana di telecomunicazioni ha sviluppato un forte interesse nella sperimentazione e nell'utilizzo della tecnologia degli SAPR all'interno della propria azienda. TIM, polo di riferimento per la ricerca e innovazione nel panorama nazionale ed internazionale, svolge importanti ricerche non solo in ambito delle telecomunicazioni ma anche in vari ambiti tecnologici sempre più trasversali. In particolare, nel centro di sviluppo e ricerche TIM Open Labs con sede a Torino, vengono portati avanti studi e sperimentazioni sullo scouting di nuove tecnologie, l'elaborazione di studi sulle valutazioni di fattibilità e lo studio di prototipi, coprendo vari temi quali: IoT, tecnologia 5G, Big Data, Intelligenza artificiale, Digital

Services e virtualizzazione di rete. In quest'ottica di sviluppo, i sistemi di aeromobili a pilotaggio remoto trovano spazio non solo per il loro specifico campo di utilizzo, ma è di particolare interesse anche il loro sistema di funzionamento e pilotaggio in generale, che sta trovando sviluppi sempre più interessanti grazie allo sfruttamento della tecnologia di rete 5G, la 5° generazione di tecnologia per la comunicazione mobile. Grazie infatti alla maggiore velocità di banda, alla bassa latenza e alla stabilità di connessione offerta dalla nuova rete sviluppata da TIM, si sono già sperimentati i primi prototipi di SAPR nei quali la ground station e l'aeromobile comunicano non più in canale diretto tramite un classico collegamento a radiofrequenza, ma tramite una connessione a pacchetti in rete mobile. Questa innovativa modalità di pilotaggio apre le porte ad una comunicazione pilota - aeromobile che supera il limite delle distanze imposte dal classico canale di comunicazione e che permette un invio in real time dei dati raccolti dal payload, anche per flussi importanti in termini di banda richiesta dallo streaming. [4]

A novembre 2019 Tim ha lanciato a Torino la prima rete live 5G Edge Cloud d'Europa con droni connessi, tale rete prevede di essere un punto chiave per lo sviluppo industriale ed economico della città. La rete 5G Edge Cloud garantisce infatti un'elevata banda e bassa latenza e permette di aggregare ed elaborare una quantità altissima di dati che assicurano servizi digitali con livelli di qualità e sicurezza elevati, nonché maggiore agilità e flessibilità di configurazione dei servizi e delle applicazioni secondo le tipiche logiche del Cloud. Proprio la bassa latenza della rete, tramite cui è possibile connettere sia il drone che il sistema di comando, permette di sfruttare un canale radio sicuro e di proteggere la guida da possibili interferenze, cosa indispensabile per un volo in sicurezza anche in contesti affollati.¹¹

Capitolo 2

Il workflow di lavoro di un SAPR

2.1 Obiettivi della tesi

Negli ultimi anni l'azienda TIM si è evoluta l'ottica di rimanere leader e punto di riferimento nell'ambito delle telecomunicazioni e infrastrutture di rete, ma sviluppando allo stesso tempo anche un interesse sempre maggiore in ambiti diversificati, cercando di offrire sul mercato servizi sempre più trasversali. Basti pensare ai servizi di TIM Vision e TIM Music, esempi di come l'azienda abbia puntato, in questo caso, ai servizi di intrattenimento. In tale ottica aziendale e tenendo in considerazione l'interesse sempre maggiore nell'applicazione della tecnologia dei SAPR, si sta sperimentando anche in TIM l'utilizzo dei droni in diversi campi applicativi, cercando di testare e valutare quali nuovi servizi l'azienda potrà offrire sul mercato. Questi potenziali campi di interesse richiedono che il drone abbia principalmente due caratteristiche innovative, rispetto la tecnologia esistente allo stato dell'arte:

1. Una connessione al pilota e trasmissione dati ad alte prestazioni
2. Un buon livello di autonomia e automazione nello svolgimento del task.

È su queste due caratteristiche che parte dei laboratori di sviluppo e ricerca di TIM stanno puntando. Come già descritto nel Capitolo 1, il collegamento tra drone e base di controllo tramite la rete 5G è già una realtà nell'ambiente sperimentale. A testimonianza di ciò, a maggio 2019

si è tenuta a Genova una dimostrazione di applicazione di tale tecnologia, dove TIM in collaborazione con Ericsson, Liguria Digitale e gli organi amministrativi locali, hanno effettuato due missioni, una in volo e una a terra, rispettivamente con un drone ed un rover controllati da remoto attraverso la rete mobile. Tali operazioni, svolte nell’ottica di monitoraggio del territorio, hanno visto l’impiego di droni professionali e del know-how di Seikey, importante partner tecnologico di TIM, oltre ai rover controllati in logica 5G messi a punto da Ericsson. L’esperimento si è avvalso della piattaforma Cloud Robotics Infrastructure di Tim e, alla luce dei promettenti risultati ottenuti, tale piattaforma può permettere nuove soluzioni per la pubblica sicurezza, per il monitoraggio di infrastrutture critiche per la tutela del territorio e in generale nuovi servizi dedicati alla comunità, imprese e pubblica amministrazione.¹

Per quanto riguarda invece il secondo requisito, ossia l’automazione nello svolgimento di un generico task, anche in questo caso le ricerche ed il mondo tecnologico stanno dando risulti sempre più promettenti. È proprio in questo contesto che la presente tesi cerca di focalizzarsi. La richiesta dell’azienda infatti, è stata quella di studiare e analizzare le soluzioni presenti sul mercato per quanto concerne l’elaborazione del dato post volo, cercando un prodotto commerciale in grado di offrire dinamicità, semplicità di fruizione ed adattabilità alle esigenze di TIM. Inoltre, in uno step successivo, è stato richiesto di studiare come tali soluzioni individuate possano integrarsi con il workflow di un SAPR nell’ottica di aumentare il grado di automazione e di abbattere i tempi richiesti nel classico ciclo di lavoro.

2.2 Gli step del workflow

Per comprendere meglio quanto appena riportato, è bene individuare e definire i vari step che tipicamente compongono un lavoro svolto con un drone, che sia esso un semplice servizio fotografico, una mappatura di un terreno o una delle qualsiasi applicazioni descritte nel Capitolo 1. La natura dei seguenti step elencati nasce sia dal workflow logico di lavoro, sia dalla metodologia di utilizzo della tecnologia, sia da obblighi e linee guida dettate dalle normative che regolano l’uso dei SAPR.

2.2.1 Studio di fattibilità

Uno studio di fattibilità delinea il piano di esecuzione di un progetto, stimando le risorse necessarie. Lo studio mette in luce i punti di forza e di debolezza del progetto stesso, identificando le opportunità ed i rischi, e definendone la probabilità di successo². In particolare, nel caso di un task in cui si prevede l'uso dei SAPR, oltre a quanto sopra definito è necessario valutare anche se tale tecnologia può essere effettivamente usata. Esistono infatti limitazioni importanti da tenere in considerazione, prime tra tutte le limitazioni tecnologiche. Non è raro infatti che ci siano ambienti o situazioni in cui un drone non può essere usato, come ad esempio in particolari impianti industriali che presentano forti disturbi elettromagnetici i quali possono influenzare negativamente il corretto funzionamento dei sensori di bordo, del sistema GPS o del sistema di invio e ricezioni del radio segnale. Un'altra limitazione può essere data dalle estreme condizioni ambientali, come temperature troppo basse o troppo alte, che rischiano un deterioramento delle batterie ai polimeri di litio, tipicamente usate. Nel primo caso si rischia infatti un parziale ghiacciamento dei vari elettroliti all'interno dell'accumulatore, bloccando di fatto le reazioni chimiche necessarie a mantenere il corretto livello di tensione. Nel secondo caso invece l'elettrolita interno subirebbe una modificazione fisica passando dal suo normale stato gelatinoso ad uno stato più liquido, provocando un innalzamento della resistenza interna e di conseguenza dalla temperatura stessa. [5]

Un altro tipo di limitazioni è dato dalle normative vigenti nel Paese in cui si opera. Secondo le regolamentazioni imposte da ENAC esistono specifiche zone interdette al volo come infrastrutture sensibili, assembramenti di persone e determinate zone vietate al volo se non dietro al rilascio di una specifica autorizzazione rilasciata dagli organi competenti.

2.2.2 Scelta degli strumenti

Successivamente all' step precedente, si definiscono gli aspetti più tecnici e pratici riguardanti il volo stesso, di seguito elencati:

- **Tipologia di missione.** Il primo riferimento da tenere in considerazione, per quanto concerne l'Italia, sono le specifiche richieste dal regolamento ENAC vigente. Tali specifiche dipendono dalla tipologia di missione nella quale ricade il volo in questione. In generale la principale differenziazione sia ha tra "Operazione non critica" e "Operazione

Critica”. Il primo caso racchiude tutte le operazioni di volo in VLOS, ossia un volo in cui il drone è pilotato a vista, che non prevedono il sorvolo di aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani e infrastrutture sensibili. Il secondo caso, invece, racchiude tutte quelle operazioni che non rispettano, anche solo parzialmente, le indicazioni appena descritte. [7]

- **Scelta dell’aeromobile.** Una delle prime valutazioni pratiche da fare riguarda il mezzo che verrà usato nella missione. Tale scelta è influenzata da molteplici fattori come la limitazione del peso, la tipologia di automazioni e sistemi di sicurezza installati a bordo ed altri criteri richiesti dalla normativa vigente come sopracitato. Inoltre, altro aspetto non secondario, è la capacità richiesta al mezzo di riuscire ad operare usando come payload la sensoristica richiesta dal task.
- **Scelta della sensoristica.** Altra scelta importante è quella della sensoristica necessaria per il task da svolgere. Come è già stato detto, la tipologia di dati che possono essere raccolti tramite drone è molteplice; per ogni tipo di dato è prevista una tipologia diversa di sensore, il quale può variare per qualità operativa, dimensioni, peso e scelte economiche.
- **Scelta dell’operatore e del pilota, autorizzazioni.** Le decisioni sopra elencate vanno ad incidere su un fattore che può sembrare secondario ma che nella pratica è fondamentale per poter mettere in atto l’operazione che si sta pianificando. Si tratta della necessità di avere nel team di lavoro un pilota certificato ENAC il quale abbia conseguito i necessari attestati per svolgere quella determinata tipologia di volo. Nel mondo aeronautico italiano si differenziano le figure di pilota e operatore di volo. Il primo infatti, da definizione, è la persona responsabile della condotta del volo degli APR, che sia questo manuale o automatico, mentre la figura dell’operatore rappresenta la persona fisica o giuridica che ha la responsabilità delle operazioni. Nella realtà dei fatti però, le due figure sono spesso investite da un’unica persona. [7] In secondo luogo, per poter effettuare il volo, è spesso necessario il rilascio di specifiche autorizzazioni da parte degli organi competenti dell’amministrazione locale, questura o direttamente ENAC. Tale aspetto non verrà approfondito in questa sede perché esulta dagli argomenti di interesse, ma se ne vuole sottolineare l’importanza nell’uso professionale dei SAPR.

2.2.3 Pianificazione del volo

Le diverse tipologie di missioni richiedono diverse tipologie di volo e in specifici campi di utilizzo, come ad esempio la fotogrammetria aerea o la mappatura di una struttura, la precisione del movimento e della traiettoria di volo sono fondamentali. La conduzione del mezzo da parte del pilota durante la missione può essere effettuata principalmente in 2 modalità: manuale o automatica. Il volo manuale, come si può facilmente intuire, prevede che il pilota regoli in real time l'andamento del mezzo sui 3 assi, assistito da eventuali automatismi come il sistema di posizionamento globale GPS, sensori di prossimità o la stabilizzazione automatica dell'aeromobile. In tal caso lo step di pianificazione consiste nel prevedere e tracciare le esatte manovre che il pilota dovrà poi andare ad eseguire. Nel volo automatizzato, usato principalmente per lavori di fotogrammetria, la fase precedente alla missione di volo è differente. Infatti, il pilota delinea tramite specifici software, l'area di interesse da sorvolare, la velocità di crociera, la percentuale di sovrapposizione delle immagini scattate e la quota da mantenere. Tali parametri vengono così elaborati creando una missione di volo automatica che il drone eseguirà autonomamente. Il calcolo di tali parametri è principalmente influenzato dal livello di precisione e di dettaglio che si richiede all'output finale. Il parametro di riferimento usato tipicamente nei software di pianificazione del volo è il GSD (Ground Sampling Distance), che misura la distanza di due pixel consecutivi misurati sul terreno. Più è alto il valore di GSD, minore sarà la risoluzione spaziale nell'immagine a discapito dei dettagli visibili. Tale parametro è direttamente proporzionale alla quota di volo.³

2.2.4 Operazione di volo

Durante questo step avviene la vera e propria missione, che consiste nell'effettuare materialmente il volo pianificato per la raccolta dei dati. La sensoristica usata a tale scopo può essere gestita dal pilota stesso o da un secondo assistente, in alternativa il suo funzionamento può essere automatizzato e pianificato in parallelo alla pianificazione del volo. In alcuni casi la cattura dei dati deve avvenire con una certa cadenza regolare, come nell'esempio sopracitato della fotogrammetria aerea in cui le immagini catturate devono rispettare una soglia minima di overlapping. Normalmente i dati raccolti sono salvati in una memoria locale installata sul sensore

stesso o sul velivolo, inviando in tempo reale una preview alla stazione di controllo a terra tramite una connessione radio, tipicamente indipendente dalla connessione radio dedicata al controllo e alla ricezione dei dati telemetrici del mezzo. I dati generati dal sensore sono infatti solitamente di grandi dimensioni e richiederebbero un throughput del canale elevato che una connessione radio WiFi solitamente non può offrire. Per fare un esempio, al giorno d'oggi per l'invio in tempo reale di un segnale video dal drone alla ground station, il top di gamma nel mondo commerciale è la tecnologia Lightbridge 2 di DJI, che assicura una ricezione di un segnale video FullHD a 30 fps fino ad una distanza di 1.7 km.⁴ Ma si tratta di un segnale fortemente compresso utile solo in fase di volo per il pilotaggio del mezzo, infatti nemmeno tale sistema permette l'invio in tempo reale del flusso video originale in alta qualità.

2.2.5 Trasferimento dati

La fase successiva al volo è dunque quella di trasferire la mole di dati salvati sul sensore al calcolatore dedicato alla successiva fase di elaborazione. Si vuole sottolineare tale step perché dal punto di vista delle tempistiche è un'operazione dispendiosa. Oltre allo spostamento fisico dalla zona di volo al punto di elaborazione, bisogna considerare il tempo necessario per il download dei dati, dove spesso si tratta di una mole importante di materiale nell'ordine di grandezza dei Gigabyte. Inoltre, se l'elaborazione avviene tramite una piattaforma cloud based è necessario considerare anche il tempo necessario per l'upload dei dati, dal calcolatore alla piattaforma cloud.

2.2.6 Elaborazione e analisi del dato

Il tipo di elaborazione del dato raccolto dipende da una serie di fattori di varia natura, ma si possono riassumere partendo dai risultati che la misurazione richiede. Solo individuando bene tale aspetto è possibile definire correttamente il tipo di dato da raccogliere e la metodologia di elaborazione successiva, per avere così un'analisi finale che soddisfi le richieste.

Per definire al meglio la fase di elaborazione è necessario diversificare le metodologie esistenti in base al tipo di dato raccolto.

Radiazione infrarossa

Tale radiazione elettromagnetica, caratterizzata da una lunghezza d'onda compresa tra i 700nm e i 1000nm e con una banda di frequenza inferiore alla luce visibile, può essere misurata per effettuare operazioni termografiche, ossia una tecnica di analisi non distruttiva basata appunto sull'acquisizione dei segnali infrarossi per rilevare l'energia termica. Grazie alla termografia si possono ottenere delle immagini termografiche, ovvero delle vere e proprie mappe di temperatura dell'oggetto o zona di misurazione. Il funzionamento di una termocamera consiste nel far convergere, tramite i componenti ottici, l'energia all'infrarosso emessa da un oggetto verso un detector all'infrarosso. Tale detector invia le informazioni al sensore elettronico per l'elaborazione dell'immagine. L'elettronica traduce i dati provenienti dal detector in un'immagine visibile a colori falsati.⁵ Le camere termografiche si suddividono in due principali tipologie: non radiometriche e radiometriche. Le prime sono in grado di misurare le differenze di temperatura, dando come output la distribuzione del calore rilevato nell'inquadratura, senza però dare un valore assoluto di temperatura. Le camere radiometriche consentono invece di misurare il valore di temperatura assoluto di ogni punto dell'immagine, richiedendo però in input anche il valore di emissività e temperatura riflessa. Per avere infatti una corretta misurazione della temperatura, è necessario considerare il fenomeno fisico per la quale la radiazione di energia termica che colpisce la superficie di un oggetto può essere assorbita, trasmessa o riflessa. Valutando le percentuali di potenza radiante trasmessa G^{trasm} , riflessa G^{rifl} ed assorbita G^{ass} rispetto a quella incidente G , è possibile definire le seguenti grandezze:

- Coeff. di assorbimento $a = G^{\text{ass}} / G$
- Coeff. di riflessione $r = G^{\text{rifl}} / G$
- Coeff. di trasmissione $t = G^{\text{trasm}} / G$

Inoltre, poiché per il principio di conservazione dell'energia si ha:

$$G^{\text{ass}} + G^{\text{rifl}} + G^{\text{trasm}} = G$$

si ha pure che:

$$a + r + t = 1$$

⁶Per questo motivo il calcolo del valore relativo alla temperatura deve tenere anche in considerazione la capacità dell'oggetto di irraggiare energia e la temperatura dell'ambiente esterno che viene riflessa. Altra conseguenza, data dal fenomeno fisico appena descritto, è la difficoltà o l'impossibilità di applicare tale sistema di misura per superfici trasparenti, riflettenti o materiale gassoso come vapori.

Nel mondo professionale degli APR le camere a infrarossi sono largamente usate in diversi campi applicativi. Un esempio è il campo dell'edilizia, dove le immagini termiche permettono di individuare distintamente la presenza di difetti e anomalie che possono comportare il degrado di determinati componenti strutturali, permettono inoltre il controllo di isolamenti, infiltrazioni d'acqua e problematiche simili. Negli impianti industriali l'analisi termografica viene usata per effettuare analisi di surriscaldamento degli impianti e per individuare eventuali perdite energetiche. Negli impianti fotovoltaici l'uso della termografia è sfruttato per individuare anomalie, hotspot e certificarne il corretto funzionamento.⁷ Nell'ambito civile invece, i droni muniti di termocamera sono ampiamente usati nella ricerca dispersi e prevenzione o controllo di incendi.

Radiazioni multispettrali

Analogamente a quanto è stato descritto per la misurazione delle onde elettromagnetiche nello spettro dell'infrarosso, è possibile misurare come altre larghezze di banda vengono riflesse dalle superfici e sfruttare tale misura per raccogliere specifici dati. Nell'ambito dell'agricoltura infatti, è di particolare interesse rilevare come le piante, ed in particolare la superficie delle foglie, riflettono in particolare 3 larghezze di banda: la banda relativa al rosso (665-700 nm) e l'infrarosso vicino (NIR, 740-900 nm) e infrarosso ad onde corte (0.9 – 1.7 μ m). [8] Tali misurazioni possono essere effettuate in diverse modalità; da una misurazione satellitare, da un sensore a postazione fissa installato nel campo interessato, tramite sensori montati su mezzi agricoli oppure su un APR. Negli ultimi due casi il dato raccolto deve essere accompagnato anche da una misurazione GPS per avere una misura della posizione globale del singolo rilievo. Partendo dalla luce solare che colpisce la pianta, questa verrà assorbita in diverse misure in base alla larghezza di banda, il resto della radiazione verrà invece riflessa. Un funzionamento corretto e sano della vegetazione corrisponde dunque alla giusta quantità di energia assorbita o riflessa.

Alla luce di tale principio, in base ai diversi indici matematici della riflettanza per ogni banda di spettro nominata, è possibile calcolare l'**indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**. Esso descrive il livello di vigoria della coltura e si calcola come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso e nel rosso [11].

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Per identificare le aree potenzialmente problematiche in una coltivazione, si identifica il valore minimo e il valore massimo di NDVI nel campo e tramite tali valori di riferimento viene effettuata una normalizzazione dei valori calcolati associando il colore verde al valore massimo e il colore rosso al valore minimo. Quest'ultimo colore andrà dunque ad individuare le zone in cui le piante sono maggiormente colpita da stress. Tale stress, indice di un problema di sviluppo vegetativo, può essere causato principalmente da 4 problemi:

- Stress nutrizionali.
- Attacchi parassitari.
- Forti danni da grandine o gelata.
- Scarsa emergenza.

Un secondo parametro calcolabile tramite la misurazione di camere multispettrali è l'**indice NDMI (Normalized Difference Moisture Index)** che descrive il livello di stress idrico della coltura e si calcola come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso e nell'infrarosso ad onde corta. Anche in questo caso viene prodotta una mappa in cui i valori sono normalizzati ed associati ad una scala colore.

Punti laser

Nell'ambito di rilevamento di modelli tridimensionali, la tecnologia a laser scanner è ampiamente usata da molti anni. Il principio di funzionamento si basa sull'applicativo laser, in grado di generare un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata. Tale fascio laser è utilizzato per la misurazione di distanze, misurando il tempo

trascorso nella riflessione di due treni d'onda (distanziometri ad impulsi) o misurando lo sfasamento d'onda che avviene durante la riflessione (distanziometri a misura di fase). Una parte meccanica varia la direzione del laser nello spazio, mentre un sensore rileva per ogni impulso (o treno di impulsi) la distanza percorsa dal fascio.⁸ Come risultato di output si ha così una **nuvola di punti** che, una volta trattata ed elaborata, dà una misura sulla forma dell'oggetto o superficie sulla quale è stata effettuata la scansione. Nell'applicazione di laser scanner usati come payload di un drone, il fascio laser viene fatto deviare tramite una rotazione attorno all'asse solidale alla direzione di volo, mentre l'avanzamento dell'aeromobile stesso permette di avere la terza dimensione nella scansione. Tale funzionamento dà origine alla tecnica di telerilevamento LIDAR. Uno step fondamentale in tale tecnica è il filtraggio, classificazione ed elaborazione dei dati di output, necessaria per avere un risultato finale qualitativo e corretto. La nuvola di punti generata deve essere ripulita di tutti i punti non necessari, come ad esempio punti di sfondo o marker noti, e da tutti i punti outlier, generati da rumore o errori di acquisizione. Altro step necessario è quella della georeferenziazione dei punti in un sistema noto e solidale per tutti i punti.⁹

Da tale nuvola di punti è possibile estrarre diversi modelli che descrivono l'oggetto o la superficie in questione. Può trattarsi di una **mesh 3D**, se si tratta di un oggetto o elemento specifico, oppure un modello che rappresenti la superficie del terreno. In particolare, si differenziano il **Modello Digitale di Superficie (DSM)** che consiste nel modello della superficie terrestre comprensiva degli oggetti presenti sul suolo come edifici, vegetazione ed altri manufatti, e il **Modello Digitale del Terreno (DTM)**, cioè il modello che rappresenta l'andamento della superficie del suolo senza gli elementi antropici e vegetazione.

I campi di utilizzo della tecnica a laser scanner sono molteplici e spesso sono usati in alternativa o concomitanza alla fotogrammetria digitale, della quale si parlerà nel paragrafo successivo. Nell'ambito edilizio, tale tecnica è usata per la stima di parametri geometrici di edifici in aree urbanizzate, in archeologia i sistemi LIDAR hanno permesso di scoprire nuovi punti di interesse archeologico, potendo descrivere fedelmente la morfologia del terreno e vedendo aspetti prima impossibili da osservare.¹⁰ Nell'ambito ambientale invece, i sistemi a laser scanner applicata ai droni è sfruttata nell'analisi del rischio idrologico e alluvionale. Per mezzo del LIDAR,

difatti, gli esperti provvedono alla completa analisi del territorio in modo da individuare gli eventuali punti critici e quindi procedere ai lavori per eliminare eventuali rischi.

Dati RGB

Quando un oggetto viene illuminato con luce bianca, questo assorbe le frequenze luminose in base alla sua particolare forma, materiale e caratteristiche fisiche. L'oggetto riflette il resto delle frequenze luminose che vengono catturate dall'occhio umano, questo mischia tali frequenze creando così la percezione del colore. Il sensore RGB serve a discriminare lo spettro della luce visibile, in un modo simile al lavoro svolto dall'occhio umano. In particolare, in un sensore RGB vengono discriminati i colori primari rosso, verde e blu, secondo i parametri dettati dalla CIE:

- Rosso, con una lunghezza d'onda di 700,47 nm.
- Verde, con una lunghezza d'onda di 546,09 nm.
- Blu, con una lunghezza d'onda di 435,79 nm.

L'immagine catturata sarà dunque scomposta nei colori primari descritti e, grazie alla proprietà dell'additività, unendo tali colori si ottengono tutti i colori necessari a descrivere l'immagine. Tale scelta di lunghezze d'onda, e di conseguenza di colore, è data dal fatto che tali colori primari sono quelli che stimolano maggiormente l'occhio umano, o per meglio dire, sono i segnali che vengono meglio differenziati nella risposta dei coni, all'interno della retina.

Il principio di funzionamento appena descritto, si realizza all'interno di un sensore RGB tramite il lavoro svolto da una matrice di fotodiodi che, grazie all'effetto fotovoltaico, è in grado di riconoscere una determinata lunghezza d'onda nello spettro elettromagnetico e trasformare tale impulso luminoso in un segnale elettrico. [12]

I sensori RGB sono di gran lunga i più usati a bordo degli APR, la maggior parte dei droni commerciali hanno infatti già preinstallato come payload una fotocamera digitale che prevede l'uso di un sensore di tipo CCD o CMOS. La spiegazione di tale diffusione è data dal fatto che nel mondo professionale, ma anche in quello hobbistico, il principale scopo di un APR è quello di catturare immagini o flussi video per i più diversi scopi. Tale tipologia di dato infatti, può subire diverse manipolazioni ed elaborazioni

ed essere visualizzato in modo facilmente comprensibile dall'occhio umano. Gli ambiti di interesse principali che prevedono l'uso di immagini o video sono di seguito elencati:

- **Fotografia e videomaking.** Nell'ambito fotografico, cinematografico o in generale del videomaking, le immagini aeree sono sempre più richieste a tutti i livelli. (Si veda il Capitolo 1). In questo settore professionale le elaborazioni che subiscono le immagini sono solitamente finalizzate a migliorare e personalizzare la resa visiva, lo stile e il look. Si tratta dunque di agire tramite programmi di color correction, ritocco dei dettagli, pulizia da rumore e applicazioni di filtri colore secondo i gusti e le esigenze del professionista
- **Ispezioni visive.** In caso di ispezioni a infrastrutture, edifici o altri elementi antropici in cui è sufficiente un controllo visivo dello stato di salute, solitamente le immagini catturate non subiscono particolari elaborazioni se non al più un'alterazione di colore o contrasto che aiuta a evidenziare determinati dettagli o problematiche ricercate.
- **Fotogrammetria.** La fotogrammetria prevede una serie di metodi di rilevamento planimetrico e altimetrico del terreno, che impiegano determinate vedute fotografiche del terreno stesso. Tale procedimento, si basa sulla possibilità di considerare le immagini fotografiche come prospettive dell'oggetto, aventi per centro di vista il secondo punto nodale dell'obiettivo e di conseguenza consente l'acquisizione 3D, ovvero le caratteristiche geometriche di un oggetto, attraverso il processamento congiunto di 2 o più immagini che lo ritraggono da posizioni differenti. Nel caso più semplice di rilievo di una zona orizzontale come un generico terreno, l'acquisizione delle immagini avviene con un avanzamento del drone lungo una precisa direzione mentre effettua fotografie nadirali, ossia con l'asse dell'obbiettivo verticale verso il basso, mappando così una precisa porzione di terreno lineare. Ci si sposta poi lateralmente per la successiva acquisizione della porzione adiacente parallela, tornando in senso di marcia inverso. Aspetto fondamentale in tale procedura è la necessità di una certa percentuale di overlapping, ossia una sovrapposizione dei due scatti successivi, di circa il 60-80% sul lato orizzontale e del 70% sul lato verticale delle immagini. Questo si rende necessario poiché nel processamento automatico delle immagini 3 punti omologhi appartenenti allo stesso oggetto devono essere visibili su almeno 3 immagini differenti.¹¹ Uno studio del 2016

realizzato dal gruppo AVT Vermessung ZT GmbH (Imst, Austria) in collaborazione con la Fondazione Bruno Kessler della provincia di Trento, ha dimostrato sperimentalmente i vantaggi di implementare nella fotogrammetria tradizionale anche immagini oblique, oltre a quelle nadirali. È stato infatti dimostrato che in una mappatura generica di un terreno, la nuvola di punti risulterà più densa e più ricca di informazioni se in input vengono fornite non solo foto verticali ma anche oblique, ossia fotografie con un'inclinazione di circa 45° rispetto la verticale. I vantaggi della combinazione nadirale e obliqua si hanno non solo da un punto di vista geometrico nell'output finale, attraverso il miglioramento dei risultati della triangolazione aerea, ma anche da un punto di vista fotogrammetrico, riducendo notevolmente le zone occluse o nascoste. [13]

Elaborazione fotogrammetrica: Entrando nel dettaglio degli algoritmi sfruttati nel riuscire ad estrapolare informazioni geometriche 3D a partire da due o più immagini 2D, o nel riuscire a creare un ortomosaico cercando il matching in un dataset di foto, questi si basano sostanzialmente sulla ricerca di punti in comune nelle immagini, nel calcolo delle loro distanza e nell'applicazione di trasformazioni geometriche e spostamenti locali per riuscire così ad allineare le immagini e portarle ad un sistema di riferimento comune. Un esempio di questa tipologia di algoritmi è lo **Structure from motion (SfM)**. [15]

Questa tecnica feature based di ricostruzione fotogrammetrica basa il suo principio di funzionamento prendendo ispirazione dal fenomeno della parallasse, ossia il fenomeno per cui un oggetto sembra spostarsi rispetto allo sfondo se si cambia il punto di osservazione. Da tale fenomeno il cervello umano elabora informazioni riguardanti la terza dimensione e in generale informazioni di tipo geometrico. La tecnica SfM, dopo aver estrapolato alcune feature dalle immagini basandosi sulla variazione del gradiente, effettua un matching tra tutte le feature del dataset alla ricerca di corrispondenze. Da tali corrispondenze si estraggono le informazioni geometriche dell'oggetto e, applicando le trasformazioni sopracitate, l'algoritmo darà in output un modello 3D dell'oggetto in questione. [14] Alla luce del principio di funzionamento dell'elaborazione fotogrammetrica, è facile intuire la necessaria sovrapposizione delle immagini adiacenti, per avere così maggior probabilità di una corretta elaborazione. Gli algoritmi con un approccio

feature based come quello appena descritto forniscono generalmente corrispondenze nelle immagini con elevata certezza, ma furono introdotti soprattutto per la relativa bassa richiesta computazionale. Un approccio più recente e performante, implementato dagli odierni software di fotogrammetria, sono gli algoritmi di **Dense Image Matching (DIM)** che basano il loro funzionamento sulle densità dei pixel e permettono di avere un output un valore GSD pari a quello delle foto originali date in input.

Georeferenziazione. Al fine di svolgere un lavoro qualitativo ed ottenere dei risultati utili ai fini fotogrammetrici, si necessita di una buona tecnica per georeferenziazione delle immagini e del modello finale. Al giorno d'oggi molti dei SAPR commerciali integrano automaticamente nei metadati delle immagini scattate le coordinate GPS del punto in cui sono state catturate, sfruttando i dati forniti da un ricevitore GPS installato a bordo. Non sempre tale segnale è sufficientemente preciso da poter essere usato a fini fotogrammetrici, dunque altre tecnologie di supporto sono spesso implementate. Un esempio è il metodo RTK (Real Time Kinematic), che sfrutta una stazione base fissa connessa via radio al drone. Conoscendo la posizione sempre fissa della base, il software di bordo del ricevitore applica le stesse correzioni al drone e ne determina la posizione. Tale informazione però non sempre è sufficiente se si vuole raggiungere un buon grado di precisione. La chiave per il corretto svolgimento del rilievo topografico si basa sul posizionamento di punti a terra a coordinate note (GCP) che devono essere ben visibili dalle foto scattate dal drone. Tali punti saranno sfruttati in fase di elaborazione come riferimento di geolocalizzazione.

Output. Normalmente, nella maggior parte dei casi gli output ottenibili dell'elaborazione fotogrammetrica sono i seguenti:

- *Nuvola di punti:* usata solitamente come rappresentazione di strutture tridimensionali come oggetti o superfici in rilievo.
- *Mesh poligonale/Modello 3D:* ossia un reticolo che definisce un oggetto nello spazio, composto da vertici, spigoli e facce.
- *DSM/DTM:* modelli della superficie precedentemente descritti.
- *Curve di livello:* ovvero una rappresentazione della superficie tramite linee che uniscono punti con uguale quota, usate per rappresentare l'altimetria di un terreno.

- *Ortomosaico*: ossia la rappresentazione di una superficie geometricamente corretta e georeferenziata

Capitolo 3

Scouting e analisi degli applicativi di elaborazione dati

Come anticipato nel capitolo precedente, lo scopo primario della presente tesi è quello di analizzare e valutare i principali software e piattaforme di elaborazione specializzate nel trattamento di dati catturati da sistemi APR. Non sono stati posti vincoli di ricerca riguardanti la tipologia di dato da trattare o l'ambito professionale di impiego del SAPR, dunque si è proceduto in uno scouting ad ampio raggio, cercando soluzioni che fossero in grado di elaborare tutte e 4 le tipologie di dato descritte nella sezione 2.2.6 e che fossero sufficientemente scalabili e flessibili da riuscire ad adattarsi a più scenari lavorativi. Per l'analisi degli applicativi, data la loro varietà e i diversi gradi di complessità, si è proceduto suddividendo il lavoro in 5 differenti fasi:

1. Individuazione delle caratteristiche e misure tramite le quali effettuare le analisi, in modo da poter svolgere una valutazione quanto più oggettiva e accurata possibile
2. Fase di una prima analisi non approfondita generale, in cui sono stati presi in considerazione dieci differenti applicativi presenti sul mercato. Per ogni soluzione sono state estrapolate le caratteristiche principali che hanno permesso la successiva fase di selezione.

3. Fase di selezione di quattro delle precedenti dieci soluzioni individuate, partendo dalle valutazioni apprese nella precedente fase di analisi generale.
4. Analisi e valutazione approfondita sulle quattro soluzioni selezionate, basandosi sulle informazioni fornite dal produttore stesso oltre che su test, pareri e recensioni di utenti che abbiano già provato l'applicativo. In tale analisi sono state misurate le metriche di valutazione e valutate le caratteristiche decise nello step 1
5. Comparazione e analisi dei risultati raggiunti, sintesi e presentazione di quanto appreso, per permettere una semplice ed immediata valutazione delle ricerche.

3.1 Individuazione delle metriche di valutazione

Come precedentemente descritto, le applicazioni analizzate presentano caratteristiche, logiche di lavoro e particolarità molto diverse tra loro. Per tale motivo si è presentata la necessità di delineare come svolgere al meglio le analisi e successivamente il modo migliore per analizzare e comparare i risultati ottenuti.

Le caratteristiche che si è deciso di tenere in considerazione durante la fase di analisi sono state le seguenti.

- **Piattaforma di elaborazione:** distinguere le soluzioni cloud based da quelle che prevedono l'elaborazione in locale. Un servizio basato su una piattaforma clouding richiede una fase di upload dei dati, ma il costo computazionale non è a carico dell'utente, il che evita la necessità di un investimento in una piattaforma di calcolo ad alte prestazioni, altrimenti necessaria per l'elaborazione dei dati. Un servizio che prevede invece l'installazione del software su una macchina da parte dell'utente e che elabora i dati in locale, non necessita della fase di upload e offre una maggior garanzia di sicurezza data dal fatto che il dataset di dati, solitamente immagini fotografiche, non devono essere trasferiti su server esterni all'azienda. D'altra parte, si necessita però un elaboratore ad alte prestazioni in grado di supportare il carico computazionale previsto.

- **Funzionalità offerte:** si valuta l'applicativo in base a quali e quanti step del flusso di lavoro (Vedi sezione 2.2) offre supporto. Un servizio che può definirsi completo prevede una soluzione che parte dalla pianificazione del volo, alla gestione dei dati raccolti durante il volo, fino alla realizzazione dell'elaborato finale.
- **Compatibilità:** si valuta l'applicativo in base alla sua compatibilità con i diversi sistemi APR. Spesso le soluzioni esistenti sono compatibili con una o poche tipologie di droni, soprattutto per gli applicativi sviluppati da aziende che si occupano anche della progettazione di SAPR.
- **Versatilità:** la valutazione riguarda quanti e quali tipologie di dato l'applicativo è in grado di elaborare. Per le tipologie di dati tipicamente raccolti tramite SAPR si rimanda alla sezione 2.2.6.
- **Tempi di elaborazione e qualità dell'output:** uno degli aspetti che può influenzare molto la scelta di un applicativo di elaborazione, è la tempistica richiesta da quando un input è stato inserito fino all'ottenimento dell'output finale. I due principali step che dilatano i tempi di attesa sono l'upload del dataset (se richiesto) e la fase di elaborazione vera e propria. La qualità dell'output è tipicamente proporzionale alle tempistiche e all'engine interno usato per l'elaborazione, oltre alla qualità intrinseca dei dati di input.
- **Integrazione:** si valuta se la soluzione analizzata può offrire strumenti e possibilità per poter essere integrata in modo soddisfacente nel workflow di lavoro. Tale valutazione tiene conto di eventuali vincoli d'uso e della messa a disposizione di SDK o altri strumenti per personalizzare e adattare il flusso di lavoro in base alle esigenze dell'azienda.
- **Prezzo:** comparando le diverse soluzioni d'acquisto o abbonamento, si ricerca un metro comune per valutare i costi da sostenere per le elaborazioni da eseguire.
- **Altre caratteristiche peculiari:** le diverse soluzioni si differenziano anche per servizi, soluzioni o caratteristiche aggiuntive che aiutano l'utente ad ottimizzare il lavoro o ad ottenere risultati migliori.

3.2 Ricerca delle principali soluzioni presenti sul mercato

Le ricerche si sono concentrate sia sugli applicativi noti nell'ambito professionale di SAPR, sia su realtà emergenti, sia su realtà meno conosciute. Questa fase di ricerca ha portato alla luce interessanti soluzioni sviluppate da diverse aziende del settore, a testimonianza del crescente interesse nel modo dei droni e in particolare nella ricerca delle più diverse metodologie di utilizzo di questa tecnologia.

Di seguito si elencano gli applicativi valutati, riportando un breve commento che riassume l'analisi non approfondita eseguita.

- **SenseFly eMotion.**¹ Soluzione software sviluppata da Parrot, uno dei più conosciuti costruttori di SAPR commerciali e professionali, sia multirotori sia ad ala fissa. Tale applicativo, dedicato ai droni di loro costruzione, permette un avanzato metodo di pianificazione del volo e di gestione dei dati raccolti. In particolare, permette un controllo avanzato del mezzo con un'ampia gamma di informazioni telemetriche, oltre ad una soluzione ad hoc per la pianificazione del volo in ambito agricolo. L'elaborazione delle immagini è basata sul software di Pix4D (analizzato in seguito).
- **Analist 2020 Cloud.**² Nata dall'azienda italiana Analist Group consiste in un servizio cloud based dedicato all'elaborazione dei dati catturati da SAPR nei principali campi professionali come topografia, architettura, termografia, archeologia e agricoltura. La caratteristica che contraddistingue Analist Cloud è l'integrazione di servizi catastali. Dà la possibilità infatti di gestione dei libretti Pregeo, svolgendo anche operazioni di orientamento, di adattamento e di elaborazione di nuove particelle catastali. L'elaborazione del dato è basata sulla tecnologia dei software di Autodesk e Pix4D.
- **OpenDroneMap.**³ Si tratta di un toolkit di fotogrammetria open source per la collezione, processamento, analisi e visualizzazione di dati aerei. Partendo da un dataset di foto aeree permette la creazione di modelli 3D georeferenziati, modelli digitali di terreni e superfici, modelli con texture 3D e classificazione di nuvole di punti oltre alla misurazione di aree, volumi, calcolo dei contorni. La versione originale prevede

la fruizione tramite linea di comando, una versione con GUI è disponibile tramite un'apposita API. Tramite una Python SDK permette facilmente l'integrazione delle funzioni descritte con altre applicazioni.

- **Capture Reality.**⁴ Software di fotogrammetria sviluppato dall'omonima azienda, specializzato nell'elaborazione di immagini, aeree e non, e dei dati catturati con tecnologia a laser scanner. L'applicativo permette la ricostruzione di modelli 3D a partire da tali dati in input, specializzato soprattutto negli ambiti di architettura, full body scanning, gaming e visual effects.
- **Autodesk Recap.**⁵ Soluzione cloud based della nota azienda pensata per lo storage, gestione ed elaborazione di immagini fotografiche e dati catturati tramite laser scanner. Gli output ottenibili sono in particolare mesh e nuvole di punti. È un software conosciuto soprattutto in ambito edile e architettonico vista la possibilità di ricostruzione di ambienti 3D, e la misurazione di distanze e volumi.
- **Agisoft Metashape.**⁶ È un noto software che esegue l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali e genera dati spaziali 3D da utilizzare in applicazioni GIS, nella documentazione sul patrimonio culturale e nella produzione di effetti visivi, nonché per effettuare misure indirette di oggetti di varie scale. Alcune tra le interessanti feature si riporta la classificazione di oggetti basata sulla densità delle nuvole di punti, la possibilità di ottenere modelli del terreno DSM/DTM e ortomosaici.
- **DJI terra.**⁷ Anche il leader nella progettazione e costruzione di droni commerciali ha sviluppato nel 2019 un software proprietario dedicato all'elaborazione dei dati catturati tramite SAPR di sua costruzione. Comprende inoltre un applicativo dedicato alla pianificazione del volo. Tra le caratteristiche principali, simili alle applicazioni sopra riportate, si citano la ricostruzione mappe 2D elaborate anche a partire da immagini multispettrali, misurazioni lineari, di aree e di volumi, e la classificazione di determinati tipi di oggetti. Una peculiarità che l'azienda vanta, è la generazione di fotomosaici e di nuvole di punti in tempo reale. Una grande limitazione che, al momento di questa analisi, presenta è la compatibilità limitata solo a pochi modelli di droni. In particolare, la compatibilità è possibile solo con gli ultimi modelli della serie DJI Phantom 4.

- **Delair.Ai.**⁸ Piattaforma cloud-based inaugurata nel 2019 dall'azienda francese Delair. Tale azienda offre dal 2008 sistemi di aeromobili a pilotaggio remoto ad ala fissa, progettati per i principali settori professionali come agricoltura, sicurezza pubblica e privata, industrie minerarie e industrie nell'ambito della distribuzione elettrica. La piattaforma Delair.Ai permette l'elaborazione di tutte le tipologie di dati tipicamente raccolti tramite SAPR, dedicando soluzioni specifiche per la gestione di cumoli di materiale e gestione di cave minerarie, monitoraggio e ispezioni nei cantieri nell'ambito edile, monitoraggio di coltivazioni nell'ottica dell'agricoltura di precisione e soluzioni per l'analisi termografica.
- **Dronedeploy.**⁹ Si tratta di una piattaforma cloud sviluppata dall'omonima azienda americana che ha riscontrato successo sia negli U.S.A. sia a livello globale. Similmente alla piattaforma Delair.Ai sopra descritta, offre una sofisticata elaborazione dati per offrire soluzioni in ambito edile, minerario, agricolo, energetico e gas/petrolifero. Una sua peculiarità è quella di offrire compatibilità con app terze, in modo da integrare elaborazioni e raccolte dati di altre piattaforme, oltre alla facile condivisione degli output. Un'aggiuntiva app per mobile permette la pianificazione del volo, la misurazione istantanea di grandezze fisiche e automazione durante il rilievo.
- **Pix4D.**¹⁰ Il software sviluppato in Svizzera a partire dal 2011, è noto nell'ambito della fotogrammetria e in generale della computer vision. Negli anni si è adattato per riuscire ad elaborare sempre più tipologie di dati ed offrire in output soluzioni per tutti gli ambiti già citati per altre piattaforme. Il prodotto principale è offerto da un software che prevede l'elaborazione in locale, mentre alcuni dei servizi offerti sono disponibili anche su una piattaforma cloud.

3.3 Selezione di quattro delle soluzioni analizzate

Alla luce di quanto descritto nella sezione 3.2, si è proceduto all'individuazione delle quattro soluzioni per le quali eseguire poi un'analisi approfondita. Sono stati esclusi gli applicativi con una compatibilità limitata e quelli con un'offerta di soluzioni limitata ad un numero troppo ristretto

di settori lavorativi. Sono state invece privilegiate le piattaforme nate o specializzate soprattutto nell’ambito dei SAPR e quelle caratterizzate da maggiore scalabilità e robustezza. Il vincolo di selezione 4 soluzioni, su cui effettuare il successivo step di analisi approfondita, è stato dato da TIM nell’ottica di avere un numero sufficiente ma facilmente gestibile di comparazioni e dati raccolti.

Le piattaforme di elaborazione selezionate sono state

- DJI Terra
- Delair.Ai
- DroneDeploy
- Pix4D

Nella sezione 3.4 che segue, si riportano le analisi, i dati raccolti e le valutazioni generali per ognuna delle quattro piattaforme.

3.4 Analisi e approfondimento delle soluzioni selezionate

In questa fase di analisi approfondita, per ogni piattaforma è stata riportata una descrizione generale ed un report delle funzionalità offerte misurate in base alle metriche scritte nella sezione 3.1. I dati e le informazioni riportate sono stati estrapolati dalla documentazione ufficiale offerte dall’azienda di sviluppo, dalle piattaforme web destinate alla presentazione e pubblicizzazione, e da siti terzi in cui tester e utenti hanno presentato review e risultati ottenuti durante l’utilizzo delle piattaforme.

3.4.1 DJI Terra

Applicativo sviluppato da DJI a inizio 2019 che arricchisce l’offerta della famosa casa costruttrice di sistemi APR, dando la possibilità di avere un sistema unico integrato per l’uso professionale dei droni, a partire dalla pianificazione del volo fino all’output finale voluto. Terra permette infatti di elaborare, analizzare e visualizzare i dati catturati da droni per quando concerne l’ambito della pubblica sicurezza, dell’agricoltura di precisione, dell’edilizia e infrastrutture e del filmmaking professionale. Premettendo che tale analisi è stata effettuata in data 9 novembre 2019, il sito ufficiale

riporta poche informazioni riguardo al software, probabilmente a causa della recente apparsa sul mercato.

Funzionalità offerte

• Pianificazione del volo

L'applicativo permette di pianificare i voli nel dettaglio, in base al tipo di missione e della zona di volo. I parametri di volo sono completamente personalizzabili come altezza, velocità, angolatura della camera e valore di qualità GSD. In base alla tipologia di lavoro da svolgere sono previste tre tipologie di volo pianificabili:

- *Aerea*: modalità di volo che permette di catturare immagini di un'area prescelta per una mappatura del terreno, garantendo rapidità e facilità, identificando e delineando una zona di volo poligonale su una mappa.
- *Waypoints*: Sfrutta punti del percorso prestabiliti e parametri regolabili del velivolo (come altitudine, velocità, direzione, inclinazione e angolo della fotocamera) per acquisire le immagini di un'area o di un oggetto in maniera dinamica e personalizzata. Per le missioni più complesse è possibile simulare un volo su un modello 3D già esistente, così da poter calcolare i parametri di volo nel modo più preciso possibile.
- *Oblique*: Acquisisce una cospicua quantità di dati, sorvolando e mappando autonomamente più volte la stessa area. Ad ogni volo, l'angolo della fotocamera sarà impostato in modo differente, per poter catturare così le immagini da angolature differenti.

Il set di modalità di volo è limitato rispetto a soluzioni dei competitor, mancano infatti alcune soluzioni come il volo circolare, necessario per il mapping di monumenti o infrastrutture sviluppate in altezza.¹¹ La pianificazione del volo può essere fatta anticipatamente prima di andare fisicamente sul sito, direttamente sul campo di volo e in caso di assenza di connessione ad internet, necessaria a consultare le mappature del territorio, la missione può essere pianificata dopo un primo sorvolo ed una mappatura preliminare dell'area.

• Gestione del volo

In fase di volo il radiocomando del drone deve essere connesso ad un computer che funge da controller per il volo pianificato, questo

comporta il fatto che è necessario portare sul sito di lavoro anche un computer sufficientemente potente, oltre all'attrezzatura riguardando il SAPR stesso. Questo rappresenta un grosso svantaggio rispetto alle soluzioni concorrenti, tenendo in considerazione anche la necessità, quasi obbligatoria, di avere una fonte di alimentazione per il portatile, oltre ad un prolungamento delle tempistiche di set up di volo. Durante la fase di volo, un ortomosaico 2D viene creato in tempo reale e sovrapposto alla mappa satellitare, in questo modo è possibile prendere veloci decisioni operazionali in real time e pianificare più nel dettaglio il volo. L'overlapping raccomandato dalla casa sviluppatrice è del 65-80% sul lato lungo e 60-70% sul lato corto. Per aumentare l'accuratezza del rilievo è possibile inserire dei Ground Control Point o altri tipi di riferimenti al suolo a coordinate note. È possibile inoltre avere un rapporto della missione appena conclusa per verificare che gli standard di qualità prefissati siano stati rispettati. Tramite le camere multispettrali proprietarie è possibile calcolare l'indice di qualità delle piante NDVI in tempo reale. La funzione "Real time 3D point cloud" permette di elaborare un modello 3D preliminare in poco tempo. Tale funzione è però disponibile solo per un numero limitato di modelli APR.

- **Elaborazione**

L'engine del software lavora in locale, non è previsto nessun servizio su piattaforma cloud. Le principali feature offerte sono

- Real-time 2D Mapping
- Agricultural application
- KML File Import
- 2D Reconstruction (Terreni agricoli)
- 2D Reconstruction (Scenari urbani)
- 3D Reconstruction
- 3D Mission Planning

Il software offre 3 livelli di dettaglio di output finale, permettendo di trovare il giusto trade-off tra qualità dell'output e tempo di calcolo richiesto. L'elaborazione in alta qualità richiede 16 volte il tempo necessario ad un'elaborazione in bassa qualità, ma misure effettive del tempo impiegato non sono disponibili. La qualità teorica dei modelli

di output rientra nel range da 1 a 2 volte il valore GDS raggiunto in fase di acquisizione. Nella fattispecie di utilizzo un Phantom 4 RTK per l'acquisizione dati ed un'altezza di volo di 100m, l'accuratezza orizzontale raggiungibile è di circa 2-5 cm, mentre quella verticale raggiunge i 4 cm. Il servizio di ricostruzione 3D è tecnicamente compatibile con immagini scattate da sistemi APR diversi da quelli ufficialmente compatibili, ma la qualità e l'accuratezza non sono in questo caso garantite. I modelli finali elaborati non sono modificabili, ma è possibile esportarli per poterli editare in un programma esterno. Da tali modelli in output è possibile fare misurazioni di lunghezza, aree e volumi, creare annotazioni in specifici punti e andare ad interrogare le foto originali per un qualsiasi punto del modello selezionato.

Prezzo

DJI Terra prevede 3 diverse tipologie di licenze definite Basic, Advance e Pro che si differenziano in base alle feature che offrono. La licenza professionale costa all'incirca 3000€ per una licenza annuale. Non è previsto nessun tipo di abbonamento o altre forme di acquisto.

Critiche e opinioni

Essendo una piattaforma nuova e non ancora così conosciuta, gli utenti che hanno avuto modo di testare il software sono relativamente pochi. La prima versione rilasciata, a detta di qualche utente, presenta ancora delle limitazioni e dei comportamenti errati tipici di una versione Beta. La sua semplicità di utilizzo si scontra con la scarsa possibilità di parametrizzare il workflow di elaborazione, costringendo l'utente ad un'esperienza molto guidata e poco personalizzabile.¹² Da alcuni test effettuati, la geolocalizzazione della mappatura presenta un errore nell'ordine di un chilometro, togliendo così anche la possibilità di testare la mappatura 2D in tempo reale.¹³ La qualità del risultato finale dell'ortomosaico presenta una qualità oggettivamente minore rispetto le elaborazioni fatte con soluzioni concorrenti. La scelta di rendere il servizio DJI Terra compatibile solamente con le ultime versioni della serie Phantom 4 è oggettivamente discutibile considerando anche il fatto che tale drone è stato tolto dalla produzione a partire dal secondo semestre del 2019 fino ai primi mesi del 2020.¹⁴

3.4.2 DelAir.Ai

DelAir Tech nasce in Francia nel 2011 proponendosi sul mercato come casa costruttrice di droni ad ala fissa. Dopo essersi espansa anche nel data mining e nel cloud service, sviluppa nel 2019 la piattaforma Delair.Ai¹⁵, potendo così offrire sul mercato soluzioni professionali nell'ambito della visual intelligence per l'analisi e gestione delle risorse materiali di aziende edili e minerarie, raccogliendo dati in grado di descrivere tali informazioni di business. La piattaforma è una soluzione cloud based in grado di gestire ed elaborare flussi di dati visuali, come video ed immagini, ed altre strutture dati come quelle ottenibili da sistemi LIDAR, da termografie e da mappature multispettrali.

Funzionalità offerte

La piattaforma Delair.Ai è compatibile con qualunque sistema APR in grado di catturare immagini RGB georeferenziate, oppure immagini RGB senza geotag ma, in tale caso, si necessita l'aggiunta di un file .csv contenente le informazioni relative alle coordinate GPS. Per quanto riguarda i sensori multispettrali e infrarossi, la piattaforma è compatibile con le principali sensoristiche di ultima generazione (Parrot, Micasense, Airinov, Flir). Infine Delair.Ai accetta anche nuvole di punti in formato .las, generati da un sistema a laser scanner LIDAR o ground based. Internamente la piattaforma usa due differenti engine di elaborazione: quello di Pix4D e quello di Agisoft Metashape.

- **Pianificazione del volo**

A differenza di altri competitor, Delair permette la pianificazione e la gestione del volo solo sui propri SAPR ad ala fissa, applicativo comunque slegato dalla piattaforma Delair.Ai.

- **Elaborazione**

I principali modelli geometrici ottenibili in output sono quelli che anche le piattaforme concorrenti offrono:

- Orthophoto
- Digital Surface Model
- 3D Point Cloud
- 3D Mesh
- 3D Model

- Slope Map
- Change Map
- Digital Surface Model Contours

La piattaforma di Delair.Ai, similmente ad altri servizi concorrenti, contraddistingue in modo specifico i servizi offerti in base all'ambito lavorativo. In particolare, sono presi in considerazione quattro settori lavorativi in cui la piattaforma può essere sfruttata:

- **Cantieri minerari:** tramite una mappatura aerea è possibile misurare distanze, aree e volumi per agevolare la pianificazione delle esplosioni controllate, creare dei report sull'accumulo ed il consumo di materiali e fare un'analisi di rischio e pericoli nel sito. È possibile inoltre creare mappe di livello, riconoscere i contorni, produrre modelli di superficie DSM, calcolare pendenze e raggi di curva nelle strade interne al sito, oltre al poter produrre un modello 3D del cantiere in alta definizione. Tali elaborazioni sono facilmente condivisibili e consultabili anche a distanza grazie al servizio in cloud ed un sistema di sharing appositamente creato.
- **Costruzione di infrastrutture:** Grazie alla velocità e facilità di raccolta dati nei cantieri, è possibile tenere traccia dell'andamento di tutte le operazioni svolte all'interno del sito, aumentando l'efficienza e la sicurezza. Tramite il calcolo di volumi ed aree è possibile ottimizzare l'uso della scorta di materiale in termini di quantità e costo.
- **Agricoltura:** Delair.Ai permette di mappare ed esplorare facilmente aree di campi coltivati. Tramite una mappatura a sensore multispettrale e sensore RGB, è possibile monitorare la crescita delle piante, calcolare previsioni della resa e fare valutazioni dei danni causati da eventi come incendi, siccità o deforestazione illegale.
- **Sicurezza e difesa:** Dal 2012 Delair mette a disposizione sistemi per la sicurezza individuale o di un gruppo grazie all'impiego dei propri SAPR e la piattaforma cloud in questione. Grazie a droni caratterizzati da una bassa rumorosità, una trasmissione via radio con un raggio di ricezione fino a 30km di distanza, comunicazioni protette e collegamenti satellitari, il sistema è in grado di fare un riconoscimento facciale a 1.5 km, rilevamento di movimenti e svolgere geotrekking sull'obiettivo.

Un punto forza della piattaforma è la classificazione di nuvole di punti, create da sistemi Lidar o da fotogrammetria. È possibile esaminare tali dati per classificazione, intensità, elevazione e colore rgb. Un esempio di utilizzo di tale feature è la possibilità di poter individuare della vegetazione che sta crescendo fuori da un certo confine oppure, fornendo un database di tipologie di materiali e sfruttando il calcolo dei volumi, è possibile stimare la massa di un accumulo di materiale.¹⁶ L'accuratezza massima raggiungibile è possibile solo utilizzando dei Ground Control Point durante il rilievo. I valori teoricamente raggiungibili, utilizzando un generico drone professionale ed elaborando i dati con la piattaforma, sono di circa 3 cm per l'accuratezza orizzontale e 4 cm per l'accuratezza verticale. Il livello di accuratezza è un punto chiave per la corretta misurazione dei volumi di materiale e per i rilievi fotogrammetrici.¹⁷

Integrazione

DelAir mette a disposizione una SDK¹⁸ in Python che permette di sviluppare un sistema di scambio e gestione di dati con la piattaforma Delair.Ai. In questo modo è possibile integrare i servizi della piattaforma in qualsiasi applicazione. Dal caso studio riportato sul sito è stato sviluppato un semplice script che permette di prendere in input la mappatura delle strade in una miniera e, tramite una specifica formula del consumo di carburante dei mezzi usati, lo script dà in output la scelta migliore della strada da percorrere per avere il maggior risparmio possibile in termini di costi del carburante. L'SDK in questione mette a disposizione tutte le funzioni per svolgere un lavoro di mappatura, dalla creazione e caricamento di un dataset, all'elaborazione di una nuvola di punti o di una mesh fino al download di una preview dell'output ottenuto.

Prezzo

Il pagamento è organizzato non per licenze o abbonamenti ma per crediti spendibili sulla piattaforma in base ai servizi e al numero di elaborazioni richieste. La maggior parte delle soluzioni proposte prevede l'acquisto non solo di crediti ma anche del drone ad ala fissa di Delair. È possibile acquistare una licenza con un numero di processamenti e di upload di foto illimitato per 1000\$ al mese, oppure acquistare dei crediti per un servizio

“pay as you go” partendo da un pacchetto minimo di 10 crediti. Con un singolo credito (250\$) è possibile elaborare fino a 2000 foto.

Critiche e opinioni

Nel mese di settembre 2019, DJI ha ufficializzato la partnership con Delair per rendere i loro prodotti compatibili con i servizi offerti dall’azienda francese.¹⁹ Per ora però nessuna soluzione offerta dalla due aziende prevede tale compatibilità. Essendo Delair.Ai un servizio che, al momento di tale analisi, ha pochi mesi di vita, sia il sito ufficiale sia altre fonti sul web presentano ancora poche informazioni specifiche sul sistema e sulle effettive capacità. In un articolo di Inside Unmanned Systems²⁰ si elogia Delair.Ai come una piattaforma aperta, capace di operare con qualsiasi hardware e con la possibilità di integrare i servizi della piattaforma con altre realtà IT tramite API e SDK dedicate. Alcuni video dimostrativi²¹ dimostrano che la piattaforma accetta anche dati non prettamente catturati con drone. Possono essere importate delle mesh esterne da applicare all’interno dell’ambiente ricostruito. In uno degli esempi presentati, il servizio di Delair.Ai viene sfruttato per valutare lo stato di salute di una cisterna industriale, inserendo il modello 3D di progettazione originario della struttura nell’ambiente di sviluppo della piattaforma, questo viene confrontato automaticamente con il modello ricostruito dal sistema Delair.Ai potendo così per verificare eventuali danni o deformazioni rispetto l’originale.

3.4.3 DroneDeploy

Dronedeploy è un’azienda americana nata a San Francisco [CA] nel 2013. La piattaforma cloud based da loro sviluppata offre una gamma di soluzioni che coprono i principali aspetti nell’uso professionale di un APR, dalla pianificazione del volo, alla raccolta di dati durante la missione, fino alla successiva fase di processamento e analisi di questi ultimi. Oltre alla piattaforma cloud, alcuni dei servizi e in particolare quelli relativi alla pianificazione e alla gestione del volo, sono offerti tramite un’applicazione

per mobile e alcune delle funzionalità sono supportate solo da dispositivi iOS recenti.

Funzionalità offerte

Di particolare interesse è la presenza di una vera e propria App Market²² tramite la quale aziende esterne offrono dei tool usufruibili con acquisti in app sulla piattaforma Dronedeploy. Le attuali 100 app disponibili permettono di avere un'ampia varietà di servizi ed elaborazioni aggiuntivi alle funzioni base, oltre a rendere modulabile il costo di utilizzo.

- **Pianificazione e gestione del volo**

La soluzione di Dronedeploy prevede come detto, oltre alla piattaforma di elaborazione, un applicativo mobile per la pianificazione e gestione del volo. Una particolarità di tale applicativo sono le funzionalità real time che offre.²³ Queste promettono infatti di elaborare i dati raccolti direttamente durante il volo, creando mappature 2D e 3D ed effettuando un upload dei dati appena catturati sulla piattaforma cloud. Un esempio si ha nell'ambito agricolo, in cui possibile avere una prima analisi dello stato di salute delle piante e degli eventuali danni causate da eventi naturali. In ambito edilizio, invece, è possibile visualizzare e trasmettere la mappatura del sito, per valutare lo stato dei lavori e compararlo con mappature precedenti. L'applicativo offre inoltre un supporto per l'utilizzo del drone nel primo soccorso e una lettura immediata delle temperature durante ispezioni con termocamera, con la possibilità di creare in live una termo mappatura.

- **Elaborazione del dato**

Le soluzioni che Dronedeploy offre sono separate in base agli ambiti di utilizzo e dedicate principalmente a cinque settori lavorativi, similmente alla formula offerta dalla concorrente Delair.

- **Miniera e cave.**²⁴ Il servizio permette la gestione di accumuli di materiale tramite una fotogrammetria con relativo calcolo di volumi. Questo consente di creare e aggiornare un inventario di accumuli di materiale presenti nel sito, potendo così gestire e monitorare l'uso o l'accumulo di tali risorse confrontando più misurazioni successive, ad un costo minore rispetto ai metodi tradizionali. È possibile inoltre visualizzare e comparare lo stato del sito e stimare volumi di produzione, l'efficienza delle esplosioni in cava, oltre a

visualizzare e misurare le caratteristiche delle strade per una progettazione più efficiente per il trasporto materiale e movimento dei mezzi.

- **Ambito edilizio.**²⁵ Nell’ottica di ottimizzazione delle tempistiche, miglioramento delle comunicazioni e riduzione generale dei costi, il drone può essere usato per condurre ispezioni e documentare lo stato di qualsiasi tipologia di cantiere. Grazie alla mappatura 3D è possibile analizzare e monitorare lo stato d’avanzamento dei lavori in modo sicuro e veloce, creando una riproduzione interattiva del sito che può essere arricchita da ulteriori foto e video. Questi strumenti permettono inoltre di individuare e correggere eventuali errori o difetti, confrontando i dati raccolti con il progetto originale.
- **Agricoltura di precisione.**²⁶ L’applicativo Dronedeploy si appoggia a tool esterni integrati come Skymatics per l’elaborazione dettagliata dei dati raccolti in ambito agricolo. Skymatics, in particolare, è un tool a pagamento non incluso nel costo base del servizio, ed offre la possibilità di pagare a singolo report effettuato. I dati raccolti da sensori multispettrali possono essere elaborati per valutare lo stato di salute delle piante tramite il calcolo di indici di vigore come VARI e NDVI. Tali indici possono essere confrontati in momenti diversi durante la crescita delle piante, per poter evidenziare miglioramenti o peggioramenti dello stato di salute nelle diverse zone dell’appezzamento, nell’ottica di massimizzare il rendimento. È inoltre possibile evidenziare problematiche legate a malattie/parassiti per poter effettuare trattamenti immediati e mirati. Tramite la funzione Live Map è possibile effettuare misure e riscontrare eventuali problemi anche in real time durante il volo. Dronedeploy offre un pacchetto completo legato all’ambito agricolo al costo di 1200\$ annui, comprendente un tool per la pianificazione e automazione del volo, la possibilità di upload da mobile per avere un immediato processamento delle immagini acquisite, il tool LiveMap HD per avere render, approfondimenti e elaborazione in real time dei dati durante la fase di volo e i servizi base descritti.
- **Ispezioni a infrastrutture.** La ricostruzione 3D dell’infrastruttura arricchita con note e label, permette una valutazione dello stato di salute con costi limitati e ottenibili in condizioni di massima sicurezza. Sfruttando la pianificazione del volo automatica in

modalità dedicata all'ispezione dei tetti, è possibile mappare l'area interessata in poco tempo. Dronedeploy promette una velocità di consegna dell'ispezione 3 volte più velocemente rispetto ai servizi concorrenziali. L'elaborazione dei dati, nell'ambito delle ispezioni ad infrastrutture, può essere realizzata tramite un tool esterno (Roof Report) al costo di circa 20-100\$ ad elaborazione. Altri tool sono disponibili per questa specifica funzione. In particolare, l'output dell'elaborazione di Roof Report dedicato all'ispezione dei tetti, comprende un file DXF compatibile con i programmi CAD e un PDF, dove la superficie viene suddivisa in sezioni e per ognuna vengono riportate diverse misure come lunghezze, aree e inclinazioni. La precisione di ogni misura è, secondo l'azienda, circa del 99.4%.²⁷

- **Ispezione ad impianti solari.** L'ispezione permette di trovare danni e difetti meccanici direttamente durante il volo tramite la funzione Thermal Live Map dell'applicativo mobile precedentemente descritto. Dronedeploy permette inoltre di stimare l'esposizione solare dei pannelli, calcolando così la resa energetica. Tramite tool integrati come VisualAi Solar Planner, è possibile svolgere delle analisi di terreni durante la fase di valutazione di costruzione di una solar-farm.
- **Siti di estrazione petrolio e gas.** Tramite le mappe con linee di livello e ricostruzione 3D, viene semplificata la pianificazione di nuove installazioni di reti ed impianti del settore. Dronedeploy può essere utilizzato anche per ispezioni e ricerca di difetti o rotture, sfruttando sensori RGB e termografia radiometrica. Dal sito ufficiale è disponibile un ebook dedicato all'utilizzo di APR inerente a questo settore.

Un particolare aspetto vantato dall'azienda è l'alto grado di sicurezza garantito nello storage dei dati caricati sulla piattaforma cloud, realizzato tramite tecniche di crittografia e protezione da attacchi DDos. Per quanto concerne l'accuratezza degli elaborati, l'azienda sottolinea che dipende da molti fattori tecnologici, meteorologici e precisione dello svolgimento nel task di cattura ed è inoltre legata al valore GDS di partenza. Tipicamente l'accuratezza relativa attesa, riguardante cioè le misure locali, varia da 1 a 5 volte tale valore. Il valore di accuratezza assoluta attesa, ossia la precisione relativa alla posizione assoluta

di un punto, dipende radicalmente dalla metodologia di misurazione GPS usata. Basandosi solo sulla misura GPS data un tipico drone commerciale, tale valore è di 1 metro per la misura orizzontale e di 3 metri per quella verticale. Integrando sistemi di Ground Control Point o sistemi RTK, l'accuratezza orizzontale aumenta fino a 2-5 cm mentre quella verticale arriva a 4-8 cm.²⁸

Una particolare funzione offerta dall'applicativo di Dronedeploy è la possibilità di scegliere se e di quanto comprimere le immagini in fase di upload. Questo permette di trovare il trade-off necessario tra qualità di output e tempistiche di attesa.

I tempi di elaborazione dipendono ovviamente dalla tipologia di immagini in output e da quanto risultata facile per l'algoritmo trovare le feature identificative (Si veda la sezione [2.2.6](#)).

Integrazione

Dronedeploy ha sviluppato una serie di strumenti pensati per personalizzare e automatizzare l'elaborazione e lo svolgimento di task, nell'ottica di far risparmiare tempo all'utente e aumentare il grado di versatilità dei servizi offerti.²⁹ Gli strumenti sono resi disponibili tramite un SDK che racchiude principalmente quattro funzionalità:³⁰

- *UI Kit*: Tool che permette di creare e personalizzare l'interfaccia utente dell'applicativo di Dronedeploy. In questo modo è possibile integrare e rendere facilmente consultabili svariati dati o informazioni utili nella pianificazione del volo o da tenere in considerazione durante l'elaborazione, come dati meteorologici o interferenze elettromagnetiche misurate.
- *Datastore*: Database personalizzabile per lo storage e la gestione di molteplici tipologie di dati, non solo i dati grezzi raccolti durante la fase di volo, ma anche storici di analisi e inventari di risorse.
- *Funzioni di aggiornamento*: Per assicurare un'accurata e avanzata funzionalità di monitoraggio è possibile creare upload automatici dei dati raccolti e avviare funzioni di server direttamente dall'applicativo mobile.
- *Trigger*: Tale strumento permette la creazione di notifiche automatiche per la gestione delle scorte materiali oltre gestire il download o l'esportazione dei modelli di output al termine dell'elaborazione

Costi

È disponibile una versione di prova di 14 giorni del sistema DroneDeploy con un limite di 10 mappature o modellazioni. Il costo del servizio è organizzato in 3 tipologie di abbonamento:³¹

- Pro Plan: 1.188\$ a fatturazione annuale o 149\$ per un solo mese, per un singolo account. Soluzione per il volo e mappatura base che include l'applicativo Live Map ed il Mapping in Real Time. Prevede un limitativo di 1000 immagini a mappatura.
- Business Plan: 3588\$ annuali o 449\$ per un singolo mese. Prevede un supporto per voli ed elaborazioni complesse con un limitativo di 3000 immagini a mappatura, non tutte le funzionalità sono incluse.
- Enterprise Plan: prezzo non disponibile, dedicato alle aziende. Include tutte le funzionalità disponibili oltre l'accesso agli strumenti inclusi nel SDK.

Critiche e opinioni

L'applicativo mobile è scaricabile gratuitamente dai principali store. Alcune delle funzionalità di pianificazione e gestione del volo sono gratuite, mentre le altre richiedono uno degli abbonamenti sopracitati. Dallo store di Google l'applicativo ha ricevuto 1700 recensioni con un punteggio totale di 4.3 stelle. Le critiche maggiori riguardano problemi di compatibilità su determinati dispositivi e bug minori. Molto apprezzata è la semplicità e la possibilità di poter confrontare in real time il risultato della mappatura in corso con i rilievi precedenti dello stesso.

Generalmente le review scritte da utenti e professionisti del settore e condivise sulle principali piattaforme social e di discussione, danno un giudizio positivo sul servizio offerto, di seguito alcuni aspetti sottolineati.

La pianificazione del volo, calcolata in modo guidato o automatico, viene fatta a monte tramite l'applicativo web, arrivando così sul sito con già la missione preimpostata sull'applicazione mobile.³²

La ricostruzione 3D di un sito si può basare su foto scattate anche in missioni e movimenti del drone differenti. Il servizio cloud based è in grado di riconoscere in quale posizione ogni foto è stata scattata, tramite le informazioni di geotagging nei metadati e grazie al lavoro di computer vision svolto.

Il tempo di attesa sembra essere di 2 ore per una mappatura con 2/300 foto. L'upload delle immagini richiede mediamente circa un minuto l'una.³³

Un tool esterno, tra i tanti disponibili, sfrutta algoritmi di machine learning per il riconoscimento di oggetti all'interno delle immagini, facendo un conteggio di automobili, edifici, spazi vuoti e pannelli solari. Le misurazioni che è possibile fare sul modello finale (distanze, pendenze, aree, volumi) non richiedono altri dati o strumentazioni se non le immagini con relativo geotagging, dalla quale dipendono però la precisione e l'accuratezza.

3.4.4 Pix4D

L'azienda di Pix4d è nata in Svizzera nel 2011 all'interno del Politecnico di Losanna ed offre una suite di software che sfruttano tecniche di fotogrammetria e computer vision nell'elaborazione delle immagini. Tali tool sono offerti tramite un applicativo mobile, un software desktop e un servizio su piattaforma cloud based.³⁴

Funzionalità offerte

A differenza delle principali soluzioni concorrenti descritte nei capitoli precedenti, Pix4D non offre un software o una piattaforma unificata in grado di elaborare tutti i tipi di dato e produrre output utili a tutti i settori professionali, ma divide l'applicativo in 5 principali software e tool, ognuno specializzato in un certo ambito lavorativo.

- **Pix4D Mapper.**³⁵ È l'applicativo principale dedicato alla fotogrammetria, molto conosciuto nell'ambito professionale. È composto da un software che prevede l'elaborazione in locale ed un collegamento diretto con la piattaforma cloud, sulla quale è possibile caricare ed elaborare i dati in alternativa alla funzione locale. I dati in input accettati sono molteplici e comprendono immagini aree, video, dati da tecnologia RTK e punti GCP.³⁶ L'applicativo permette di elaborare i dati sopracitati per ottenere in output i classici modelli che l'ambito fotogrammetrico richiede. Di particolare interesse è la possibilità di creare nuvole di punti, filtrare e pulire i campioni per effettuare poi una classificazione dei punti RGB in base alla loro densità, così da poter individuare determinati oggetti e costrutti: strade, vegetazione,

edifici e infrastrutture. Il software permette inoltre di combinare più progetti assieme in caso di mappature molto estese, offre una buona correzione e calibrazione delle immagini di input in base al modello di lenti e camera usata. La maggior parte delle funzionalità offerte sono basate sul software locale, il carico computazionale è dunque lasciato all'utente nella maggior parte dei casi. Di particolare vanto è la funzione di Ray Cloud Editor, grazie al quale l'utente può modificare direttamente sul software i modelli creati, andando a correggere manualmente eventuali errori, creare animazioni per una visualizzazione immersiva del modello e migliorare in generale l'output finale. Un'altra interessante utility è la possibilità di visualizzare facilmente tutte le foto relative ad ogni punto del modello creato, per una visualizzazione e analisi più approfondita. L'accuratezza relativa teorica è di circa 1-3 volte il valore GDS dell'input, mentre i valori di accuratezza globale hanno un range di 1-2 volte il valore GDS per la misura orizzontale e 1-3 volte il valore GDS per la misura verticale.

- **Pix4D Fields.**³⁷ Tool dedicato all'ambito agricolo disponibile per dispositivi mobile e computer, compatibile con immagini prese da qualsiasi sensore RGB e da alcuni modelli di camere multispettrali (Sequia+, RedEdge). Un'apposita funzione permette di confrontare l'andamento della crescita delle piante, andando a visualizzare tutte le mappature effettuate precedentemente in una specifica zona. Inoltre, le immagini possono essere processate istantaneamente ed essere condivise in poco tempo tramite la piattaforma cloud e sincronizzazione dei dispositivi ad essa collegati. Tramite l'applicativo mobile, l'ortomosaico, i modelli DSM e altre mappe di dati multispettrali vengono calcolati in real time in locale, mentre nella fase di elaborazione dei dati tramite il software, possono essere calcolati i valori standard relativi allo stato di salute delle piante (NDVI, NDRE) e previsioni di raccolto per determinate tipologie di coltivazioni. I risultati finali possono essere esportati con un report PDF generato automaticamente. Le specifiche dell'hardware consigliate rivelano che non è necessario un computer ad alte prestazioni per permettere l'elaborazione di questa tipologia di dati.
- **Pix4D Capture.**³⁸ Applicazione mobile gratuita per la pianificazione e gestione del volo tramite la quale è possibile progettare mappature 3D e modellazione di siti. L'app è compatibile con diversi marchi di

SAPR multirottore e ad ala fissa (DJI, Parrot, Yuneec). Come altre applicazioni concorrenti è possibile pianificare il set up di volo impostando i valori di GDS, sovrapposizione delle immagini, angolo di camera e velocità di volo. È inoltre possibile effettuare l'upload dei dati catturati direttamente alla piattaforma cloud.

- **Pix4D Engine.**³⁹ Si tratta di un set di moduli programmabili compatibili con gli altri tool offerti da Pix4D. Disponibile sia per l'elaborazione sulla piattaforma cloud based sia per l'elaborazione in locale, è un tool che consente di aumentare la personalizzazione, l'automazione e l'integrazione dei processi dei vari programmi di Pix4D. Permette di avere il controllo sulla pipeline dei programmi, il trasferimento di dati e di creare workflow automatizzati. Questo avviene grazie alla possibilità di accedere direttamente agli algoritmi e ai processi generati dai programmi di Pix4D, potendo creare così un mix di automazione tra i vari moduli, ottimizzare le tempistiche per task ripetitivi, implementare la scalabilità delle operazioni eseguite su una grande quantità di dati sfruttando il servizio cloud based. È possibile usare Pix4D Engine anche su infrastrutture server proprietarie come AWS e Azure.
- **Pix4D Survey.** Tool aggiuntivo creato per interfacciare al meglio la fotogrammetria al disegno tecnico computerizzato CAD. Permette infatti il passaggio da nuvola di punti a grandezze vettoriali, come misure di perimetri e impronta di edifici. Il tool è disponibile, al momento dell'analisi, in versione Beta.
- **Pix4D Model.** Model è una versione ridotta dell'applicativo principale Mapper. Permette infatti avere in output mesh poligonali 3D a partire da un dataset di immagini o video. I modelli che è possibile ottenere possono essere resi compatibili con software di animazione 3D, di modellazione, stampanti 3D e VR.

Campi di utilizzo

Similmente alle aziende concorrenti, Pix4D propone l'utilizzo dei software appena descritti in base al settore professionale d'interesse.

- **Ispezioni e controllo cantieri:** Grazie al tool di editing Pix4D Mapper, la compatibilità con GCP e dati RTK, è possibile avere un alto livello di precisione delle surveys effettuate nei cantieri. Grazie ai tool

visti è possibile esportare modelli di superficie DSM, mappe 3D e misurazioni del terreno. Tramite la funzionalità Ray Cloud precedentemente descritta, è possibile verificare l'accuratezza della realizzazione del progetto in cantiere confrontando il modello creato con il progetto originale.

- **Edilizia:** I dati raccolti da terra o dal drone possono essere implementati con i dati raccolti dal sistema “Crane Camera Solution” di Pix4D,⁴⁰ un sistema di telecamere avanzate che può essere installato sulle gru da cantiere. Questo apparecchio, collegato al sistema dedicato Pix4DBim Cloud, permette il monitoraggio dell'avanzamento dei lavori tramite una costante fotogrammetria e la successiva modellazione 3D. Pix4D permette inoltre di registrare l'avanzamento di scavi, misurazione di accumuli di materiale e fare un'accurata stima di costi per lo spostamento di materiale.
- **Agricoltura:** È possibile creare e processare mappe relative agli indici di salute delle piante in tempo reale e confrontarle con mappature precedenti. È possibile sfruttare la mappatura con camere multispettrali per fare una stima precisa dei danni provocati da infezioni, incendi e altri disastri, dati utili anche a fini assicurativi. Grazie al calcolo dei differenti indici di vigore delle piante, Pix4D permette di individuare aree con necessità di trattamenti, permettendo così un intervento mirato. È possibile inoltre designare e perseguire degli obiettivi di aumento di resa, gestire meglio l'irrigazione e la somministrazione di elementi fertilizzanti.
- **Pubblica sicurezza:** L'elaborazione delle immagini di Pix4D permette di documentare e svolgere operazioni di ricognizione in modo veloce e pratico rispetto i metodi tradizionali. Questa funzionalità facilita i lavori svolti in fase di investigazione per membri di giuria ed esperti forensi. Infatti, grazie alla precisa ricostruzione 3D delle scene di incidenti e crimini è possibile rivederle e analizzarle in qualsiasi luogo e in qualsiasi momento, con la possibilità di fare misurazioni di distanze, aree e volumi.
- **Ambito minerario:** I rischi per la sicurezza in miniera possono essere valutati e diminuiti grazie al monitoraggio delle esplosioni controllate, corsi di flussi d'acqua e stabilità dei pendii. E' possibile inoltre creare report in tempo reale per il monitoraggio di avanzamento dei lavori,

dei consumi delle scorte di materiali e per svolgere previsioni sulla produzione in miniera.

- **Educazione:** Pix4D fornisce degli strumenti dedicati all'ambito educativo per la promozione ed insegnamento ai principi della fotogrammetria. Esempi di questi strumenti sono video educativi, esercizi propedeutici e licenze per i software dedicate.

Prezzo

I tool precedentemente descritti prevedono un abbonamento annuale o mensile oppure un acquisto di licenza a vita. Tutte le opzioni di abbonamento prevedono il servizio cloud based di processamento con un limite mensile di 10 elaborazioni o 2500 immagini elaborate. Si riportano di seguito i prezzi relativi ai servizi di interesse per la presente tesi:⁴¹

- Mapper: il tool più completo ha un costo di 4000€ con licenza a vita (1 device), 2600€ per 12 mesi o 260€ per un mese di licenza.
- Fields: il suo costo è di 1900€ per l'abbonamento annuo e 190€ per un mese.
- Model: il costo è di 504€ per un anno, 49€ per un mese di licenza.

Critiche e opinioni

Come descritto nella Sezione 3.2, l'azienda produttrice di droni Parrot ha scelto Pix4D come partner per proporre all'utente una soluzione integrata di SAPR ed elaborazione dal dato raccolto. I prodotti delle due aziende sono dunque integrati, facilitando così l'elaborazione dei dati catturati in volo. Gli utenti che recensiscono Pix4D confrontano molto spesso questo software con Dronedeploy, suo diretto competitor.⁴² In base ad alcuni test svolti da utenti professionisti del settore, non sembra esserci una soluzione che si può ritenere migliore in termini assoluti, i test svolti nel Capitolo 4 della presente tesi cercheranno di approfondire tale aspetto.

3.5 Comparazione e analisi dei risultati raggiunti

Come si apprende dalla fase di analisi descritta nella precedente sezione, le quattro soluzioni presentano delle caratteristiche in comune a partire dalle tipologie di dati di input accettate, modelli di output ottenibili, dall'elaborazione di quest'ultimi agli ambiti professionali per la quale sono proposte soluzioni ad hoc e in generale i workflow di lavoro. Ciò che differenzia invece le piattaforme di elaborazione sono principalmente le tipologie di abbonamento e i relativi costi, la compatibilità con tool e tecnologie esterne, il livello di accuratezza teoricamente raggiungibile, eventuali funzioni e tool che permettono una personalizzazione e facilitazione di utilizzo. Per quanto concerne le tempistiche richieste per l'elaborazione e la robustezza degli algoritmi usati per la ricostruzione fotogrammetrica, risulta difficile avere comparazioni se non svolgendo appositi test.

3.5.1 Analisi dei dati

Alla luce dei dati raccolti è stata elaborata la tabella presente nella Figura 3.1 che compara i quattro applicativi, riassumendo il valore delle caratteristiche individuate e descritte nella sezione 3.1 e analizzate nella sezione 3.2.

La tabella mette in evidenza la presenza o meno di certe caratteristiche (Piattaforma, Funzionalità, Elaborazione), presenta due valutazioni oggettive per le caratteristiche di Compatibilità e Integrazione, e riporta i valori di Accuratezza e Prezzo. Per il valore di Accuratezza, riferita alla precisione di una ricostruzione fotogrammetrica, sono riportati i valori di accuratezza globale (se disponibile) e accuratezza relativa, i dati riportati sono quelli descritti nella documentazione ufficiale del venditore. Le unità di misura riportate sono in GDS, ossia quante volte vale l'accuratezza dell'output rispetto al valore di Ground Sample Distance (cm/pixel) delle immagini in input. La misura in centimetri è stata ottenuta considerando la fattispecie di una mappatura di un terreno effettuata con un drone standard commerciale (DJI Phantom) con un'altezza di volo di 100 metri. Dunque, tale valore aiuta il lettore a stimare l'accuratezza in una situazione di mappatura standard. Per quanto riguarda invece l'ammontare

del costo per ogni soluzione, l'analisi ha richiesto di trovare metro di misura che venisse incontro alle differenti modalità di vendita, diverse per tutte e quattro le soluzioni. Si vuole sottolineare che i servizi basati solo su piattaforma cloud presentano delle limitazioni in termini di numero di elaborazioni o immagini elaborate, mentre i software usufruibili in locale non presentano tale limitazione in quanto il carico computazionale è a carico dell'utente.

Anali della tabella comparativa

Dalla tabella nella Figura 3.1 è possibile delineare i punti di forza e debolezza degli applicativi, che possono variare in base al tipo di elaborazione, alla frequenza di utilizzo e alle funzioni ricercate dall'utente.

- **Piattaforma:** nel caso di previsione di utilizzo di un servizio cloud based, Dronedeploy offre gli applicativi necessari ma risulta interessante la doppia versione dell'engine di elaborazione di Pix4D, disponibile sia per il calcolo in locale sia in piattaforma cloud. Quest'ultima presenta però funzioni di gran lunga minori rispetto alla piattaforma di Dronedeploy. Delair.Ai pecca di mancanza di un applicativo dedicato alla pianificazione del volo, esistente solo per i tre modelli di SAPR ad ala fissa di loro costruzione (dunque non considerato). Si può considerare comunque la possibilità di usare un'applicazione esterna per questa funzione.
- **Funzionalità:** per questo aspetto risaltano le soluzioni di DJI e Dronedeploy. Il primo integra la pianificazione del volo, la gestione del dato in tempo reale e, ovviamente, la fase di elaborazione. È da tenere però in considerazione le opzioni limitate di tipologia di volo pianificabile e la necessità di dover operare sul sito con un computer, aspetti discussi nella Sezione 3.4.1. Dronedeploy offre un buon supporto e integrazione tra applicazione mobile e piattaforma cloud, oltre all'elaborazione del dato in tempo reale in fase di volo. Pix4D pecca per la mancanza di quest'ultima funzionalità.
- **Elaborazione:** tutti e quattro gli applicativi sono in grado di elaborare grossomodo le stesse tipologie di dati e di fornire i modelli e misure

	DJI Terra	Delair.Ai	Dronedeploy	Pix4D
Piattaforma				
<i>Cloud Based</i>		X	X	X
<i>Local Based</i>	X			X
<i>Mobile App</i>			X	X
Funzionalità:				
<i>Pianificazione volo</i>	X		X	X
<i>Gestione volo</i>	X		X	
<i>Elaborazione</i>	X	X	X	X
Elabrazione:				
<i>Dati RGB</i>	X	X	X	X
<i>Dati IR</i>	X	X	X	X
<i>Dati Multispettrali</i>	X	X	X	X
<i>Dati Laser</i>		X	X	X
Compatibilità:				
<i>Bassa</i>	X			
<i>Media</i>		X		
<i>Alta</i>			X	X
Integrazione:				
<i>Bassa</i>	X			
<i>Media</i>		X		
<i>Alta</i>			X	X
Accuratezza:				
<i>Relativa</i>	=	=	5 GDS	1-3 GDS
<i>Globale</i>	1-2 GDS	1-2 GDS	1-2 GDS	1-2 GDS
	Orriz = 2-5 cm Vert. = 4 cm	Orriz = 3 cm Vert. = 4 cm	Orriz = 2-5 cm Vert. = 4-8 cm	Orriz = 2-5 cm Vert. = 4 cm
Prezzo:				
<i>Costo modulare</i>		X	X	X
<i>Costo licenza mensile</i>	-	1000,00€ (Senza limitazioni)	449,00€ (3000 immagini)	260€ + 190€ (2500 immagini per la parte cloud)
<i>Costo licenza 12 mesi</i>	3000,00€ (Senza limitazioni)	-	3307,00€ (3000 immagini x elaborazione)	2600,00€ + 1900,00€ (2500 immagini al mese per la parte cloud)

Figura 3.1: Tabella comparativa delle feature analizzate nella sezione 3.4.

che i vari casi d'uso richiedono. DJI Terra non prevede l'elaborazione di dati generati da laser scanner.

- **Compatibilità:** il valore basso attribuito all'applicativo DJI Terra è dato dal fatto che la soluzione è principalmente sviluppata a sistema

chiuso anche se, come descritto in precedenza, il software di elaborazione accetta immagini provenienti da SAPR differenti. Anche la piattaforma di Delair offre i migliori risultati se vengono utilizzati nel workflow i droni di loro costruzione.

- **Integrazione:** Dronedeploy e Pix4D offrono veri e proprio toolkit dediti all'integrazione delle loro funzionalità all'interno di altri applicativi e alla personalizzazione del flusso di lavoro. Anche Delair.Ai prevede una SDK ma la soluzione è meno sviluppata rispetto le concorrenti. Da sottolineare l'App Marketing presente in Dronedeploy che permette un'integrazione ancora maggiore con servizi terzi.
- **Accuratezza:** I valori teorici raggiungibili sono simili per tutte e quattro gli applicativi. Questo però non da informazione su quanto bene funzionino effettivamente gli engine di elaborazione e gli algoritmi usati.
- **Prezzo:** Grande vantaggio di Delair.Ai, Dronedeploy e Pix4D è il prezioso modulabile. Il primo lo realizza tramite il sistema dei crediti precedentemente descritto, il secondo con diverse tipologie di abbonamento e gli acquisti in app di servizi esterni, ed il terzo in fine, tramite la suddivisione dei diversi moduli che compongono il servizio. Nel caso di Pix4D, nella tabella sono state mantenute separate il costo dell'applicativo Mapper e Fields, che assieme offrono i servizi dei concorrenti.

Un'ulteriore analisi è stata fatta mettendo in relazione le caratteristiche che più interessano la presente tesi. In particolare, nel grafico presente in Figura 3.2 sono stati messi in relazione la piattaforma di esecuzione prevista dall'applicativo e il grado di integrazione offerto, secondo le definizioni definite precedentemente.

Risaltano le applicazioni di Pix4D e Dronedeploy, in base alla piattaforma su cui l'utente vuole basarsi ed in particolare la possibilità di Pix4D di avere parte del processo in cloud.

Un'analisi simile è stata fatta nel grafico in Figura 3.3, mettendo in relazione il prezioso con le eventuali limitazioni imposte. Quest'ultimo parametro influenza la convenienza a livello di prezzo, in base al numero di elaborazioni svolte. Il grafico tiene inoltre in considerazione solo l'ambito della ricostruzione fotogrammetrica, escludendo le funzionalità per

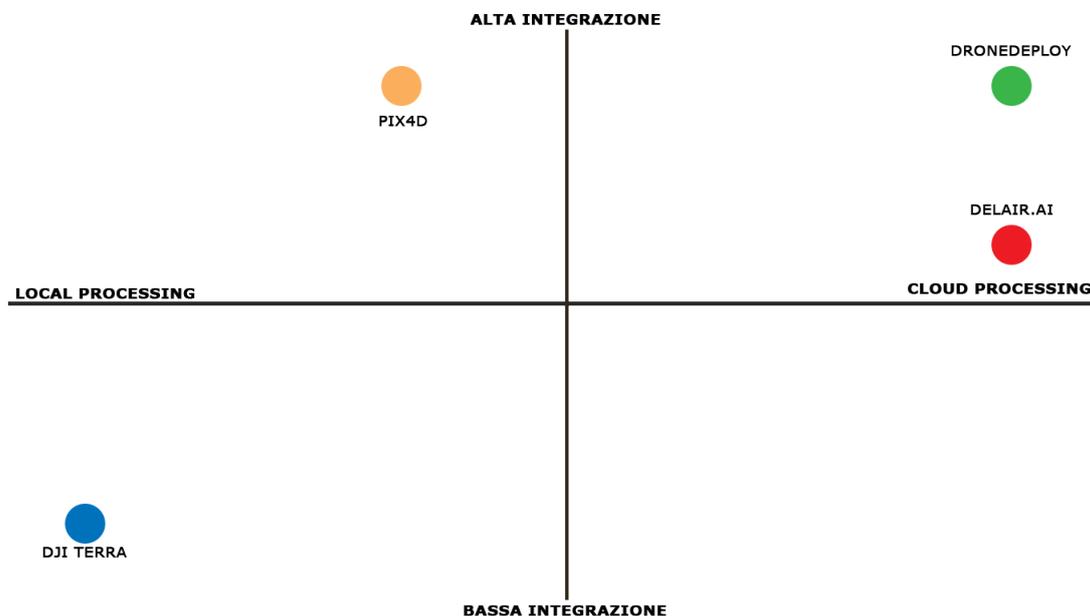


Figura 3.2: Grafico che mette in relazione il livello di interazione con la tipologia di processing.

l'elaborazione dei dati multispettrali. Contrariamente i prezzi di Pix4D sarebbero maggiorati.

Analizzando il grafico in Figura 3.3 risulta che Pix4D ha un rapporto prezzo/servizi migliore, nonostante le limitazioni più forti per la piattaforma cloud, ha la possibilità di avere elaborazioni senza limiti in locale. Spicca Delair.Ai per la possibilità di elaborazioni senza limiti per un prezzo maggiore. DJI Terra offre anch'essa una soluzione senza limitazioni ma è stato attribuito un valore minore perché l'elaborazione in locale può portare limitazioni date dall'hardware.

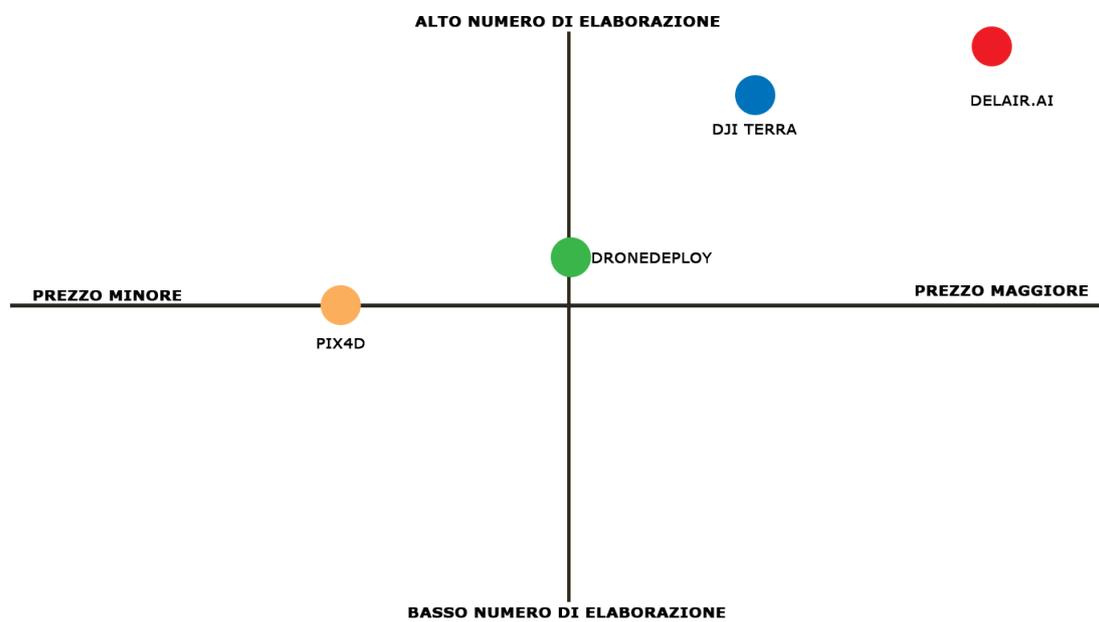


Figura 3.3: Grafico che mette in relazione il costo dell'applicativo in base al numero di elaborazioni effettuate.

Capitolo 4

Testing e comparazione di Pix4D e DroneDeploy

Le analisi effettuate nel capitolo precedente hanno evidenziato come le diverse soluzioni applicative rispondono a diverse esigenze lavorative. Tenendo in considerazione i risultati ottenuti e le esigenze di TIM, si è optato per testare due degli applicativi in questione: Pix4D e Dronedeploy. Il test consiste nel fornire in input diversi dataset ai due applicativi, richiedendo in output una ricostruzione 3D dell'ambiente mappato. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati fra loro analizzando visivamente i modelli e basandosi sui report generati dagli applicativi in fase di elaborazione. Si rende noto che i modelli saranno presentati e valutati senza subire processi di post produzione, tipicamente necessari per avere un output di buona qualità.

4.1 Il dataset

Lo step di preparazione del dataset da usare in questa fase di test è stata curata in particolare modo, cercando di simulare una reale esigenza dell'azienda e cercando di mettere alla prova gli algoritmi di ricostruzione usati nei due applicativi. Per questo motivo è stata coinvolta SEiKEY, azienda di riferimento per quanto concerne l'uso di SAPR per soluzioni aziendali, non che partner tecnologico di TIM. L'azienda è nata nel veranese nel 2012 ed è indirizzata in soluzioni ad alta specializzazione basata sull'uso

dei droni, quali la digitalizzazione di cantieri, infrastrutture e realtà industriali. Da qualche anno è divenuta il service principale di TIM per servizi basati sull'uso di SAPR.

SEiKEY è venuta incontro alle esigenze della presente tesi, fornendo un dataset di immagini catturate durante un rilievo ad una stazione radio base (BTS) nel milanese. La scelta di avere una BTS come oggetto di elaborazione presenta un doppio vantaggio: da una parte rappresenta quella che potrebbe essere un vero caso d'uso per TIM, dato il fatto che le ispezioni alle BTS sono effettuate sovente all'interno dell'azienda. In secondo luogo, la struttura fisica di una stazione radio base è considerevolmente complessa, soprattutto per una ricostruzione 3D di alta qualità. Per questo motivo rappresenta una sfida notevole per gli applicativi testati, situazione ricercata per risultati più interessanti. Il dataset fornito da SEiKEY è composto da 605 immagini oblique, catturate tenendo la camera orientata a circa 45° rispetto la posizione nadirale ed effettuando un volo verticale lungo la BTS, per poi muoversi circolarmente ad ogni salita di un certo grado, attorno alla stessa. Sono presenti inoltre 109 foto nadirali del terreno circostante alla BTS.

Aeromodello: il drone usato nella missione è un multicottero DJI Matrice 600 Pro, modello diffuso nella fascia degli APR professionali. Ha un peso al decollo di circa 12kg incluso il payload, rientrando dunque nella categoria Light secondo la normativa ENAC.

Fotocamera: la camera usata come payload è una DJI Zenmuse X5 (FC 550), con un sensore CMOS da 21.6 mm diagonali. Ha una lente a focale fissa da 15 mm e le impostazioni usate durante il rilievo prevedono una chiusura di diaframma $f/1.7$ e shuttering da $1/6830$ secondi. Le immagini scattate hanno un dimensione di 4000×2250 pixel.

Le foto presentano complessivamente una buona qualità avendo però delle leggere aberrazioni che rendono i dettagli sfocati e un effetto complessivo di leggera nebbia. La causa probabile la si può individuare nel diaframma troppo aperto con conseguente abbassamento dei tempi di scatto, oppure può essere dato anche dalle condizioni atmosferiche. Non sono inoltre presenti Ground Control Point, necessari ad aumentare il livello di accuratezza come descritto in precedenza. La geolocalizzazione del modello di output è basata dunque solo sulle informazioni date dal sistema

GPS dell'aeromodello, presenti nei metadati delle immagini stesse. Nel complesso il dataset è ricco di immagini, catturate nel modo ottimale per la fotogrammetria come già descritto.

4.1.1 Dataset secondario

Assieme al dataset descritto, che sarà indicato come dataset primario, SEiKEY ha fornito anche un secondo dataset, indicato qui come dataset secondario, composto da 216 immagini nadirali e oblique catturate con l'aeromodello DJI Spark. L'oggetto di interesse delle fotografie è la parte superiore della BTS di interesse, ossia la parte in cui sono presenti i ripetitori radio.

Aeromodello: il modello Spark della DJI è di categoria ultralight, con un peso al decollo di 300g, prevede una camera integrata stabilizzata su 2 assi

Fotocamera: la fotocamera integrata presenta un sensore CMOS da 7.66 mm diagonali. Le immagini catturate hanno una dimensione di 3968x2976 pixel, chiusura di diaframma media di f/2.6 e tempo di esposizione media di 1/640 secondi.

4.2 Preparazione del dataset

Per poter studiare come gli algoritmi di ricostruzione fotogrammetrica rispondono a diversi livelli qualitativi e quantitativi di dati, sono state create quattro versioni differenti di dataset. Per fare ciò è stato preparato uno script in linguaggio Python che preleva dal dataset originale una frazione di foto indicata dall'utente, selezionando le immagini in modo omogeneo in modo da non avere parti di BTS più ricche di immagini rispetto ad altre. In questo modo i dataset totali ottenuti sono 6:

- Un dataset completo, composto da 605 immagini.
- Un dataset dimezzato, composto da 302 immagini.
- Un dataset di un terzo, composto da 201 immagini.
- Un dataset di un quarto, composto da 151 immagini.
- Un dataset di foto nadirali, composto da 109 immagini.
- Un dataset secondario, descritto in precedenza, composto da 216 immagini.

4.3 Fase di test di Pix4D

4.3.1 Processo di elaborazione

Dopo aver caricato il dataset nel programma di Pix4D o sulla piattaforma cloud, vengono letti automaticamente i metadati delle immagini individuando le caratteristiche della camera, della focale usata, dell'altezza di volo e i dati di geolocalizzazione.

Il processo di elaborazione di Pix4D è suddiviso in 3 macro-blocchi, sia per il processamento locale sia quello in cloud.

1. **Step 1.** Nello step iniziale vengono ricercati nelle immagini i keypoint tramite estrazione delle feature, queste saranno usate nel calcolo del posizionamento e dell'orientamento geometrico della nuvola di punti. Per questo step, il programma permette di scegliere diversi gradi qualità. In particolare, permette di definire la dimensione delle immagini nella quale vengono ricercati i key point, passando dalla dimensione originale fino a 1/8 della dimensione. In questo modo si può trovare il giusto trade off tra qualità di ricerca e tempistiche di calcolo. Per quanto concerne tutti i test effettuati, si è optato per mantenere la massima qualità disponibile. Un ulteriore processo fatto in questo step è l'ottimizzazione delle immagini in base alla camera usata dove, conoscendo le caratteristiche della camera e dell'obiettivo vengono attuate delle correzioni sulle fotografie fornite.
2. **Step 2.** In uno secondo step viene calcolata la nuvola di punti, estrapolandola dalle immagini del dataset in base al match trovato tra i punti chiave. L'utente ha la possibilità di scegliere la dimensione delle immagini usate per estrapolare ulteriori punti 3D. L'opzione scelta è $\frac{1}{2}$ rispetto la dimensione originale. Aumentare tale valore non sarebbe servito più di molto a raggiungere risultati migliori e avrebbe richiesto una quantità di RAM fino a 4 volte maggiore.¹ Altro parametro modificabile è il numero di punti 3D estrapolati per ogni pixel, l'opzione scelta è quella di un punto ogni 8 pixel dell'immagine originale. L'ultimo parametro riguardante la densificazione della nuvola di punti è il numero minimo di match richiesto per ogni punto 3D, ossia la soglia minima di immagini in cui un dato punto calcolato viene riscontrato. Sotto tale soglia il punto viene ignorato, avendo così la possibilità

di escludere eventuali punti di rumore. Per i test effettuati è stato richiesto un match minimo di 3 immagini.

3. **Step 3.** Nel terzo step vengono calcolati la mesh 3D, il modello DMS o altri modelli descritti nei capitoli precedente.

4.3.2 Quality report

Durante l'elaborazione, Pix4D crea un file di log ed un Quality Report, documenti ricchi di informazioni e indicazioni su come l'elaborazione sta procedendo. È tramite tali documenti che le diverse elaborazioni saranno valutate e comparate. Il quality report in particolare è un interessante documento utile a verificare la qualità del dataset fornito, dei risultati dei vari step di elaborazione e permette di verificare eventuali problemi riscontrati.

Il report è formato da diverse sezioni di cui si elencano le caratteristiche principali:

- **Quality Check:** Viene riportata la media di quanti keypoint sono stati trovati nelle immagini, il valore minimo consigliato è di 10.000 key point per ogni immagine analizzata. Nel caso in cui venissero trovati meno di 500 key point l'elaborazione non può procedere per mancanza di informazioni. I motivi che potrebbero portare ad un numero di punti troppo basso sono da ricercare principalmente nella qualità delle immagini (esposizione, rumore, sfocature...), nella dimensione delle immagini (effettive o dal downsizing impostato nell'elaborazione) o nel pattern che caratterizza il terreno mappato, come nel caso di aree molto uniformi come deserto o zone innevate.
- **Dataset:** Tiene in considerazione quanti blocchi di mappatura il dataset ha generato, idealmente il blocco individuato dovrebbe essere uno unico, con le immagini che creano dunque un unico modello. Il valore riportato indica la percentuale di immagini associata al blocco principale ed il valore ottimale è superiore al 95%. Se tale valore non viene raggiunto è necessario aumentare la percentuale di overlap, oppure il dataset fornito è stato creato in voli differenti e soffre di poca compatibilità tra le immagini. Se invece il valore riportato è minore del 60%, non è possibile procedere con l'elaborazione ed il problema

potrebbe essere di gravità maggiore, come la tipologia di terreno difficile da elaborare (superfici in movimento come lava, distese d'acqua o superfici riflettenti) oppure le impostazioni di pianificazione di volo o di elaborazione sono errate.

- **Camera optimization:** Si valuta se le operazioni di ottimizzazione delle immagini sono state applicate correttamente, e di conseguenza se le giuste caratteristiche del sensore e della focale sono state individuate. In caso contrario il software non è riuscito a calcolare correttamente il grado di distorsione delle immagini oppure quest'ultime sono state pre-processate ed il software non riesce ad elaborarle.
- **Matching:** Indica il numero di matching per i keypoint trovati nell'immagine processata, se tale valore è minore di 1000, il problema è anche in questo caso da ricercare nell'overlapping.

Il quality report presenta inoltre alcuni grafici e preview degli elaborati, di cui si riportano solo quelli di potenziale interesse:

- Una prima versione dell'ortomosaico e del modello DSM, da questi è possibile individuare eventuali errori di elaborazioni come buchi nella mesh, artefatti o distorsioni.
- Un secondo set di grafici rappresenta l'errore di calcolo della posizione di ogni immagine, rappresentando la posizione assoluta iniziale, la posizione calcolata e l'area di incertezza di quest'ultima, data dell'offset massimo. La rappresentazione è organizzata tramite le proiezioni sui piani XY, XZ e YZ della traiettoria del volo, la posizione assoluta è collegata tramite un link colorato alla posizione calcolata e quest'ultima è circondata da un'ellisse di incertezza. Nello specifico caso dei test effettuati, la forma geometrica risultante sarà un cilindro cavo sviluppato in altezza, risultato della traiettoria di volo eseguita attorno alla BTS.
- Due ulteriori grafici rappresentano rispettivamente la percentuale di overlapping delle immagini che, come spesso citato, è un parametro strettamente legato alla qualità dell'elaborazione, e la quantità di match trovati tra i keypoint del dataset.
- Due tabelle riguardanti il numero di key point calcolati mediamente nelle immagini e la quantità totale di match trovati in gruppi crescenti di foto.

Dei dati disponibili elencati, solo alcuni saranno usati per l’analisi e comparazione dei risultati, tenendo in considerazione la tipologia di mappatura effettuata e l’obbiettivo dei test.

4.3.3 Elaborazione locale vs elaborazione in cloud

La possibilità di poter elaborare il modello fotogrammetrico sia sulla piattaforma in cloud sia in locale, ha portato alla necessità di verificare se le due metodologie portassero ai medesimi risultati. A questo proposito è stata installata una versione di Pix4D Mapper su un computer Asus di bassa - media fascia con un processore Intel i7 di quarta generazione, 16 Gb di memoria primaria e una scheda grafica NVIDIA GeForce 840M. Riguardo la piattaforma cloud le specifiche hardware prevedono un processore Intel Xeon Platinum 8124M e un totale di 69Gb di memoria RAM. Per questa fase di test è stato dato in input alle due piattaforme il dataset primario completo, nella Tabella 4.1 comparativa sono riportati i risultati ottenuti in termini di tempistiche.

Task	Pix4D Local	Pix4D Cloud
Calcolo keypoint	13 min	6 min
Calcolo matching	7 min	10 min
Calibrazione	40 min	9 min
Point Densification	12h 15min	25 min
TOTALE	13h 20 min	90 min
Tempo compilazione report	68 min	25 min

Tabella 4.1: Comparazione tempistiche di elaborazione dei due applicativi

Come si può facilmente notare, l’elaboratore scelto non ha sufficienti risorse per competere con il servizio cloud based. È da tenere però in considerazione il tempo di upload delle immagini che, in base alla connessione ad internet disponibile, può richiedere un tempo non indifferente. Nel caso del presente test è stata usata una connessione in fibra ottica FTTC da 100 Mb/s, il tempo di upload è stato di circa 15 minuti.

Per quanto concerne la qualità dei dati di output, si può affermare che questi sono uguali, presentando la stessa quantità di key point trovati, lo stesso numero medio di match trovati in ogni immagine e, visivamente, lo stesso modello 3D finale. Tali dati sono presentati nello specifico nel

paragrafo successivo.

Alla luce dei risultati del test effettuato, si è optato per sfruttare la piattaforma cloud per l’elaborazione dei modelli dei test previsti.

4.3.4 Pix4D test

Test 1 - Elaborazione intero dataset

Per il primo test si è deciso di usare tutto il dataset primario a disposizione, includendo anche il dataset di immagini nadirali per aumentare maggiormente le angolazioni dei punti di vista, le immagini totali che compongono il dataset sono dunque 713. Nella Tabella 4.2 si riportano le tempistiche di calcolo divise per i macro-blocchi precedentemente individuati.

Task	Tempo
Calcolo keypoint	4 min
Calcolo matching	4 min
Calibrazione	14 min
Point Densification	75 min
TOTALE	97 min
Tempo compilazione report	22 min

Tabella 4.2: Tempistiche di elaborazione per il Test 1

È possibile osservare che la prima parte del lavoro composta dai primi 3 macro-blocchi e necessaria per la compilazione del report, ha richiesto 22 minuti, sempre escludendo il tempo di upload. Tale attesa è necessaria per valutare se il dataset fornito è di sufficiente qualità o se ci sono state delle complicazioni date dalle impostazioni o dalle immagini stesse, problemi che emergono durante il calcolo dei keypoint e dei match. La parte più complessa, composta dalla densificazione della nuvola di punti, ha richiesto invece 75 minuti. Dopo tale tempo, per un totale di circa 100 minuti, i modelli finali sono stati resi disponibili per la visualizzazione, l’analisi ed il download.

- **Offset delle posizioni.** Nella Figura 4.1 è stato riportato il grafico riguardante la posizione assoluta delle immagini (spot blu) e la corrispondente posizione calcolata dopo l’elaborazione (spot verdi). Le

due posizioni sono collegate da una linea verde che rappresenta l'offset e un'ellisse verde scuro rappresenta l'incertezza di posizione calcolata. In particolare, è stata riportata la proiezione YZ e quella XY del modello cilindrico del volo, dato il fatto che la mappatura in questione si è sviluppata in altezza rispetto alla struttura e in sul piano XY per la parte nadirale.

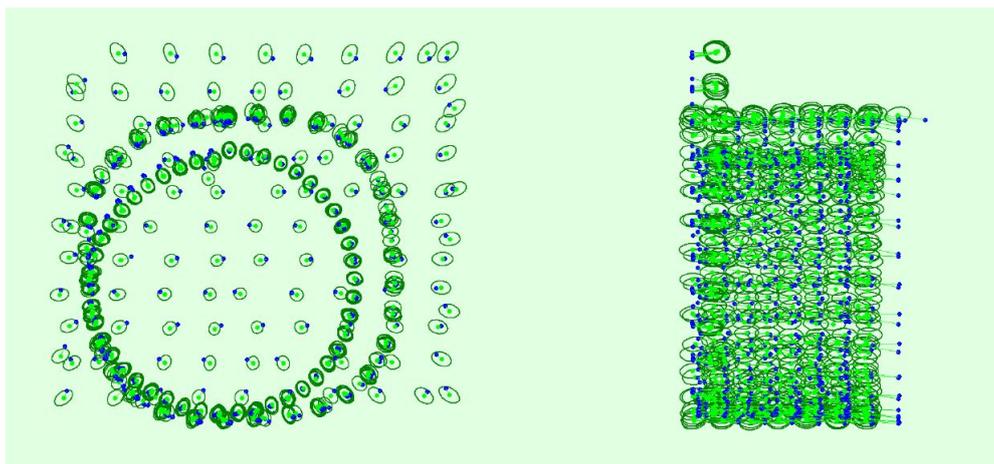


Figura 4.1: Grafico degli offset nel Test 1.

L'offset presente in tutte le immagini, ha un valore non trascurabile ed è dato soprattutto dal fatto che non è stato previsto l'uso di GCP o altri sistemi di correzione della posizione GPS rilevata durante il rilievo. Questo comporta un margine di errore maggiore per la posizione rilevata dal solo sistema di georeferenziazione dell'APR.

	Keypoints per immagine	Match per immagine
Mediana	27154	7641
Min	20081	2213
Max	36582	17826
Media	26567	7741

Tabella 4.3: Keypoint e match calcolati nel Test 1

- **Tabella dei keypoint 2D.** Analizzando la Tabella 4.3 è possibile osservare il numero di key point trovati nelle immagini ed il numero dei match tra key point. Si osserva che il valore minimo dei punti chiave è

di molto superiore al valore minimo accettato, e la media ha un valore soddisfacente. Il numero di match presenta una grande differenza tra il valore massimo e minimo, ma è un fenomeno accettabile considerato l'esistenza delle immagini più periferiche del dataset, che presentano comunque un numero sufficiente di corrispondenze con il resto del modello.

La percentuale di immagini correttamente calibrate, per cui incluse del modello, è 100%. Il valore di accuratezza GDS rilevato nel dataset è di 1.84 cm/pixel . Si riporta infine la rappresentazione grafica nella Figura 4.2, dove è possibile osservare come le immagini, rappresentate nella loro posizione calcolata, sono messe in relazione tra loro tramite un link nero. Come nel grafico precedente, sono riportate le proiezioni XY e YZ della traiettoria di volo. Maggiore un'immagine è ricca di collegamenti, maggiori sono stati i match trovati. È possibile osservare come la parte superiore della struttura è più densa di collegamenti. Questo fenomeno è in tutta probabilità da associare alla complessità della struttura della BTS per la parte superiore, ricca di dettagli con geometrie non regolari. La parte inferiore è invece molto più semplice, a testimonianza di una zona di link meno densa.

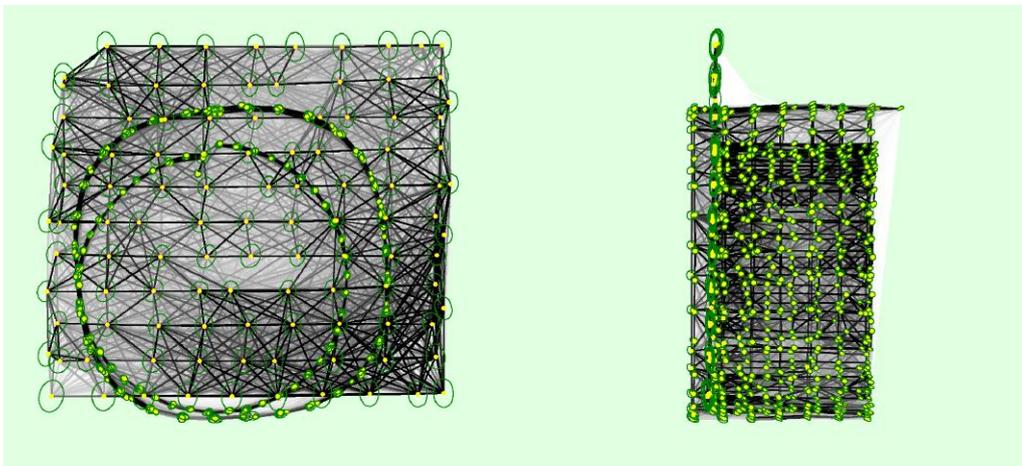


Figura 4.2: Grafico dei match nelle immagini per il Test 1

- **Modello poligonale.** Il modello poligonale, della quale si riporta la parte più di interesse nella Figura 4.3, presenta generalmente un buon risultato. La parte più complicata data dall'asta sulla cima,

è stata individuata correttamente nonostante nelle immagini è facilmente confondibile con il terreno sottostante, e i vari componenti di trasmissione radio sono discretamente distinti. Un buco nella nuvola la si trova nella parte sottostante alla piattaforma superiore, data dalla mancanza di immagini dedicate. La parte inferiore, compreso il terreno circostante, è correttamente ricostruito se non per qualche dettaglio mancante nella scala che risale la struttura.



Figura 4.3: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 1

Test 2 - Elaborazione dataset dimezzato

Task	Tempo
Calcolo keypoint	2 min
Calcolo matching	2 min
Calibrazione	9 min
Point Densification	30 min
TOTALE	43 min
Tempo compilazione report	13 min

Tabella 4.4: Tempistiche di elaborazione per il Test 2.

Le 302 immagini sono state caricate sulla piattaforma cloud e le tempistiche di elaborazione, escluso per cui l'upload, sono riportate nella Tabella 4.4.

Si può notare come il tempo richiesto per il calcolo del primo blocco e dunque per avere in output il Quality Report, è minore rispetto al test precedente. Sia il calcolo dei keypoint, sia quello dei match hanno richiesto meno tempo, essendo tali tempi calcolo direttamente proporzionali al numero di immagini.

- **Offset delle posizioni.**

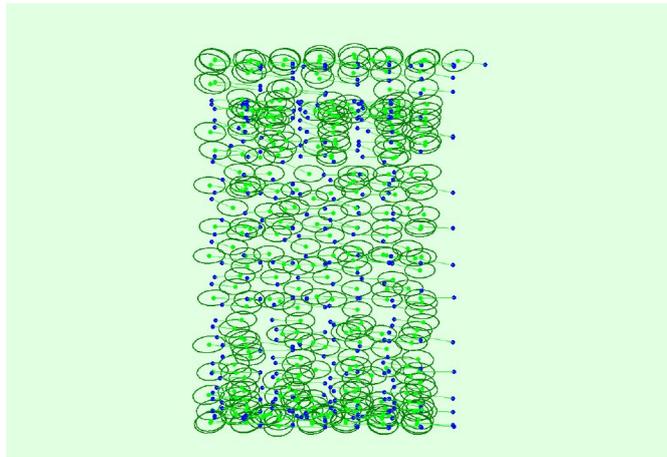


Figura 4.4: Grafico degli offset nel test 2.

Dalla rappresentazione grafica in Figura 4.4 dell'offset tra posizione effettiva e calcolata, è possibile notare una nuvola di posizioni meno densa ma sufficientemente omogenea senza zone scoperte. Il valore di offset e di indecisione sembrano essere del tutto simili al test precedente. Si riporta in questo caso solo la proiezione XY della traiettoria di volo.

- **Tabella dei keypoint 2D.** Come è possibile vedere nella Tabella 4.5, i valori riguardanti il numero di key point trovati sono del tutto simili al test precedente, sorprende invece il numero di match calcolati per ogni immagine. Si ha infatti un incremento consistente di tale valore con una media superiore di quasi il 70%, l'incremento maggiore si ha nel numero minimo di link trovati, che è triplicato. La motivazione può ricercarsi nel fatto che sono state escluse dal dataset originale una serie di immagini di zone periferiche date dal dataset nadirale. Si

riporta che il numero di match è molto maggiore considerando gruppi di 2 e 3 immagini, mentre diminuisce sensibilmente con gruppi di 4 o più fotografie. Questo è dato dal fatto che le distanze tra la posizione delle immagini è maggiore in questo dataset.

	Keypoints per immagine	Match per immagine
Mediana	26983	12126
Min	20081	7422
Max	32183	16274
Media	26309	12038

Tabella 4.5: Keypoint e match calcolati nel Test 2

La percentuale di immagini correttamente calibrate è del 100%, mentre il valore di GSD è di 1.98cm/pixel, valore del tutto simile al test precedente.



Figura 4.5: Grafico dei match nelle immagini per il Test 2

L'aumento dei link trovati si riflette anche nella rappresentazione grafica in Figura 4.5, in cui la quantità di link neri è decisamente molto più densa, in questo caso non c'è molta distinzione tra la parte superiore e la parte inferiore.

- **Modello poligonale.**



Figura 4.6: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 2

Analizzando visivamente il modello risultante, si nota che per la parte inferiore del modello, quella riguardante il terreno e la prima parte della BTS, i risultati ottenuti sono simili al test in cui è stato usato l'intero dataset. Per quanto riguarda invece la parte superiore della struttura, riportata in Figura 4.6, i risultati presentano una diminuzione della qualità del modello, si ha una presenza maggiore di rumore attorno alle componenti radio ed un buco nella mesh di dimensioni maggiori. L'asta rimane comunque sufficientemente rappresentata. Considerando il fatto che nel test è stato usato un dataset più che dimezzato, si hanno dei risultati comunque soddisfacenti, in particolare per la parte inferiore del modello.

Test 3 - Elaborazione di un terzo del dataset originale

Il terzo test consiste nel dare in input il dataset che contiene il 30% delle foto originali. Per l'elaborazione delle 201 immagini i tempi si sono ridotti per quanto riguarda lo step di point densification. Il report è stato reso disponibile dopo 14 minuti, similmente al test precedente, e l'elaborazione si è conclusa in 34 minuti (Vedi Tabella 4.6).

Dunque il vantaggio sulla tempistiche è nullo per la prima parte di elaborazione ed è presente solo per la parte di densificazione della nuvola di punti.

Task	Tempo
Calcolo keypoint	2 min
Calcolo matching	2 min
Calibrazione	10 min
Point Densification	20 min
TOTALE	34 min
Tempo compilazione report	14 min

Tabella 4.6: Tempistiche di elaborazione per il Test 3

- **Offset delle posizioni**

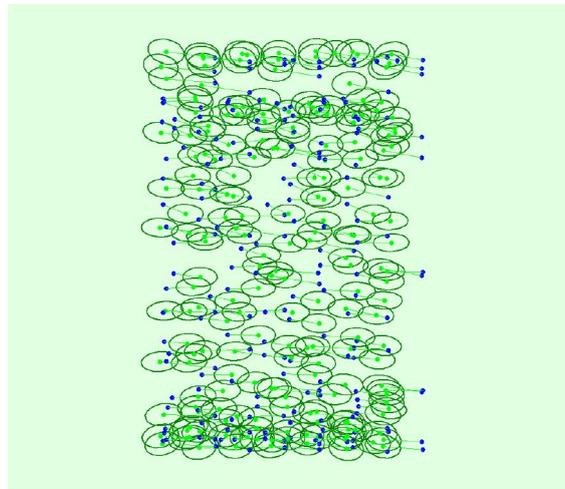


Figura 4.7: Grafico degli offset nel Test 3.

Come preventivato, la nuvola di punti prodotta nella rappresentazione degli offset (Figura 4.7) è meno densa ma generalmente uniforme. I valori di offset e le aree di indecisione delle posizioni calcolate rimangono con valori simili rispetto ai test precedenti. Anche in questo caso tutte le immagini del dataset sono state calibrate e il GSD resta di 2 cm/pixel.

- **Tabella dei keypoint 2D.** Consultando la Tabella 4.7, è possibile notare un livello sempre costante di keypoint trovati ed una diminuzione del numero di match rispetto al test effettuato con mezzo dataset. È interessante osservare come il massimo numero di match rimane costante, dato probabilmente dalle immagini nella zona più dense, ossia quella riguardante la parte superiore del modello.

	Keypoints per immagine	Match per immagine
Mediana	26962	11616
Min	20337	4574
Max	32401	16047
Media	26332	11360

Tabella 4.7: Keypoint e match calcolati nel Test 3

La rappresentazione dei link trovati tra le immagini e riportata nella Figura 4.8 è visivamente meno densa, si ha una concentrazione di match nella parte centrale alta del modello, mentre la parte centrale più bassa e in generale le zone periferiche presentano una densità molto minore rispetto al test precedente.

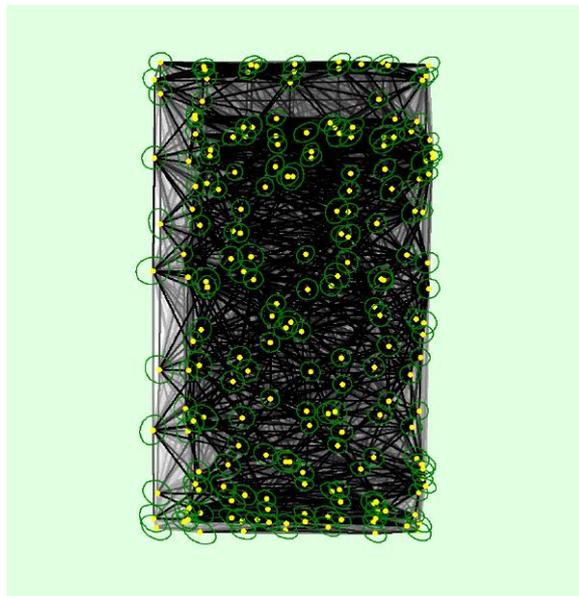


Figura 4.8: Grafico dei match nelle immagini per il Test 3

- **Modello poligonale** Il modello poligonale, di cui si riporta la parte superiore nella Figura 4.9, riporta errori e difetti sempre più marcati. La parte superiore è affetta da molto rumore, dove punti appartenenti al terreno vengono associati alla struttura, i buchi nei modello sono maggiori ma nonostante questo è possibile ancora individuare i componenti principali presenti sulla BTS. Gli elementi secondari, come i supporti metallici più interni e le componenti dimensionalmente più piccole, non sono ben visibili. La parte inferiore, strutturalmente più semplice è visivamente accettabile ma non presenta il livello di dettaglio dei test precedenti.



Figura 4.9: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 3

Test 4 - Elaborazione di un quarto del dataset originale

L'ultima riduzione del dataset originale prevede 151 immagini, selezionate in modo omogeneo nel dataset primario. Data la quantità ridotta di fotografie, i tempi di elaborazione sono di molto inferiori rispetto ai test precedenti. In questo caso si ha una riduzione sensibile in tutti i macro-blocchi di calcolo. In 8 minuti il Quality Report è stato reso disponibile e in 24 minuti è stato elaborato l'output finale. (Vedi Tabella 4.8)

Task	Tempo
Calcolo keypoint	1 min
Calcolo matching	1 min
Calibrazione	6 min
Point Densification	16 min
TOTALE	24 min
Tempo compilazione report	8 min

Tabella 4.8: Tempistiche di elaborazione per il Test 4

- **Offset delle posizioni.**

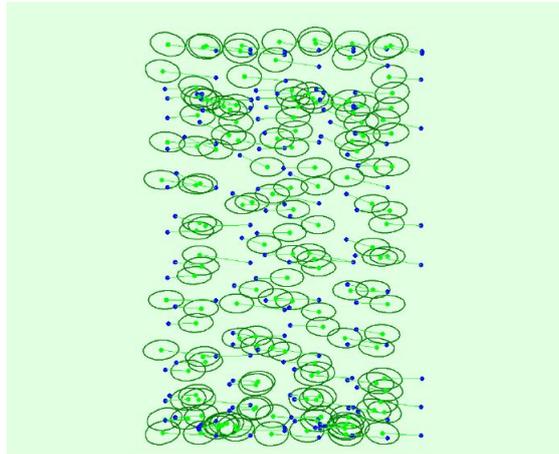


Figura 4.10: Grafico degli offset nel test 4.

Similmente alle considerazioni fatte per il grafico degli offset nei test precedenti, nella Figura 4.10 è possibile notare che l'offset rimane lo stesso non essendo legato alla quantità di immagini fornite, così come il grado di incertezza della posizione calcolata. È possibile verificare che la densità delle immagini è molto limitata. Infatti, le 151 fotografie fornite sono relativamente poche per un soggetto complesso come una BTS.

- **Tabella dei keypoint 2D.** Andando ad analizzare la Tabella 4.9 relativa al numero dei key point trovati, si conferma la costanza di quest'ultimo valore e per quanto concerne il numero dei match si ha una lieve flessione dei match medi trovati. Si può affermare che tali

dati siano rimasti quasi stabili rispetto al test effettuato con un terzo di dataset.

	Keypoints per immagine	Match per immagine
Mediana	26890	10799
Min	20150	4624
Max	32183	15092
Media	26285	10696

Tabella 4.9: Keypoint e match calcolati nel Test 4

Da un controllo visivo dalla rappresentazione dei link trovati tra le varie immagini (Riportata in Figura 4.11), la densità è molto simile al test precedentemente svolto. La zona che soffre maggiormente di una bassa densità è sempre quella periferica, maggiore ricchezza si ha invece nella parte centrale più alta del modello.

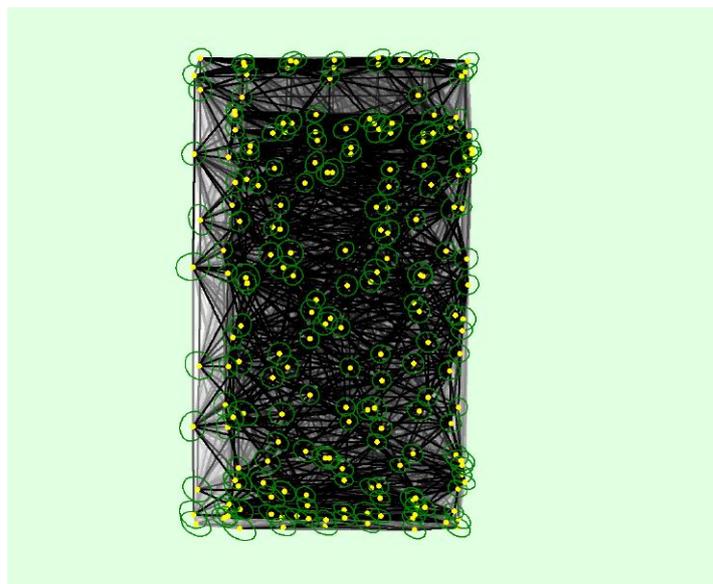


Figura 4.11: Grafico dei match nelle immagini per il Test 4

- **Modello poligonale.**

Dal modello poligonale, di cui è rappresentata la parte superiore nella Figura 4.12, si coglie un livello di errore e di imprecisione non accettabile, anche successivamente ad un eventuale lavoro di post-produzione. L'algoritmo non è più in grado di diversificare correttamente i punti



Figura 4.12: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 4

appartenenti alla BTS da quelli appartenenti al terreno circostante. L'asta superiore si è persa quasi totalmente, mentre gli elementi radio non sono più distinguibili correttamente. La parte inferiore della struttura resta comunque apprezzabile avendo una geometria più semplice e lineare. Nel complesso la ricostruzione è interessante tenendo in considerazione il fatto che sono state usate solo 151 immagini per realizzarla.

Test 5 - Elaborazione del dataset secondario

Il dataset secondario, come già descritto, è stato realizzato tramite un SAPR notevolmente più piccolo e meno pregiato rispetto quello usato nei test eseguiti precedentemente. Le 216 immagini sono state caricate sulla piattaforma cloud ed è stata avviata l'elaborazione. Il sistema, poco dopo, ha restituito un errore di elaborazione riguardante la non possibilità di eseguire la ricostruzione fotogrammetrica. Secondo la documentazione, il problema segnalato poteva riguardare, tra le altre cose, la percentuale di overlapping e la qualità delle immagini. Escludendo la prima opzione, è stato studiato visivamente il dataset in questione e si è notata una variazione non banale della luminosità e del contrasto ad ogni fotografia. Questo è dato dal fatto che la camera era stata impostata in modo che

adattasse i parametri di scatto ad ogni nuova inquadratura. Il che ha reso l'insieme delle fotografie con caratteristiche non omogenee e visivamente molto diverse tra loro.

- **Equalizzazione automatica dell'istogramma.**

Per risolvere il problema sopracitato è stato pensato di sviluppare uno script in linguaggio Python che, per ogni immagine che compone il dataset, equalizzi l'istogramma del contrasto della fotografia. E' stata posta particolare cura per preservare e associare correttamente anche i metadati presenti nelle foto originali, essenziali per rendere il nuovo dataset modificato usufruibile da Pix4D. Il dataset modificato è risultato visivamente più omogeneo.

Il dataset così modificato è stato fatto elaborare all'applicativo e questa volta il dataset è stato accettato correttamente.



Figura 4.13: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 5

È interessante veder come il modello, riportato in Figura 4.13, abbia una ricostruzione delle texture più realistica rispetto ai test descritti precedentemente. Inoltre, è possibile riconoscere come anche alcuni dettagli fini sono stati ricostruiti correttamente, come ad esempio le strutture metalliche nella parte interna della piattaforma. Questo è probabilmente dato dal fatto che tutte le immagini del dataset sono state scattate solamente alla parte superiore della struttura, da diverse angolazioni e altezze. Il

tempo di elaborazione è stato proporzionale al database primario, l'output ha richiesto infatti circa 45 minuti. Il modello di output rappresenta comunque delle forti limitazioni come svariati punti di rumore nella parte soprastante la struttura e buchi nella mesh degli elementi radio.

4.4 Fase di test di DroneDeploy

La piattaforma di Dronedeploy si basa su un workflow concettualmente simile a quello di Pix4D, anche se il processo di elaborazione non è ben dichiarato, al contrario dell'applicativo concorrente.

Come descritto nella Sezione 3.4.3, Dronedeploy prevede una soluzione cloud based ideata per offrire tutte le funzionalità di cui un utente ha bisogno per un rilievo aereo tramite SAPR, dalla pianificazione del volo fino all'elaborazione del risultato finale. La piattaforma, accessibile tramite web, prevede però anche la possibilità di caricare ed elaborare dataset esterni. Il dataset che si vuole analizzare deve rispettare determinati requisiti:

- Le immagini devono essere in formato JPEG.
- Nei metadati delle immagini devono essere presenti riferimenti di latitudine, longitudine e altitudine.
- Deve esserci un overlapping sufficiente, maggiore del 70%.
- Il dataset deve essere composto da almeno 30 immagini.

Nella fase di upload del dataset è possibile personalizzare alcuni parametri riguardanti l'elaborazione stessa, ma è evidente la minor scelta di modifiche e opzioni disponibili che l'utente può scegliere rispetto la piattaforma Pix4D. La principale scelta ricade su due tipologie di mappatura:²

- **Terrain:** processamento pensato per la mappatura di terreni in ambito agricolo o per ispezioni ad un generico sito.
- **Structures:** processamento dedicato alla ricostruzione 3D di una struttura. Per tale elaborazione si richiede la presenza di immagini oblique ed è imposto un limitativo di 1000 immagini.

È possibile inserire eventuali punti GCP per aumentare l'accuratezza del modello, tale opzione è disponibile però solo per abbonamenti Business ed Enterprise. L'ultimo parametro regolabile dall'utente è la possibilità di comprimere le immagini del dataset prima di caricarle sulla piattaforma, tale scelta permette di risparmiare tempo in fase di upload ed di elaborazione al costo di una minore qualità nell'output finale. L'upload può essere fino a 10 volte più veloce ma in tal caso la qualità del modello finale è dimezzata. Una volta impostati i parametri sopracitati, il sistema restituisce un range di tempo previsto per l'elaborazione. La varianza del tempo previsto è data dal fatto che l'elaborazione dipende molto dal dataset fornito e della facilità con cui l'algoritmo usato riesce ad estrapolare le feature dalle immagini³ (Si veda la Sezione [2.2.6](#)).

4.4.1 Quality report

Similmente al servizio concorrente Pix4D, anche DroneDeploy mette a disposizione un report riguardante l'elaborazione effettuata. Il documento non contiene però la ricca quantità di dati che prevede il report dell'applicativo concorrente. Le sezioni presenti sono le seguenti.

- **Map Details Summary** in cui sono riportati dati generali della mappatura tra cui il livello di precisione GDS e l'estensione di terreno mappato.
- **Quality and accuracy Summary** che riporta la quantità di foto correttamente allineate, la bontà di correzione nello step di camera optimization, la velocità media dell'otturatore e informazioni meno interessanti.
- **Preview** dell'ortomosaico e del modello DSM per poter effettuare un veloce check visivo del modello creato.
- **Dettagli sul livello di overlapping** e copertura della zona interessata dove si riporta, tra le varie informazioni, anche la media di immagini che coprono ogni pixel del modello in output ed il valore dell'errore quadratico medio dell'elaborazione dell'algoritmo di estrazione delle feature Structure from Motion (si rimanda alla Sezione [2.2.6](#)).
- **Densification and Meshing** dove si riporta la percentuale di immagini nadirali, oblique e orizzontali e la quantità di punti e triangoli presenti della mesh finale.

Un punto di vantaggio per il report generato da Dronedeploy è quello di essere personalizzabile e dà la possibilità di arricchirlo con i tool disponibili sulla piattaforma (si veda la Sezione 3.4.3). Per i test eseguiti non sarà comunque implementato nessun tool aggiuntivo. Il report, a differenza dell'applicativo concorrente, è reso disponibile solo al termine dell'elaborazione finale, notificata tramite email. Un'ulteriore differenza con Pix4D è la mancanza di un file di log riguardante l'elaborazione effettuata, documento molto utile in fase di analisi. Non è stato infatti possibile estrarre precise informazioni riguardanti le tempistiche di elaborazione ed altri dettagli.

4.4.2 DroneDeploy test

Test 1 - Elaborazione intero dataset

Similmente a quanto è stato eseguito per il primo test di Pix4D (Sezione 4.3.4), anche per Dronedeploy la prima prova ha previsto di usare come input l'intero dataset primario e il dataset di immagini nadirali, per avere la copertura più completa possibile di punti di vista e orientamenti della camera. Una volta caricate le 707 foto del dataset, è stato chiesto all'applicativo di elaborare le immagini con l'opzione Structures, senza l'uso di punti GCP e senza prevedere alcuni tipo di compressione per le immagini in upload, per avere così la massima qualità possibile di output. Nella Tabella 4.10 si riassumono i principali dati estratti dal Report, ottenuto ad elaborazione conclusa.

Dai dati raccolti è possibile osservare che i tempi di elaborazione richiesti per avere in output il modello finale sono stati sensibilmente più alti rispetto allo stesso test elaborato con l'applicativo concorrente, non avendo dati più specifici è impossibile però valutare quali tra i vari step di elaborazione ha richiesto tempistiche più lunghe. Una seconda osservazione riguarda il valore di precisione GDS che risulta inferiore circa del 22% rispetto quello calcolato dal concorrente, dunque la mappatura presenta un livello di dettaglio teoricamente maggiore. Per gli altri dati presentati risulta difficile una comparazione con i test svolti su Pix4D, ma aiutano a dare un'idea di come il processamento delle immagini sia stato svolto. In particolare, sorprende l'alta densità media di immagini per ogni pixel del modello, data sicuramente dal fatto che il volo è stato di tipo circolare

Parametro	Misura
Tempo di elaborazione	3 ore 10 min
Valore GSD	1,45 cm/pixel
Immagini allineate	100%
Densità media di immagini per pixel	229 image/pixel
Structure from Motion	
RMSE per asse	X=45,42cm Y=60,69cm Z=365,46cm
RMSE medio	215,49 cm
Orientamento immagini	
Nardirali	15%
Oblique	0%
Orizzontali	85%
Cloud Density	73.83 pixel/ft ²

Tabella 4.10: Statistiche di elaborazione per il Test 1

facendo più giri attorno alla struttura. Il valore del errore quadratico medio sembra in una prima analisi abbastanza elevato, ma non avendo dati in confronto non è possibile fare paragoni con i test del primo applicativo. Un dato negativo riguarda la percentuale di orientamento delle immagini in cui risulta che le fotografie del dataset primario sono state classificate come orizzontali invece che oblique. Le immagini orizzontali presentano un orientamento della camera parallelo al terreno ed una certa percentuale di cielo presente nell'immagine, cosa che è bene evitare in rilievi di questo tipo. Il dataset in questione non riporta nessuna di queste caratteristiche, dunque c'è stata un'errata interpretazione da parte dell'algoritmo. Questo fatto può facilmente portare ad una ricostruzione errata del modello.

Il modello

Il modello generato, di cui si riporta una sezione in Figura 4.14, presenta delle limitazioni ed un grado di errore visivamente maggiore rispetto al modello generato con lo stesso dataset dell'applicativo di Pix4D. In particolare, la zona più interessata agli errori è la parte superiore della struttura BTS. Nonostante il ricco dataset fornito, è presente del rumore in cui parte del terreno è stato associato alle componenti radio, sono inoltre presenti buchi nella nuvola in cui mancano alcune componenti della

struttura. Si presume che tali errori siano relazionati all'errata classificazione delle immagini, di cui l'80% è stata etichettata come orizzontale.



Figura 4.14: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 1

La parte inferiore presenta invece un risultato migliore, in cui gli errori visibili sono minori e il grado di dettaglio è apprezzabile. Probabilmente un buon lavoro in post produzione potrebbe migliorare il modello ma tale procedura esulta dai test previsti. Un altro modo per aumentare il grado di accuratezza potrebbe essere quello di realizzare il volo secondo la pianificazione automatica che DroneDeploy offre. Essendo tale sistema integrato con lo step di elaborazione, è probabile che un volo fatto ad hoc dallo stesso applicativo aiuti ad avere un modello finale migliore.

Test 2 – Elaborazione di metà dataset

Per il secondo test è stato fornito in input il dataset dimezzato, che comprende 302 immagini oblique. Come è possibile osservare dai valori riportati nella Tabella 4.11, il valore di precisione GDS è aumentato di molto poco, circa del 7%, il che è interessante se relazionato al fatto che il dataset fornito è composto da meno della metà delle immagini del dataset fornito al Test 1. Come atteso, la densità media di immagini riferite ad un

singolo pixel si è dimezzata, mentre nei valori riguardanti l'errore quadratico medio è singolare il fatto che sia diminuito sul piano XY e aumentato sul terzo asse. L'unica spiegazione è l'assenza delle foto nadirali che, nel test precedente, hanno aumentato l'area di interesse mappata aumentando l'errore medio dato dalle parti più periferiche e meno coperte dalla mappatura. Come è possibile notare, anche in questo caso le immagini son state classificate come orizzontali, nonostante siano oblique. Infine la densità media della nuvola è calata del 30% circa, come prevedibile dato il calo di immagini in input.

Parametro	Misura
Tempo di elaborazione	2 ore 20 min
Valore GSD	1,55 cm/pixel
Immagini allineate	100%
Densità media di immagini per pixel	103 image/pixel
Structure from Motion	
RMSE per asse	X=32,30cm Y=61,57cm Z=375,20cm
RMSE medio	220,37 cm
Orientamento immagini	
Nadirali	0%
Oblique	0%
Orizzontali	100%
Cloud Density	55,31 pixel/ft ²

Tabella 4.11: Statistiche di elaborazione per il Test 2

Modello poligonale

Come è facile osservare nella Figura 4.15, la ricostruzione della piattaforma superiore della BTS è praticamente nulla, ossia pochissimi punti della nuvola sono stati calcolati per quella porzione di struttura. Un modello di questo tipo risulta inutilizzabile a differenza del modello dato dal Test 2 di Pix4D. Come detto in precedenza la struttura di stazione radio base è complessa rispetto a più comuni strutture oggetto di fotogrammetria come edifici o ciminiere, dunque resta la possibilità di ottenere migliori risultati in ambiti differenti. A testimonianza di ciò, la parte inferiore risulta ancora accettabile come ricostruzione, presentando degli errori e buchi nella nuvola ancora tollerabili.



Figura 4.15: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 2

Test 3 – elaborazione con un terzo del dataset originale

Il terzo test, che prevede un dataset di 201 immagini, ha richiesto circa 1 ora e 20 minuti per essere elaborato, dunque anche in questo caso le tempistiche sono più onerose rispetto allo stesso test svolto con l'applicativo concorrente. I dati che riguardano tale test, riportati nella Tabella 4.12, sono simili a quelli ottenuti nel Test 2. La densità di immagini che mediamente si riferiscono ad un singolo pixel è diminuita in modo proporzionale alla diminuzione del dataset, mentre l'errore quadratico medio calcolato nell'algoritmo di Structure from Motion è rimasto quasi invariato, la variazione maggiore si ha, anche in questo caso, sull'asse Z. Tale asse è infatti quello più difficile da elaborare come dimostrano anche i dati riportati nel capitolo precedente, in cui l'accuratezza dell'asse Z è sempre minore rispetto quella sul piano XY.

Parametro	Misura
Tempo di elaborazione	1 ore 20 min
Valore GSD	1,57 cm/pixel
Immagini allineate	100%
Densità media di immagini per pixel	73 image/pixel
Structure from Motion	
RMSE per asse	X=32,00cm Y=61,77cm Z=374,20cm
RMSE medio	220,97 cm
Orientamento immagini	
Nadirali	0%
Oblique	0%
Orizzontali	100%
Cloud Density	50,81 pixel/ft ²

Tabella 4.12: Statistiche di elaborazione per il Test 3



Figura 4.16: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 3

Modello poligonale

Viene riportato in Figura 4.16 il modello poligonale risultante dall'elaborazione del terzo dataset. Di rilievo è la mancanza completa nella parte superiore della struttura della BTS, l'applicativo non è stato in grado di rilevare nemmeno un punto appartenente a tale parte o, più probabilmente, i pochi punti rilevati sono stati classificati come rumore e dunque ignorati.

La densità della nuvola di punti è in generale minore rispetto i test precedenti, questo è visibile anche per la parte inferiore riguardante il terreno. Si rimanda al test corrispondente eseguito con l'applicativo Pix4D dove, a differenza di questo caso, la parte superiore della stazione radio base è stata identificata in maniera discreta.

Test 4 - Elaborazione di un quarto del dataset

Nell'ultimo test che prende in riferimento il dataset principale, il tempo di elaborazione è sceso fino a poco più di un'ora, valore maggiore rispetto al test corrispondente dell'applicativo concorrente (Vedi Tabella 4.13).

Il valore GDS è diminuito lievemente in linea con l'andamento rilevato nei test precedenti ed il valore dell'errore dello Structure from Motion è rimasto quasi invariato rispetto al Test 3. La densità della nuvola è di circa il 40% minore rispetto al Test 1, rimane comunque un valore interessante considerando che le immagini in input sono circa 1/7 rispetto a tale test. Persiste l'errore di classificazione di orientamento delle immagini, elemento che sicuramente influisce sul risultato finale.

Parametro	Misura
Tempo di elaborazione	40 min
Valore GSD	1,52 cm/pixel
Immagini allineate	100%
Densità media di immagini per pixel	53 image/pixel
Structure from Motion	
RMSE per asse	X=31,70cm Y=61,57cm Z=373,98cm
RMSE medio	219,47 cm
Orientamento immagini	
Nardirali	0%
Oblique	0%
Orizzontali	100%
Cloud Density	40,70 pixel/ft ²

Tabella 4.13: Statistiche di elaborazione per il Test 4

Modello poligonale

La parte inferiore della BTS è ulteriormente degradata, resta di qualità accettabile la parte sottostante in cui le forme geometriche sono più semplici. Le texture restano accurate in modo sufficiente. Anche in questo caso il corrispondente test in Pix4D ha dato risultati nettamente migliori (Figura 4.17).



Figura 4.17: Sezione della nuvola di punti generata dal Test 4

Test 5 – Elaborazione dataset secondario

Per questo test finale è stato fornito in input il dataset secondario con già applicate le trasformazioni descritte nella Sezione 4.3.4, ossia per ogni immagine è stato equalizzato l'istogramma, andando a migliorare ed uniformare il contrasto ed in generale la resa visiva. Dopo la fase di upload del dataset, un errore notificato tramite e-mail ha informato della impossibilità di elaborare le immagini fornite, indicando che la causa era da ricercarsi nella qualità del dataset, nella percentuale di overlap o nell'angolazione con cui le immagini sono state scattate. Da tale test si può confermare che la robustezza dell'algoritmo usato è minore rispetto a quello che

ha dimostrato l'applicativo di Pix4D, che infatti è riuscito ad elaborare correttamente anche il dataset secondario.

Capitolo 5

Automazione dello step di elaborazione

Lo step finale che la presente tesi si propone di approfondire, è lo studio di fattibilità e la sperimentazione riguardante l'automazione del task di elaborazione. Come visto in precedenza le tempistiche che intercorrono tra il task di cattura e quello di elaborazione rappresentano un limite importante se si valuta macroscopicamente il tempo richiesto dall'intero workflow di lavoro di un SAPR. Per ridurre il più possibile tali tempistiche sono stati individuati due punti cardine sulla quale agire:

- L'invio dei dati in real time dall'aeromobile alla piattaforma di elaborazione, senza la necessità di scaricare tali dati in una fase successiva al volo.
- Automazione del settaggio e avvio dell'elaborazione all'arrivo del dataset in real time.

D'accordo con l'azienda, il primo punto non verrà approfondito nella presente tesi e si parte dunque dal presupposto che il drone usato, collegato in tecnologia 5G, invii le immagini in real time ad un certo elaboratore, a mano a mano che queste vengono catturate. La sperimentazione effettuata presuppone dunque l'arrivo di un flusso di immagini che vengono organizzate in una directory dedicata.

5.1 I tool disponibili

Come descritto nei precedenti capitoli, alcuni dei software analizzati offrono tool dedicati all'integrazione dei servizi di elaborazione all'interno di applicativi esterni. Alla luce dei risultati ottenuti nella fase di testing si è optato per approfondire e testare i tool offerti da Pix4D, sfruttandoli per creare un sistema di elaborazione automatizzato. Pix4D offre la possibilità di utilizzo di una SDK proprietaria che comprende librerie e documentazioni relative. Grazie a questo develop kit è possibile creare un algoritmo di elaborazione personalizzato, avendo a disposizione le singole funzioni che compongono il flusso di elaborazione. L'SDK è messa a disposizione tramite l'applicativo Pix4D Engine¹, tramite il quale è possibile installare le librerie che comprendono le funzioni sopra nominate.

5.2 Sviluppo del prototipo

Il prototipo del sistema di elaborazione automatizzato che è stato sviluppato è composto da 4 differenti script scritti in linguaggio Python, ed il loro funzionamento è così schematizzabile:

- **Simulator:** tale script simula l'arrivo di un flusso di immagini in una data cartella. Dato un dataset di fotografie, lo script crea una copia di queste nella cartella di interesse denominata "watched", tale copia avviene un'immagine per volta con un intervallo di tempo random da 1 a 5 secondi tra una e l'altra. La simulazione è così verosimile all'arrivo in real time di immagini provenienti da un flusso creato da un SAPR.
- **Watcher:** lo script si mette in ascolto sulla cartella prescelta "watched" per individuare quando il flusso di immagini inizia e quando questo termina. Nel dettaglio, quando avviene una modifica all'interno della cartella ed in particolare quando la prima immagine è stata aggiunta, un timer viene avviato. All'arrivo di ogni successiva immagine tale timer viene azzerato. Se il suo valore supera i 30 secondi, si presuppone che il flusso di dati provenienti dal drone sia terminato e lo script "Equalizator" viene invocato.
- **Equalizator:** presupponendo l'utilizzo di un drone non professionale con una fotocamera che non offre prestazioni ottimali, è stato paragonato il dataset interessato al dataset secondario descritto nel capitolo

precedente. Alla luce delle sperimentazioni fatte, lo script Equalizator prevede l’equalizzazione dell’istogramma di contrasto delle immagini in arrivo, con l’obiettivo di rendere il dataset omogeneo a livello visivo, facilitando così il task di ricerca delle feature. Terminato tale task, lo script “Computing” viene avviato.

- **Computing:** lo script si occupa della vera e propria elaborazione del dataset creato negli step precedenti. Le funzioni usate sono quelle previste nelle librerie messe a disposizione da Pix4D. Sono presenti un gran numero di funzioni disponibili, ognuna permette di curare un preciso aspetto del workflow di elaborazione. Tale workflow è organizzato in una pipeline alla quale vengono assegnati i vari step con precisi parametri che l’algoritmo eseguirà in successione. Viene di seguito illustrato il processo logico sviluppato per la fase di testing, per i dettagli delle funzioni usate e delle funzionalità disponibili si rimanda alla documentazione fornita da Pix4D.²

5.2.1 Logica del processo di elaborazione

Lo script “Computing” sviluppato si pone 5 principali obiettivi, raggiunti tramite le funzioni specifiche previste nella SDK di Pix4D Engine.

1. **Login e creazione del progetto.** Per avviare il processo di elaborazione, Pix4D richiede l’accesso alla piattaforma tramite username e password per avere così l’autorizzazione a poter usare il sistema Pix4D Engine. Successivamente viene creata una nuova cartella dedicata e al suo interno un nuovo progetto viene creato. In tale step viene indicato anche il path necessario a raggiungere il dataset di immagini da elaborare.
2. **Creazione della pipeline di elaborazione.** Per il presente test sono stati richiesti all’applicativo tre differenti step di lavoro:
 - Calibrazione delle immagini
 - Densificazione della nuvola di punti
 - Creazione del modello 3D

Alla pipeline creata è stato associato un template di configurazione ideale per l’elaborazione di un modello 3D sviluppato in altezza. Sono state create poi delle callback associate ai tre step, tramite i quali

all'avvio e al termine di ognuno di ogni compito il sistema avvisa l'utente con una notifica.

3. **Quality check.** Per evitare che il processo di elaborazione venga avviato con un dataset qualitativamente insufficiente, è stato associato un “Validator” allo step di calibrazione delle immagini. Se tale step non raggiunge un output di qualità sufficiente, la pipeline viene fermata e tale evento viene notificato all'utente.
4. **Pulizia della nuvola di punti.** La nuvola di punti creata nel relativo step viene elaborata da un sistema di filtraggio nella quale gli outliner vengono eliminati. Tale processo si basa su un'analisi statistica dei punti vicini; in base alla classificazione dei vicini viene etichettato il punto come outliner o meno. Il processo di pulizia da rumore assicura una creazione della mesh 3D qualitativamente migliore.
5. **Quality report.** Al termine dell'elaborazione un report relativo ai processi avvenuti viene stampato a schermo tramite una finestra di web browsing.

5.3 Valutazione prototipo

Il sistema di script creato si propone come prototipo di automazione dello step di elaborazione. Questo prototipo, unito all'automazione del volo fornita da alcuni degli applicativi studiati e al nuovo sistema di connessione di SAPR tramite la rete 5G di TIM, costituiscono un flusso di lavoro innovativo ed efficiente. Con una giusta configurazione del intero sistema, è possibile ottenere un workflow di rilievo e ricostruzione 3D come mai svolto prima, riducendo ai minimi termini il tempo impiegato e l'intervento manuale umano.

Capitolo 6

Conclusione e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni

Alla luce di quanto descritto nel Capitolo 1, in cui sono state illustrate le attuali applicazioni dei sistemi APR nel mondo professionale, e tenendo in considerazione il workflow che l'applicativo richiede, come descritto in modo dettagliato nel Capitolo 2, la presente tesi si è focalizzata sullo step di elaborazione del dato catturato dal drone, venendo incontro alle richieste di TIM. L'azienda è già da tempo interessata alle sperimentazioni di nuove tecnologie applicate ai SAPR e tale tesi ha risposto alla necessità di definire le potenzialità che i moderni applicativi di elaborazione dati offrono ai vari settori lavorativi.

In particolare, nella prima parte di ricerca è stato presentato lo stato dell'arte per quanto concerne le diverse tipologie di processamento di dati, come gli applicativi individuati elaborano i diversi tipi di dato che sovente vengono raccolti tramite SAPR, e quali siano gli output tipicamente richiesti e ottenibili tramite tali soluzioni. È stato constatato che le macro-aree di maggior interesse comprendono:

- *Rilievi fotogrammetrici* applicabili al campo edile e architettonico, al campo delle industrie minerarie e al mondo dell'archeologia e beni culturali.
- *Rilievi con camere multispettrali*, di interesse per l'industria agricola nell'ottica dell'agricoltura di precisione.

- *Rilievi con termocamere* utili sia nel campo dell'energetico ma anche in quello edile e del primo soccorso.
- *Rilievi con sistemi LIDAR*, richiesti nelle ricostruzioni 3D ad alta definizione nell'ambito delle grandi infrastrutture o mappature di terreni.

Nella seconda parte di ricerca si è verificato e testato come i migliori applicativi individuati (Pix4D e Dronedeploy) rispondessero a cinque diversi dataset di immagini catturate tramite SAPR, i quali differivano per qualità e dimensione. I test eseguiti sono stati essenziali per capire da una parte la robustezza, la precisione, la scalabilità e la dinamicità degli applicativi testati, dall'altra ha messo in evidenza i requisiti minimi richiesti ad un dataset per poter essere elaborato correttamente dai software in questione. Nel dettaglio, è emerso in molti dei test eseguiti che i migliori risultati sono stati raggiunti con Pix4D, il quale, ha dimostrato una maggior robustezza negli algoritmi usati al suo interno, una capacità maggiore di adattarsi alle esigenze dell'utente ed una maggiore trasparenza sui dettagli dell'elaborazione eseguita. Dall'altra parte Dronedeploy ha dimostrato una maggior facilità d'uso con un'esperienza utente più guidata ed un servizio ben integrato con le funzionalità di pianificazione del volo e gestione dei dati raccolti.

Un'analisi più generale dei test e delle ricerche eseguite permette di confrontare i risultati ottenibili da un approccio classico "da manuale" rispetto ad un approccio più semplificato, con un drone meno performante e con un volo meno impegnativo. A tal proposito è possibile affermare che per un lavoro fotogrammetrico per rilievi a strutture complesse in cui è richiesta particolare precisione e accuratezza nell'output finale, si necessita di una cattura dati svolta come da manuale, includendo nel dataset immagini oblique e nadirali catturate in modo omogeneo da tutte le angolazioni, con particolare attenzione al valore di overlapping tra immagini adiacenti. Per svolgere questo tipo di task sono disponibili diversi applicativi che permettono una corretta pianificazione del volo e un certo grado di automatismo durante il volo stesso. L'uso di punti a coordinate note GCP risulta importante per raggiungere i massimi livelli di accuratezza, questo però richiede uno step di lavoro ed una strumentazione aggiuntiva nel workflow di lavoro. In alternativa o in aggiunta, la tecnologia di correzione GPS RTK viene incontro a tale esigenza senza però il bisogno di implementare fisicamente punti di controllo a terra. In un approccio meno rigoroso invece, in cui il sistema APR è meno performante, dove non è

previsto l'uso di punti GCP ed il dataset di immagini scattate non è ottimale, i risultati raggiungibili sono qualitativamente minori. L'adattabilità di tale approccio dipende principalmente da due aspetti:

- **L'obiettivo finale del rilievo:** nel caso in cui la necessità del task consta in una mappatura per ispezioni visive o per avere un modello 3D che descriva il soggetto o il terreno in modo generale, l'approccio semplificato può trovare spazio applicativo. E' possibile inoltre processare immagini che non prevedono informazioni di geolocalizzazione, ma in tal caso il modello finale non sarà correttamente orientato. Al contrario, per task in cui è necessario avere un modello 3D sul quale effettuare misure di precisione o controlli visivi di dettagli, tale approccio potrebbe non essere adeguato.
- **L'oggetto del rilievo:** l'approccio semplificato può adattarsi bene in rilievi a strutture non complesse come semplici edifici, terreni agricoli o simili, mentre per strutture più articolate, come il caso della stazione radio base usato nei test, si necessita di un approccio più strutturato.

Un ulteriore aspetto messo in risalto dai test eseguiti nella presente ricerca, è la necessità di avere un dataset di immagini che presentano determinate caratteristiche qualitative, come un livello di contrasto ed esposizione costanti, una dimensione di immagini sufficiente, stabilità e dettagli ben contrastati senza effetti di sfocatura o di mosso. La post-produzione delle immagini prima dell'elaborazione non è solitamente prevista nel workflow classico, ma si è invece rilevata utile durante alcuni dei test svolti, dove l'applicazione di script scritti ad hoc hanno permesso al dataset di migliorare gli aspetti visivi sopra citati. Gli aspetti importanti sono quelli di non apportare modifiche che vadano a falsare o diminuire la qualità fotografica e quella di riuscire a mantenere tutti i metadati che le immagini originali hanno al loro interno.

Nell'ultima parte della presente tesi, è stato studiato come creare un sistema automatizzato nella quale un drone, connesso nella rete 5G di TIM, invia in real time un flusso di immagini durante una generica mappatura di un terreno e queste vengono automaticamente processate per avere in output il modello 3D nel minor tempo possibile. I risultati mostrano come tale sistema può essere implementato, realizzando un prototipo basato sulla SDK messa a disposizione da Pix4D. Tale approccio apre una strada promettente nell'ottica di automazione, portando ad una mappatura 3D tramite SAPR sempre più ottimizzata .

Bibliografia

- [1] J. Karpowicz “Exploring Commercial Drone Opportunities and Regulation Across Europe.” Commercial UAV Expo 2017,[Online]. Available: <https://expouav-static.s3.amazonaws.com/uploads/2016/12/Free-Report-7-Commercial-Drone-Predictions-for-2017.pdf>
- [2] V. Sharma “Advances in Drone Communications, State-of-the-Art and Architectures” Commercial UAV Expo 2017,[Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/21>
- [3] C. Deng, S. Wang, Z. Huang , Z. Tan and J. Liu, “ Unmanned Aerial Vehicles for Power Line Inspection: A Cooperative Way in Platforms and Communications” (2014) [Online]. Available: https://pdfs.semanticscholar.org/7e68/5fb533e9df95a7ebf51a45b8b6e0df28be04.pdf?_ga=2.189473903.512563867.1584202987-1802980230.1584202987
- [4] Gruppo Telecom Italia, “Speciale: 5G Digital Business Platform” Notiziario tecnico, Ed 1-2019. [Online]. Available: <https://www.telecomitalia.com/content/dam/telecomitalia/it/archivio/documenti/Innovazione/MnisitoNotiziario/2019/1-2019/anno28-n1-2019.pdf>
- [5] A. Rigamonti, ”Batterie Li-Poly, Queste sconosciute” [Online]. Available: https://riganet.it/documents/lipo_rev2.pdf
- [6] B. Li, Z. Fei, S. Member, and Y. Zhang, Senio IEEE Member “UAV Communications for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Trends” 2018/12/01[Online]. Available: <https://folk.uio.no/yanzhang/IEEEIoTUAV2018.pdf>
- [7] ENAC “Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto” Ed.3 - Novembre 2019 [Online]. Available: https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2019-Nov/Regolamento_Mezzi_Aerei_a_Pilotaggio_Remoto_Ed_3_11112019.pdf

- [8] A. Calcante, A. Mena “Strumenti informativi per la viticoltura di precisione (seconda parte)”, maggio 2019. [Online]. Available: http://www.intersezioni.eu/public/art_177/15%20Innovazione%20Calcante.pdf
- [9] J. Karpowicz, “Building the Bridge Between the Telecommunication Industry and Drones in Europe,” *Commercial UAV*, aprile 2019, [Online]. Available: <https://www.commercialuavnews.com/energy/building-bridge-telecommunication-industry-drones-europe%20>
- [10] M. Vio, P. Romagnoni, F. Peron “LO SCAMBIO TERMICO PER IRRAGGIAMENTO,” Università Iuav di Venezia [Online]. Available: http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/cla-03-04-/13_cap.pdf
- [11] S. Antognelli, “IINDICI DI VEGETAZIONE NDVI E NDMI: ISTRUZIONI PER L’USO,” Agriculus (2019) [Online]. Available: <https://www.agriculus.com/indici-vegetazione-ndvi-ndmi-istruzioni-luso/>
- [12] C. Dell’Alba, ‘Sensori d’immagine CCD e CMOS” università degli studi di Padova (2012) [Online]. Available: http://tesi.cab.unipd.it/40910/1/Sensori_d'immagine_CCD_e_CMOS.pdf
- [13] D. Poli, I. Toschi, K. Moe, F. Lago, F. Remondino, K. Legat, C. Schreiner, “Fotogrammetria con immagini aeree oblique sviluppi e prodotti innovativi” ASITA 2016 [Online]. Available: http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/poli_etal_asita2016.pdf
- [14] Linda G. Shapiro, George C. Stockman , “Computer Vision” Prentice Hall, 2001, ISBN 978-0-13-030796-5 [Online]. Available: http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/poli_etal_asita2016.pdf
- [15] S. Ullman, “The Interpretation of Structure from Motion” M.I.T. (1976)[Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/6298/AIM-476.pdf;jsessionid=5499B4DEE045545D833CC51C84DFED28?sequence=2>

Capitolo 7

Notes

Capitolo 1

1. IDC Spending Guide 2019:

<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45584919>

2. Multiopticdrone, "Fotogrammetria con drone":

<https://www.multiopticdrone.com/fotogrammetria-drone/>

3. Pasquale Falzarano "Agricoltura di Precisione, pubblicate le Linee guida nazionali": <https://agrireregionieuropa.univpm.it/en/node/10065>

4. Croce Rossa Italiana, "Progetto SAPR": <https://www.cri.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/25452>

5. United States Patent and Trademark Office: [shorturl.at/dlAW4](https://www.uspto.gov/patents/shorturl-at/dlAW4)

6. DelAir: <https://delair.aero/portfolio/security-and-defense/>

7. DJI News, "AT&T Signal it will use drones for tower inspections" (2016): <https://enterprise.dji.com/news/detail/at-t-signals-it-will-use-drones-for-tower-inspections>

8. How telecom operators can benefit from drones, Nathan Cranford (2018): <https://www.rcrwireless.com/20180309/how-telecom-operators-can-benefit-from-drones-tag27-tag99>

9. TorinoToday "Tim Drone ready la rete copertura radiomobile al massimo della operatività": <http://www.torinotoday.it/economia/tim-drone-ready.html>

10. Thales, Vodafone join Cranfield University's 4G/5G drone tracking test programme (2019) : <https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/thales-vodafone-join-cranfield-universitys-4g-5g-drone-tracking-test-programme/>

11. TIM, a Torino la prima rete live 5G Edge Cloud d'Europa con droni connessi, Antonio Monaco (2019):<https://www.hdblog.it/droni/articoli/n512384/tim-torinoprima-rete-live-5g-edge-cloud/>

Capitolo 2

1. Repubblica, "Avviati a Genova i test per l'utilizzo del 5G nel controllo del territorio", Marco Frojo (Ottobre 2019):

<http://bit.ly/3cZp0Cd>

2. BENConsulting, "Studio di fattibilità":<https://www.b-e-net.it/servizi/sviluppo-impresa/studi-di-fattibilita/>

3. Support Pix4D, "Ground sampling distance (GSD)":

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD>

4. DJI, "Lightbridge 2": <https://www.dji.com/it/lightbridge-2/>

5. FLIR, "Manuale di termografia ad infrarossi": http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_IT.pdf

6. Università Iuav, A. Carbonari: http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/cla-03-04-/13_cap.pdf

7. APRFlyTech, "Termografia, campi di applicazione" (2018): <http://www.aprflytech.it/termografia-con-drone/>

8. Università degli studi di Firenze, "Topografia, misura delle distanze": <http://www.geomaticaeconservazione.it/documenti/documenti/topografia/Distanze.pdf>

9. "Il rilievo LIDAR" Perini L., Luciani P., Lorito S., Calabrese L (2011): <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/il-rilievo-lidar>

10. Il Fatto Storico, "Il LiDAR sta rivoluzionando l'archeologia"(2012): <https://ilfattostorico.com/2012/07/27/il-lidar-sta-rivoluzionando-larcheologia/>

11. Archeodigital, "Aerofotogrammetria con drone e Agisoft Photoscan. Introduzione" (2018):

<https://www.archeodigital.it/blog/how-to-aerofotogrammetria-con-drone-photoscan-introduzione/>

Capitolo 3

1. Sensefly website - eMotion Solution: <https://www.sensefly.com/software/emotion/>
2. Analist Group website - Analist 2020 CLOUD: <https://www.analistgroup.com/it/prodotti/topografia-e-catasto/analist>
3. Open Drone Map website: <https://www.opendronemap.org/>
4. Capture Reality website: <https://www.capturingreality.com/>
5. Autodesk website - Recap: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>
6. Agisoft website - Metashape: <https://www.agisoft.com/>
7. DJI website - DJI Terra <https://www.dji.com/it/dji-terra>
8. Delair website - Delair.Ai overview <https://delair.aero/delair-ai-visual-intelligence-for-enterprise-asset-management/>
9. Dronedeply website <https://www.dronedeploy.com/>
10. Pix4D website <https://www.pix4d.com/>
11. Precision Capture - DJI Terra: Make the world your digital asset (2019)<https://precisioncapture.com/dji-terra-make-the-world-your-digital-asset/>
12. Paladrone - "DJI Terra - test e analisi": <https://youtu.be/caQmI6mVExo>
13. Rich Charpentier - "DJI Terra-A New Software For The Discontinued Phantom 4 Pro Drone?"<https://www.youtube.com/watch?v=9cKy1rfdugk>
14. Archeodigital - "DJI Phantom 4 Pro Fuori Produzione":<https://www.archeodigital.it/blog/dji-phantom4pro-fuori-produzione/>
15. Dealair website - "What is delair.ai?"<https://support.delair.aero/support/solutions/articles/24000041126-what-is-delair-ai->
16. Wingtra SAPR - "Delair.Ai": <https://wingtra.com/best-photogrammetry-software/delair-ai/>
17. Delair websti - "Are drone surveys accurate enough?": <https://delair.aero/mines-aggregates/are-drone-surveys-accurate-enough-for-stockpile-inventories-in-mining-aggregates-and-construction/>
18. Delair.ai SDK Documentation: https://welcome.delair.ai/wp-content/uploads/sdk_documentation/
19. DJI newsroom - "DJI And Delair Partner To Enhance Visual Data Collection, Management & Analysis For Enterprises" (2019):<https://www.dji.com/ee/newsroom/news/dji-and-delair-partner-to-enhance-visual-data-collection-management-analysis-for-enterprises>

20. Inside Unmanned Systems "Delair Launches Cloud-Based Software Platform" (2019):<https://insideunmannedsystems.com/delair-launches-cloud-based-software-platform-delair-aerial-intelligence/>
21. David Alamillo - "Why to use Delair ai O&G BIM IoT Integration":
https://www.youtube.com/watch?v=_zssxArR9Rs
22. Dronedeploy website - "Drone Data, Amplified":
<https://www.dronedeploy.com/product/market/>
23. Dronedeploy website - "Live Map": <https://www.dronedeploy.com/product/live-map/#>
24. Dronedeploy website - "Mining": <https://www.dronedeploy.com/solutions/mining/>
25. Dronedeploy website - "Construction":<https://www.dronedeploy.com/solutions/construction/>
26. Dronedeploy website - "Agriculture":<https://www.dronedeploy.com/solutions/agriculture/#ag-bundle>
27. Dronedeploy Documentation - "Roof Report " :
<https://support.dronedeploy.com/docs/roof-report>
28. Dronedeploy Guides - "How Accurate is My Map?":
<https://support.dronedeploy.com/docs/how-accurate-is-my-map-2>
29. Dronedeploy Guides - "Getting started - API key":
<https://support.dronedeploy.com/docs/getting-your-api-key>
30. Dronedeploy Blog - "Introducing DroneDeploy's SDK":
<https://blog.dronedeploy.com/introducing-dronedeploys-sdk-c2a4eddd032c>
31. Dronedeploy website - "Pricing" :
<https://www.dronedeploy.com/pricing.html>
32. Dronegeniuity - "DroneDeploy Review - Aerial 3D Mapping Software":
<https://www.youtube.com/watch?v=i2vJYv0aIcE>
33. DroneU - "DroneDeploy Is Easier to Use": https://www.youtube.com/watch?v=_3fWu8q_0hc
34. Pix4D website: <https://www.pix4d.com/>
35. Pix4D website - "Pix4D Mapper": <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
36. Pix4D Documentation- Feature list:
https://assets.ctfassets.net/go54bjdzbrgi/3QM79NYMeatgIIRfrEzgtL/249f221faf364589f7faaf410af622b3/FEAL_Pix4Dmapper_ENG_V4.4.pdf
37. Pix4D website - Pix4D Fields: <https://www.pix4d.com/product/pix4dfields>

38. Pix4D website - Pix4D Capture: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>
39. Pix4D website - Pix4D Engine: <https://www.pix4d.com/product/pix4dengine>
40. "5 questions to ask before trying Pix4D's Crane Camera", Pix4D Blog: <https://www.pix4d.com/blog/5-questions-to-ask-before-trying-Pix4D-Crane-Camera>
41. Pix4D website - Pricing: https://cloud.pix4d.com/store/?=&solution=pro#solution_pro
42. Rich Charpentier - "DJI Mavic 2 Pro Drone 3D Model - Pix4D, Drone Deploy comparison" <https://www.youtube.com/watch?v=VSKk0Cl2dqU>

Capitolo 4

1. Pix4D Support - "Point Cloud Densification": <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557799-Menu-Process-Processing-Options-2-Point-Cloud-and-Mesh-Point-Cloud#label1>
2. Dronedeploy Support- "How to process dataset": <https://support.dronedeploy.com/docs/how-to-process-datasets>
3. Dronedeploy Support - 3D Points Cloud: <https://support.dronedeploy.com/docs/3d-point-clouds-1>

Capitolo 5

1. Pix4D Engine- Documentation: <https://www.pix4d.com/product/pix4dengine>
2. Pix4D Engine- Pix4D Engine <https://developer.pix4d.com/server/1.2.0/index.html>

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo spazio a chi, con dedizione e pazienza, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato e chi, in questi anni, mi ha accompagnato nel mio percorso di studi.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore professore Montrucchio Bartolomeo che mi ha seguito, con la sua disponibilità e professionalità, in ogni step della realizzazione dell'elaborato.

Ringrazio di cuore l'ingegnere Gaspardone Marco, mio relatore all'interno di TIM, il quale mi ha affidato il compito della presente tesi e che ha saputo guidarmi con professionalità e pazienza durante tutto il lavoro, dalla fase iniziale di ricerche fino alla stesura finale. La sua passione e dedizione sono state di grande ispirazione.

Un ringraziamento doveroso a Cristiano De Leonardis e alla sua azienda SEiKEY che, assieme a Brambilla Davide, mi hanno supportato a livello tecnico nella fase di sperimentazione e testing. Il loro entusiasmo e la loro professionalità sono un personale modello di riferimento.

Ringrazio la mia famiglia, in particolare Simone, Sibilla e mio papà Aldo. La famiglia è la patria del cuore.

Ringrazio anche tutti gli amici, i colleghi e le persone a me care che mi hanno accompagnato in questi anni di studio. Ogni esperienza vissuta con voi resterà viva nella mia memoria.

Infine, vorrei dedicare questo piccolo traguardo a me stesso, che possa essere l'inizio di una lunga e brillante carriera professionale.

