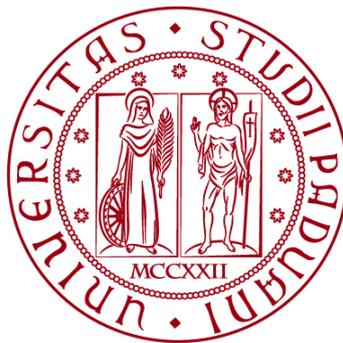


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

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



TESI DI LAUREA

**INTEGRAZIONE DI RILIEVI SATELLITARI E
AEREI DELL'AREA DEI LABORATORI
NAZIONALI DI LEGNARO A SUPPORTO DI
ANALISI IDRAULICHE**

Relatore: PROF. SALVATORE PAPPALARDO
Correlatore: Dott. EDOARDO CRESCINI

Laureando: CLAUDIA LUISE

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Abstract

I Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto (SAPR), comunemente conosciuti come droni, consentono di acquisire - in tempi brevi ma con dati metrici dettagliati - numerose informazioni di carattere ambientale e strutturale per il rilievo ed il monitoraggio del territorio.

Integrando l'uso di SAPR con dati da piattaforme satellitari e di rilievo GNSS sul campo con la metodologia a rete RTK si è andati a rilevare l'area dei Laboratori Nazionali di Legnaro e del reticolo idrografico minore circostante ad essi, al fine di ottenere elaborati cartografici di grande dettaglio, quali il *Digital Surface Model* (DSM), il *Digital Terrain Model* (DTM), l'ortofoto e i modelli 3D degli edifici, realizzando anche un'analisi dell'uso del suolo dei LNL grazie all'impiego della *Digital Earth*.

L'elaborato descrive lo sviluppo della programmazione ed integrazione di queste due metodologie di rilievo, tenendo conto della problematica della vasta superficie da rilevare e della particolarità del rilievo dei canali utilizzando la metodologia del *corridor mapping*, approfondendo inoltre l'utilizzo dei vari *software* necessari per la progettazione ed esecuzione del rilevamento e della restituzione degli elaborati cartografici.

I risultati e la metodologia sviluppata nel presente lavoro fanno emergere le enormi potenzialità derivate dell'uso di SAPR, sia nell'acquisizione, elaborazione e rappresentazione di elementi areali che in mappature lineari, fondamentali per lo studio del reticolo idrografico minore.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 <i>Digital Earth</i> e piattaforme aeree: dal <i>remote</i> al <i>proximity sensing</i> - dalle piattaforme satellitari ai SAPR	3
1.1.1 <i>Digital Earth</i> : contesto, evoluzione e tecnologie	3
1.1.2 Evoluzione della <i>Digital Earth</i> e avvento dei <i>Big Earth Data</i>	4
1.1.3 <i>Remote sensing</i> e <i>Digital Earth</i>	10
1.1.4 Dal <i>remote</i> al <i>proximity sensing</i> , dai SAPR agli <i>smartphone</i>	12
1.2 Rilievi SAPR: caratteristiche principali, ambiti di applicazione e opportunità	15
1.2.1 I Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto.....	17
1.2.2 Fotogrammetria e rilievo fotogrammetrico con SAPR	20
1.3 Rilievi topografici mediante GPS: metodologia GNSS - RTK.....	24
1.3.1 Il sistema GPS	25
1.3.2 Gli errori nel sistema GNSS.....	27
1.3.3 Tecniche di posizionamento GNSS: metodologia RTK	30
1.3.4 Procedura del rilievo topografico con metodologia a rete RTK	32
1.4 Obiettivi	34
1.5 Area di studio: inquadramento geografico, contesto e problematica.....	35
1.5.1 Inquadramento geografico dell'area.....	35
1.5.2 I Laboratori Nazionali di Legnaro: dalla fondazione ad oggi	37
1.5.3 Motivazione e scopo dei rilievi	37
2. MATERIALI E METODI	39
2.1 Definizione dell'area dei LNL e analisi del reticolo idrografico minore.....	39
2.1.1 Definizione edificato e confini.....	39

2.1.2 Analisi diacronica edificato e superfici	41
2.1.3 Estrazione del reticolo idrografico minore	43
2.2 Utilizzo di SMASH	45
2.3 Utilizzo di UgCS	50
2.3.1 La pianificazione del <i>corridor mapping</i>	51
2.3.2 Pianificazione del volo sul canale consortile	53
2.3.3 Pianificazione del volo sui Laboratori Nazionali di Legnaro	56
2.4 Utilizzo di Agisoft Metashape Professional	58
3. RISULTATI E DISCUSSIONE	67
3.1 Integrazione delle metodologie di rilievo	67
3.2 Analisi territoriali e spaziali e produzione di cartografia	74
3.2.1 Cartografia dell'analisi diacronica dell'edificato	74
3.2.2 Ortofoto, DSM e DTM del reticolo idrografico minore	82
3.3 Analisi statistica	84
4. CONCLUSIONI	93
BIBLIOGRAFIA	95
SITOGRAFIA	99

1. INTRODUZIONE

Nel primo capitolo vengono esposti i principi teorici fondamentali per poi eseguire gli studi in questione. Si sono ricercate le origini della *Digital Earth*, il suo sviluppo nel corso dei decenni, le applicazioni odierne e le prospettive future di questo argomento, evidenziando la transizione dal *remote sensing* al *proximity sensing* nel campo della Terra Digitale e delle piattaforme aeree e terrestri. In seguito, sono stati presentati: i sistemi SAPR spiegando cosa sono, le loro caratteristiche e le applicazioni, sia in ambito generale che specifico nel campo del rilievo fotogrammetrico; e i sistemi GNSS, citandone le tipologie, esponendo le possibili fonti di errore generate dall'impegno del sistema e analizzando, in particolare, il più diffuso e utilizzato GPS, descrivendo i diversi metodi di rilievo satellitare, focalizzandosi sulla metodologia RTK e rete RTK. Infine, sono stati delineati gli obiettivi della tesi e l'area di studio presa in esame, spiegando le motivazioni che hanno fatto nascere l'esigenza delle analisi.

Nel secondo capitolo vengono messi in pratica i principi teorici della *Digital Earth* e del *remote* e *proximity sensing* delineati in precedenza tramite la spiegazione dei procedimenti seguiti per progettare i rilevamenti e ottenere i risultati finali delle ricerche relative allo studio delle superfici odierne e storiche dei Laboratori Nazionali di Legnaro e del reticolo idrografico minore. Oltre ai materiali, cioè i dati adoperati durante gli studi come le immagini satellitari, aeree, storiche e le fotografie georeferenziate acquisite, vengono esposte anche le metodologie, ossia il modo in cui sono stati trattati i dati e i vari *step* seguiti per programmare le uscite in campo ed elaborare i risultati partendo dalle informazioni in possesso inizialmente e quelle ottenute durante lo svolgimento dell'attività, conducendo l'illustrazione dei vari strumenti *software* e le applicazioni utilizzate e la finalità per le quali si sono impiegate.

Nel terzo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dallo studio sostenuto, vale a dire la cartografia dell'analisi diacronica della superficie dei LNL condotta mediante Google Earth Pro, le inerenti tabelle riassuntive delle percentuali di suolo utilizzato e i prodotti cartografici, ovvero l'ortofoto, il DSM e il DTM del reticolo idrografico minore generati a seguito dell'elaborazione fotogrammetrica eseguita grazie a Agisoft Metashape Professional. Vengono raccolti ed esposti anche svariati casi studio, inerenti l'integrazione delle metodologie di rilievo tra sistema GNSS e SAPR, in cui vengono

rilevati diversi territori naturali come fiumi, cave, falesie o zone verdi altamente vegetate e non, ma anche manufatti artificiali come edifici, dighe, piazzali od opere di sostegno, per giungere alla fine all'analisi della possibilità di integrazione di un modulo GNSS-RTK direttamente in un mezzo aeromobile a pilotaggio remoto valutandone le precisioni ottenibili.

Infine, nell'ultimo capitolo, vengono tratte le conclusioni finali del progetto di rilievo e del lavoro svolto, con anche una considerazione su come sarebbe stato possibile rendere più efficiente il sistema di rilevamento e gestire in maniera più funzionale le tempistiche in campo.

1.1 *Digital Earth* e piattaforme aeree: dal *remote* al *proximity sensing* - dalle piattaforme satellitari ai SAPR

1.1.1 *Digital Earth*: contesto, evoluzione e tecnologie

La definizione più completa ed attuale di *Digital Earth* è stata delineata nel 2012 dal consiglio dell'*International Society for Digital Earth*, cioè l'organizzazione internazionale che principalmente promuove lo scambio accademico, l'innovazione scientifica e tecnologica, l'educazione e la collaborazione internazionale verso la Terra Digitale ¹, come: “ la *Digital Earth* utilizza le tecnologie digitali per modellare i sistemi terrestri, comprendendo gli aspetti culturali e sociali rappresentati dalle società umane che vivono sul pianeta. Il modello è un sistema informativo multidimensionale, multiscala, multitemporale e multistrato. La *Digital Earth* è concepita come una piattaforma comune a sostegno della cooperazione nazionale e internazionale per lo sviluppo sostenibile globale e come un nuovo punto di sviluppo della crescita economica e del benessere sociale ”. ²

Ad oggi esistono diverse piattaforme o *geobrowser* basate sulla tecnologia del comando e controllo, con le relative applicazioni di visualizzazione, che propongono il loro globo virtuale finalizzato all'esigenza per la quale si è evoluto e maturato nel corso del tempo con caratteristiche distintive diverse gli uni dagli altri. Alcune esigenze che possiamo riscontrare vanno dalla sicurezza, alla ricerca sulla scienza del sistema terrestre e del cambiamento climatico, fino allo sviluppo regionale sostenibile. Per tale motivo le terre digitali le possiamo raggruppare in tre categorie:

- piattaforme commerciali basate sulla localizzazione (Google Maps, Bing Map o Tripadvisor);
- piattaforme per la ricerca scientifica basate sulle scienze del sistema terrestre (Google Earth, WorldWind, ArcGIS);
- piattaforme pubbliche orientate alle politiche territoriali per lo sviluppo locale sostenibile e al supporto delle decisioni (geoportali nazionali, regionali o comunali). ³

¹ *About ISDE* <http://www.digitalearth-isde.org/list-2-1.html>

² *What is Digital Earth* by ISDE Council (2012) <http://www.digitalearth-isde.org/list-90-1.html>

³ Guo H. et al (2017) *Big Earth Data: a new challenge and opportunity for Digital Earth's development*.

Il primo prototipo originale del sistema Terra, l'*Earthviewer* di Keyhole, venne sviluppato nel 2001 ed integrava immagini di telerilevamento su larga scala con una serie di dati di punti chiave in un modello del globo in 3D. Successivamente la NASA nel 2003 rilasciò WorldWind rivolgendosi principalmente agli utenti della comunità scientifica, Google nel 2005 lanciò Google Earth ed ESRI nel 2006 introdusse sul mercato ArcGIS Explorer che consentiva di visualizzare dati globali a più risoluzioni e di eseguire interrogazioni e analisi su tipologie di dati differenti tra loro.

Sebbene Google Earth non sia stato il primo *software geobrowser* per il globo virtuale, è stato quello di maggior successo poiché è riuscito a creare un enorme interesse agli utilizzatori: è gratuito, veloce, consente a chiunque di visualizzare e condividere i propri dati facilmente grazie ad un proprio linguaggio di *markup* (KML), è divertente da usare in conseguenza della sua velocità, dell'interfaccia facile da usare, delle immagini di alta qualità e di una serie crescente di contenuti interessanti.⁴

1.1.2 Evoluzione della *Digital Earth* e avvento dei *Big Earth Data*

La *Digital Earth* si è evoluta di pari passo con i progressi tecnologici in termini di osservazione della Terra, sistemi informativi geografici, sistemi di posizionamento globale e Internet, ed è stata influenzata dai cambiamenti nella percezione e nei progressi della ricerca su questo concetto, stimolati da scienziati, governi e imprese.⁵

Le svolte più significative nello sviluppo della *Digital Earth* si possono riepilogare in:

- 1998, *The Digital Earth: Understanding Our Planet in the Twenty-First Century*

Una delle prime definizioni di *Digital Earth* venne coniata in un discorso da Al Gore per l'apertura del California Science Center nel 1998. *Digital Earth* era descritta come una rappresentazione virtuale della Terra, a più risoluzioni e tridimensionale, dove poter incorporare una vasta quantità di dati georeferenziati e con la possibilità di poter viaggiare nel tempo attraverso lo scorrimento della sequenza temporale dei dati acquisiti, collegandosi ad una rete interconnessa di biblioteche digitali.

⁴ Grossner K.E., Clarke K.C. (2007) *Is Google Earth, "Digital Earth?" – Defining a Vision.*

⁵ Guo H. et al (2017) *Big Earth Data: a new challenge and opportunity for Digital Earth's development.*

I possibili ampi impieghi ipotizzati per la DE variavano dal campo diplomatico, alla lotta contro la criminalità, alla preservazione della biodiversità, alla predizione del cambiamento climatico e all'aumento della produttività agricola, affidandosi quindi per il suo progresso a più settori, tra cui la ricerca ambientale e tecnologica, l'industria e la politica.

L'obiettivo della DE era quello di trasformare la moltitudine di dati grezzi come le immagini satellitari ad alta risoluzione, le mappe digitali e le notizie economiche, sociali e demografiche, in informazioni comprensibili sulla nostra società e sul pianeta comportando dei benefici all'educazione, al processo decisionale per un futuro sostenibile, alla pianificazione del territorio, all'agricoltura e alla gestione delle crisi.

La tecnologia necessaria supposta da Gore per costruire una Terra Digitale prevedeva: la scienza computazionale, la memoria di massa, le immagini satellitari, la rete a banda larga, l'interoperabilità e i metadati.⁶

- 1999, *Beijing Declaration on Digital Earth*

In occasione del primo simposio internazionale sulla Terra Digitale (ISDE1) del 1999 durante la Dichiarazione di Pechino è stato spiegato che: “ la *Digital Earth*, affrontando le sfide sociali, economiche, culturali, istituzionali, scientifiche, educative e tecniche, permette all'umanità di visualizzare la Terra e tutti i luoghi al suo interno, di accedere alle informazioni su di essa e di comprendere e influenzare le questioni sociali, economiche e ambientali che riguardano le loro vite nei loro quartieri, nelle loro nazioni e sul pianeta Terra ”.

L'implementazione della *Digital Earth* può essere possibile solo grazie alla cooperazione e collaborazione tra diversi soggetti (comunità scientifiche, industria, governi, organizzazioni regionali e internazionali) e deve dare la priorità a problemi di protezione dell'ambiente, gestione dei disastri, conservazione delle risorse naturali, sviluppo economico, sociale e sostenibile globale e di miglioramento della qualità della vita dell'umanità. A tale fine c'è la necessità di investire nella ricerca scientifica e di sviluppare delle tecnologie chiave: le infrastrutture informatiche e tecnologiche, l'osservazione e la

⁶ Gore A (1999) *The Digital Earth: understanding our planet in the 21st Century*.

modellazione sistematica globale, le reti di comunicazione, lo sviluppo di *database* e l'interoperabilità dei dati geospaziali.⁷

- 2009, *Beijing Declaration on Digital Earth*

In 10 anni sono stati compiuti notevoli sviluppi nella scienza e tecnologia della *Digital Earth*, tutti avvenuti parallelamente ai progressi nella tecnologia dell'informazione spaziale e delle reti di comunicazione, nel calcolo ad alte prestazioni e nella scienza del sistema Terra, andando a creare una piattaforma di condivisione dei dati della Terra Digitale garantendo l'accessibilità e l'utilizzo per scopi pubblici e commerciali a tutti. Durante lo svolgimento del sesto simposio internazionale sulla Terra Digitale (ISDE6) si afferma che: “*Digital Earth* è parte integrante di altre tecnologie avanzate tra cui: l'osservazione della Terra, i sistemi di geo informazione, i sistemi di posizionamento globale, le reti di comunicazione, le reti di sensori, gli identificatori elettromagnetici, la realtà virtuale, le infrastrutture di calcolo distribuito, ecc. È vista come un contributo strategico globale per lo sviluppo scientifico e tecnologico, ed essa sarà il catalizzatore per trovare delle soluzioni ai problemi scientifici e sociali internazionali.”

La futura applicazione della Terra Digitale ricoprirà un ruolo cardine nello studio del cambiamento climatico globale e delle problematiche della società umana, come l'esaurimento delle risorse naturali, l'insicurezza alimentare e idrica, la scarsità di energia, il degrado ambientale, la prevenzione e risposta ai disastri naturali, l'esplosione demografica e la pianificazione e gestione urbana.

Nel corso della Dichiarazione di Pechino sono stati delineati i prossimi obiettivi per la *Digital Earth*:

- accelerare il trasferimento di informazioni utilizzando le emergenti infrastrutture di dati spaziali in tutto il mondo;
- aumentare la capacità di condivisione delle risorse informative e la trasformazione dei dati grezzi in informazioni e applicazioni pratiche per colmare il divario digitale tra paesi diversamente informatizzati;
- sfruttare pienamente le tecnologie di prossima generazione che verranno sviluppate, tra le quali l'osservazione della Terra, il *networking*, la ricerca di

⁷ International Society for Digital Earth (1999) *Beijing Declaration on Digital Earth*.

database, la navigazione e il *cloud computing* per aumentare il servizio al pubblico e ridurre i costi.⁸

- 2011, *Digital Earth vision 2020*

Nel marzo del 2011 l'ISDE organizzò a Pechino un *workshop* sulla *Digital Earth* di nuova generazione mirato a identificare gli elementi chiave da includere in una visione rivisita per la DE, in conseguenza dei numerosi e notevoli sviluppi che hanno avuto luogo nei settori della tecnologia dell'informazione, della grafica 3D, delle infrastrutture di dati e dell'osservazione della Terra. Dal *workshop* sono emersi due documenti scientifici che hanno fornito una nuova comprensione del concetto di Terra Digitale esaminando i progressi attuati dal 1998 e prevedono lo sviluppo futuro della stessa, tenendo in considerazione i rapidi progressi che scienza e tecnologia sono destinate a compiere.

Il primo documento intitolato “*Next-Generation Digital Earth*” espone, oltre ai risultati ottenuti dalla ricerca e sviluppo della DE, anche le diverse limitazioni nell'utilizzo della prima generazione del globo virtuale, come ad esempio i problemi di accuratezza, l'incertezza posizionale, la difficoltà di comunicare informazioni che non sono direttamente visibili, la presenza di restrizioni su ciò che può essere fatto con i risultati delle analisi e non è liberamente possibile visualizzare, in un momento arbitrariamente definito nel passato, l'aspetto di un luogo, o visualizzare come sarà in futuro, in termini di crescita urbana o di innalzamento del livello del mare, sulla base dei modelli scientifici. La prossima generazione di *Digital Earth* si prevede che non sarà un singolo sistema ma, piuttosto, molteplici infrastrutture connesse basate sull'accesso aperto e sulla partecipazione attraverso molteplici piattaforme tecnologiche che risponderanno alle esigenze di pubblici diversi. È stata anche proposta una visione più dinamica della Terra Digitale che informa attivamente sugli eventi che accadono sulla (o vicino alla) superficie terrestre collegandosi alle reti di sensori e ai *situation-aware system*. Viene ipotizzato l'utilizzo dell'audio per permettere all'utente di porre domande attraverso la voce, memorizzare i suoni e le storie legate ai luoghi e riportare la pronuncia del nome del posto. Infine, viene espressa la richiesta di nuovi modelli di governo del globo virtuale e la collaborazione tra il settore privato, il mondo accademico, le organizzazioni non

⁸ International Society for Digital Earth (2009) *Beijing Declaration on Digital Earth*.

governative e il governo per avere lo stesso successo ottenuto nello sviluppo della prima generazione.⁹

Il secondo documento intitolato “ *Digital Earth 2020: Towards the vision for the next decade* ” espone i principali fattori politici, scientifici e sociali per lo sviluppo della DE, ponendo particolare attenzione al tema sociale e della collaborazione tra il mondo della scienza e dei cittadini comuni poiché non può esserci una DE valida per tutti, ma ci saranno una serie di punti di vista diversi collegati alla DE, basati sulle stesse fonti di dati, che offriranno agli utenti funzionalità diverse.

La nuova versione di *Digital Earth*:

- avrà l'aspetto di un globo, poiché efficace per la visualizzazione, dal quale sarà quindi possibile vedere all'interno degli edifici, nel sottosuolo e sott'acqua;
- visualizzerà le caratteristiche fisiche attuali della Terra, ma anche il passato, attraverso i dati storici, e il futuro, sulla base dei risultati di modelli integrati;
- sarà dinamico e interattivo sfruttando i flussi informativi provenienti da sensori e persone;
- sintetizzerà informazioni eterogenee e fornirà metriche di qualità e affidabilità sia degli input che degli output dei dati;
- sarà più partecipativo in quanto le persone avranno più voce in capitolo nel fornire dati, ma anche nell'interpretare i dati e nel plasmare la costruzione di prove scientifiche, e nel discutere i pro e i contro delle diverse scelte politiche;
- tratterà di luoghi, culture e identità, nello spazio fisico e virtuale, ponendo l'accento sull'analisi delle reti e dei flussi di persone, sulle relazioni tra luoghi e esseri viventi, in aggiunta alla tradizionale analisi spaziale;
- sarà facile e divertente da usare con diversi livelli di funzionalità disponibili per diversi tipi di pubblico per saperne di più su un luogo o un problema, o interagire con modelli e parametri;
- sarà un quadro di riferimento onnipresente poiché le persone e un numero crescente di oggetti di uso quotidiano saranno online in ogni momento.

Questa nuova visione della Terra Digitale pone al centro del suo progresso lo sviluppo della scienza sociale, favorendo la partecipazione dei cittadini nella costruzione di

⁹ Goodchild M.F., Guo H., Annoni A. et al (2012) *Next-generation Digital Earth*.

evidenze scientifiche e scelte strategiche che riguardano il nostro pianeta, colmando il divario tra scienza, società e responsabili politici. L'uso molto diffuso dei *social network* rappresenta un modo fondamentale per comunicare e trasformare i cittadini in importanti fornitori di informazioni, in questo modo la scienza può avere accesso a molte osservazioni più dinamiche sull'ambiente, segnalando i cambiamenti osservati e percepiti dalle persone.

La DE dovrebbe essere un quadro dinamico per condividere informazioni a livello globale e migliorare la nostra comprensione collettiva delle complesse relazioni tra la società e l'ambiente in cui viviamo ma l'attuazione di questa visione di *Digital Earth* richiede ulteriori progressi nella scienza e nella tecnologia e un grande sforzo di collaborazione internazionale.¹⁰

- 2019, *Florence Declaration by the International Society for Digital Earth*

Da quando il concetto di *Digital Earth* è stato presentato nel 1998, lo stato della scienza e tecnologia della DE è avanzato e ha fornito una crescita prospera. Recentemente è emersa un'ondata di *big data* che sta inaugurando una nuova era per la comprensione e l'utilizzo di *Digital Earth* attraverso tecnologie come il *cloud computing*, l'intelligenza artificiale e l'*Internet of Things*.

Digital Earth è stata all'avanguardia nello sviluppo delle scienze della terra, delle scienze dell'informazione e delle scienze e tecnologie spaziali, ma il prossimo obiettivo è quello di espandere il suo ruolo nell'accelerare il trasferimento di informazioni dalla scienza, alle applicazioni a sostegno di una gestione sostenibile dei beni ambientali globali, sfruttando le tecnologie esistenti ed esplorarne di nuove per facilitare accesso e riutilizzo dei dati.¹¹

- *Digital Earth, Big Data e Big Earth Data*

La disponibilità di informazioni geografiche provenienti da sensori satellitari e terrestri si è espansa rapidamente incoraggiando l'utilizzo dei *Big Data*, i quali hanno accentuato la collaborazione internazionale, l'analisi ad alta intensità dei dati, le enormi risorse di calcolo, la visualizzazione di alto dettaglio e le migliori tecniche di ricerca e scoperta, come quelle che possono essere facilmente implementate in un globo virtuale.¹²

¹⁰ Craglia M., de Bie K., Jackson D. et al (2012) *Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade*.

¹¹ International Society for Digital Earth (2019) *Florence Declaration*.

¹² Goodchild M.F., Guo H., Annoni A. et al (2012) *Next-generation Digital Earth*.

I *Big Data* hanno creato una nuova prospettiva computazionale nell'uso dei dati raccolti continuamente da varie fonti per esplorarne l'andamento in grandi volumi di dati e per comprendere meglio le dinamiche del mondo. Questi progressi offrono la grande opportunità a *Digital Earth* di svolgere il suo ruolo visionario nell'integrazione di un'enorme quantità di dati geospaziali multidimensionali, multi-temporali e multi-risoluzione, nonché di dati socioeconomici, in un contesto di analisi globale e di sistemi applicativi sulla Terra.

La Terra Digitale si è evoluta in una nuova connotazione di *Big Earth Data*, incorporando i potenti strumenti necessari per comprendere e spiegare il sistema Terra e per indagare sullo sviluppo globale sostenibile attraverso l'analisi di questi dati massicci. Si concentra sull'osservazione sistematica della Terra, nonché sui metodi ad alta intensità di dati per lo studio dei modelli del sistema Terra, con l'obiettivo di aumentare la scoperta della conoscenza.

Si prevede che i *Big Earth Data* promuoveranno la visione della *Digital Earth* collegando più satelliti e centri di informazione geografica, basandosi sulle infrastrutture spaziali nazionali e su Internet ad alta velocità per completare l'acquisizione, la trasmissione, l'archiviazione, l'elaborazione, l'analisi e la distribuzione dei dati spaziali.¹³

1.1.3 *Remote sensing e Digital Earth*

Il telerilevamento o *remote sensing* si riferisce all'osservazione ed esplorazione non intrusiva della Terra utilizzando onde elettromagnetiche da una piattaforma a una certa distanza dall'oggetto dello studio.

Le piattaforme utilizzate per eseguire ricerche mediante telerilevamento possono variare dai satelliti, ai veicoli spaziali (comprese le navette spaziali), agli aerei e a varie piattaforme terrestri. Nella categoria degli aerei possiamo ricavare una sottocategoria relativa ai sistemi aeromobili a pilotaggio remoto, cioè i droni. La maggior parte dei dati cartografici di base e delle immagini utilizzate nel telerilevamento sono raccolte dai

¹³ Liu Z., Foresman T., van Genderen J., Wang L. (2020) *Understanding Digital Earth*.

satelliti e dagli aerei, grazie a dei sensori montati su di essi che ottengono grandi set di dati relativi all'atmosfera, all'oceano e alla terra con alta precisione e alta risoluzione.¹⁴

I sensori si possono dividere sulla base della loro modalità di acquisizione dei dati:

- i sensori ottici passivi misurano la radiazione naturalmente disponibile, emessa o riflessa, dagli oggetti da rilevare a seconda della loro riflettività o riflettanza. Rientrano in questa categoria tutti i satelliti multi ed iper-spetttrali che operano dalle lunghezze d'onda del visibile fino a quelle dell'infrarosso;
- i sensori radar attivi emettono un'onda elettromagnetica, diretta verso l'oggetto di indagine e viene poi registrata e misurata dal sensore la radiazione riflessa dall'oggetto. Questi satelliti a SAR lavorano nella frequenza delle microonde.

Entrambe le categorie presentano dei vantaggi o svantaggi a loro favore. I sistemi ottici contengono l'informazione sulla riflettività naturale degli oggetti da cui si possono estrarre informazioni e parametri fisici. Tuttavia, non sono in grado, né di penetrare attraverso le nuvole, la pioggia e il fumo, né di acquisire dati nelle ore notturne, se non il segnale termico; ambedue le limitazioni non accadono per i sistemi radar, i quali contengono sia l'informazione di intensità legata alla riflettività degli oggetti, sia l'informazione di fase, legata alla distanza bersaglio-radar, e consentono di produrre un'immagine, in cui ciascun pixel rappresenta l'intensità di radiazione elettromagnetica irradiata dalla porzione di superficie osservata.¹⁵

Il progresso tecnologico dei sensori di telerilevamento ci permette di ottenere dati su scala globale, ampliando notevolmente la comprensione dell'ambiente in cui l'umanità vive da prospettive spaziali e temporali, e fornisce un numero crescente di risorse di dati per la *Digital Earth*.¹⁶

Con il fine di accelerare le soluzioni ai cambiamenti climatici la DE mira a sfruttare tecnologie aero- e geo-spaziali avanzate, in particolare il telerilevamento, per migliorare rapidamente la modellazione, la mappatura e la simulazione di complessi sistemi ambientali e umani in tutto il pianeta.¹⁷

¹⁴ Fu W., Ma J., Chen P., Chen F. (2020) *Remote Sensing Satellites for Digital Earth*.

¹⁵ <https://monito.irpi.cnr.it/sistema-di-monitoraggio-telerilevamento-da-satellite-remote-sensing/>

¹⁶ Fu W., Ma J., Chen P., Chen F. (2020) *Remote Sensing Satellites for Digital Earth*.

¹⁷ Craglia M., de Bie K., Jackson D. et al (2012) *Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade*.

I dati di telerilevamento ottenuti da sensori spaziali e aerei sono caratterizzati da alte risoluzioni spaziali e spettrali, che possono migliorare l'accuratezza della classificazione del territorio e il monitoraggio dei cambiamenti di uso del suolo. Inoltre, l'elaborazione delle immagini in tempo quasi reale dei dati di telerilevamento fornisce un potente supporto decisionale per rispondere rapidamente alle emergenze (ad esempio, terremoti, inondazioni e altri disastri naturali). Per tali motivi i *Big Earth Data*, cioè il futuro della *Digital Earth*, si basano sui dati ottenuti dal telerilevamento per promuovere lo sviluppo della ricerca sulle scienze della Terra, per comprendere e spiegare il sistema Terra e per favorire lo sviluppo globale sostenibile.¹⁸

1.1.4 Dal *remote* al *proximity sensing*, dai SAPR agli *smartphone*

Nel paragrafo precedente è stato spiegato cos'è il telerilevamento e sono state descritte le diverse tipologie di piattaforme e di sensori, ora ci focalizzeremo su un altro elemento che entra in gioco nel telerilevamento, cioè la distanza tra il sensore e l'oggetto dello studio, introducendo il *proximity sensing*.

Distinguendo le piattaforme di acquisizione in base alla distanza che intercorre tra il sensore e l'oggetto di studio possiamo trovarci in due situazioni: le piattaforme a lunga distanza come i satelliti, i veicoli spaziali e gli aerei e le piattaforme a breve distanza. In quest'ultima categoria rientrano gli aeromobili a pilotaggio remoto e le piattaforme terrestri come furgoni, camion, trattori, carri armati e robot.

Nonostante il progresso tecnologico dei sensori di telerilevamento, la distanza continua a rimanere cruciale per la precisione del risultato finale. Attualmente, la maggior parte dei satelliti per l'osservazione della Terra dispone di sistemi a sensori radar attivi con risoluzioni molto elevate. Grazie all'impiego della quarta generazione di satelliti si può arrivare ad una risoluzione spaziale di 1 metro o meno, consentendo l'identificazione di edifici, strade, progetti di moderna costruzione e le relative modifiche.¹⁹ Tuttavia, se si ha la necessità di risoluzioni più accurate o si ha difficoltà a rilevare l'oggetto interessato per via del sito in cui si trova, l'alternativa ottimale è ricorrere alla *proximity sensing* con l'utilizzo di droni aerei o terreni. È possibile ampliare il concetto di *proximity sensing*,

¹⁸ Guo H. et al (2017) *Big Earth Data: a new challenge and opportunity for Digital Earth's development*.

¹⁹ Fu W., Ma J., Chen P., Chen F. (2020) *Remote Sensing Satellites for Digital Earth*.

cioè il rilevamento di un oggetto o un cambiamento di stato ad una distanza ravvicinata, ad un livello accessibile per tutte le persone.

Le funzionalità degli *smartphone* stanno trasformando i cittadini in sensori viventi capaci di fornire un'enorme massa di dati. Grazie a *Internet* hanno la possibilità di creare, assemblare e diffondere informazioni geografiche fornite volontariamente dagli stessi individui, ottenendo un mosaico globale di informazioni geografiche.

Il VGI (*Volunteered Geographic Information*) è un fenomeno legato al mondo dell'informazione geografica con il potenziale per ridefinire i ruoli tradizionali della mappatura. Le tecnologie che si sono combinate e sviluppate per rendere possibile questa informazione geografica volontaria sono:

- il *Web 2.0* dove le persone possono personalmente fornire i contenuti ai siti *Web*, a differenza di un tempo in cui il rapporto tra utente e pagina *Web* era unidirezionale poiché l'unica azione che l'utente poteva fare era avviare il *download* del contenuto;
- la georeferenziazione, cioè la capacità di specificare la posizione sulla superficie terrestre utilizzando un numero limitato di sistemi ben definiti e interoperabili, tra i quali i più universali sono latitudine e longitudine, necessita di una serie di strumenti per identificare le coordinate dei luoghi sulla superficie terrestre;
- il *geotag* è un codice standardizzato che può essere inserito nelle informazioni per annotarne la posizione geografica appropriata, i contenuti si riferiscono a una posizione specifica sulla superficie terrestre e diversi siti consentono l'accesso a tali voci dalle mappe;
- il GPS (*Global Positioning System*) consente la misurazione diretta della posizione sulla superficie terrestre;
- la grafica di alta qualità per la visualizzazione dinamica di oggetti tridimensionali;
- la comunicazione a banda larga per un accesso capillare a *Internet* tramite una connessione ad alta capacità.²⁰

L'ubiquità del GPS permette a chiunque di misurare la posizione sulla superficie terrestre con una precisione di pochi metri e di etichettare altre informazioni come le fotografie con la relativa posizione geografica e delle note di testo. Se si unisce il GPS e a una serie

²⁰ Goodchild M.F. (2007) *Citizens as sensors: The world of volunteered geography*.

di servizi *web-based*, il cittadino è in grado di essere un consumatore e un produttore di informazioni geografiche e di realizzare mappe, con vista dall'alto o dal suolo, utili per i suoi scopi del momento, comodamente attraverso l'interfaccia del cellulare. ²¹

L'integrazione della rete di osservazione satellitare con un sistema globale di sensori viventi consentirebbe di passare da una rappresentazione essenzialmente statica della Terra ad una dinamica e interattiva. Inoltre, l'integrazione delle misurazioni quantitative e delle osservazioni dei sensori, con la ricchezza di informazioni qualitative fornite dai cittadini, permette non solo di valutare come sta cambiando l'ambiente, ma anche come tale cambiamento viene percepito, ²² oltre alla possibilità di sfruttare questa ricchezza di dati digitali per una varietà di applicazioni, dalla gestione e risposta alle emergenze, alla valutazione del rischio, alla qualità della vita e al monitoraggio ambientale. ²³

²¹ Goodchild M.F., Guo H., Annoni A. et al (2012) *Next-generation Digital Earth*.

²² Craglia M., de Bie K., Jackson D. et al (2012) *Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade*.

²³ Goodchild M.F. (2007) *Citizens as sensors: The world of volunteered geography*.

1.2 Rilievi SAPR: caratteristiche principali, ambiti di applicazione e opportunità

Inizialmente nati per scopi militari, i droni hanno avuto negli ultimi anni uno sviluppo sia nel campo della tecnologia utilizzata, come l'incremento della durata della batteria, sia in termini di popolarità in vari settori di utilizzo grazie alla varietà di sensori che possono essere integrati in base alle esigenze dell'attività.

I droni di ultima generazione riescono a fornire risultati uguali se non superiori ai metodi convenzionali di rilievo in termini di tempo, precisione, sicurezza e costi. Con l'ulteriore vantaggio della flessibilità del velivolo nel raggiungere aree elevate, spazi non sicuri o inaccessibili ai lavoratori umani. Ciò ha fatto sì che i settori in cui è possibile utilizzarli si moltiplicassero di pari passo all'incremento delle funzionalità eseguibili dagli stessi.

Risulta comunque doveroso tenere in considerazione i possibili problemi riscontrabili durante il loro utilizzo, che sono principalmente: di tipo ambientali, dovuti alle condizioni meteorologiche e di illuminazione o alla velocità e direzione del vento; e di tipo tecnico, cioè carenze tecniche nei sensori impiegati e nei componenti delle piattaforme, come la carenza di GPS, le interferenze elettromagnetiche, la durata delle batterie e la qualità dell'immagine.²⁴

Le tipologie di utenti dei droni possono rientrare in sette categorie:

- 1) organizzazioni intergovernative;
- 2) governo, in cui sono comprese anche le istituzioni statali, l'esercito e la polizia;
- 3) aziende;
- 4) scienza e università;
- 5) gruppi della società civile, cioè organizzazioni non governative, giornalisti, gruppi religiosi e altri gruppi della società civile;
- 6) individui nominati;
- 7) utenti sconosciuti.

Queste sette categorie di utenti espongono i droni a un'ampia gamma di usi con varie motivazioni per cui usare il dispositivo in questione:

²⁴ Albeaino G. et al (2019) *A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain.*

- uso personale, senza un guadagno materiale visibile;
- giornalismo, per la trasmissione, raccolta e diffusione di informazioni e notizie;
- conservazione dell'ambiente e della fauna selvatica, per monitorare e proteggere gli habitat e le ecologie;
- agricoltura, per la coltivazione o produzione o preservazione di generi alimentari;
- salute e sicurezza pubblica;
- crimine, ossia per raggiungere un obiettivo illegale;
- arte e intrattenimento, per l'uso e cattura dell'espressione dell'immaginazione creativa, comprendendo anche attività o spettacoli destinati a dare divertimento;
- movimento e patrocinio sociale, a sostegno dei diritti umani;
- militare, con un uso non armato a sostegno di operazioni di non combattimento;
- commercio, per tutti gli utilizzi a scopo di lucro;
- sorveglianza, con l'osservazione ravvicinata di un obiettivo da parte di funzionari governativi o forze dell'ordine o privati;
- polizia;
- servizi di emergenza e risposta alle catastrofi;
- ricerca scientifica.²⁵

Generalmente il drone lo si raffigura come un velivolo aereo; tuttavia, quella è solo una delle tre possibili piattaforme di acquisizione dei dati con dispositivi pilotati da remoto. Si possono avere: piattaforme terrestri guidate da un operatore con radiocomando o in grado di muoversi su percorsi GPS preimpostati, in questo caso il veicolo è su ruote o cingolato e lo si può caratterizzare in base all'alimentazione, all'autonomia, alla potenza, alla capacità di carico, alla velocità, alla capacità di superare ostacoli e di muoversi su terreno in pendenza, ai sensori e agli apparati meccanici e all'equipaggiamento per lo svolgimento di operazioni specifiche; oppure piattaforme acquatiche come piccoli sommergibili o imbarcazioni, che possono essere diversamente caratterizzati in base ai sensori, alla profondità raggiungibile, all'autonomia e alla capacità di carico.²⁶

²⁵ Choi-Fitzpatrick A. et al (2016) *Up in the Air: A Global Estimate of Non-Violent Drone Use 2009-2015*.

²⁶ Pappalardo S., *Sistema a pilotaggio remoto per l'analisi del territorio: elementi*.

1.2.1 I Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto

L'acronimo SAPR (Sistema Aereo a Pilotaggio Remoto) corrisponde all'insieme:

- del mezzo aereo APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto), cioè un velivolo caratterizzato dall'assenza del pilota di bordo e con la possibilità di volare con tre modalità differenti, in volo automatico, semi-automatico o in volo manuale;
- dei componenti per il controllo e comando, cioè la stazione di controllo;
- dai sensori utilizzati per l'acquisizione dei dati di nostro interesse.

Gli APR sono suddivisi in due categorie, i multirotori e gli ala fissa, che, a loro volta, possono essere differenziati in base a diversi parametri come le dimensioni, il peso, la tipologia di motore, il carico trasportabile (*payload*), la distanza massima di volo dalla stazione di controllo (*range operativo*), la quota massima di volo e l'autonomia di volo.

I multirotori hanno un aspetto simile ad un elicottero, con una struttura a più eliche, da minimo tre a massimo otto, montate su bracci estraibili. Grazie alla loro struttura possono mantenere ferma la posizione a mezz'aria, effettuare virate improvvisate, volare in direzione obliqua e la fase di decollo e atterraggio viene eseguita verticalmente. Tutto ciò garantisce maggiore flessibilità nell'acquisizione dei dati in quanto è possibile effettuare riprese nadirali, cioè con la fotocamera rivolta verso il basso, ma anche inclinate mediante l'utilizzo della *gimbal* che consente all'operatore di ruotare il sensore di acquisizione da remoto in modo indipendente dal velivolo. Avendo una ridondanza di eliche, in caso di guasto al motore, i multirotori possono consentire un ritorno sicuro e controllato al punto di decollo; tuttavia, hanno una limitata autonomia di volo e di resistenza al vento ed una bassa quota massima di volo.

Gli ala fissa hanno un aspetto simile ad un aereo, con una struttura planare composta da un'elica spingente e grandi ali. Non hanno la capacità di librarsi in verticale e per questo motivo necessitano di avere un percorso rettilineo sgombro per il decollo e l'atterraggio, hanno una capacità di carico molto bassa e possono eseguire soltanto riprese nadirali, ma hanno una maggiore resistenza al vento che garantisce un'elevata autonomia di volo ed una quota massima di volo molto elevata.

La scelta di utilizzare un drone multirottore oppure ad ala fissa dipende, oltre che alle caratteristiche peculiari delle due categorie, dalla finalità del rilievo che si deve eseguire, dalle caratteristiche dei prodotti finali da ottenere e dalle caratteristiche fisiche del sito da

rilevare. I multirotori possono essere utilizzati tranquillamente se si deve rilevare una zona con estensione limitata e si vuole ottenere un rilievo a grandissima scala con accuratze sub-centimetriche e pixel a uno o due centimetri; gli ala fissa possono essere impiegati in aree molto estese e si possono ottenere rilievi a grande scala con accuratze centimetriche e pixel a cinque centimetri.

La stazione di controllo a terra costituisce l'interfaccia tra il pilota remoto e il mezzo APR. È composta da: un radiocomando, con il quale è possibile pilotare il velivolo in remoto e controllare i parametri di controllo dello stato del mezzo (posizione, assetto, velocità di crociera, modalità di volo, stato dei motori, livello di carica delle batterie, distanza dal punto di decollo, qualità del segnale GPS); un ricevente montato sul velivolo; un PC o un *tablet* o uno *smartphone* con installato un *software* di controllo e configurazione dei parametri di volo, che in precedenza ha funto anche per la progettazione della traiettoria di volo.

I sensori presenti in un APR sono quelli che più influenzano la qualità del risultato del lavoro di rilievo e il carico del velivolo stesso, possono essere di due tipologie: i sensori di navigazione sono quelli che consentono il volo e la gestione autonoma delle missioni programmate; mentre i sensori per l'acquisizione dati si differenziano in base alla tipologia e finalità del rilievo da effettuare.

Nella prima tipologia troviamo:

- il giroscopio, consente di mantenere l'assetto nei tre assi nonostante eventi esterni tendano a modificarlo;
- l'accelerometro, consente di far individuare all'APR l'orizzonte rispetto al suolo, garantendo il riposizionamento automatico parallelo al suolo;
- il barometro, consente di conoscere e mantenere la quota relativa di volo mediante la rilevazione di variazioni di pressione dovuti al cambio di quota;
- il magnetometro, consiste in una bussola elettronica che, in combinazione con il GPS, definisce la posizione;
- il GPS, consente di stabilire la posizione del mezzo e di seguire le traiettorie preimpostate delle missioni;
- i sensori anti-collisione, consente di rilevare gli ostacoli in prossimità.

Nella seconda tipologia troviamo:

- le camere digitali RGB e le videocamere, per l'acquisizione di foto e video;
- le camere termiche, consentono un rilevamento della radiazione infrarossa;
- le camere multispettrali e iperspettrali, consentono il *proximal sensing*, cioè, svolgere telerilevamento satellitare utilizzando immagini da distanze ravvicinate;
- il sistema LiDAR, limitatamente a rilievi di prossimità poiché facilmente influenzabili dalla luce e dai materiali;
- il sistema di segnalazione a ultrasuoni (UBS), consentendo il posizionamento in luoghi privi di GPS;
- l'identificazione a radiofrequenza (RFID), per localizzare i materiali in sito.

I droni, quando vengono impiegati per scopi professionali, possono eseguire operazioni di ispezione, se la finalità è osservare un fenomeno o una situazione da una prospettiva preferenziale e, in questo caso, i voli vengono sostenuti in modalità manuale; oppure, se con le operazioni si vuole misurare dei dati metrici o delle caratteristiche fisiche tramite il sensore montato, la modalità più adeguata è quella automatica.²⁷

Come accennato in precedenza, gli APR hanno tre possibili diverse modalità di volo:

- automatico è possibile predeterminando la rotta di volo del velivolo attraverso la definizione di *waypoint* GPS (punti di coordinate note) o integrando il GPS con il *software* di pianificazione della traiettoria sul computer, i vantaggi includono una moderata esperienza richiesta ai piloti rispetto alle operazioni manuali e la capacità dei sistemi ad adattarsi ai cambiamenti delle condizioni climatiche;
- semi-automatico è caratterizzato dalla combinazione dell'autonomia del computer e dell'intervento umano, questi voli vengono adottati nel caso in cui i voli automatici possano essere interrotti per complessità di spazi confinati;
- manuale, in cui il pilota ha il controllo remoto del mezzo comandandolo da terra, viene utilizzato per prevenire qualsiasi rischio associato al volo autonomo del drone in luoghi specifici, come la vicinanza a edifici e strutture, oppure l'assenza di sensori anticollisione e di navigazione, o la regolamentazione.²⁸

²⁷ Lo Brutto M. (2016) *I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche.*

²⁸ Albeaino G. et al (2019) *A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain.*

1.2.2 Fotogrammetria e rilievo fotogrammetrico con SAPR

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di ottenere informazioni metriche (forma e posizione) di oggetti tridimensionali mediante interpretazione e misura su immagini fotografiche (fotogrammi) acquisite da due punti di vista differenti.

Con l'impiego della fotogrammetria:

- possiamo determinare le caratteristiche di oggetti senza avere contatto fisico;
- otteniamo un rilievo simultaneo di molti punti;
- dal momento che le misure vengono fatte a posteriori, a rilievo ultimato, possono essere ripetute, modificate e controllate;
- è possibile eseguire un rilievo a bassi costi, con rapidità esecutiva e uniformità di precisione;
- viene garantito un elevato dettaglio e fotorealismo.

È possibile distinguere la fotogrammetria aerea quando viene eseguita da satellite, aereo o drone, e fotogrammetria terrestre quando la distanza tra la camera e l'oggetto in analisi è di massimo 200 metri. In entrambi i casi i momenti principali del processo fotogrammetrico sono:

- la presa, cioè l'acquisizione delle immagini con opportune camere e con un'ampia sovrapposizione tra le foto;
- l'orientamento, cioè la determinazione dei parametri della trasformazione per passare da misure sull'immagine a misure sull'oggetto. Tali parametri riguardano l'orientamento interno, legato alle caratteristiche geometriche interne della camera; e l'orientamento esterno, derivante dalle coordinate di posizione della camera e dalle coordinate di assetto del velivolo, per i quali sono necessari dei punti omologhi sulle immagini e dei punti di coordinate note sul terreno (GCP);
- la restituzione, cioè la determinazione delle coordinate di molti punti per la ricostruzione dell'oggetto.

Il risultato del processo consente la ricostruzione 3D dell'oggetto fotografato, rispettandone metricamente le forme e le dimensioni sia sotto l'aspetto planimetrico che altimetrico.²⁹

Il rilievo fotogrammetrico con SAPR può essere suddiviso in cinque fasi:

²⁹ Menin A., *Dispense di topografia – Fotogrammetria*.

1) Progettazione dei voli

In questa fase si progetta l'esecuzione della futura ripresa aerea sulla base delle simulazioni del *software* di programmazione del volo, tenendo in considerazione le caratteristiche del sito di interesse e l'accuratezza e precisione che vogliamo ottenere dal risultato del rilievo. Viene definita:

- la localizzazione e il numero dei fotogrammi, viene quindi definito il blocco fotogrammetrico, cioè l'insieme delle strisciate fotogrammetriche che devono garantire una sovrapposizione (*overlap*) pari almeno al 70% tra le immagini, sia in senso longitudinale che trasversale, poiché per eseguire una corretta restituzione fotogrammetrica bisogna che i parametri esterni siano diversi ad ogni presa. Nella definizione della copertura a terra bisogna assicurarsi di volare anche fuori dall'area da rilevare, in modo che anche i margini siano ripresi da più foto;
- il *Ground Sampling Distance* (GSD) o risoluzione geometrica dell'immagine, ossia la dimensione reale espressa da un pixel dell'immagine rispetto all'oggetto rilevato, corrisponde alla scala media dell'immagine. Il GSD influenza il livello di dettaglio del fotogramma, più ha un valore basso e più diminuisce la dimensione dei dettagli che possono essere rappresentati in modo nitido. Esso è legato alla dimensione del sensore, alla distanza focale dell'obiettivo e alla distanza camera-oggetto; di conseguenza, in base alla precisione che si vuole ottenere, si può stabilire l'altezza di volo dell'APR;³⁰
- la procedura di presa durante il volo, se eseguire prese su *waypoint* predeterminati seguendo meglio lo schema di progetto e ottenendo foto migliori ma con la possibilità di aumentare i tempi di volo, oppure se effettuare prese in scatto continuo della camera riducendo i tempi di volo ma avendo una qualità inferiore delle immagini e meno accuratezza;³¹
- il tipo di camera, di obiettivi e di sensore;
- la scelta del tipo di velivolo APR;
- il periodo ottimale per l'acquisizione (stagione, ora, condizioni climatiche).³²

³⁰ Carraro F., *Fondamenti di fotogrammetria e rilievo fotogrammetrico da drone*.

³¹ Lo Brutto M. (2016) *I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche*.

³² Menin A., *Dispense di topografia – Fotogrammetria*.

2) Rilievo topografico dei punti di controllo (GCP)

Per eseguire correttamente un rilievo fotogrammetrico è indispensabile effettuare la misura topografica, mediante stazione totale o GPS, dei punti di controllo poiché fungono da vincolo metrico fondamentale del rilievo stesso dato che sono necessari per eseguire l'orientamento nel processo fotogrammetrico.³³ I *Ground Control Points* (GCP) costituiscono la rete di appoggio composta da punti di cui si conosce la distanza e/o la posizione nel sistema di riferimento di interesse.³⁴ In questa fase va considerata:

- la modalità di materializzazione dei punti, quindi se utilizzare punti naturali o punti presegnalati tramite *target*, prestando attenzione al dimensionamento e alla visibilità;
- il numero di punti totali, poiché più punti vengono materializzati e più preciso sarà il risultato in quanto alcuni verranno impiegati come *control points* per la georeferenziazione, mentre altri come *check points* per verificare l'accuratezza del rilievo;
- la disposizione dei punti nell'area del rilievo che deve innanzitutto coprire l'intera area, poi, in caso di terreni accidentati o salti di quota, deve essere incrementata la presenza di punti.

La scelta della modalità di acquisizione della posizione dei GCP può andare ad influire sul risultato del rilievo finale dal momento che, se misuro le coordinate con stazione totale o GPS in modalità statica ottengo precisioni migliori (centimetriche o sub centimetriche) ma l'acquisizione risulta più lenta e complessa; mentre, se misuro le coordinate tramite GPS in modalità RTK o NRTK, posso ottenere precisioni centimetriche ma in minor tempo e in maniera più agevole.

3) Esecuzione dei voli

Durante l'esecuzione della ripresa fotogrammetrica bisogna sempre fare attenzione all'autonomia di volo residua dell'APR. Essa è influenzata dal *payload* del mezzo stesso, cioè dalle varie tipologie di camere e sensori che influiscono, appunto, sull'autonomia, oltre che dal punto di vista qualitativo delle immagini. Risulta opportuno quindi avere delle batterie aggiuntive di riserva per il dispositivo per sostituirle tra un volo e l'altro oppure in caso di necessità o di imprevisti in campo.

³³ Lo Brutto M. (2016) *I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche*.

³⁴ Carraro F., *Fondamenti di fotogrammetria e rilievo fotogrammetrico da drone*.

4) Procedure di orientamento delle immagini (elaborazione fotogrammetrica)

In questa fase vengono determinati i parametri di orientamento fotogrammetrico, sia quelli esterni che consentono di calcolare la posizione e l'assetto della camera nell'istante dello scatto per ricostruire le relazioni geometriche tra l'immagine e l'oggetto fotografato applicando le relazioni analitiche della fotogrammetria per effettuare le misure sull'oggetto a partire dalle corrispondenti misure sulle immagini; sia quelli interni cioè la distanza principale, la posizione del punto principale e la distorsione dell'obiettivo della camera.

Dal processo di orientamento si ottiene una nuvola di punti sparsa che descrive approssimativamente l'oggetto in 3-D e i parametri per la stima delle precisioni del rilievo.

5) Produzione degli elaborati ed analisi dei dati

L'ultima fase, tramite procedure di *dense image matching*, cioè di autocorrelazione, restituisce l'elaborato finale del rilievo fotogrammetrico la nuvola di punti 3-D ad altissima densità. Da essa è possibile ottenere:

- il modello 3-D fotorealistico convertendo la nuvola in *mesh* con o senza *texture*;
- il DSM (*Digital Surface Model*), cioè il modello della superficie terrestre;
- il DTM (*Digital Terrain Model*) filtrando la nuvola si ottiene il modello soltanto della superficie del terreno, senza vegetazione o strutture antropiche;³⁵
- l'ortofoto, cioè una fotografia che ha la proprietà di essere una proiezione ortografica e quindi misurabile dell'area del rilievo.³⁶

³⁵ Lo Brutto M. (2016) *I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche.*

³⁶ <https://3dmetrica.it/ortofoto/>

1.3 Rilievi topografici mediante GPS: metodologia GNSS - RTK

L'acronimo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) individua l'insieme dei sistemi satellitari globali e regionali, di navigazione terrestre, aerea e marittima, che forniscono ovunque nel mondo, in ogni istante e con qualsiasi condizione climatica, la posizione di un osservatore a terra.

Tra i sistemi satellitari globali troviamo:

- GPS (*Global Positioning System*) dell'America;
- GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) della Russia;
- Galileo dell'Unione Europea;
- BeiDou della Cina.

Tra i sistemi satellitari regionali, cioè, finalizzati alla copertura di aree specifiche del globo, troviamo:

- QZSS (*Quasi Zenith Satellite System*) del Giappone;
- IRNSS (*Indian Regional Navigational Satellite System*) dell'India.

I GNSS vengono utilizzati in molteplici settori: nei servizi LBS (*Location Based Services*) come i servizi di geolocalizzazione; nelle applicazioni civili, ad esempio in auto per le indicazioni di navigazione, in agricoltura per l'agricoltura di precisione o in cantieristica per il controllo delle macchine; nel monitoraggio ambientale a supporto di studi previsionali sui terremoti o nello studio dei percorsi migratori delle specie animali; nelle applicazioni di rilevamento del territorio come strumento di posizione nelle misure geodetiche, geofisiche, idrografiche, topografiche e cartografiche.³⁷

I principali vantaggi dell'impiego dei sistemi GNSS nei rilievi sono: riuscire a determinare tridimensionalmente il punto, un'elevata produttività e precisione, non è necessaria la visibilità tra i punti da battere, non sono influenzati dalle condizioni meteorologiche, non ci sono limiti per le distanze da misurare e la facilità di utilizzo.

Alcuni svantaggi nell'utilizzo dei GNSS sono: il costo dei ricevitori, la necessità di visuali libere sopra i $15^\circ \div 20^\circ$ rispetto all'orizzonte dell'antenna, la sensibilità ai disturbi elettromagnetici e la necessità di passare da quote ellissoidiche a ortometriche.³⁸

³⁷ Guarnieri A., *I sistemi di posizionamento satellitare globale GNSS*.

³⁸ Guarnieri A., *Impiego della tecnologia GNSS nel rilievo del territorio*.

1.3.1 Il sistema GPS

Il progetto NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System*) è stato il primo sistema di posizionamento globale nato negli anni '70 ad opera del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America per scopi militari, con la possibilità di utilizzo anche da parte dei cittadini ma con minori precisioni. Ad oggi risulta essere il più famoso e ampiamente usato.

Il sistema GPS è stato progettato in modo tale da garantire globalmente, 24 ore su 24, la visibilità di almeno quattro satelliti, consentendo le operazioni di misura grazie alla determinazione del tempo impiegato da un segnale emesso da un satellite per giungere a un'antenna di ricezione terrestre.³⁹

Esso è composto essenzialmente da tre segmenti:

- il segmento spaziale

Rappresentato dalla costellazione di satelliti in orbita, i quali sono costituiti da: quattro orologi atomici molto stabili, un apparato di ricezione ed uno di trasmissione, una memoria, un apparato di autoalimentazione e un apparato di navigazione pilotabile da terra. Le funzioni principali dei satelliti sono:

- trasmettere informazioni agli utilizzatori attraverso un segnale complesso;
- ricevere e memorizzare informazioni trasmesse dal segmento di controllo;
- eseguire, su base limitata, analisi per mezzo del microprocessore di bordo;
- mantenere un segnale di tempo molto accurato;
- eseguire manovre di correzione dell'orbita con i razzi guidati dal segmento di controllo.⁴⁰

- il segmento di controllo

Costituito dalle cinque stazioni fisse a terra disposte equidistanti tra loro lungo la linea equatoriale: Hawaii, Colorado Springs, Ascension, Diego Garcia e Kwajalein. Le stazioni ricevono continuamente i segnali emessi da tutti i satelliti e svolgono molteplici funzioni, finalizzate al mantenimento della completa operatività del sistema:

- controllo delle orbite, dello stato di salute e della sincronia degli orologi dei satelliti;

³⁹ Menin A., *Dispense di topografia – Cenni sulla metodologia satellitare.*

⁴⁰ Achilli V., *Principi di funzionamento del sistema GPS.*

- correzione degli orologi e delle orbite con dei razzi pilotati da terra;
- trasmissione delle effemeridi trasmesse, cioè le coordinate del satellite calcolate sulla base delle orbite precedentemente compiute;
- aggiornamento dell'almanacco della costellazione, cioè delle coordinate delle orbite di tutti i satelliti della costellazione;
- elaborazione dei modelli di ionosfera e troposfera. ⁴¹

- il segmento utente

Formato da tutti gli utenti, civili e militari, dotati di un ricevitore in grado di captare, decodificare ed elaborare il segnale trasmesso dai satelliti per determinare la posizione.

Un ricevitore GPS è costituito: un'antenna, una batteria di alimentazione, uno schermo di controllo e dall'elettronica necessaria per ricevere, registrare il segnale ed eseguirne una prima elaborazione. ⁴² Esso svolge in sequenza le seguenti funzioni:

- selezionare uno o più satelliti visibili;
- agganciare i satelliti e acquisire i segnali;
- mantenere l'aggancio con i satelliti selezionati;
- estrarre i dati di navigazione dal segnale;
- calcolare la posizione, la velocità e il tempo.

I ricevitori GNSS vengono classificati in base alla costellazione che possono acquisire (singola, doppia o multipla) e ai segnali che possono elaborare (solo codice, mono frequenza, doppia frequenza o segnali multipli).

Il segnale GPS viene generato dagli orologi atomici di ogni satellite ed è composto da:

- due portanti sinusoidali (L1 e L2) trasportano i codici binari per la modulazione di fase e servono anche per eliminare diverse cause di errore;
- due codici binari (C/A e P) vengono usati dal ricevitore per calcolare la distanza satellite-ricevitore e, di conseguenza poi, la posizione. Da essi è anche possibile identificare univocamente il satellite che li ha emessi. Il codice C/A modula solamente la portante L1 ottenendo una precisione inferiore rispetto al codice P che modula entrambe le portanti;

⁴¹ Guarnieri A., *I sistemi di posizionamento satellitare globale GNSS*.

⁴² Achilli V., *Principi di funzionamento del sistema GPS*.

- un messaggio di navigazione (D) contenente informazioni relative sia al singolo satellite come l'identificativo, l'ora e data, la posizione lungo l'orbita prevista, ma anche informazioni sull'intera costellazione come l'almanacco dei satelliti e il modello ionosferico.

La posizione del ricevitore viene calcolata per trilaterazione misurando, cioè, la distanza tra esso ed almeno quattro satelliti, tre dei quali necessari per determinare le coordinate del ricevitore e uno per eseguire la sincronizzazione dell'orologio del ricevitore con quello del satellite. La distanza ricevitore-satellite viene calcolata misurando il tempo di propagazione, cioè il tempo che impiega il segnale per viaggiare nel vuoto dal satellite al ricevitore. Tale tempo di propagazione viene determinato confrontando il segnale ricevuto dal satellite, da misure di codice o di differenza di fase, con una replica generata nel ricevitore.

La massima precisione ottenibile nella misura della distanza ricevitore-satellite è legata al tipo di misura utilizzata nel confronto tra i due segnagli, con il metodo della pseudodistanza, cioè l'impegno dei codici si può arrivare ad un'accuratezza di una decina di metri, con il metodo dell'osservabile fase e quindi con la differenza di fase delle portanti, si può raggiungere precisioni fino a due millimetri.⁴³

1.3.2 Gli errori nel sistema GNSS

Le principali fonti di errori nel posizionamento satellitare, che influiscono sulla precisione del risultato, sono legate a fattori relativi a:

- errori nella misura della distanza ricevitore-satellite dovuti al disturbo del segnale durante la propagazione dal satellite al ricevitore. In questa categoria troviamo:
 - errore d'orbita dei satelliti, cioè uno scostamento della posizione del satellite rispetto a quella prevista dalle effemeridi che genera un errore nella posizione del ricevitore a terra;
 - errore di sfasamento degli orologi dei satelliti, viene calcolato dalle stazioni di controllo e riportato nel messaggio di navigazione;

⁴³ Guarnieri A., *I sistemi di posizionamento satellitare globale GNSS*.

- rifrazione ionosferica, il segnale attraversando la ionosfera (parte alta dell'atmosfera a 40-100 Km) viene rifratto per la presenza di elettroni liberi subendo un ritardo. Il disturbo ionosferico varia in funzione della latitudine, dell'ora del giorno, della stagione e dell'attività solare e può essere attenuato attraverso le osservazioni notturne quando l'attività ionosferica è minima, le correzioni differenziali mediante combinazione di osservazioni simultanee di due ricevitori, l'utilizzo di ricevitori multifrequenza oppure grazie al modello matematico calcolato dalle stazioni di controllo e trasmesso nel messaggio di navigazione D;
 - rifrazione troposferica, il segnale attraversando la troposfera (parte bassa dell'atmosfera fino a 40 Km) viene ritardato da fattori atmosferici come pressione, temperatura e umidità ed è aggravato se il satellite ha una bassa elevazione sull'orizzonte rispetto al ricevitore. Il disturbo troposferico può essere ridotto impostando un angolo di elevazione minimo dei satelliti sotto il quale il ricevitore non acquisisce i segnali provenienti da essi, oppure applicando correzioni differenziali o mediante il modello troposferico standard contenuto nel messaggio di navigazione;
 - effetto *multipath*, quando all'antenna arriva un segnale diretto dal satellite e uno riflesso dalle superfici circostanti, può portare ad un aumento della distanza tra satellite e ricevitore e quindi ad un errato posizionamento. Lo si può eliminare grazie ad un particolare *design* dell'antenna stessa che rimuove i segnali riflessi, oppure effettuando lunghe sessioni di misura o impiegando degli algoritmi di rimozione;
 - interferenze elettromagnetiche che interferiscono con il segnale GPS aumentando il rumore, per evitarle bisogna posizionare il ricevitore a distanza da tralicci dell'alta tensione, ripetitori per la telefonia o centrali di distribuzione dell'energia elettrica;
 - errore di sfasamento dell'orologio del ricevitore rispetto al tempo GPS.
- errori dell'utente come il posizionamento in prossimità di sorgenti di *multipath* o di interferenze elettromagnetiche, l'errata misura dell'altezza dell'antenna, l'esecuzione di tempi di osservazioni troppo brevi con misure effettuate in modo

frettoloso oppure l'imprecisione nel centramento del punto a terra e nella verticalità dell'antenna.

- effetto della geometria satellitare influisce sulla precisione del posizionamento in modo variabile nel tempo a causa del moto continuo lungo le orbite che varia la distribuzione geometrica dei satelliti. L'effetto della configurazione geometrica satellitare rispetto al ricevitore è quantificabile mediante il fattore adimensionale DOP (*Dilution Of Precision*) che indica l'incertezza di un posizionamento. A seconda della componente del posizionamento considerata il DOP è riferito a diversi indicatori:
 - HDOP (*Horizontal DOP*) indica la qualità planimetrica della precisione e misura la grandezza degli errori DOP in latitudine e longitudine;
 - VDOP (*Vertical DOP*) riferito alla qualità della precisione altimetrica e misura la grandezza degli errori DOP nella componente verticale;
 - PDOP (*Position DOP*) concerne la qualità della precisione del posizionamento 3D, esprimendo la relazione fra l'errore nella posizione del ricevitore e quello nella posizione dei satelliti, si lega HDOP e VDOP;
 - TDOP (*Time DOP*) riguarda la riduzione della precisione in funzione dell'errore di determinazione del tempo causato dallo sfasamento dell'orologio del ricevitore rispetto al tempo GPS;
 - GDOP (*Geometric DOP*) rappresenta l'indice della degradazione della posizione in senso tridimensionale e del tempo, associando gli errori di posizione del ricevitore, agli errori di tempo ed errori di distanza ricevitore-satellite, unendo quindi il PDOP al TDOP.

Il dato DOP più utile per stabilire gli effetti della geometria satellitare è il GDOP in quanto è combinazione di tutti gli altri fattori. Il miglior modo per ridurre al minimo gli effetti del GDOP è quello di osservare il maggior numero possibile di satelliti per un opportuno tempo di osservazione poiché minore è il tempo di osservazione e maggiore è l'influenza del DOP.

1.3.3 Tecniche di posizionamento GNSS: metodologia RTK

Esistono varie tecniche di posizionamento con differenti precisioni finali ottenibili e si differenziano in base a una diversa combinazione di quattro criteri:

- il numero di ricevitori usati (posizionamento assoluto, relativo o differenziale);
- quanto tempo di stazione sul punto (osservazioni statiche permanendo sui punti per un determinato periodo o cinematiche con il ricevitore in movimento);
- quando si elaborano le misure acquisite (tempo reale o post-processato);
- il tipo di grandezza misurata (differenza di tempo tra codici o differenza di fase tra portanti).

Il posizionamento assoluto è eseguito con un solo ricevitore, con la possibilità di acquisire sia misure di codice che di fase ed in modalità statica o cinematica in tempo reale. Le coordinate del punto sono determinate in un sistema di riferimento globale e le precisioni sono scarse in quanto il segnale ricevuto dal ricevitore è influenzato da tutte le sorgenti di errore.⁴⁴

Nel posizionamento relativo vengono stimati le posizioni di punti incogniti rispetto a un punto di coordinate note, determinando le componenti del vettore *baseline* che li unisce, impiegando due ricevitori che acquisiscono in contemporanea, un ricevitore master che occupa in modo statico il punto noto e un ricevitore rover che occupa il punto incognito in maniera statica o cinematica per battere più punti. Attraverso il calcolo delle componenti del vettore è possibile ridurre o eliminare alcuni errori comuni ai segnali ricevuti dagli stessi satelliti. In funzione della lunghezza della base e del tempo di rilievo con elaborazione post-processata, ossia al termine dell'acquisizione dei dati in campagna, si possono ottenere accuratezze intorno al centimetro o anche millimetriche in caso di rilievi statici con misure di fase, oppure maggiori al centimetro se il rilievo è cinematico con misure di codice o fase. A pari tempo di rilievo, l'accuratezza dipende dalla lunghezza della *baseline* e non è possibile stimare basi molto lunghe con sessioni brevi.⁴⁵

Il posizionamento differenziale è possibile svolgerlo con due ricevitori oppure con uno solo, in modo analogo a quello assoluto, ma con la possibilità di eliminare o ridurre gli errori sistematici grazie alle correzioni che la stazione fissa base, mentre staziona sul

⁴⁴ Guarnieri A., *Impiego della tecnologia GNSS nel rilievo del territorio*.

⁴⁵ Menin A., *Dispense di topografia – Cenni sulla metodologia satellitare*.

punto noto, calcola in tempo reale, quindi direttamente in campo, e trasmesse al rover mediante una connessione radio-modem continua. In base al tipo di grandezza osservata, il posizionamento differenziale in tempo reale viene indicato con:

- DGPS (*Differential GPS*) in cui si trasmettono correzioni per le misure di codice con precisione decimetrica (10 ÷ 50 cm) fino a 20-30 Km di distanza;
- RTK (*Real Time Kinematic*) dove si trasmettono correzioni per le misure di fase con precisione centimetrica (1 ÷ 5 cm) fino a 15-20 Km di distanza.

Le correzioni differenziali sono applicate soltanto ai dati dei satelliti comuni osservati da base e rover. Le differenti distanze operative dalla stazione base sono dovute al fatto che all'aumentare della distanza base-rover diventa più difficile correggere i disturbi della ionosfera e troposfera, riducendo la precisione della tecnica RTK.

Come precedentemente accennato, questo metodo di posizionamento può essere eseguito anche con un solo ricevitore, il rover, quindi senza il ricevitore master, utilizzando dei servizi di correzione in tempo reale:

- sistemi di posizionamento SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) forniscono correzioni solo per misure di codice (DGPS) in tempo reale da uno o più satelliti geostazionari con precisioni che vanno da 50 cm a un metro in planimetria e fino a due metri in altimetria;
- rete di stazioni permanenti GNSS, operando quindi in modalità NRTK (*Network RTK*), viene creata una cooperazione tra le stazioni permanenti della rete che consente l'elaborazione congiunta dei dati acquisiti dalle stazioni della rete stessa per fornire servizi di correzione gratuiti o a pagamento.

Con una struttura di rete, la tecnica RTK può essere impiegata fino a distanze di 100 km dalle stazioni permanenti, mantenendo la precisione omogenea (da 30 a 45 mm in planimetria e da 40 a 55 mm in altimetria) in tutta l'area della rete poiché le correzioni non sono influenzate dalle caratteristiche di un'unica stazione permanente ma da un modello di correzione dell'errore ionosferico e troposferico applicato su scala regionale.⁴⁶

⁴⁶ Guarnieri A., *Impiego della tecnologia GNSS nel rilievo del territorio*.

Una stazione permanente GNSS si compone di un ricevitore, che può essere controllato localmente da un PC o connesso remotamente a un centro di controllo, e della relativa antenna, in acquisizione 24 ore su 24, monumentata stabilmente.

Una rete di stazioni permanenti si compone di un insieme di stazioni permanenti, con una distribuzione omogenea sulla porzione di territorio interessata, e da uno o più centri di controllo che gestiscono le stazioni permanenti e ne garantiscono la manutenzione, l'assimilazione dei dati e il monitoraggio della qualità degli stessi, l'elaborazione, il calcolo delle coordinate delle stazioni permanenti e la distribuzione di dati e prodotti all'utenza. Le reti di stazioni permanenti per servizi di posizionamento hanno lo scopo di favorire l'utilizzo dei metodi GNSS per le applicazioni di rilevamento, controllo del territorio e posizionamento in generale, garantendo vantaggi come alte accuratèzze e bassi tempi ma con fattori di costo e complessità bassi.⁴⁷

1.3.4 Procedura del rilievo topografico con metodologia a rete RTK

Le fasi principali del rilievo topografico sono: la ricognizione, eseguita su carta o su Google Earth in cui si individua e viene definita l'area del rilievo per identificare la morfologia del luogo e la presenza di manufatti o di altri ostacoli sullo stesso, in sito, invece, si valuta le possibili problematiche dell'intervento (ostacoli aerei, vegetazione, case, strade, accessibilità ai luoghi) e si prende nota degli stessi scattando anche foto; le misurazioni di campagna, realizzate con apposita strumentazione per ottenere le grandezze ricercate; il calcolo, effettuato mediante apposito *software* e la restituzione dei dati.

Il metodo RTK con collegamento GNSS permette di determinare e visualizzare in tempo reale le coordinate 3D di molti punti ed è il metodo più usato per tutte le fasi del rilievo topografico a terra, visto la possibilità di eseguire il rilievo con una sola antenna su palina in collegamento radio con il centro di controllo di una rete GNSS che funge da punto di coordinate note e trasmette le correzioni ai dati registrati.

⁴⁷ Menin A., *Dispense di topografia – Cenni sulla metodologia satellitare.*

L'organizzazione del rilievo mediante rete RTK deve prevedere: il collegamento a Internet, la verifica delle batterie di alimentazione e di tutto l'equipaggiamento necessario e la progettazione della sessione di misura. ⁴⁸

Il posizionamento in tempo reale con rete RTK richiede in campo una continua attenzione da parte dell'operatore che, oltre ad individuare i punti da rilevare e a misurare l'altezza dell'antenna del rover, deve allo stesso tempo, tenere sotto controllo i valori di alcuni parametri indicativi della qualità del rilievo stesso come il numero di satelliti osservati ($n. \geq 5$), i parametri DOP relativi alla geometria satellitare, e il ritardo delle correzioni (latenza $< 2\text{sec}$). In particolare, sul *display* del ricevitore è possibile osservare il valore di un apposito indicatore che informa l'operatore sulla precisione raggiunta nella misura della distanza ricevitore-satellite:

- FIXED per correzioni alle misure di fase con massima precisione possibile (cm);
- FLOAT per correzioni alle misure di fase con precisione inferiore (dm);
- CODE per correzioni di solo codice (DGPS) con precisione sub-metrica;
- STD per nessuna correzione ricevuta con precisione metrica. ⁴⁹

⁴⁸ D'Apostoli R., Giampaolo F. (2018) *Guida pratica al rilievo topografico con GPS e stazione totale*.

⁴⁹ Guarnieri A., *Impiego della tecnologia GNSS nel rilievo del territorio*.

1.4 Obiettivi

L'obiettivo generale per questo progetto di tesi è esaminare le potenzialità dell'utilizzo dei SAPR su ampie superfici per l'analisi di una porzione del reticolo idrografico minore della provincia di Padova, col fine di ottenere un risultato georeferenziato, aggiornato e accurato della zona. In contemporanea si vuole andare ad integrare i rilievi terrestri eseguiti mediante GNSS a mezzo di rete RTK con i rilievi aerei fotogrammetrici da drone del reticolo idrografico per determinare la sezione dei canali e, di conseguenza la loro capacità di portata, essendoci la necessità di eseguire delle analisi idrauliche della zona. Per analizzare la superficie dei Laboratori Nazionali di Legnaro si vuole impiegare inizialmente, per una prima analisi, la tecnologia della *Digital Earth*, in particolare del *software* Google Earth Pro, al fine di ricavare il posizionamento di ciascun edificio facente parte i laboratori, ottenendo la distanza relativa tra gli edifici, la viabilità interna e i confini; conducendo parallelamente uno studio sull'evoluzione della tipologia di copertura del suolo, analizzando la quantità e l'incremento di superficie impermeabile nel corso del tempo. Infine, per avere dei risultati di maggior dettaglio, si vuole utilizzare il sistema dei SAPR per eseguire il rilievo del terreno e dei fabbricati appartenenti ai LNL ottenendo l'ortofoto e il modello tridimensionale degli stessi per poter, successivamente, eseguire delle analisi valutative sul loro stato.

Per giungere agli obiettivi che vedono impiegati i SAPR e il sistema GNSS, i Laboratori Nazionali di Legnaro si sono rivolti allo *staff* del master GIScience e Sistemi a Pilotaggio Remoto dell'Università degli Studi di Padova, che hanno messo a disposizione le loro conoscenze tecniche e organizzative e tutte le attrezzature necessarie per i rilievi.

1.5 Area di studio: inquadramento geografico, contesto e problematica

1.5.1 Inquadramento geografico dell'area

I LNL sono collocati in provincia di Padova in Veneto, a circa una decina di chilometri in direzione sud-est dal centro storico, nel comune di Legnaro e si sviluppano su una superficie di 19 ettari.

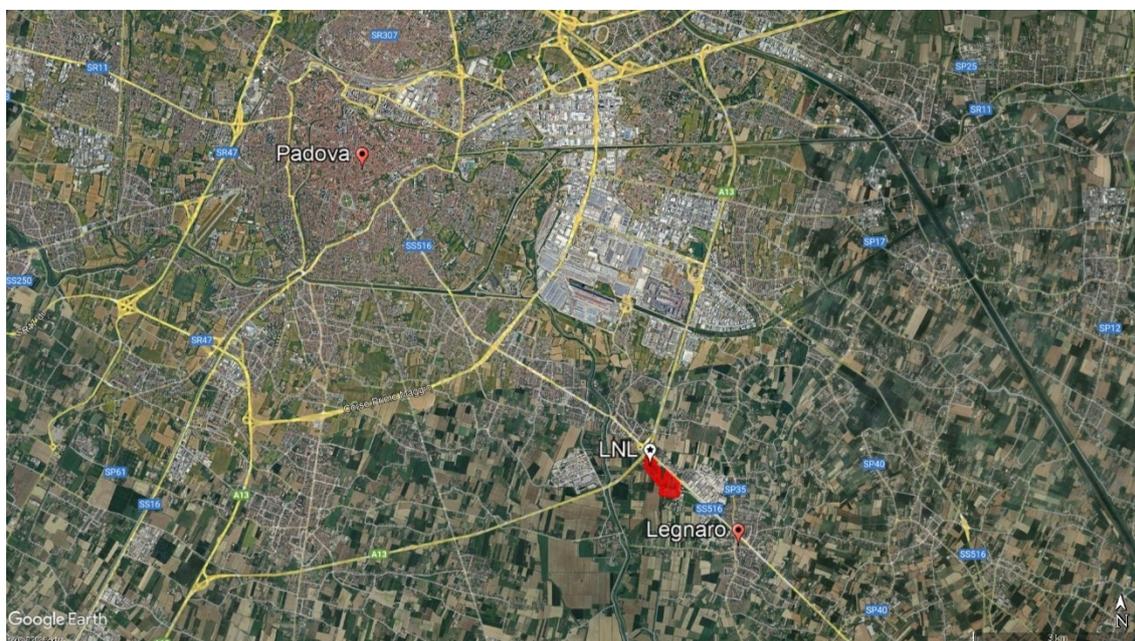


Figura 1: Inquadramento geografico LNL (alt. 17,30 Km)



Figura 2: Inquadramento geografico LNL (alt. 1,70 Km)

Essi confinano: a nord con un edificio privato, un campo ad uso agricolo, il canale Orsaretto e la Strada Statale Piovese; a est con una strada comunale (Viale dell'Università); a sud con l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo"; infine, a ovest con il canale Orsaro, dei campi agricoli e una strada comunale (Via Roma).

Per quanto riguarda la rete idrografica minore è compresa nell'area dei fiumi Bacchiglione e Brenta; quindi, risulta in gestione al Consorzio di bonifica Bacchiglione che si occupa dell'esercizio e manutenzione degli impianti e dei corsi d'acqua minori (canali di scolo) nel territorio dai Colli Euganei fino alla laguna di Venezia.⁵⁰

La porzione di reticolo minore che è stata presa in analisi è situata nel comune di Legnaro ed è delineata a nord dallo scolo Sagredo, a est da via Vittorio Emanuele II e da via Roma, a sud da via Orsaretto e via Francesco Petrarca, mentre a ovest dal canale Roncajette (derivazione del fiume Bacchiglione). Dalle carte tematiche⁵¹ rese disponibili dal consorzio risulta che l'area di interesse è appartenente al distretto Destra Brenta e che, sotto l'aspetto idraulico, il deflusso delle acque è di tipo naturale.

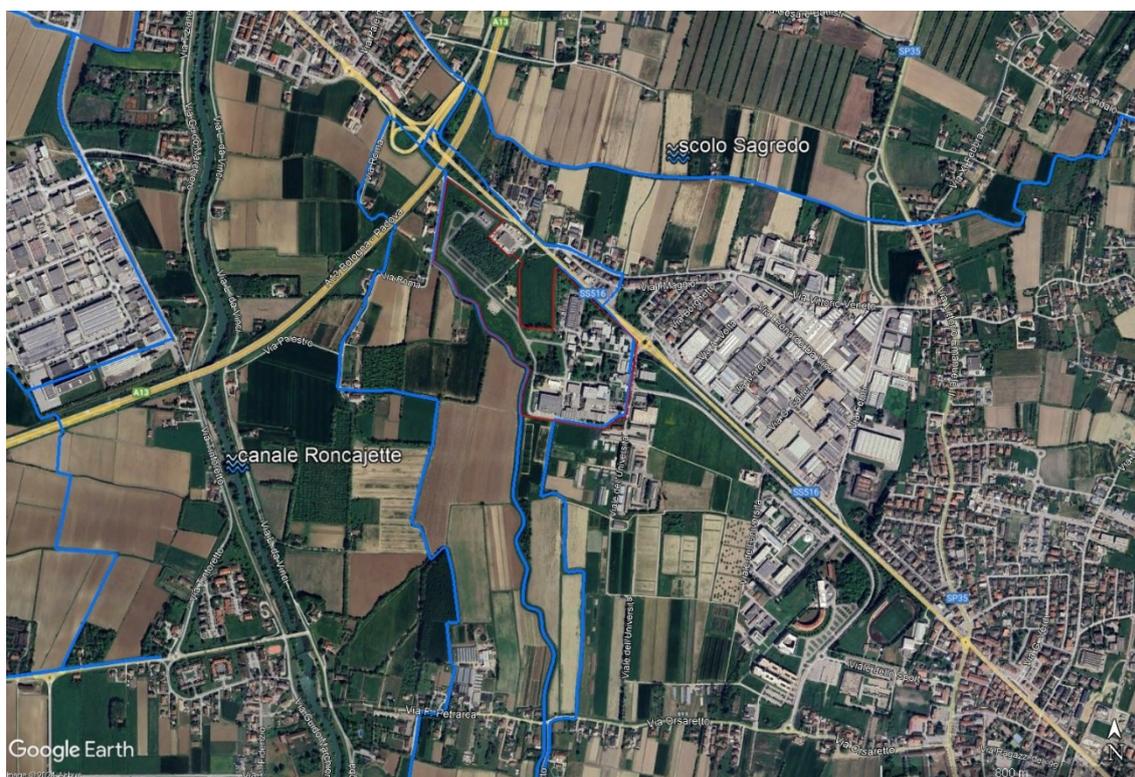


Figura 3: Inquadramento geografico rete idrografica minore (alt. 3,00 Km)

⁵⁰ <https://www.consorziobacchiglione.it/il-consorzio/chi-siamo.html>

⁵¹ <https://www.consorziobacchiglione.it/il-consorzio/carte-tematiche.html>

1.5.2 I Laboratori Nazionali di Legnaro: dalla fondazione ad oggi

I Laboratori Nazionali di Legnaro vennero fondati nel 1961 come Centro Ricerche Nucleari della regione Veneto e, a partire dal 1968, divennero il secondo laboratorio nazionale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Fin dalla loro fondazione i LNL si sono ampliati e innovati, sia in termini di nuovi campi di ricerca e studio nell'ambito della fisica, che in termini prettamente materiali come nuovi edifici per la ricerca scientifica e le relative strutture per il corretto funzionamento e controllo delle stesse.⁵² Ad oggi i laboratori svolgono ricerca nei campi della fisica delle particelle, fisica delle astroparticelle, fisica nucleare e ricerca tecnologica, contando la presenza di tre grandi acceleratori di particelle nucleari e due piccoli acceleratori per studi delle proprietà di materiali, radiobiologia, fisica dell'ambiente e della salute.⁵³

1.5.3 Motivazione e scopo dei rilievi

Durante lo svolgimento del tirocinio formativo di orientamento curricolare presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è stata esposta la necessità di eseguire un rilievo degli edifici che compongono i laboratori e dell'area non edificata facente parte degli stessi. In seguito, tale necessità, è stata annessa ad un progetto di rilevamento più ampio, consistente nel rilievo aereo fotogrammetrico con drone congiunto ad un rilievo satellitare a terra di tutta l'area dei laboratori e del reticolo idrografico minore che li circonda.

Prendendo in esame il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni del Distretto delle Alpi Orientali è stato possibile constatare che l'area appartenente ai Laboratori Nazionali di Legnaro è classificata nella carta della pericolosità idraulica⁵⁴ come pericolosità idraulica media (P2); mentre nella carta del rischio idraulico⁵⁵ si ha un rischio moderato (R1) nella maggior parte dell'area e un rischio medio (R2) in una porzione di territorio ridotta.

Vengono riportate in seguito le definizioni di pericolosità e rischio disponibili nelle norme tecniche di attuazione del PGRA:

⁵² <https://www.lnl.infn.it/i-laboratori-di-legnaro/>

⁵³ <https://www.lnl.infn.it/wp-content/uploads/OpuscoloInl.pdf>

⁵⁴ https://www.comune.legnaro.pd.it/c028044/images/Urbanistica_Territorio/Varie/PGRA/AH22_PI.pdf

⁵⁵ https://www.comune.legnaro.pd.it/c028044/images/Urbanistica_Territorio/Varie/PGRA/AH22_RI.pdf

- “*pericolosità*” probabilità che un fenomeno di una determinata intensità si verifichi in un certo periodo di tempo e in una data area;
- “*rischio*” probabilità che un fenomeno naturale o indotto dall’attività dell’uomo possa causare effetti dannosi sulla popolazione, gli insediamenti abitativi e produttivi, le infrastrutture o altri beni in un certo periodo di tempo e in una data area.⁵⁶

Nonostante le carte prese in esame indichino che i laboratori sorgano in un’area, come visto, a pericolosità e rischio idraulico medio-basso, la presenza dei sopracitati acceleratori di particelle e l’intenzione dell’ente di ampliarsi e di costruire nuovi edifici nei prossimi decenni, ha fatto sì che sorgesse l’interesse nell’eseguire un’indagine dettagliata e precisa rilevando:

- lo stato di fatto degli edifici odierni esistenti;
- l’area non edificata appartenente ai laboratori per ottenere un piano del terreno quotato per progettare, con la consapevolezza delle possibili problematiche, i nuovi edifici in programma;
- il reticolo idrografico minore che circonda i laboratori con il fine di eseguire un’analisi idraulica specifica e minuziosa della zona di interesse.

⁵⁶ https://www.comune.legnaro.pd.it/c028044/images/Urbanistica_Territorio/Varie/PGRA/Norme%20Tecniche%20Attuazione_6_.pdf

2. MATERIALI E METODI

2.1 Definizione dell'area dei LNL e analisi del reticolo idrografico minore

Il primo *software* impiegato per analizzare la superficie dei Laboratori Nazionali di Legnaro è stato Google Earth Pro. Grazie ad esso è stato possibile ricavare il posizionamento di ciascun edificio appartenente ai LNL, la distanza relativa tra di essi, la viabilità interna (sia pedonale che carrabile) e i confini, ricostruendo l'evoluzione della tipologia di copertura del suolo e mettendo in comparazione la quantità di superficie permeabile con quella impermeabile, studiandone l'incremento nel corso del tempo, e riportando poi il tutto in delle tabelle riepilogative generate nel *software* Excel.

Google Earth Pro è stato utilizzato anche per tracciare il *file* KML del reticolo idrografico minore preso in analisi, necessario per la successiva importazione dello stesso nel *software* di progettazione del volo del drone per eseguire il rilievo fotogrammetrico.

2.1.1 Definizione edificato e confini

L'analisi della superficie odierna dei laboratori, con la collocazione degli edifici, la viabilità e i confini è stata eseguita prendendo come riferimento l'immagine satellitare di Google Earth Pro acquisita in data 25 marzo 2021. In un momento successivo all'inizio di quest'analisi, sono state rese disponibili ulteriori due immagini più recenti dell'area di studio, con data di acquisizione 20 luglio 2023 e 14 aprile 2024.

Per eseguire il posizionamento degli edifici sull'immagine del 2021, si sono indicati i confini dei laboratori e applicati i 'segnaposto' per nominare gli edifici; poi, su di essa, una volta individuato il punto di contatto tra l'edificio e il suolo, con il fine di una più corretta analisi delle superfici e delle distanze tra i fabbricati, sono state riportate le misure ricavate dalle planimetrie in AutoCAD in formato dwg, derivanti da un precedente rilievo degli edifici e messe a disposizione dalla Divisione Tecnica dei LNL. Sulla foto satellitare sono state inserite tutte le misure dei lati, mediante lo strumento 'righello', dei 25 fabbricati che compongono i laboratori e, utilizzando la funzione 'poligono' di GEP, si è potuto ottenere il perimetro e l'area degli stessi. Durante questa fase, man mano che venivano inserite le dimensioni degli edifici, è stata controllata la congruenza tra 'Edificio

3D' generato dal *software* e le misure stesse. Applicando questa metodologia si è riusciti ad inserire le vere dimensioni degli edifici in quanto, se si fossero semplicemente ricalcati i perimetri degli stessi, sarebbero risultati distorti.

Successivamente si è passato a mappare le zone verdi, le strade, i percorsi pedonali e le piattaforme in cemento. Per fare ciò si è utilizzato ancora una volta lo strumento 'poligono', ricalcando il perimetro dei vari spiazzi erbosi e cementificati. Nelle zone in cui la chioma degli alberi o parti degli edifici andavano a coprire il percorso pedonale sottostante, è stata eseguita un'uscita in campo per verificare lo stato attuale dei camminamenti e rilevare manualmente, utilizzando il metro, le dimensioni degli stessi per riportarli nell'elaborato finale.

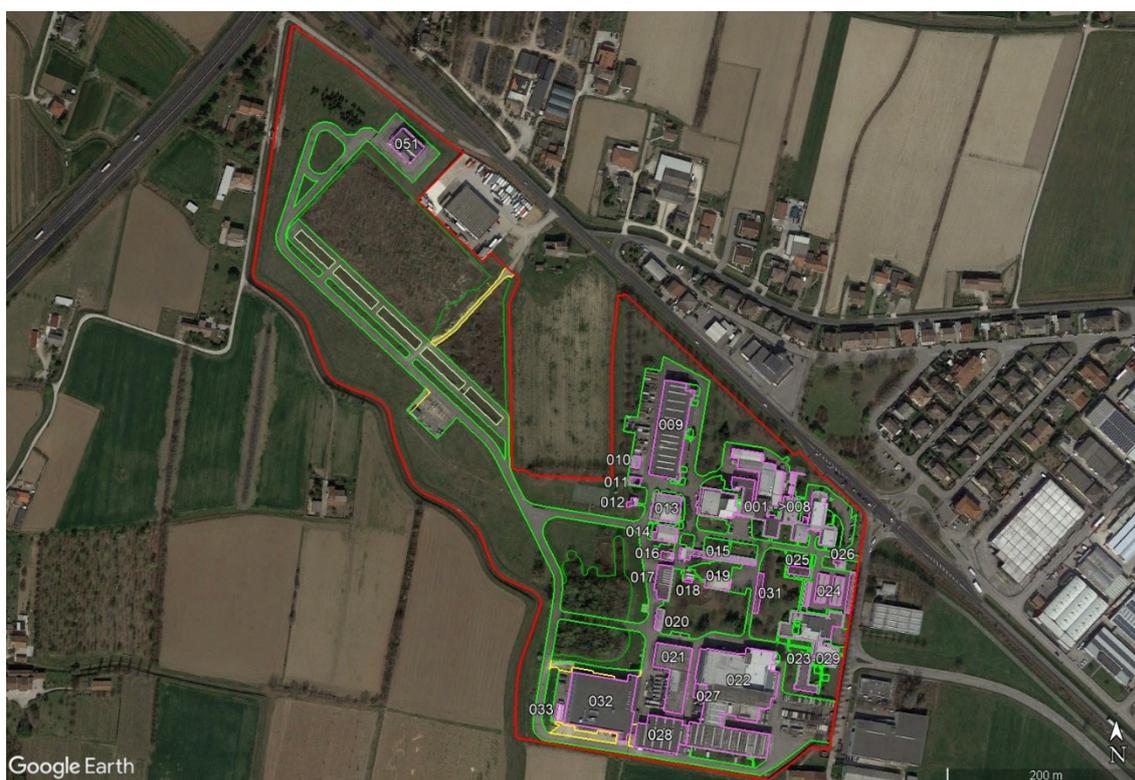


Figura 4: Definizione edificato e confini (alt. 1,00 Km)

Per raccogliere e ordinare i vari poligoni creati in questa prima fase è stata creata una cartella nei 'luoghi' di GEP relativa allo studio dell'immagine del 2021, contenente il poligono del confine dei laboratori e due sottocartelle, una relativa alle superfici permeabili e l'altra per le impermeabili. All'interno della prima sono contenuti tutti i poligoni che identificano una zona di erba, parcheggio drenante, ghiaia o vegetazione fitta, mentre nella seconda cartella sono raccolti i poligoni relativi ai contorni degli edifici.

Questa catalogazione dei poligoni in cartelle è stata applicata anche alla conseguente analisi diacronica delle superfici, creando più cartelle ciascuna riferita a una specifica immagine storica analizzata.

2.1.2 Analisi diacronica edificato e superfici

Lo studio sull'evoluzione della costruzione dei fabbricati e sull'uso del suolo dei LNL è stato condotto prendendo in analisi delle immagini storiche di Google Earth Pro, selezionando quelle con miglior qualità grafica e con un intervallo temporale tra di esse il più possibile regolare. Si sono quindi analizzate le immagini storiche acquisite il:

- 28 giugno 2016
- 14 marzo 2014
- 16 marzo 2012
- 26 maggio 2009
- 31 luglio 2004

Non disponendo di immagini a discreta qualità antecedenti il 2004 su GEP, si è eseguita una ricerca nel Geoportale della Regione del Veneto, nella sezione Aerofototeca ⁵⁷, accedendo alle riprese aeree eseguite dalla Regione del Veneto a partire dal 1978, e ad altri voli storici eseguiti da enti differenti. Per il comune di Legnaro risultavano consultabili 18 voli, di cui 13 anche scaricabili. Non tutti i voli scaricabili, tuttavia, immortalavano l'area dei laboratori e si è dovuta eseguire una selezione degli stessi. I fotogrammi scaricati e successivamente analizzati risultano essere stati acquisiti in data:

- 10 agosto 1997
- 03 maggio 1994
- 02 ottobre 1990
- 12 aprile 1981

Avendo a disposizione quattro fotogrammi aerei e otto immagini satellitari, è stato possibile costruire l'evoluzione dei laboratori negli ultimi 40 anni. Durante i primi 20 anni dalla loro fondazione però, non risultano disponibili foto aeree sufficientemente nitide per distinguere i fabbricati. Per non lasciare questo vuoto temporale all'inizio

⁵⁷ <https://idt2.regione.veneto.it/portfolio/aerofototeca/>

dell'analisi storica del territorio, consultando il sito *web* dei Laboratori Nazionali di Legnaro, nella sezione dedicata alle foto storiche ⁵⁸, si sono individuate delle foto di vari voli ritraenti i fabbricati acquisite in prospettiva aerea risalenti agli anni:

- 1967
- 1963
- 1961

Ovviamente, essendo queste ultime immagini in prospettiva, quindi non si ha la visione completa nel piano orizzontale dei laboratori, lo studio sull'uso del suolo risulta molto spannometrico e approssimativo. Si è comunque ritenuto interessante inserire i dati ricavati da queste foto per completare lo studio dell'evoluzione dei laboratori dalla loro fondazione fino ad oggi.

Una volta concluso il posizionamento degli edifici, la rappresentazione della viabilità interna e la definizione delle zone verdi, per l'immagine acquisita nel 2021; utilizzando lo strumento 'immagini storiche' è stato possibile effettuare uno scorrimento temporale per spostarsi tra le diverse date di acquisizione, esaminando le immagini relative agli anni: 2024, 2023, 2016, 2014, 2012, 2009 e 2004. Per ciascun anno è stata osservata la situazione delle costruzioni, della viabilità e del verde, andando a modificare i poligoni in base ai cambiamenti che si sono rilevati da un'immagine a quella precedente.

Conclusa la raccolta di immagini storiche disponibili su Google Earth Pro, sono state inserite le immagini aeree, scaricate dal Geoportale della Regione del Veneto. Per fare ciò è stato utilizzato il comando 'overlay immagine', andando a selezionare l'immagine che ci interessava e successivamente procedere con il posizionamento, rotazione e dimensionamento della stessa per farla combaciare con l'immagine di riferimento sottostante. In seguito, è stato applicato lo stesso procedimento di osservazione dell'area dei laboratori, rettificando i poligoni degli oggetti disegnati alla realtà del passato.

Per completare l'analisi, come accennato in precedenza, sono state prese in esame anche delle foto storiche dei laboratori in prospettiva aerea, con le quali è stato possibile rappresentare il confine e i poligoni degli edifici e del verde in maniera approssimativa in base a ciò che si poteva dedurre dalle immagini a disposizione.

⁵⁸ <https://gallery.lnl.infn.it/index.php?/category/22>

L'ultima operazione eseguita in Google Earth Pro consiste nella stampa della produzione cartografica, mediante il comando 'salva immagine', di ogni immagine analizzata con i relativi *layer* degli oggetti disegnati.

Terminata la fase di disegno degli edifici e dell'erba con la differenziazione delle superfici per i vari anni, grazie ad un foglio di calcolo del *software* Excel, sono state impostate delle tabelle, una per ogni immagine analizzata, in cui vengono elencati tutti i poligoni disegnati in GEP con la relativa area in metri quadri. Questa informazione è stata ottenuta sul *software* stesso mediante la lettura delle proprietà di ciascun poligono. Nelle tabelle sono contenuti tutti i dati numerici del progetto di analisi dell'uso del suolo, mettendo in particolare evidenza la percentuale di suolo utilizzato, differenziata anche per il tipo di utilizzo, nei diversi anni. Il calcolo della percentuale dell'area è stato eseguito prendendo come superficie di riferimento totale quella degli odierni confini dei LNL, mantenendola costante anche per gli anni passati, nonostante i vari cambi di confini che si sono susseguiti nel tempo.

2.1.3 Estrazione del reticolo idrografico minore

Per individuare i canali di scolo appartenenti al reticolo minore si è fatto riferimento alla mappa disponibile sul sito *web* del Consorzio di bonifica Bacchiglione ⁵⁹, nella quale sono indicati i corsi d'acqua consorziali.

Tenendo come riferimento la mappa del Consorzio, si è andati a delineare la rete minore in Google Earth Pro mediante fotointerpretazione a grande scala (1:2000-1:1000) utilizzando il comando 'aggiungi percorso' e servendosi, come base, dell'immagine satellitare acquisita in data 20 luglio 2023. I percorsi sono stati tracciati ponendoli nell'asse centrale del canale di scolo e sono stati nominati seguendo la nomenclatura del Consorzio, appuntando nella descrizione anche eventuali particolarità rilevate, come la presenza di un tratto tombinato, ed evidenziandole con il comando 'segnaposto'.

In totale sono stati tracciati quattro scoli e cinque diramazioni per una lunghezza totale del reticolo idrografico minore da analizzare di 11,76 Km.

Di seguito sono riportati i canali consorziali con relativo nome, lunghezza e particolarità:

⁵⁹ <https://www.consorziobacchiglione.it/servizi/mappa-canali.html>

- scolo Orsaro di 3,26 Km con un tratto tombinato di percorso incerto passante sotto la Strada Statale Piovese;
- scolo Sagredo di 1,76 Km con tratto tombinato di percorso incerto passante sotto l'incrocio tra Via Vittorio Emanuele II e Via XI Febbraio;
- scolo Orsaretto di 2,57 Km con due tratti tombinati, il primo passante sotto Via Vittorio Veneto, Via I Maggio e la Strada Statale Piovese, mentre il secondo lungo i confini dei laboratori lato est e parte del nord e sud (per tracciarlo è stata consultata la documentazione presente in archivio dei LNL in merito alla “nuova inalveazione dello scolo consortile Orsaretto con tombamento di un tratto”);
- scolo Vecchio Orsaretto di 0,23 Km;
- scolo Orsaretto Diram. Viale dell'Università di 0,51 Km;
- scolo Orsaretto Diram. di 2,69 Km con un tratto tombinato con percorso incerto passante sotto il raccordo tra Corso Sandro Pertini e la Strada Statale Piovese;
- scolo Orsaretto Diram. Via Roma di 0,35 Km;
- scolo Orsaretto Diram. A13 di 0,29 Km;
- scolo Orsaretto Diram. Isolafior di 0,1 Km.

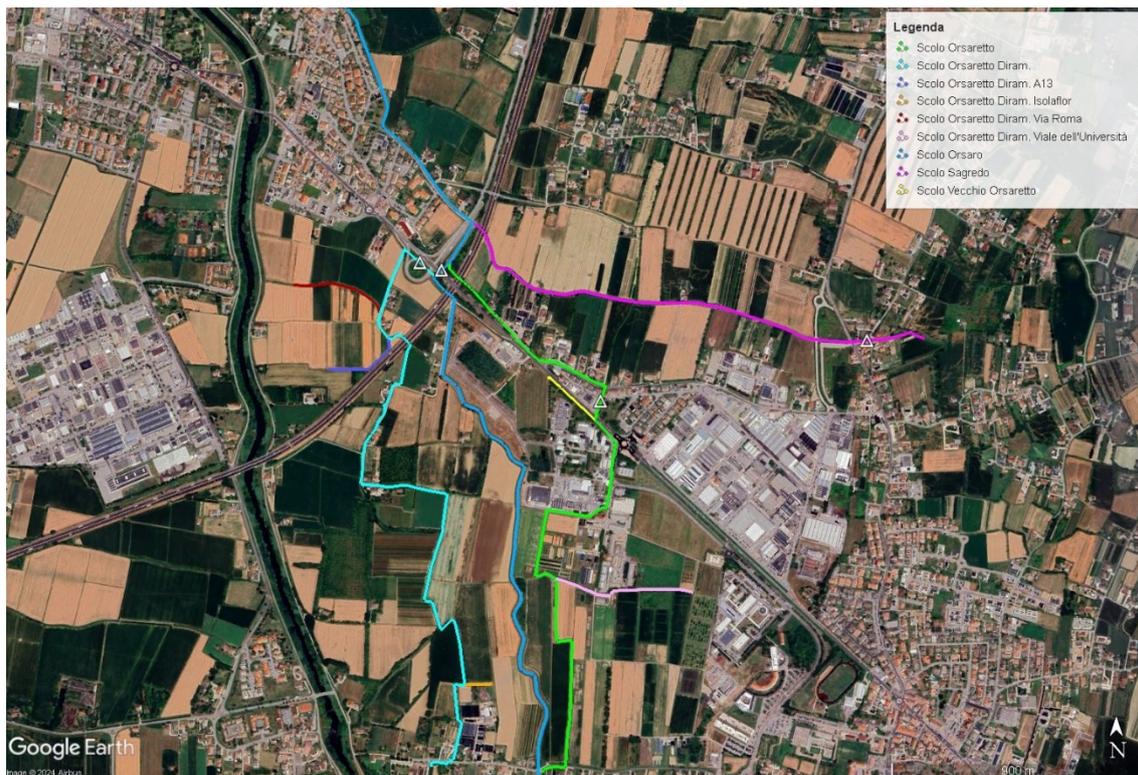


Figura 5: Reticolo idrografico minore (alt. 3,50 Km)

2.2 Utilizzo di SMASH

SMASH *Digital field mapping* è un'applicazione di mappatura digitale del terreno, sviluppata da HydroloGIS S.r.l. e disponibile gratuitamente per sistemi Android e iOS, che permette anche agli utenti meno esperti di raccogliere dati geospaziali in campo utilizzando dispositivi elettronici, come *tablet* o *smartphone*, per eseguire rapidi rilievi qualitativi in ambito ingegneristico, geologico, agricolo o archeologico.

Lo scopo principale di SMASH è avere uno strumento facilmente trasportabile e sempre a portata di mano quando serve, avendo la possibilità di scattare fotografie georeferenziate ed orientate durante un rilievo con anche la possibilità di importarle successivamente in applicazioni GIS, permettendo di migliorare significativamente la qualità e l'efficienza della raccolta dati sul campo. È possibile lavorare con SMASH anche in modalità *offline* e, grazie all'interfaccia semplice e intuitiva, risulta facile da usare poiché consente di eseguire solo le funzionalità più basilari ma essenziali come:

- rilevare i punti di interesse specifici contrassegnandoli e descrivendoli sul campo;
- raccogliere immagini georeferenziate e annotazioni per ogni punto rilevato;
- registrare tracce GPS acquisendo dati di localizzazione ad alta precisione;
- importare ed esportare dati verso e da sistemi di informazione geografica in modo agevole;
- visualizzazione cartografica per la navigazione con supporto di dati raster e vettoriali;
- supporto di geo pacchetti (standard OGC) per l'interoperabilità con vari formati di dati geospaziali.⁶⁰

SMASH è stato utilizzato per eseguire un primo sopralluogo del reticolo idrografico minore in esame andando ad accertare la larghezza dei corsi d'acqua, per poi poter impostare l'ampiezza della ripresa dal drone nel piano di volo, e a stabilire l'accessibilità dei canali in termini di proprietà, quindi se si trovasse su suolo pubblico o privato e dove si potesse fare stazione per il decollo e atterraggio, e di modalità di raggiungimento, se fosse possibile utilizzare l'auto o bisognasse raggiungerlo a piedi.

⁶⁰ <https://www.geopaparazzi.org/smash/index.html>

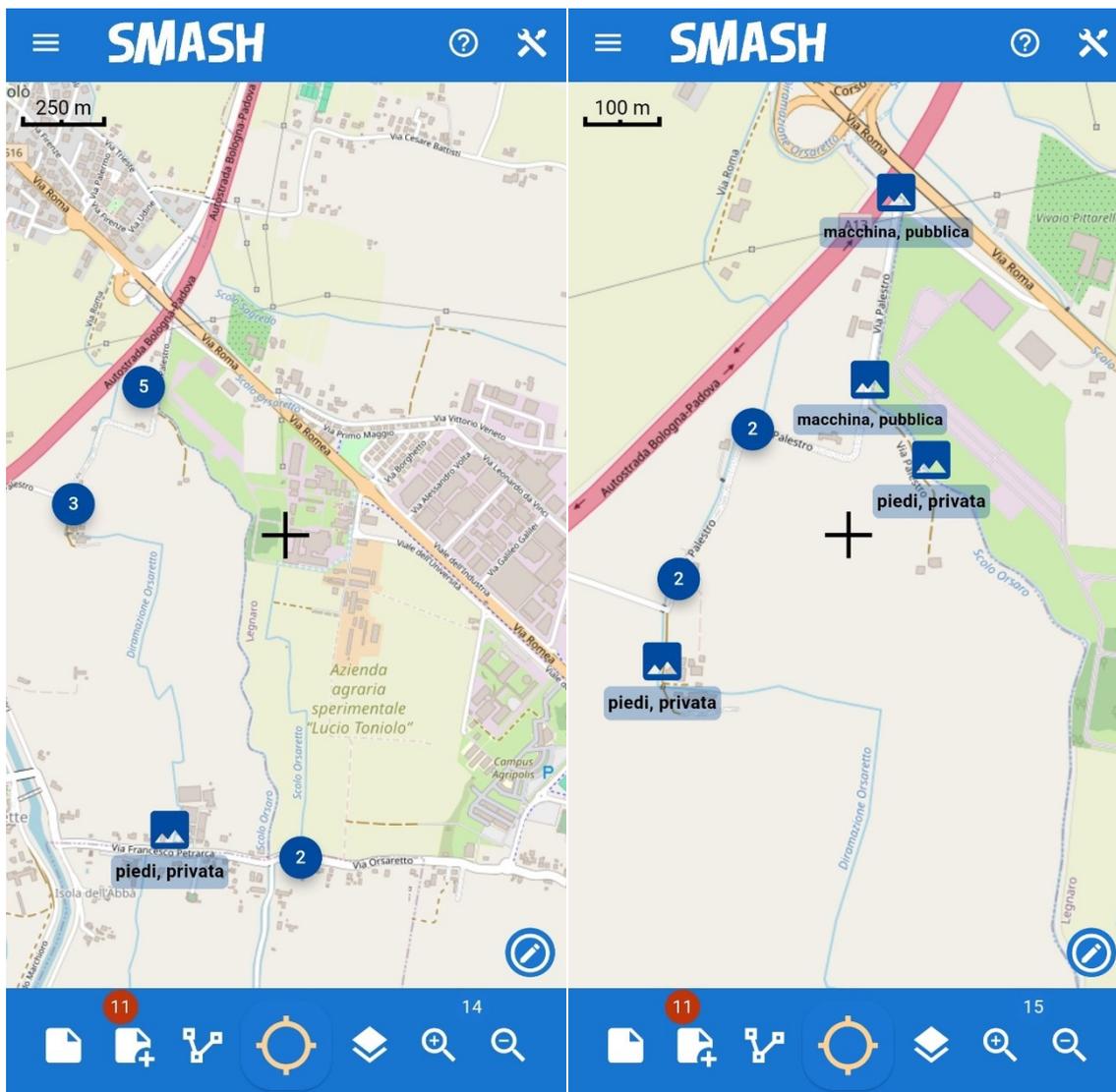


Figura 6: Interfaccia SMASH

Il sopralluogo in questione è stato svolto per esaminare la porzione ovest e sud del reticolo idrografico minore poiché era quella che presentava maggiori incertezze non deducibili da uno studio mediante Google Earth Pro, acquisendo delle foto georeferenziate per i punti reputati di interesse e specificando nelle note descrittive delle stesse la modalità usata per arrivarci e la proprietà dei terreni circostanti.

Terminato il sopralluogo effettuato con lo *smartphone* in campo è stato possibile esportare le foto acquisite durante l'uscita, con il relativo posizionamento e descrizione, in formato JPG e il file KML di tutto il rilievo, attraverso il quale sono state caricate in Google Earth Pro le immagini con le informazioni raccolte.



Figura 7: Foto georeferenziate da SMASH in Google Earth Pro (alt. 2,20 Km)



Figura 8: Foto B di SMASH



Figura 9: Foto D di SMASH



Figura 10: Foto G di SMASH



Figura 11: Foto M di SMASH

L'analisi dell'accessibilità del reticolo idrografico minore condotta con l'impiego dell'applicazione SMASH è stata integrata successivamente ad un'analisi eseguita mediante il *software* Google Earth Pro in cui si sono stati esplicitati i tratti dei canali consorziali accessibili:

- tramite automobile in zona pubblica;
- tramite automobile in zona privata;
- a piedi in zona pubblica;
- a piedi in zona privata.

La finalità di tale analisi è quella di avere un quadro chiaro di dove il reticolo si sviluppa per poter programmare le modalità di spostamento durante le giornate di rilievo dello stesso e chiedere eventualmente l'autorizzazione e il permesso per accedere a determinati luoghi in proprietà privata agli abitanti o alle aziende.

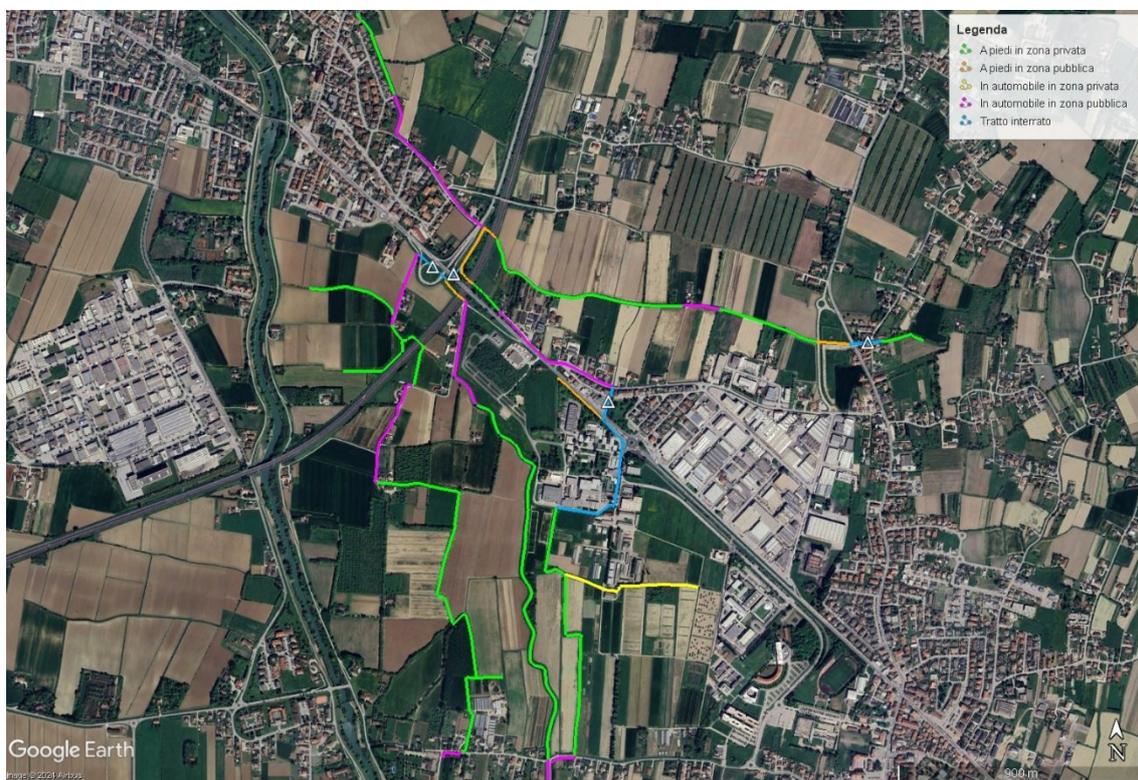


Figura 12: Accessibilità reticolo idrografico minore (alt 3,60 Km)

2.3 Utilizzo di UgCS

UgCS di SPH Engineering è un *software* di pianificazione, monitoraggio e controllo delle missioni di volo APR che garantisce una pianificazione professionale delle missioni per eseguire una varietà di applicazioni come i rilievi fotogrammetrici, le indagini LiDAR, le ispezioni verticali e sulle linee elettriche, i rilievi magnetici a bassa quota, minerari o in *streaming* video.

Le principali caratteristiche offerte dal *software* sono:

- pianificazione delle missioni permettendo agli operatori di creare percorsi di volo personalizzati, dettagliati e complessi utilizzando mappe 2D e 3D, riuscendo a definire *waypoint*, altitudini, velocità e altre variabili del volo;
- interfaccia intuitiva che rende facile la navigazione e il controllo del drone mostrando dati in tempo reale come posizione e stato del drone;
- compatibilità *multiplatform* supportando una vasta gamma di droni e sistemi operativi consentendo agli utenti di utilizzarlo per diverse tipologie di rilievo;
- monitoraggio della salute e prestazioni del drone durante il volo come, ad esempio, il livello di carica della batteria, i motori, i sensori e altri componenti;
- funzionalità per la gestione delle zone di *no-fly*, avvisi di sicurezza e protocolli di emergenza per garantire operazioni sicure;
- integrazione con vari sensori come fotocamere, LiDAR e altri strumenti di rilevamento per diverse applicazioni;
- registrazione dei dati di volo per analisi post-missione.⁶¹

UgCS consente il rilevamento del territorio utilizzando la tecnica della fotogrammetria per rilievi areali e lineari, suddividendo il flusso di lavoro di pianificazione del volo in:

- 1) specificazione del risultato desiderato, ovvero stabilire il GSD, i confini dell'area da rilevare e l'*overlap* tra le immagini;
- 2) importazione di una mappa accurata e dati di elevazione (facoltativo), di *default* UgCS fornisce l'accesso a dati di elevazione SRTM, se i piloti vogliono effettuare una pianificazione del volo più accurata possono caricare ortomosaici e/o dati di elevazione provenienti da rilievi o fornitori di dati satellitari;

⁶¹ <https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs>

- 3) pianificazione della missione che è composta da una pianificazione iniziale in cui si definisce l'area di rilevamento del drone manualmente o importando un *file* KML e si imposta il GSD, l'*overlap* e l'azione di controllo della fotocamera, e una convalida del percorso in cui si controlla il percorso fotogrammetrico calcolato automaticamente ed eventualmente lo si modifica o integra aumentando o diminuendo i *waypoint* oppure impostando un punto di decollo e atterraggio sicuro per il mezzo;
- 4) distribuzione dei punti di controllo a terra (facoltativo) per allineare con precisione l'*output* del rilievo con le coordinate sulla Terra, il pilota può schierare i punti di controllo a terra se vuole ottenere la massima precisione e accuratezza del risultato, oppure utilizzare solo il PPK (cinematica di post-elaborazione) per precisioni sufficientemente buone;
- 5) esecuzione del volo della missione;
- 6) creazione di tag geografici per le immagini (facoltativo) che può essere eseguita durante il volo automaticamente o in UgCS dopo l'atterraggio del drone e consente di taggare le immagini riprese dal drone con le coordinate della telemetria registrata;
- 7) elaborazione dei dati utilizzando *software* di terze parti disponibili sul mercato come Pix4D Mapper, Agisoft Metashape o altri strumenti professionali che supportano generazioni di nuvole di punti dense e GCP.⁶²

2.3.1 La pianificazione del *corridor mapping*

Il *corridor mapping* è uno strumento di pianificazione del volo di UgCS che consente l'ispezione di oggetti lineari, cioè, che si sviluppano prevalentemente lungo una direzione, come linee elettriche, strade e fiumi. In queste missioni, i droni possono essere equipaggiati con fotocamere la cui impronta del sensore copre l'elemento da rilevare con una certa sovrapposizione (sia in avanti che lateralmente) e, in base al GSD specificato, viene calcolata automaticamente l'altitudine di volo.

L'elemento "corridoio" da rilevare viene definito specificando determinati parametri:

- *turn type*, cioè il tipo di svolta che può essere:

⁶² <https://www.sphengineering.com/news/ugcs-photogrammetry-tool-for-uav-land-survey-missions>

- *stop and turn*, l'APR vola verso il primo punto, si ferma e poi vola verso il punto successivo;
 - *bank turn*, l'APR non si ferma al punto ma taglia l'angolo e lo attraversa senza fermarsi;
 - *straight*, l'APR vola direttamente alla posizione specificata come latitudine, longitudine e altitudine;
 - *spline*, l'APR vola verso la posizione specificata come latitudine, longitudine e altitudine ma su percorsi smussati invece che su linee rette.
- *width* indica la larghezza del “corridoio” in metri, quindi rispetto alla linea centrale c'è un margine di metà *width* a sinistra e a destra;
 - *speed*, velocità di volo lungo il percorso;
 - *camera* del mezzo da utilizzare per le acquisizioni fotografiche;
 - GSD da impostare in base all'accuratezza del risultato che si vuole ottenere;
 - *forward overlap* ossia la percentuale di sovrapposizione in avanti;
 - *side overlap* ossia la percentuale di sovrapposizione laterale;
 - *camera top facing forward* riguarda l'orientamento della telecamera rispetto al vettore di movimento, se attivo la telecamera sia orientata in modo che i fotogrammi si sovrappongano sul bordo superiore, altrimenti si sovrappongono lateralmente tra di loro;
 - *AGL Tolerance* è la differenza di altezza consentita quando è impossibile inserire *waypoint* aggiuntivi;
 - *avoid obstacles* per evitare gli ostacoli imprevisti;
 - *altitude mode* indica il riferimento di altitudine utilizzato dal drone per il volo e può essere impostata su AMSL (*Above Mean Sea Level*) per volare ad altezza costante rispetto al livello medio del mare o AGL (*Above Ground Level*) per volare a distanza verticale costante dal suolo;
 - *action execution* indica quando devono essere eseguite le azioni, si possono impostare per solo il punto di partenza, per ogni punto o per ogni punto di passaggio;
 - *no action at last point* per non eseguire azioni nell'ultimo punto.

Il calcolo del percorso fotogrammetrico del “corridoio” viene determinato rispettando delle regole cardine quali:

- le passate sono sempre parallele alla linea centrale del corridoio;
- se il corridoio può essere coperto da una sola passata, essa coincide con la linea mediana;
- se un solo passaggio non è sufficiente, verranno eseguiti il minor numero possibile di passate per coprire la superficie;
- la traiettoria del drone viene mantenuta sempre all’interno del “corridoio”.⁶³

2.3.2 Pianificazione del volo sul canale consortile

UgCS è stato impiegato come *software* per la pianificazione, controllo e configurazione dei parametri di volo per effettuare i rilievi del reticolo idrografico minore in esame. Come visto in precedenza, il reticolo si estende linearmente lungo 11,76 Km in totale, sviluppandosi nel tessuto rurale e cittadino intersecando strade, autostrade, diverse proprietà e varia vegetazione. Per questo motivo e per il fatto che l’APR con il quale si è deciso di eseguire i rilievi si tratta di un drone multirottore a quattro eliche, un DJI Mavic 2 Pro con sensore fotografico Hasselblad da 1 pollice di grandezza⁶⁴, si è dovuto necessariamente suddividere il reticolo in più segmenti, pianificando più missioni in diverse giornate di rilievo.

In seguito, viene illustrata la pianificazione del rilievo con il metodo del *corridor mapping* di una porzione del reticolo minore, nello specifico viene analizzato il tratto di scolo Orsaretto di 734 m che costeggia via Vittorio Veneto e la Strada Statale Piovese, e il tratto di scolo Orsaro di 178 m situato tra l’autostrada A13 e a corso Sandro Pertini, per un totale di 912 m (Figura 14).



Figura 13: DJI Mavic 2 Pro

⁶³ <https://manuals-ugcs.sphengineering.com/v4.20/docs/photogrammetry-corridor>

⁶⁴ <https://www.dji-store.it/prodotto/dji-mavic-2-pro/>



Figura 14: Canali consorziali oggetto del rilievo (alt. 900 m)

Come prima operazione della pianificazione si è stabilito il GSD pari a 1 cm/pixel, poiché il rilievo serve per svolgere una successiva analisi idraulica del reticolo, era essenziale avere valori bassi per ottenere risultati più dettagliati. Per la stessa motivazione si è deciso di effettuare una strisciata di acquisizione delle immagini sia in andata che al ritorno e di impostare un ampio *overlap* sia in avanti che lateralmente pari all'80% del fotogramma. Gli altri parametri di volo definiti per condurre il rilievo mediante *corridor mapping* sono:

- *turn type* come *stop and turn*;
- *width* di 50 m;
- *speed* di 3,00 m/s;
- *AGL Tolerance* di 3 m;
- *altitudine mode* impostata su AGL;
- *action execution* eseguita ad ogni punto.

Queste impostazioni di volo sono state applicate alla missione dei tratti di canali da rilevare. A causa della presenza di un traliccio della luce nell'intervallo dello scolo Orsaretto che scorre parallelo alla SS516, dalla fine della strada sterrata fino all'autostrada

A13, è stato tuttavia necessario aumentare il GSD a 2 cm/pixel per poter alzare la quota di volo a 80 m diversamente che a 40 m come per gli altri tratti per evitare l'ostacolo, e il *width* è stato portato a 100 m affinché il drone effettuasse le due strisciate fotografiche desiderate, gli altri parametri invece sono rimasti invariati.

La definizione in UgCS del tracciato da rilevare, a causa della presenza di diversi ostacoli, è stata eseguita manualmente suddividendo i canali da rilevare in quattro voli separati con i relativi punti di decollo e atterraggio. In totale sono stati posizionati 83 *waypoint*, ciò vuol dire che ogni 11 metri circa di canale è stata eseguita un'acquisizione fotografica per una durata complessiva totale stimata dei voli di 17 minuti. Concluso il tracciamento della rotta e l'immissione dei parametri di volo, compresa anche l'impostazione del comportamento della camera posizionata a 90° per eseguire le riprese nadirali, la pianificazione della missione di volo risultava terminata e la si è potuta importare sul mezzo.

In campo, prima di eseguire i voli con il drone, sono stati distribuiti un totale di 34 punti di controllo a terra che sono stati rilevati, mediante GPS collegato ad una rete RTK, prestando attenzione al numero di satelliti visibili, alla precisione della misurazione e a mantenere l'ortogonalità dell'asta del ricevitore durante la misurazione. Oltre ai GCP sono stati misurati anche due transetti del canale, battendo quindi la quota del fondale, per poter ricreare il profilo della sezione dello scolo nelle posteriori analisi idrauliche.



Figura 15: Pianificazione *corridor mapping* dei canali

Per acquisire le immagini necessarie a produrre il modello 3D degli edifici sono stati pianificati ulteriori tre voli, prevedendo la variazione dell'inclinazione della camera montata sul drone, tra uno e l'altro, ed eseguendo quindi delle riprese a 90° , 70° e 45° rispetto al piano del terreno. Sull'area del rilievo, focalizzandosi nelle zone tra gli edifici di interesse, sono stati distribuiti e misurati 19 GCP e sono stati utilizzati gli stessi parametri di volo di quelli precedenti, con la differenza però che in questo caso è stata abilitata la funzione della *double grid* che ha consentito di aggiungere una seconda griglia al rilievo con un angolo di 90° rispetto alla prima per ottenere un campionamento più fitto e dettagliato degli edifici.



Figura 17: Ricevitore GNSS



Figura 18: Area per i voli a doppia griglia del modello 3D

2.4 Utilizzo di Agisoft Metashape Professional

Una volta eseguite le uscite in campo a Legnaro per l'esecuzione dei voli con il drone e la battitura dei punti di controllo a terra con il GPS, è stato possibile iniziare la restituzione grafica degli elaborati desiderati avvalendosi della fotogrammetria digitale, cioè la tecnica che permette di ottenere, a partire da una serie di immagini bidimensionali che riprendono lo stesso oggetto da più angolazioni, dei modelli tridimensionali che sono geometricamente e metricamente corretti, ossia che angoli, distanze e proporzioni si mantengono coerenti a quello che è l'oggetto nella realtà.

Di seguito viene illustrato il procedimento seguito per la restituzione degli elaborati relativi ai canali consorziali eseguito mediante il *software* Agisoft Metashape Professional che ha consentito di sviluppare tutta la catena produttiva del processo fotogrammetrico quindi dalla realizzazione della nuvola di punti (*point cloud*), alla superficie chiusa derivante dall'interpolazione della nuvola di punti (*mesh*), alla realizzazione della vestizione fotografica della *mesh* (*texture*), fino ad arrivare alla creazione di modelli digitali di elevazione come il DSM (modello digitale della superficie) e il DTM (modello digitale del terreno) e, infine, alla produzione dell'ortofoto ovvero l'immagine in cui ogni elemento viene visto in maniera zenitale risultando metricamente e geometricamente corretto oltre che georeferenziato, a differenza di una normale foto aerea scattate dall'alto che è influenzata dalle distorsioni dovute alla prospettiva.⁶⁵

Nel rilievo in campo sono state scattate durante i quattro voli un totale di 266 foto e sono stati misurati mediante un ricevitore GNSS multi-costellazione (GPS, Galileo e GLONASS) 34 punti a terra uniformemente distribuiti lungo le sponde del canale e materializzati grazie a dei *target*, le cui coordinate di latitudine, longitudine ed elevazione acquisite sono state successivamente scaricate dallo strumento e importate in Google Earth Pro per una prima visualizzazione (Figura 19). Le medesime coordinate dei punti, dopo la trasformazione dal sistema WGS84 al sistema di riferimento locale regionale RDN2008 - EPSG:7791/UTM zona 32N con i valori Est, Nord e quota ortometrica, sono state riportate in un *file* di testo per poterle utilizzare in seguito in un processo durante la restituzione in Metashape (Tabella 1).

⁶⁵ Carraro F., *Dalla fotogrammetria all'analisi dei modelli 3D*.

Nome	Est	Nord	Quota	Latitudine	Longitudine	Elevazione	Elevazione_1	Altezza_An	Qualità
1f	730790.9690000000040978	5026859.432000000029802	7.4570000000000000	45°21'26,01712"N	11°56'47,87939"E	53,221	51,319	1,902	PD Fixed
2f	730770.763999999966472	5026884.7630000000268221	7.0190000000000000	45°21'26,86083"N	11°56'46,99450"E	52,785	50,883	1,902	PD Fixed
3f	730731.2240000000045635	5026924.4749999999627471	6.9790000000000000	45°21'28,19285"N	11°56'45,24625"E	52,747	50,845	1,902	PD Fixed
4f	730704.0600000000005879	5026947.5230000000044703	7.1130000000000000	45°21'28,97090"N	11°56'44,03808"E	52,882	50,98	1,902	PD Fixed
5f	730699.391999999992549	5026945.3980000000044703	7.1130000000000000	45°21'28,90766"N	11°56'43,82025"E	52,882	50,98	1,902	PD Fixed
6f	730770.748000000021420	5026875.0590000000357628	6.8260000000000000	45°21'26,654681"N	11°56'46,97747"E	52,591	50,689	1,902	PD Float
7f	730743.939999999944121	5026900.182000000029802	7.0810000000000000	45°21'27,39159"N	11°56'45,78915"E	52,848	50,946	1,902	PD Fixed
8f	730686.40800000000054017	5026959.4479999999858439	7.5200000000000000	45°21'29,37775"N	11°56'43,24789"E	53,289	51,387	1,902	PD Fixed
9f	730687.0369999999894761	5026963.080000000074506	6.9730000000000000	45°21'29,49453"N	11°56'43,28283"E	52,742	50,84	1,902	PD Fixed
10f	730680.2630000000035390	5026977.0429999999597669	6.6660000000000000	45°21'29,95444"N	11°56'42,99536"E	52,436	50,534	1,902	PD Fixed
11f	730652.1180000000016764	5027005.9450000000298023	6.5740000000000000	45°21'30,92309"N	11°56'41,75200"E	52,346	50,444	1,902	PD Fixed
12f	730615.1040000000050291	5027040.9740000000394881	6.6560000000000000	45°21'32,10056"N	11°56'40,11175"E	52,429	50,527	1,902	PD Fixed
13f	730679.7090000000031665	5026962.908999999985099	7.5570000000000000	45°21'29,49768"N	11°56'42,94616"E	53,327	51,425	1,902	PD Fixed
14f	731113.9250000000046566	5026700.2490000000767410	6.8720000000000000	45°21'20,48261"N	11°57'02,43573"E	52,622	50,72	1,902	PD Fixed
15f	731107.0870000000057742	5026701.1459999999716878	6.7810000000000000	45°21'20,51974"N	11°57'02,12337"E	52,532	50,63	1,902	PD Fixed
16f	731108.6679999999830499	5026708.1109999999567866	6.8500000000000000	45°21'20,74328"N	11°57'02,20764"E	52,601	50,699	1,902	PD Fixed
17f	731094.827999999979511	5026703.0920000000178814	6.8160000000000000	45°21'20,59728"N	11°57'01,56394"E	52,568	50,666	1,902	PD Fixed
18f	731087.9090000000101514	5026706.3360000000126660	6.8090000000000000	45°21'20,71048"N	11°57'01,25180"E	52,561	50,659	1,902	PD Fixed
19f	731080.003999999957159	5026711.8839999999612570	6.7620000000000000	45°21'20,89939"N	11°57'00,89830"E	52,514	50,612	1,902	PD Fixed
20f	731049.052000000025146	5026723.243999999947846	6.8080000000000000	45°21'21,30375"N	11°56'59,49671"E	52,561	50,659	1,902	PD Fixed
21f	731034.4930000000133179	5026727.3100000000521541	6.8300000000000000	45°21'21,45261"N	11°56'58,83528"E	52,584	50,682	1,902	PD Fixed
22f	731028.73999999990687	5026738.3080000000193715	6.9070000000000000	45°21'21,81536"N	11°56'58,58971"E	52,661	50,759	1,902	PD Fixed
23f	731002.8090000000008382	5026746.9110000000312924	6.9990000000000000	45°21'22,12453"N	11°56'57,41391"E	52,754	50,852	1,902	PD Fixed
24f	730962.3090000000008382	5026762.2790000000096858	6.8530000000000000	45°21'22,66992"N	11°56'55,58077"E	52,61	50,708	1,902	PD Fixed
25f	730911.9830000000007451	5026783.8609999999567866	7.1360000000000000	45°21'23,42802"N	11°56'53,30705"E	52,895	50,993	1,902	PD Fixed
26f	730874.716999999945983	5026787.8189999999202788	7.0250000000000000	45°21'23,60029"N	11°56'51,60315"E	52,785	50,883	1,902	PD Fixed
27f	730835.052999999956228	5026813.2340000000171363	7.4840000000000000	45°21'24,46979"N	11°56'49,82526"E	53,246	51,344	1,902	PD Fixed
28f	730824.8410000000014901	5026827.5609999999754131	6.9240000000000000	45°21'24,94556"N	11°56'49,38058"E	52,686	50,784	1,902	PD Fixed
29f	730793.2380000000012107	5026847.5499999999813735	7.8020000000000000	45°21'25,62989"N	11°56'47,96353"E	53,566	51,664	1,902	PD Fixed
30f	730798.030999999959022	5026853.1739999999649823	7.4150000000000000	45°21'25,80623"N	11°56'48,19303"E	53,179	51,277	1,902	PD Fixed
22d	730628.035999999963678	5027268.3710000000275671	7.4130000000000000	45°21'39,44427"N	11°56'41,08743"E	53,192	51,29	1,902	PD Fixed
24d	730610.388999999966472	5027218.459999999962747	7.3300000000000000	45°21'37,84996"N	11°56'40,19350"E	53,108	51,206	1,902	PD Fixed
25d	730549.650999999954365	5027110.6950000000298023	7.0180000000000000	45°21'34,43439"N	11°56'37,22432"E	52,796	50,894	1,902	PD Fixed
26d	730618.2330000000007451	5027268.0400000000037253	7.2920000000000000	45°21'39,44517"N	11°56'40,63687"E	53,071	51,169	1,902	PD Fixed

Tabella 1: Coordinate GCP rilevati



Figura 19: Localizzazione dei GCP in sito (alt. 800 m)

Per iniziare la restituzione fotogrammetrica dei canali consorziali si sono importate in Metashape le immagini acquisite durante il volo e con esse, automaticamente, anche i metadati delle singole foto, cioè le coordinate GPS del centro di scatto e i dati relativi all'orientamento interno della camera che sono serviti poi nella fase di calibrazione e allineamento delle camere ossia il primo *step* del processo fotogrammetrico.

Attraverso il comando *'align photo'* è stata ottenuta una stima della posizione della camera da cui sono state scattate le foto e, di conseguenza, la proiezione nello spazio tridimensionale dei punti comuni tra di esse, arrivando a costituire la nuvola di punti sparsa. Era possibile selezionare cinque gradi di accuratezza del processo, più è elevato il grado e più risulta fitto il campionamento delle immagini, andando però ad influire sul tempo impiegato per eseguire la procedura, aumentandolo. Grazie al riferimento GPS del centro di presa di ogni foto, applicando l'opzione *'reference preselection'* il *software* ha confrontato prima tutte le foto tra loro più vicine a livello spaziale, agevolando l'elaborazione. Infine, è stato possibile definire anche il numero limite di *key point*, cioè i punti di riconoscimento all'interno di ogni singola foto che possono essere utilizzati per il confronto tra le stesse, e di *tie point*, ossia i punti omologhi tra le foto.

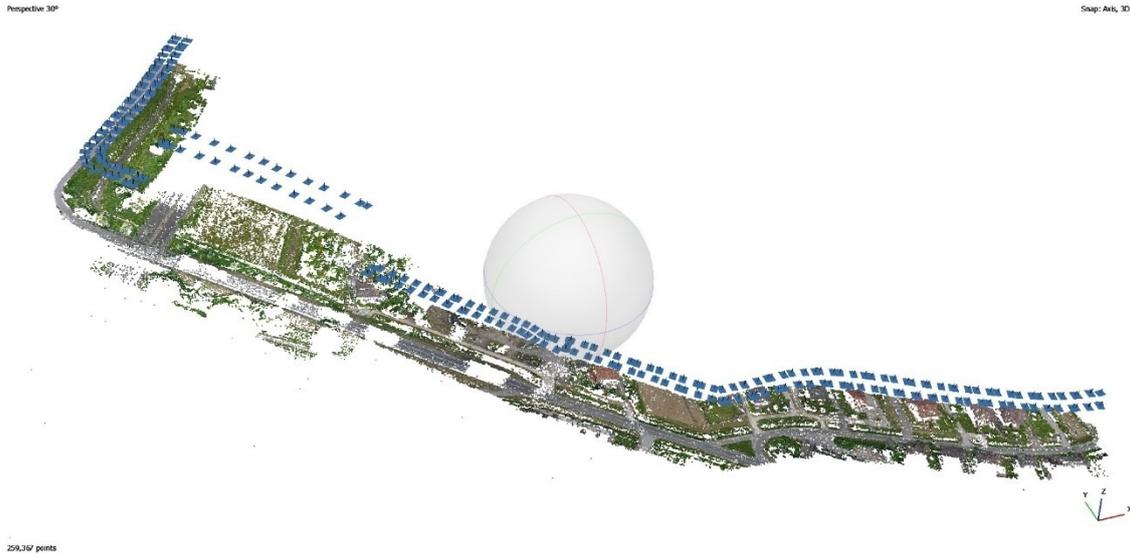


Figura 20: Nuvola di punti sparsa

Da questo primo passaggio è stato ottenuto un modello tridimensionale, una nuvola di punti sparsi, e la ricostruzione della posizione e angolazione dei centri di presa.

Tenendo in considerazione che il corretto posizionamento spaziale della camera influisce in maniera direttamente proporzionale all'accuratezza del modello 3D, si è proceduto ad eliminare i punti che potevano portare un errore alla ricostruzione, migliorando la qualità della ricostruzione stessa, basandosi su un nuovo assetto di punti ripuliti. Si è quindi applicato il comando '*gradual selection*' individuando dei fattori che permettono di selezionare, in base ad un valore limite, i punti da eliminare. Selezionando il fattore '*image count*' è stato possibile eliminare quei punti ricostruiti solo sulla base di due immagini, i quali avevano la probabilità di aumentare l'errore nella ricostruzione. Il risultato di questa operazione di pulizia è una nuvola di punti sparsa composta da 130 mila punti, a differenza di quella iniziale che ne conteneva 259 mila.

A seguito alla pulizia della nuvola è stato possibile ottimizzare i parametri di orientamento interno ed esterno delle camere mediante il comando '*optimize cameras*'.

Il modello tridimensionale ottenuto dopo questi primi *step* può già essere misurato e posizionato nello spazio poiché le coordinate GPS delle singole foto consentono di inquadrare la posizione e le dimensioni del rilievo, tuttavia, l'errore di queste coordinate risulta essere abbastanza alto rendendo necessario l'inserimento dei GCP acquisiti e

misurati in campo per ridurlo. Il *file* di testo redatto con le coordinate dei punti nel sistema di riferimento locale regionale precedentemente citato è stato quindi importato, grazie al comando *'import reference'*, nell'elaborazione prestando attenzione ad impostare il medesimo sistema di riferimento anche nel sistema di coordinate del *software*.

A questo punto sono state deselezionate le foto nel pannello di *reference*, poiché per la georeferenziazione non si sono voluti utilizzare i valori GPS delle immagini ma quelli dei GCP, e si è proceduti ad individuare i vari *target* numerati dei punti nelle foto e a posizionare sul centro degli stessi il corrispondente GCP misurato mediante la funzione *'place marker'*.



Figura 21: *Target*

Tale procedimento di individuazione e posizionamento dei GCP nelle foto è stato ripetuto per tutti i punti da georeferenziare e, nelle foto in cui comparivano dei *marker* già posizionati in automatico dal *software*, si è svolta un'operazione di aggiustamento del riconoscimento del punto solamente nelle foto in cui il *target* risultava ben visibile e definibile il centro dello stesso.

Una volta individuati tutti i GCP nelle foto, alcuni di essi sono stati deselezionati, creando così i *check points*, ossia i punti di controllo con coordinate note nel mondo reale, dai quali si estrapolano le coordinate nel modello virtuale ancorato ai *control points*, ovvero i GCP rimasti selezionati, utilizzati nel processo di georeferenziazione e scalatura del modello. La differenza tra le coordinate stimate del modello (*check points*) e quelle reali misurate con il GPS (*control points*) indica il valore dell'accuratezza e precisione del modello permettendone di stabilire la qualità. In seguito, è stato calcolato il nuovo sistema di coordinate avviando la funzione *'update transform'* che applica i nuovi valori dei *control points* al modello ed è stata eseguita nuovamente l'ottimizzazione delle camere con *'optimize cameras'*. In questo caso l'errore totale dei *check points* risulta pari a 0,405592 m mentre quello dei *control points* è di 0,015667 m, ottenendo quindi un'accuratezza del risultato pari a 0,389925 m.

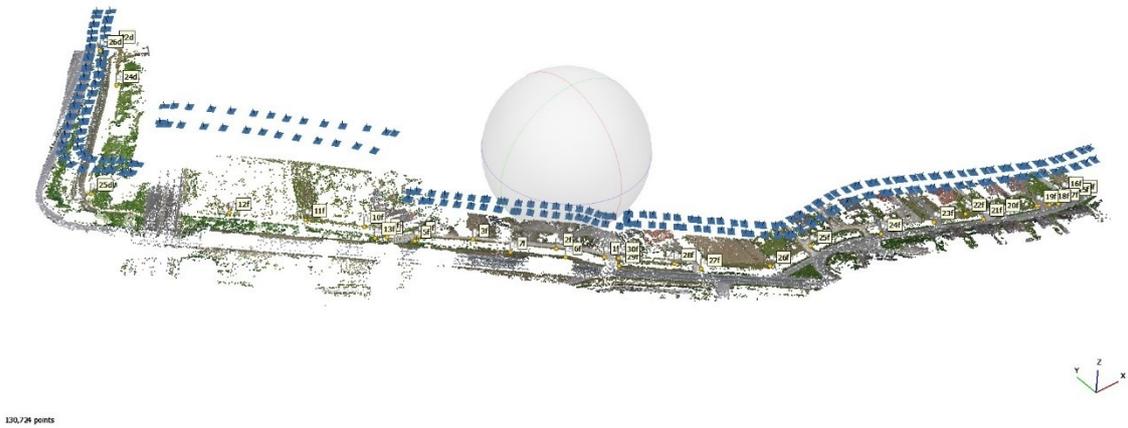


Figura 22: Nuvola di punti sparsa pulita con GCP

Si è iniziato poi a raffittire la nuvola di punti sparsa per creare quella densa utilizzando 'build point cloud' e selezionando la qualità desiderata (*high*) e il livello di filtraggio di dettagli da applicare (*moderate*) deciso in base alla tipologia di rilievo in questione, cioè se i piccoli dettagli o elementi possono essere filtrati ed eliminati oppure no. Alla fine del processo è stata ottenuta una nuvola di punti densa composta da 188 milioni di punti che ha funto da base per le successive fasi di elaborazione e interpolazione della stessa per ottenere i risultati cartografici desiderati.



Figura 23: Nuvola di punti densa

I processi successivi infatti sono stati quelli di:

- creazione della *mesh*, cioè della superficie continua interpolata dalla nuvola densa, usando la funzione *'build model'* e un *face count* di livello *medium*, si è ottenuta una superficie composta da circa 80 milioni di facce e 40 milioni di vertici;
- aggiunta della *texture* alla *mesh* mediante *'build texture'*.



Figura 24: Superficie interpolante la nuvola di punti (*mesh*)



Figura 25: Vestizione fotografica della *mesh* (*texture*)

Per concludere la restituzione fotogrammetrica dei canali consorziali sono stati generati degli ultimi modelli:

- il DSM mediante *'build DEM'* generato dalla nuvola di punti densa e raffigurato con una scala di colori legata alla quota;
- l'ortofoto grazie a *'build orthomosaic'* basandosi sul DSM e con un GSD di 1 cm/pixel;
- il DTM, cioè il modello privo delle componenti artificiali o della vegetazione, creato attraverso l'interpolazione tra i valori rimanenti a seguito dell'eliminazione delle parti non volute.

Per ottenere quest'ultimo modello è stato necessario eseguire un processo, automatizzato dal *software* stesso, di classificazione della nuvola di punti in parti omogenee tra loro per attributo o per funzione, scegliendo di definire solamente i *ground point*, cioè i punti del terreno. Tramite l'uso di *'classify ground points'* e selezionando *any class*, è stata divisa la nuvola di punti in due porzioni, una colorata di marrone rappresentante i *ground points* e l'altra non classificata grigia per tutto ciò che non è terreno.

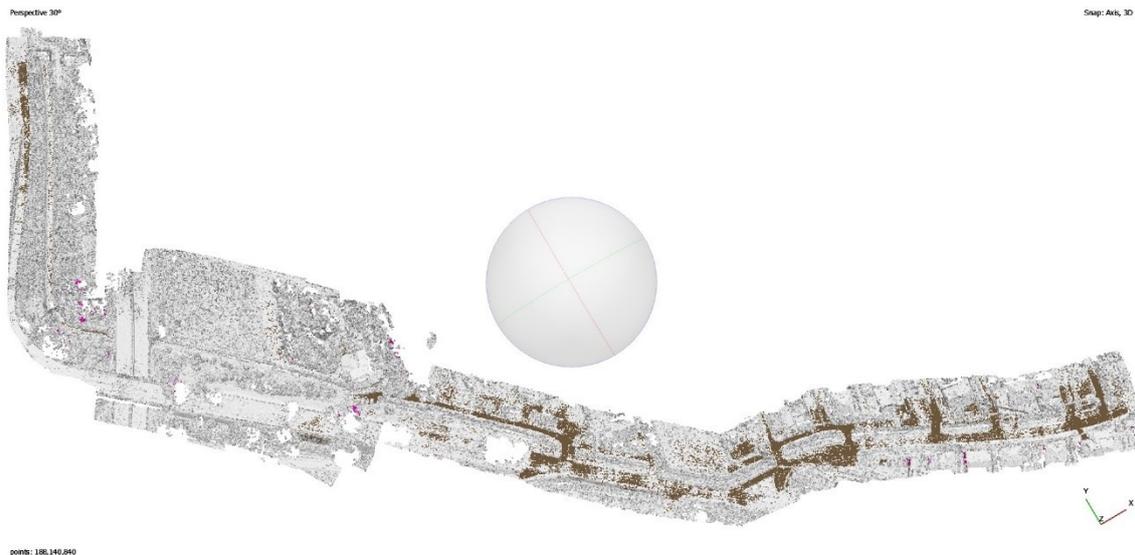


Figura 26: Nuvola di punti densa classificata per *ground points*

Ciò ha consentito di filtrare la nuvola in base alla classe (*'filter by class'*) e, togliendo il *flag* alla *point classes ground* ma lasciando attivo il resto, è stato possibile selezionare con un *rectangle selection* ed eliminare tutti i punti delle altre classi non voluti. Successivamente con *'reset filter'* si è ripristinata e visualizzata nuovamente la nuvola di punti del terreno per interpolare i vuoti grazie alla costruzione di un nuovo DSM (*'build DEM'*) ottenendo così il modello digitale del terreno.⁶⁶



Figura 27: Nuvola di punti restante con *point classes ground*

⁶⁶ Carraro F., *Dalla fotogrammetria all'analisi dei modelli 3D*.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Integrazione delle metodologie di rilievo

Nella letteratura scientifica del settore è possibile trovare diversi casi studio di analisi e rilievi del territorio in ambito fluviale, costiero, naturale o di infrastrutture antropiche, effettuati mediante i sistemi SAPR, con l'utilizzo quindi della aerofotogrammetria, e con la metodologia satellitare, sia per quanto riguarda le osservazioni di immagini satellitari, sia per l'acquisizione di misure GNSS relative al posizionamento di un punto sulla Terra.

Il telerilevamento, che è risultato essenziale per condurre una valutazione dei rilevanti cambiamenti del territorio grazie al confronto di immagini relative alla stessa area ma di epoche diverse, è possibile impiegarlo in maniera più completa e analitica per eseguire direttamente l'ortofoto proiezione e la generazione di modelli digitali del terreno a partire da immagini satellitari ad alta risoluzione. Questa metodologia ha consentito di studiare una parte del comune di Foligno (Perugia) con un'estensione di circa 150 Km², utilizzando due coppie stereoscopiche satellitari, riuscendo ad ottenere dei modelli digitali con risoluzione pari a 1 m. Tuttavia, è stato necessario applicare una correzione geometrica alle immagini satellitari, poiché soggette a forti distorsioni, dovendo comunque rilevare, con la tecnica satellitare GNSS, un certo numero di GCP in modo tale che la loro posizione risultasse nota nel sistema di riferimento del luogo ed anche nel sistema di riferimento dell'immagine e fosse quindi possibile eseguire le correlazioni e correzioni dell'immagine stessa.⁶⁷

Nel 2006 le misure satellitari GPS sono state scelte, visto la rapidità che garantiscono nel rilievo, le elevate prestazioni e la semplicità dei metodi, per eseguire il rilevamento di un tratto in erosione del fiume Vomano (provincia di Teramo) di circa 14 Km, consentendo la sua ricostruzione in un modello 3D per condurre le indagini di valutazione della stabilità spondale. Il rilievo topografico è stato realizzato tramite l'utilizzo del GPS, acquisendo dati in modalità RTK attraverso rilevamenti in continuo e misure puntuali, arrivando ad una precisione centimetrica. La fotogrammetria digitale terrestre ha ulteriormente completato il rilievo poiché, utilizzando una macchina fotografica ad elevata risoluzione, sono state acquisite delle immagini digitali in modalità di ripresa

⁶⁷ Brigante R. (2010) *Metodologie automatiche nell'elaborazione di immagini satellitari stereoscopiche ad alta risoluzione per applicazioni ingegneristiche.*

stereoscopica, le quali poi sono state georeferenziate grazie alla misurazione GPS di molteplici punti di appoggio fotogrammetrici, per coprire le aree inaccessibili e fornire informazioni dettagliate sulla morfologia e la stratigrafia del sito mediante la sua fotointerpretazione. L'integrazione del rilievo diretto effettuato con il GPS con quello indiretto della fotogrammetria terrestre ha garantito una congruente e completa copertura delle misure e, con l'elaborazione dei dati ottenuti durante i rilievi, mediante *software* di restituzione digitale della superficie topografica, è stato possibile generare un modello digitale del terreno costituito da una matrice di punti georeferenzati predisposti per la rappresentazione e l'analisi morfologica del territorio. Il DTM è stato infine utilizzato nella valutazione dei volumi soggetti a instabilità spondale.⁶⁸

In uno studio del 2015 si è esposto il rilevamento di dettaglio di un tratto fluviale del Fiume Esino (a Jesi in provincia di Ancona) e della riserva naturale Ripa Bianca che lo circonda, per un'area totale di circa 120 ettari. Il rilievo con sistema APR ad ala fissa, svolto in due voli diversi che ha fornito 417 immagini ad alta risoluzione con valori di *forward* e *side overlap* del 70% e 50% rispettivamente, è stato preceduto dal rilievo topografico GPS dei GCP, uniformemente distribuiti sull'area e materializzati con 20 *target*, effettuato in modalità RTK, in cui la posizione di ogni punto è stata calcolata utilizzando le osservazioni simultanee registrate dalla stazione base master e dal ricevitore mobile rover. La successiva correzione delle coordinate della stazione master, rispetto alla stazione permanente GNSS più vicina, ha consentito di ottenere un'accuratezza millimetrica delle stesse e centimetrica per le coordinate del ricevitore rover. Il processo di ricostruzione fotogrammetrica del blocco di immagini è stato realizzato per mezzo del *software* Agisoft Metashape Professional, eseguendo con tecniche di triangolazione aerea automatica la calibrazione della fotocamera e l'orientamento interno ed esterno delle immagini, e identificando manualmente i 20 *target* nei fotogrammi per migliorare la correlazione tra immagini e terreno. Infine, con l'applicazione di algoritmi di corrispondenza automatica delle immagini, è stata generata una nuvola di punti densa georeferenzata che ha consentito di realizzare modelli 3D ad alta risoluzione ed elaborati cartografici come il DSM con una risoluzione spaziale di 20 cm, l'ortofoto con una risoluzione di 4 cm/pixel e, a seguito della classificazione

⁶⁸ Cretella E., Mataloni G., Pasculli A., Sciarra N. (2006) *Valutazione della stabilità spondale di un tratto in forte erosione del fiume Vomano (TE) mediante analisi 3D alle differenze finite.*

semiautomatica della nuvola di punti densa, il DTM sempre con una risoluzione spaziale di 20 cm, permettendo il monitoraggio e la produzione di carte topografiche ad elevata risoluzione ma in tempi brevi e con costi contenuti in aree modificate da eventi catastrofici come le inondazioni.⁶⁹

Il *software* Agisoft Metashape Professional è stato impiegato anche per la restituzione fotogrammetrica del rilievo svolto a Monte Sant'Angelo ad Alatri (in provincia di Frosinone) mediante piattaforma aerea a pilotaggio remoto ad ala fissa con installata una fotocamera digitale, per la documentazione e il monitoraggio di una cava attiva, da cui si estrae materiale calcareo, costituita da un'altezza massima di 50 m e sviluppata su un'area di 6 ettari. Tenendo in considerazione la conformazione ed estensione della cava, il volo è stato eseguito ad una quota di 130 m su un'area di circa 36 ettari, impostando un GSD di 4 cm e un *overlap* in entrambi i sensi pari al 70% del fotogramma. In precedenza al volo erano stati materializzati e posizionati 14 *target* come GCP, sia perimetralmente che internamente alla cava, la cui determinazione delle coordinate è avvenuta con una coppia di ricevitori satellitari GNSS geodetici RTK a doppia frequenza in modalità Post-Processing (DGPS) per garantire una migliore precisione e il controllo delle misure. Le 156 immagini ottenute dal volo sono state poi importate nel *software* Metashape per eseguire tutti i noti processi dell'elaborazione fotogrammetrica, riuscendo a generare una nuvola di punti densa 3D con una sufficiente risoluzione per descrivere la superficie rilevata e le sue discontinuità, un ortofoto georeferenziato ad alta risoluzione fino a 4 cm di precisione e un DSM dettagliato di *texture* e *mesh* poligonali, con il quale è stato possibile risalire poi al volume del materiale di scavo alla data in cui è stato effettuato il rilievo.⁷⁰

Il caso studio datato 2020 analizzato mostra come è stato realizzato un rilievo integrato con la tecnica dell'aerofotogrammetria da drone, il sistema GNSS, la stazione totale e il laser scanner. Il rilevamento aveva l'obiettivo di mettere in sicurezza l'area di una falesia rocciosa di Manarola (un borgo delle 5 Terre in provincia della Spezia), ai piedi della quale è presente un percorso pedonale turistico molto frequentato, su cui in passato, nonostante le opere di consolidamento e protezione attive e passive intraprese, si sono

⁶⁹ Mastroiocco G. et al (2015) *SAPR photogrammetry for the study of damaging hydrogeological events: The example of Ripa Bianca natural reserve, Esino River (Marche, Italy)*.

⁷⁰ D'Urso M.G. et al (2015) *Un'applicazione al settore ambientale di fotogrammetria con piattaforma UAV*.

verificati crolli e cadute di massi dovuti al dissesto idrogeologico. La prima attività in campo è stata quella di mettere a terra, limitatamente lungo la banchina al piede della falesia poiché non risultavano accessibili altre aree, dei *target* ad alta visibilità per i punti di appoggio e controllo del processo fotogrammetrico e procedere, poi, con il volo in modalità manuale del drone multirottore, andando a scattare in totale 420 fotografie nadirali, frontali e oblique a 45° ad una distanza di 30 m dalla parete e rispettando un GSD di 1 cm/pixel. Successivamente sono state eseguite delle misure ripetute, in totale tre volte, dei *target* a terra con un ricevitore GNSS in modalità rete RTK, ciò per avere una distanza temporale tra le misure per individuare possibili errori di *multipath* dovuti alla vicinanza della parete rocciosa. Il posizionamento dei punti di controllo solamente alla base della falesia avrebbe potuto provocare una carenza di vincoli al modello nella parte superiore durante l'elaborazione fotogrammetrica, generando l'allontanamento dei punti sovrastanti del modello 3D dalla loro posizione reale poiché non vincolati. Per evitare ciò, si sono integrate nell'elaborazione, delle misure di punti nelle parti in elevazione della falesia, acquisite mediante stazione totale con la collimazione, senza prisma, di elementi facilmente individuabili nelle fotografie scattate dal drone, come gli spigoli delle finestre delle abitazioni o i chiodi di consolidamento nella roccia. Infine, siccome la stazione totale impiegata era integrata con un laser scanner e delle fotocamere, è stato possibile ottenere una nuvola di punti colorata misurabile direttamente in campo, già orientata nello spazio 3D grazie al preventivo orientamento della stazione stessa mediante i *target* rilevati con l'antenna GNSS. Il processo di restituzione fotogrammetrica compiuto con il *software* Agisoft Metashape Professional ha permesso di ottenere accuratezze in *output* di circa 5 cm e di generare il desiderato modello 3D formato da *mesh* triangolare con *texture*.⁷¹

Oltre ai rilievi di elementi naturali è possibile trovare ricerche relative al rilevamento di elementi artificiali costruiti dall'uomo per l'ispezione visiva basata su foto aeree di alta qualità che permettono di condurre rilievi di precisione e ricostruzioni tridimensionali georeferenziate delle strutture, visualizzando deformazioni o danni. I SAPR, grazie ai sensori montati su di essi, semplificano e accelerano l'acquisizione dei dati e, con il supporto del sistema GPS e delle funzioni di controllo del volo, è possibile operare vicino

⁷¹ <https://3dmetrica.it/rilievo-integrato/>

alle strutture, garantendo dati di alta qualità per ispezioni affidabili e migliorando le strategie di monitoraggio in termini di qualità, sicurezza ed efficienza.

Un APR multirottore a otto eliche è stato impiegato per il rilievo, svolto in sole 2 ore, di una diga di 400 e 100 metri di lunghezza e altezza rispettivamente, rilevando con strisciate verticali sovrapposte dal basso verso l'alto, a distanza costante di 15 m dalla superficie dall'oggetto, seguendo la pendenza della struttura per tutti i suoi 22.000 m² di area. Le 1.200 immagini aeree scattate perpendicolarmente alla superficie della diga hanno permesso la generazione di un'ortofoto ad elevata risoluzione, consentendo un controllo rapido ma dettagliato della superficie e l'identificazione e mappatura di eventuali danni.

Con il medesimo drone è stato rilevato anche un muro di sostegno di un'autostrada di lunghezza pari a 615 m, altezza di 18 m e area di 12.000 m², avente una pendenza che segue quella della curva dell'asse principale dell'autostrada. I voli sono stati eseguiti in 48 minuti in modalità automatica, seguendo la rotta preimpostata con la navigazione GPS, e compiendo quattro strisciate orizzontali a diverse altezze, acquisendo immagini sovrapposte in senso verticale e orizzontale, ad una distanza di circa 35 m dalla parete e con la camera posizionata sia perpendicolarmente alla superficie e sia in maniera inclinata a 45°. Le 280 immagini ottenute sono state utilizzate per il calcolo di una nuvola di punti 3D ad alta densità, con una risoluzione finale di 1.6 mm/pixel, garantendo la georeferenziazione dei dati di misura con 7 GCP distribuiti sulla struttura e determinati con il tacheometro manuale. La nuvola di punti georeferenzata ottenuta può essere in futuro utilizzata per il rilevamento automatico dei cambiamenti, calcolando e confrontando due distinte ricostruzioni 3D in campagne di misura diverse.⁷²

L'ultima categoria di casi studio presi in considerazione esaminano l'integrazione della tecnologia GNSS - RTK come componentistica montata internamente al drone.

Nel rilievo di diverse tipologie di superfici sono stati messi a confronto i dati acquisiti mediante sistema satellitare GNSS in modalità rete RTK e sistema SAPR con un ricevitore RTK interno al velivolo. Per la modalità di lavoro GNSS-RTK è stata utilizzata una soluzione a base singola, ossia un ricevitore multi-costellazione e multifrequenza con una distanza di 10 Km tra la base e il rover, e il 4G come modalità di trasmissione delle

⁷² Hallermann N., Morgenthal G., Rodehorst V. (2015) *Unmanned Aerial Systems (UAS) – Case Studies of Vision Based Monitoring of Ageing Structures*.

correzioni, per misurare i punti a terra in diverse posizioni del perimetro di rilevamento. Il volo APR con RTK è stato effettuato a 100 m di altitudine, con un 80% di sovrapposizione in avanti e laterale, e con velocità di volo di 7 m/s. L'elaborazione delle coordinate del centro di presa è avvenuta con il metodo del post-processamento mentre, per quanto riguarda le immagini, esse sono state elaborate con Agisoft Metashape, ottenendo un'ortofoto, un DSM e i dati delle coordinate X, Y e Z dei punti. Dal confronto dell'elevazione dei punti GNSS-RTK, scelti come valori originali, con quella estratta dall'APR-RTK è risultato che le deviazioni delle coordinate sono molto ridotte in posizioni aperte, come strade o cemento, variando da 3 a 8 cm, con alta copertura arborea rada e senza erba fitta con terreno nudo visibile sono di 10-15 cm, con chiome alte e fitte ed erba anch'essa fitta ma sempre con terreno nudo visibile sono di oltre 40 cm, mentre in corrispondenza di vegetazione alta e densa non viene raggiunto il punto a terra. La comparazione tra GNSS-RTK e SAPR-RTK ha dimostrato che ogni metodo ha diversi vantaggi e svantaggi: i droni possono arrivare ad aree inaccessibili fisicamente per il rilievo con GNSS ma, di contro, hanno una procedura di post-elaborazione più complessa e che richiede più risorse *software*; mentre il GNSS-RTK è facile e veloce da usare per ottenere le informazioni sulle coordinate degli oggetti, senza una complicata post-elaborazione, ma non è in grado di fornire una visione dell'intera area di rilievo, cosa che invece garantiscono i SAPR, poiché misura solo singoli punti. Le due metodologie possono quindi essere usate singolarmente o integrate tra di loro in base alle caratteristiche del sito, allo scopo del rilievo e alle precisioni desiderate.⁷³

Altri casi studi a supporto di questa integrazione di metodologie hanno sostenuto che l'aggiunta al drone di ricevitori GNSS-RTK consente di fornire un posizionamento cinematico in tempo reale, senza la necessità di punti di controllo a terra (GCP), riducendo il lavoro sul campo prima dei voli poiché si evita la loro distribuzione e misurazione.

È stata condotta un'analisi visiva e statistica dei modelli digitali di superficie di un'area densamente vegetata prodotti da dati acquisiti simultaneamente da un APR-RTK e uno non RTK, volando entrambi seguendo una doppia griglia a 90 m di altitudine, con un 80% di *overlap* frontale e 60% di laterale, dai quali si sono ottenute delle foto con un GSD di 4,86 cm/pixel e 2,23 cm/pixel rispettivamente. Il DSM generato in Metashape dal

⁷³ Vu N. Q. et al (2023) *A Comparative Study of UAV Lidar, UAV, and GNSS RTK on Infrastructure Survey*.

processo fotogrammetrico utilizzando le immagini scattate dall'APR non RTK è stato preso come modello di riferimento nel confronto poiché presentava una risoluzione spaziale più elevata ed il supporto degli 8 GCP rilevati in campo per l'orientamento dal ricevitore GNSS. I risultati conseguiti dalla comparazione dei due DSM mostrano che la mancanza di un orientamento assoluto supportato da GCP non influisce in modo significativo sul posizionamento orizzontale dato dal ricevitore GNSS-RTK a bordo del drone, ma si riflette invece sul posizionamento verticale rendendolo insufficiente e dovendo stabilire almeno un certo numero di GCP nelle aree vegetate per garantire un preciso orientamento assoluto e generare DSM di alta qualità.⁷⁴

Un'altra ricerca invece ha dimostrato come l'integrazione di un modulo GNSS-RTK, con elaborazione PPK, su un drone commerciale non personalizzabile, ha reso il sistema efficiente per la ricostruzione di un DEM altamente dettagliato e preciso della Sezione Irpinia dell'INGV in provincia di Avellino, senza l'utilizzo di GCP. Dopo l'installazione del modulo GNSS nel velivolo è stata pianificata in UgCS una missione fotogrammetrica con una velocità di volo di 5 m/s, GSD a 2 cm/pixel, 80% di *forward overlap* e 70% di *side overlap*, con uno schema a doppia griglia e utilizzando come base per il post-processamento una stazione permanente della rete integrata nazionale GNSS, acquisendo i dati con la stessa frequenza del drone. In aggiunta sono stati misurati, in modalità rete RTK con correzione in tempo reale, 30 punti di verifica con strumentazione GNSS multi-costellazione e multifrequenza. Si è dovuto infine elaborare il post-processamento dei dati GNSS della base e associare le posizioni relative alle foto scattate, producendo un progetto dedicato per il *software* Agisoft Metashape per poter realizzare la nuvola di punti densa, il modello digitale di elevazione e l'ortofoto. Le differenze di altezza tra le misure dei punti di verifica e quelle derivate dal DEM nelle stesse coordinate variano da un minimo di 1 cm a un massimo di 7,8 cm, rendendo possibile affermare che la mappatura di precisione con un drone equipaggiato con un modulo GNSS a bordo non differisce molto dalla tecnica che prevede la misurazione dei GCP a terra, permettono però di ridurre i costi, i tempi e l'impiego di risorse umane e, soprattutto, di accedere ad aree finora difficili da investigare ed esplorare.⁷⁵

⁷⁴ Sefercik U., Nazar M. (2023) *Consistency Analysis of RTK and Non-RTK UAV DSMs in Vegetated Areas.*

⁷⁵ Memmolo A. et al (2023) *UAS-LC-GNSS: Precision Surveying with a Low-Cost GNSS System for Commercial Drones.*

3.2 Analisi territoriali e spaziali e produzione di cartografia

3.2.1 Cartografia dell'analisi diacronica dell'edificato

Sono riportate di seguito le immagini attinenti all'analisi dell'uso del suolo dei Laboratori Nazionali di Legnaro condotta per mezzo del *software* Google Earth Pro. Esse sono state acquisite tutte ad un'altitudine di presa pari a 1 Km ed è possibile trovare nella didascalia di ciascuna di esse la data di acquisizione dell'immagine satellitare di riferimento. Per quanto riguarda i dati numerici sulla quantità di superficie impermeabilizzata e no, con la suddivisione degli utilizzi e le relative percentuali è possibile trovarli al sottocapitolo successivo, il 3.3 (analisi statistica) del medesimo capitolo 3.



Figura 28: Immagine satellitare acquisita in data 14/04/2024



Figura 29: Immagine satellitare acquisita in data 20/07/2023

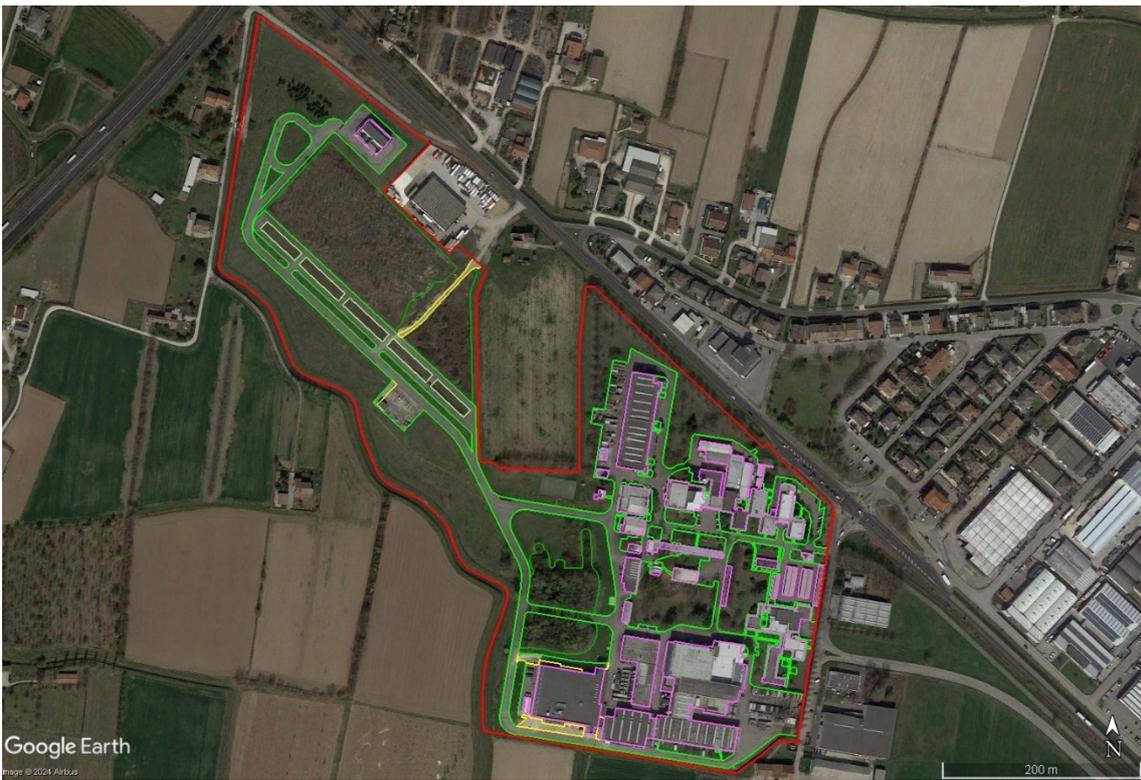


Figura 30: Immagine satellitare acquisita in data 25/03/2021



Figura 31: Immagine satellitare acquisita in data 28/06/2016

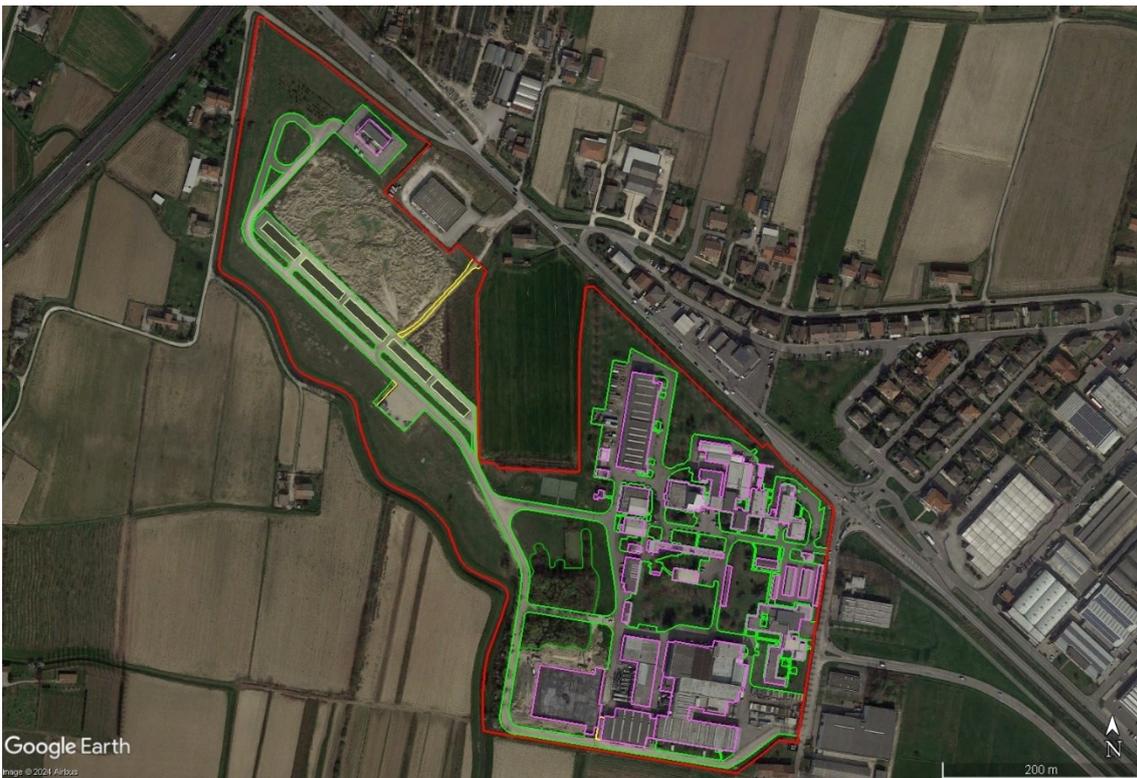


Figura 32: Immagine satellitare acquisita in data 14/03/2014

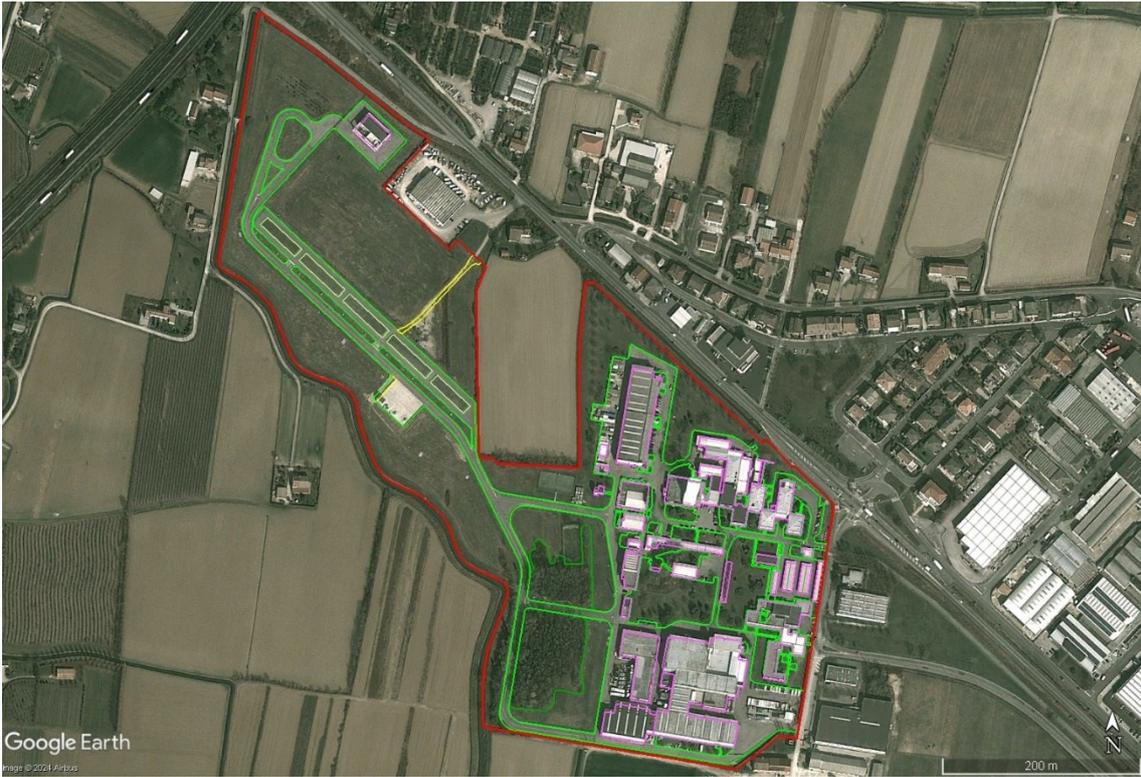


Figura 33: Immagine satellitare acquisita in data 16/03/2012



Figura 34: Immagine satellitare acquisita in data 26/05/2009



Figura 35: Immagine satellitare acquisita in data 31/07/2004



Figura 36: Immagine aerea acquisita in data 10/08/1997



Figura 37: Immagine aerea acquisita in data 03/05/1994



Figura 38: Immagine aerea acquisita in data 02/10/1990



Figura 39: Immagine aerea acquisita in data 12/04/1981

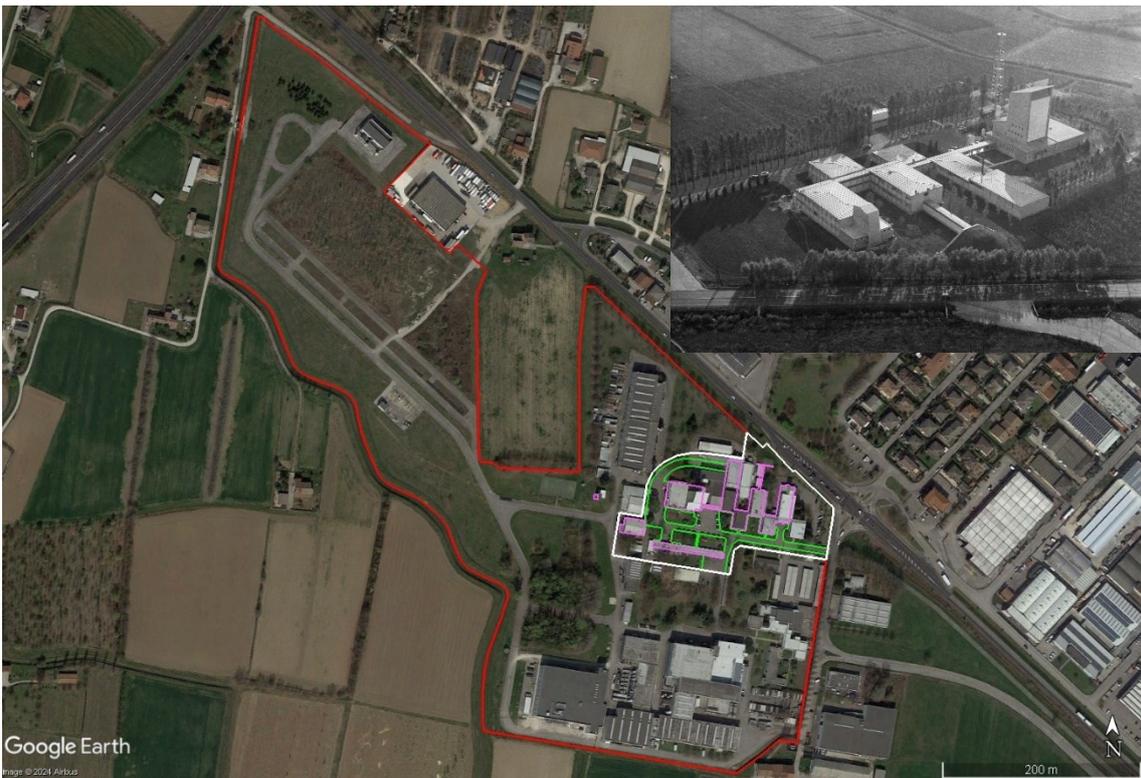


Figura 40: Foto storica del 1967

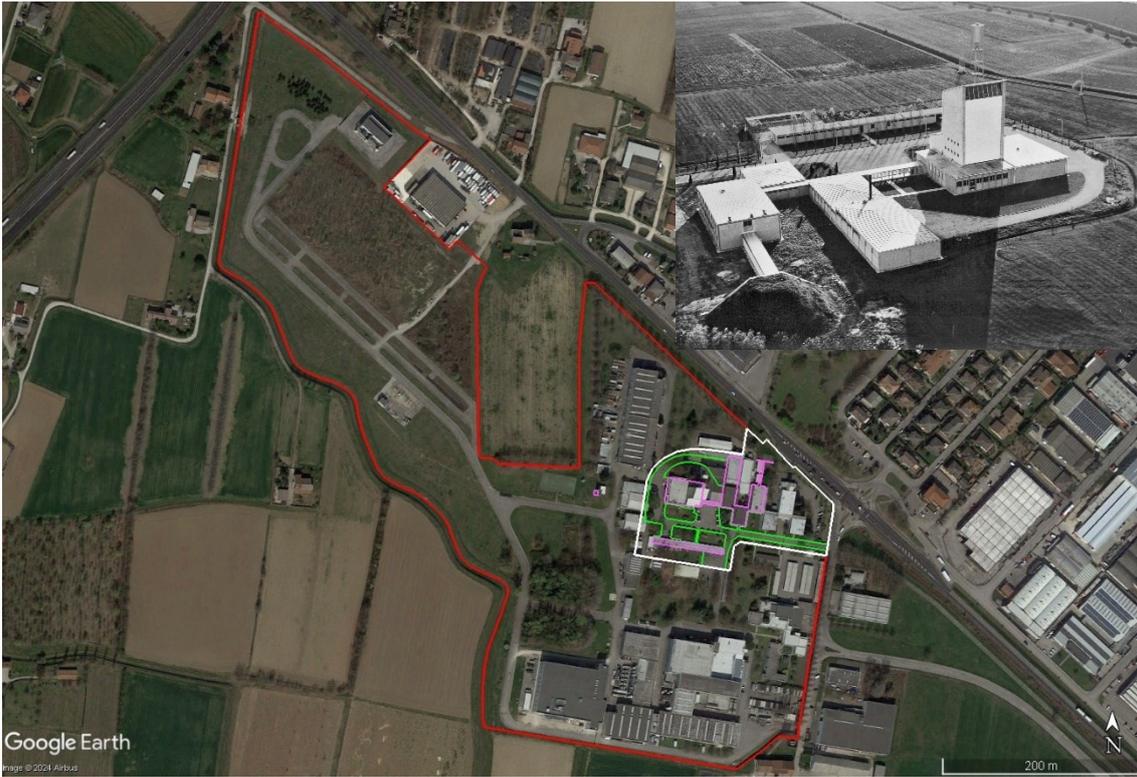


Figura 41: Foto storica del 1963

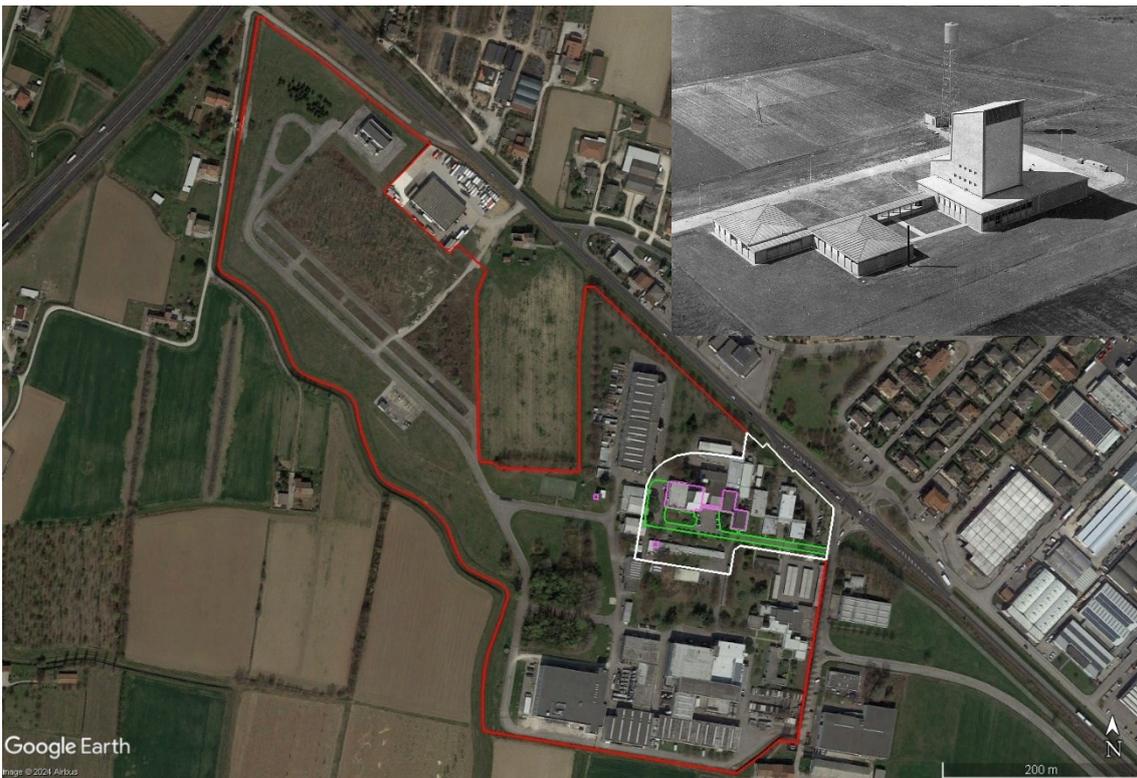


Figura 42: Foto storica del 1961

3.2.2 Ortofoto, DSM e DTM del reticolo idrografico minore

Gli *output* cartografici relativi alla porzione di reticolo idrografico minore in esame ottenuti dall'utilizzo del *software* Agisoft Metashape risultano tutti avere una precisione pari a 1 cm/pixel e si tratta dell'ortofoto, il DSM (*Digital Surface Model*) e il DTM (*Digital Terrain Model*).

Figura 43: Ortofoto



Figura 44: DSM

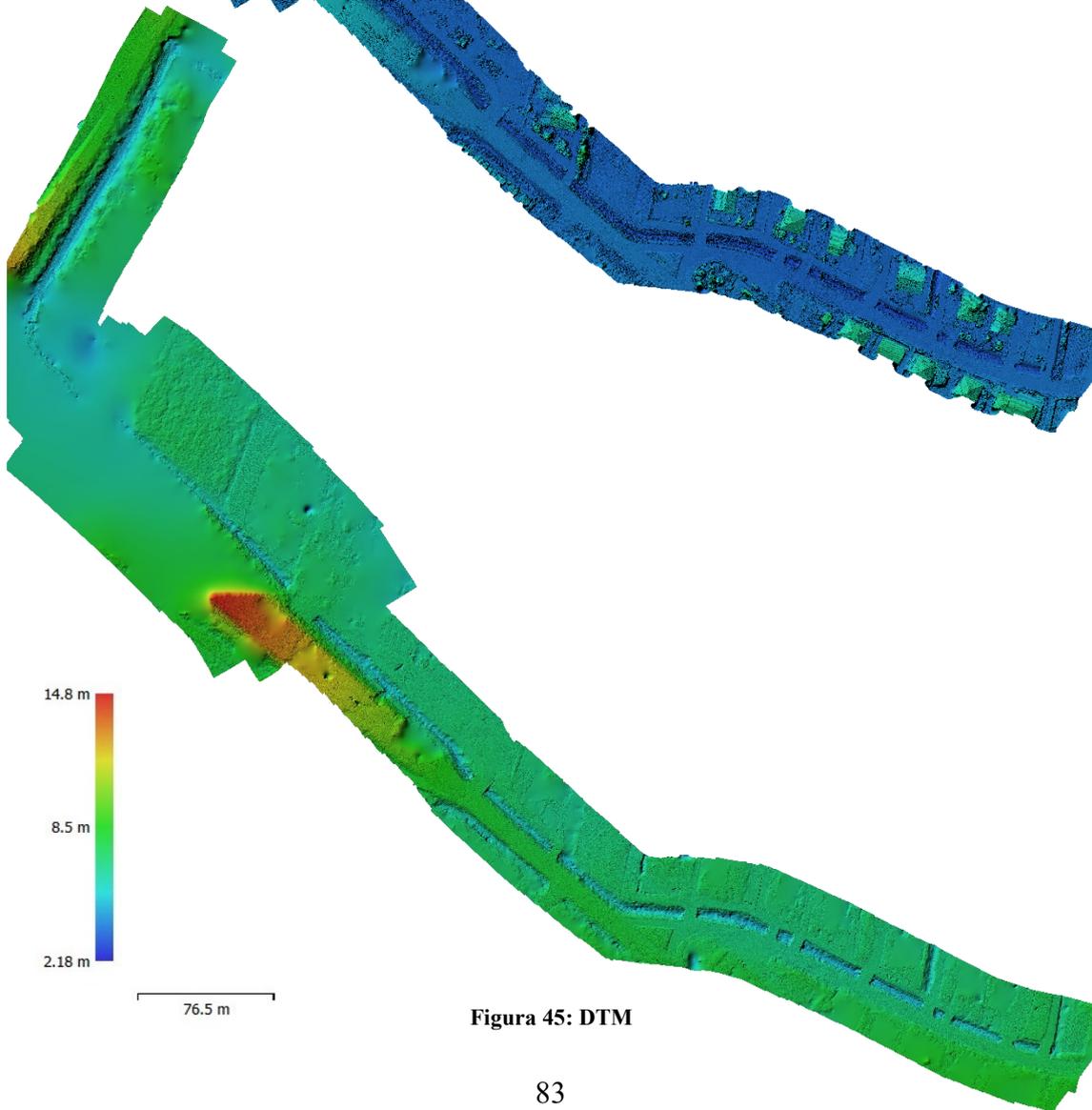
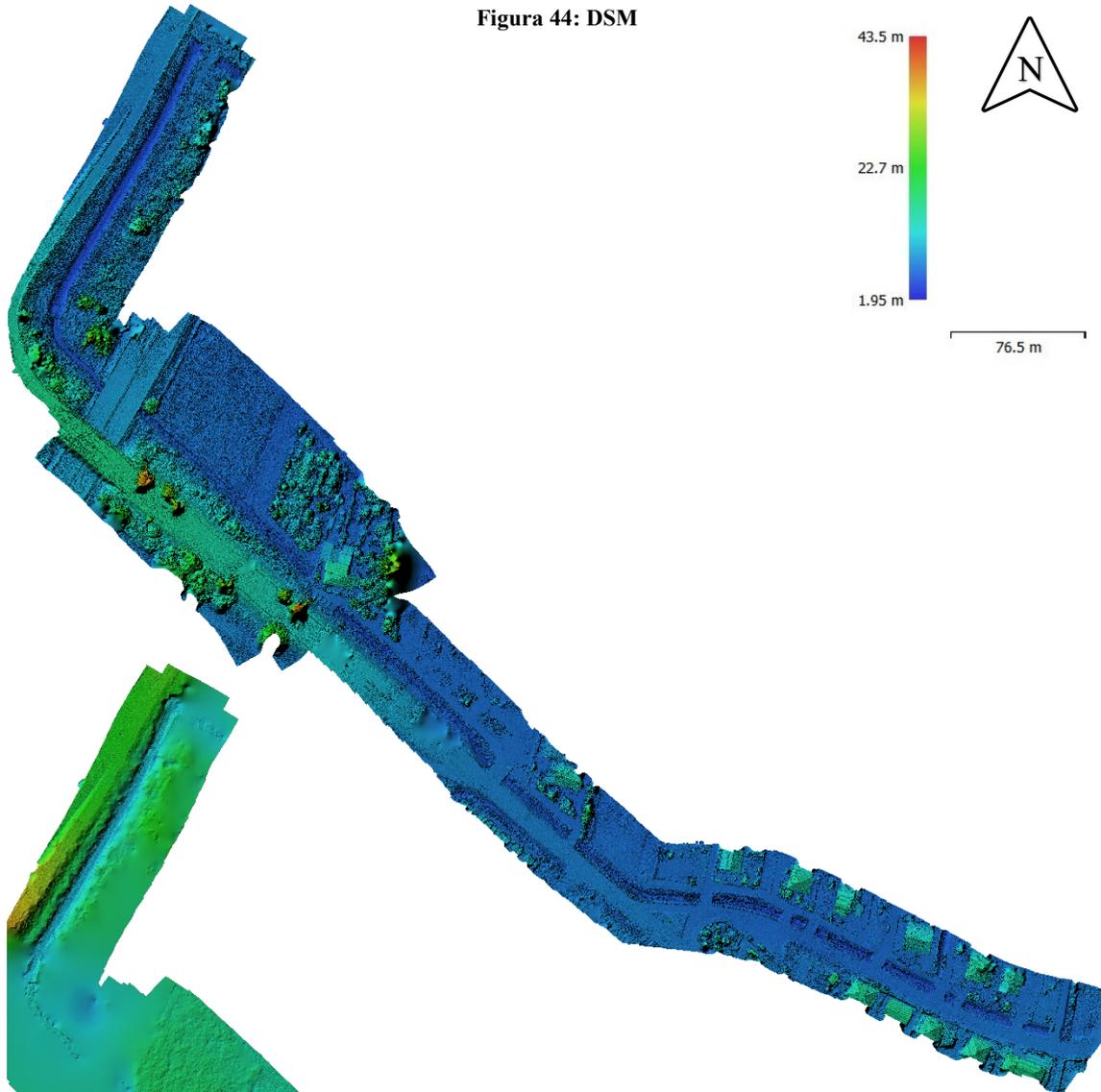


Figura 45: DTM

3.3 Analisi statistica

Vengono riportate di seguito le tabelle con le percentuali di superficie permeabile e impermeabile, con anche la differenziazione degli utilizzi, identificate durante l'analisi diacronica della proprietà dei Laboratori Nazionali di Legnaro condotta mediante l'utilizzo di Google Earth Pro. Per concludere viene presentato un grafico delle prospettive future relativo alla quantità di utilizzo del suolo redatto in base alla tendenza seguita negli anni dalla fondazione dell'istituto ad oggi.

14/04/2024				Confini LNL		190.687,00	
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE		m²	%
EDIFICI	001 → 008	5.058,00	15,51	ERBA	E Nord	21.899,00	44,31
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00	
	010	87,40			001 → 008	2.175,46	
	011	87,40			009	292,30	
	012	63,50			013-014-016	552,67	
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.000,22	
	015	489,00			022	794,50	
	016	102,00			032-033	3.180,00	
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.448,00	
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00	
	019	284,00			E Strada	1.306,00	
	020	134,00			Tot:	84.500,15	
	021	1.695,00		V.F.	VF Nord	16.277,00	12,98
	022	7.071,00			VF Nord-Est	3.630,00	
	023-029	2.181,00			VF Antenna Gravitazionale	3.852,00	
	024	938,00			VF 032	1.000,00	
	025	179,00			Tot:	24.759,00	
	026	68,90		P.D.	Tot:	2.540,00	1,33
	027	171,00					
028	1.567,00	GHIAIA	G Nord	430,00	1,03		
031	228,00		G Piattaforma	153,00			
032	3.576,00		G 032-033-028	1.387,00			
033	81,00		Tot:	1.970,00			
051	647,00						
CED	451,00						
Tot:	29.574,90						
STRADE	Tot:	47.342,95	24,83				
TOTALE:		76.917,85	40,34	TOTALE:		113.769,15	59,66

20/07/2023				Confini LNL		190.687,00		
IMPERMEABILE	m²	%	PERMEABILE		m²	%		
EDIFICI	001 → 008	5.058,00	15,27	ERBA	E Nord	21.899,00	44,35	
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00		
	010	87,40			001 → 008	2.175,46		
	011	87,40			009	292,30		
	012	63,50			013-014-016	552,67		
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00		
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.000,22		
	015	489,00			022	794,50		
	016	102,00			032-033	4.293,00		
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.448,00		
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00		
	019	284,00			E Strada	1.306,00		
	020	134,00			Tot:	84.562,15		
	021	1.695,00			V.F.	VF Nord		16.277,00
	022	7.071,00		VF Nord-Est		4.620,00		
	023-029	2.181,00		VF Antenna Gravitazionale		3.650,00		
	024	938,00		VF 032		1.263,00		
	025	179,00		Tot:		25.810,00		
	026	68,90		P.D.	Tot:	2.540,00	1,33	
	027	171,00		GHIAIA	G Nord	430,00	1,03	
	028	1.567,00			G Piattaforma	153,00		
	031	228,00			G 032-033-028	1.387,00		
	032	3.576,00			Tot:	1.970,00		
	033	81,00						
051	647,00							
Tot:	29.123,90							
STRADE	Tot:	46.680,95	24,48					
TOTALE:			75.804,85	39,75	TOTALE:		114.882,15	60,25

25/03/2021				Confini LNL		190.687,00		
IMPERMEABILE	m²	%	PERMEABILE		m²	%		
EDIFICI	001 → 008	5.058,00	15,27	ERBA	E Nord	21.899,00	43,70	
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00		
	010	87,40			001 → 008	2.175,46		
	011	87,40			009	292,30		
	012	63,50			013-014-016	552,67		
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00		
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.000,22		
	015	489,00			022	794,50		
	016	102,00			032-033	4.293,00		
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.448,00		
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00		
	019	284,00			E Strada	1.306,00		
	020	134,00			Tot:	83.322,15		
	021	1.695,00			V.F.	VF Nord		16.277,00
	022	7.071,00		VF Nord-Est		4.620,00		
	023-029	2.181,00		VF Antenna Gravitazionale		3.650,00		
	024	938,00		VF 032		2.503,00		
	025	179,00		Tot:		27.050,00		
	026	68,90		P.D.	Tot:	2.540,00	1,33	
	027	171,00		GHIAIA	G Nord	430,00	1,03	
	028	1.567,00			G Piattaforma	153,00		
	031	228,00			G 032-033-028	1.387,00		
	032	3.576,00			Tot:	1.970,00		
	033	81,00						
051	647,00							
Tot:	29.123,90							
STRADE	Tot:	46.680,95	24,48					
TOTALE:			75.804,85	39,75	TOTALE:		114.882,15	60,25

28/06/2016				Confini LNL		190.687,00		
IMPERMEABILE	m²	%		PERMEABILE	m²	%		
EDIFICI	001 → 008	5.058,00	15,27	ERBA	E Nord	21.899,00	43,81	
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00		
	010	87,40			001 → 008	2.175,46		
	011	87,40			009	292,30		
	012	63,50			013-014-016	552,67		
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00		
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.011,22		
	015	489,00			022	821,50		
	016	102,00			032-033	4.293,00		
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.493,00		
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00		
	019	284,00			E Strada	1.306,00		
	020	134,00			Tot:	83.545,15		
	021	1.695,00		V.F.	VF Nord	16.277,00	14,11	
	022	7.071,00			VF Nord-Est	4.620,00		
	023-029	2.170,00			VF Antenna Gravitazionale	3.650,00		
	024	938,00			VF 032	2.363,00		
	025	179,00			Tot:	26.910,00		
	026	68,90		P.D.	Tot:	2.540,00	1,33	
	027	171,00		GHIAIA	G Nord	430,00	1,03	
	028	1.567,00			G Piattaforma	153,00		
	031	228,00			G 032-033-028	1.387,00		
	032	3.576,00			Tot:	1.970,00		
033	81,00							
051	647,00							
Tot:	29.112,90							
STRADE	Tot:	46.608,95	24,44					
TOTALE:			75.721,85	39,71	TOTALE:		114.965,15	60,29

14/03/2014				Confini LNL		190.687,00			
IMPERMEABILE	m²	%		PERMEABILE	m²	%			
EDIFICI	001 → 008	5.058,00	15,22	ERBA	E Nord	21.899,00	56,16		
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00			
	010	87,40			001 → 008	2.185,46			
	011	87,40			009	292,30			
	012	63,50			013-014-016	552,67			
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00			
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.011,22			
	015	489,00			022	821,50			
	016	102,00			032	6.653,00			
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.493,00			
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00			
	019	284,00			E Strada	1.306,00			
	020	134,00			Tot:	107.095,15			
	021	1.695,00		V.F.	VF Antenna Gravitazionale	3.650,00	3,00		
	022	7.071,00			VF 032	2.080,00			
	023-029	2.170,00			Tot:	5.730,00			
	024	938,00			P.D.	Tot:		2.540,00	1,33
	025	179,00			GHIAIA	G Nord		430,00	0,37
	026	68,90		G Piattaforma		153,00			
	027	171,00		G 032-028		118,00			
	028	1.567,00		Tot:		701,00			
	031	228,00							
	032	3.576,00							
051	647,00								
Tot:	29.031,90								
STRADE	Tot:	45.588,95	23,91						
TOTALE:			74.620,85	39,13	TOTALE:		116.066,15	60,87	

16/03/2012				Confini LNL		190.687,00	
IMPERMEABILE	m²	%		PERMEABILE	m²	%	
EDIFICI	001 → 008	5.058,00	13,35	ERBA	E Nord	21.899,00	56,04
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00	
	010	87,40			001 → 008	2.185,46	
	011	87,40			009	292,30	
	012	63,50			013-014-016	552,67	
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.042,22	
	015	489,00			022	821,50	
	016	102,00			032	10.180,00	
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.493,00	
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00	
	019	284,00			E Strada	1.306,00	
	020	134,00			Tot:	106.853,15	
	021	1.695,00					
	022	7.071,00		V.F.			5,00
	023-029	2.170,00			VF Antenna Gravitazionale	3.420,00	
	024	938,00			VF 032	6.110,00	
	025	179,00		Tot:	9.530,00		
	026	68,90		P.D.	Tot:	2.540,00	1,33
	027	171,00		GHIAIA	G Nord	430,00	0,31
	028	1.567,00			G Piattaforma	153,00	
031	228,00	Tot:	583,00				
	051	647,00					
	Tot:	25.455,90					
STRADE	Tot:	45.724,95	23,98				
TOTALE:				TOTALE:			
		71.180,85	37,33			119.506,15	62,67

26/05/2009				Confini LNL		190.687,00	
IMPERMEABILE	m²	%		PERMEABILE	m²	%	
EDIFICI	001 → 008	4.983,00	13,25	ERBA	E Nord	21.031,00	55,90
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	57.238,00	
	010	87,40			001 → 008	2.185,46	
	011	87,40			009	292,30	
	012	63,50			013-014-016	552,67	
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.671,00	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.168,45	
	015	489,00			022	821,50	
	016	102,00			032	10.180,00	
	017	499,00			E Antenna Gravitazionale	8.493,00	
	018	25,70			E Parcheggio	1.702,00	
	019	284,00			E Strada	1.306,00	
	020	134,00			Tot:	106.601,38	
	021	1.695,00					
	022	7.071,00		V.F.			4,74
	023-029	2.061,00			VF Antenna Gravitazionale	2.930,00	
	024	938,00			VF 032	6.110,00	
	025	179,00		Tot:	9.040,00		
	026	68,90		P.D.	Tot:	2.540,00	1,33
	027	171,00		GHIAIA	G Nord	1.475,00	0,85
	028	1.567,00			G Piattaforma	153,00	
031	228,00	Tot:	1.628,00				
	051	647,00					
	Tot:	25.271,90					
STRADE	Tot:	45.605,72	23,92				
TOTALE:				TOTALE:			
		70.877,62	37,17			119.809,38	62,83

				Confini storici	111.747,00		
31/07/2004				Confini LNL	190.687,00		
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE	m²	%	
EDIFICI	001 → 008	4.983,00	12,76	ERBA	Area coltivata	78.940,00	65,49
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	44.407,00	
	010	87,40			001 → 008	2.185,46	
	011	87,40			009	292,30	
	012	63,50			013-014-016	552,67	
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.749,00	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	6.498,45	
	015	489,00			022	821,50	
	016	102,00					
	017	499,00					
	018	25,70					
	019	284,00					
	020	134,00					
	021	1.695,00					
	022	7.071,00					
	023-029	1.994,00					
	024	938,00					
	025	179,00					
	026	68,90					
	027	171,00					
028	1.567,00						
Tot:	24.329,90						
					Tot:	124.885,38	
				V.F.			7,64
					VF Antenna Gravitazionale	14.561,00	
					Tot:	14.561,00	
STRADE	Tot:	26.910,72	14,11				
TOTALE:		51.240,62	26,87	TOTALE:	139.446,38	73,13	

				Confini storici	111.747,00		
10/08/1997				Confini LNL	190.687,00		
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE	m²	%	
EDIFICI	001 → 008	4.969,00	12,48	ERBA	Area coltivata	78.940,00	70,81
	009	2.807,00			E Nord-Ovest-Sud	44.407,00	
	010	87,40			001 → 008	2.195,86	
	011	87,40			009	292,30	
	012	63,50			013-014-016	552,67	
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.749,00	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	7.222,20	
	015	431,00			022	821,50	
	016	102,00			E Sud-Est	586,00	
	017	499,00					
	018	25,70					
	019	284,00					
	020	134,00					
	021	1.695,00					
	022	7.071,00					
	023-029	1.541,00					
	024	938,00					
	025	179,00					
	026	58,30					
	027	171,00					
028	1.567,00						
Tot:	23.794,30						
					Tot:	135.020,53	
				V.F.			3,01
					VF Antenna Gravitazionale	5.746,00	
					Tot:	5.746,00	
STRADE	Tot:	26.126,17	13,70				
TOTALE:		49.920,47	26,18	TOTALE:	140.766,53	73,82	

				Confini storici	93.178,00		
03/05/1994				Confini LNL	190.687,00		
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE	m²	%	
EDIFICI	001 → 008	4.969,00	10,75	ERBA	Area coltivata	97.509,00	76,36
	009	1.483,00			E Nord-Ovest-Sud	28.768,00	
	010	87,40			001 → 008	2.195,86	
	011	87,40			009	151,30	
	012	63,50			013-014-016	552,67	
	013	748,00			015-017-018-019-020	5.749,00	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	7.457,20	
	015	431,00			022	2.633,00	
	016	102,00			E Sud-Est	586,00	
	017	499,00			Tot:	145.602,03	
	018	25,70					
	019	284,00					
	020	134,00					
	021	1.695,00					
	022	7.071,00					
	023-029	1.541,00					
	024	702,00					
	025	179,00					
	026	58,30					
	Tot:	20.496,30					
STRADE	Tot:	24.588,67	12,89				
TOTALE:		45.084,97	23,64	TOTALE:	145.602,03	76,36	

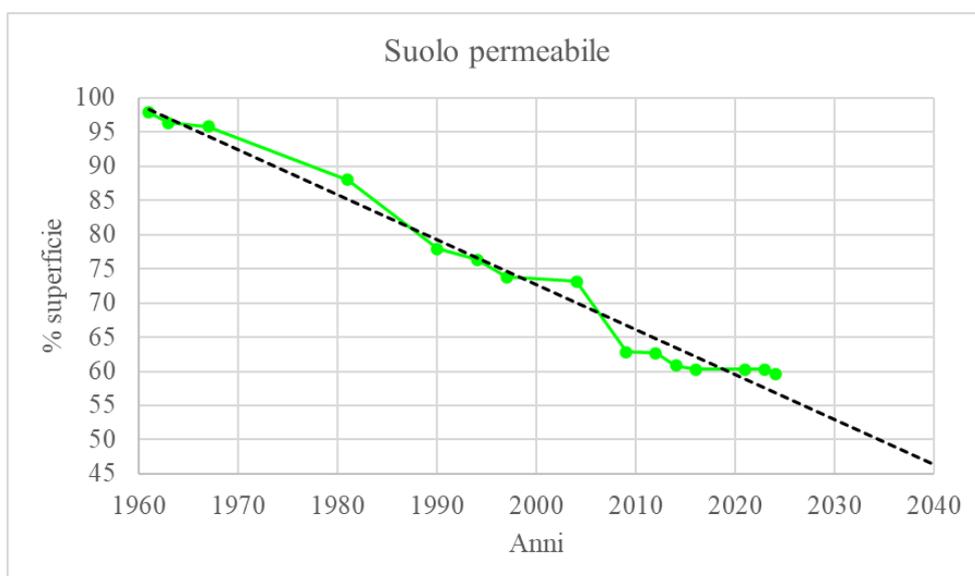
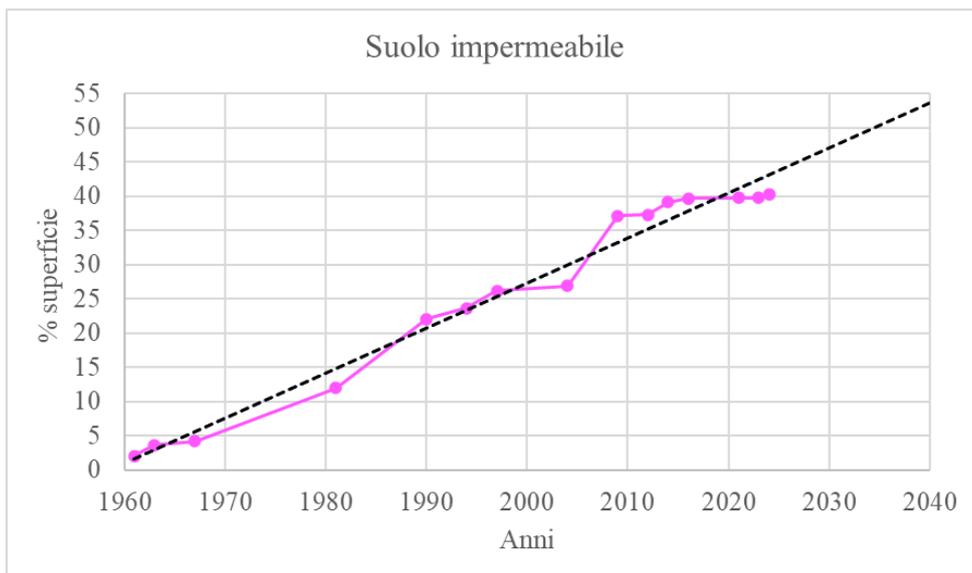
				Confini storici	93.178,00		
02/10/1990				Confini LNL	190.687,00		
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE	m²	%	
EDIFICI	001 → 008	4.291,00	9,45	ERBA	Area coltivata	97.509,00	77,91
	009	1.483,00			E Nord-Ovest-Sud	32.056,00	
	010	87,40			001 → 008	1.583,56	
	011	87,40			009	151,30	
	012	63,50			013-014-016	1.057,64	
	013	302,00			015-017-018-019-020	5.860,30	
	014	336,00			023-024-025-026-029-031	9.318,10	
	015	431,00			022	442,00	
	016	102,00			E Sud-Est	586,00	
	017	237,00			Tot:	148.563,90	
	018	25,70					
	019	284,00					
	020	134,00					
	021	1.695,00					
	022	6.689,00					
	023-029	1.541,00					
	025	179,00					
	026	58,30					
	Tot:	18.026,30					
	STRADE	Tot:		24.096,80	12,64		
TOTALE:		42.123,10	22,09	TOTALE:	148.563,90	77,91	

				Confini storici		59.457,00			
12/04/1981				Confini LNL		190.687,00			
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE		m²	%		
EDIFICI	001 → 008	3.650,00	6,30	ERBA	Area coltivata	131.230,00	88,03		
	012	63,50			E Nord-Ovest-Sud	20.096,00			
	013	302,00			001 → 008	2.241,70			
	014	336,00			015-017-018-019-020	890,00			
	015	431,00			023-024-025-026-029-031	11.834,00			
	016	102,00			022	982,00			
	017	237,00			E Sud-Est	586,00			
	021	901,00			Tot:	167.859,70			
	022	4.203,00							
	023-029	1.541,00							
	025	179,00							
	026	58,30							
Tot:	12.003,80								
STRADE		Tot:	10.823,50	5,68					
TOTALE:		22.827,30	11,97	TOTALE:		167.859,70	88,03		

				Confini storici		19.637,00			
1967				Confini LNL		190.687,00			
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE		m²	%		
EDIFICI	001 → 008	3.207,00	2,08	ERBA	Area coltivata	171.050,00	95,83		
	012	18,30			E Nord-Ovest-Sud	7.871,00			
	014	336,00			001 → 008	2.453,70			
	015	401,00			015-017-018-019-020	728,00			
	Tot:	3.962,30			023-024-025-026-029-031	627,00			
				Tot:	182.729,70				
STRADE		Tot:	3.995,00	2,10					
TOTALE:		7.957,30	4,17	TOTALE:		182.729,70	95,83		

				Confini storici		18.663,00			
1963				Confini LNL		190.687,00			
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE		m²	%		
EDIFICI	001 → 008	2.406,00	1,48	ERBA	Area coltivata	172.024,00	96,38		
	012	18,30			E Nord-Ovest-Sud	8.601,00			
	015	401,00			001 → 008	1.811,00			
					015-017-018-019-020	728,00			
	Tot:	2.825,30			023-024-025-026-029-031	627,00			
				Tot:	183.791,00				
STRADE		Tot:	4.070,70	2,13					
TOTALE:		6.896,00	3,62	TOTALE:		183.791,00	96,38		

				Confini storici		18.663,00			
1961				Confini LNL		190.687,00			
IMPERMEABILE		m²	%	PERMEABILE		m²	%		
EDIFICI	001 → 008	1.529,00	0,83	ERBA	Area coltivata	172.024,00	97,90		
	012	18,30			E Nord-Ovest-Sud	13.949,00			
	015	31,30			001 → 008	702,00			
	Tot:	1.578,60			Tot:	186.675,00			
STRADE		Tot:	2.433,40	1,28					
TOTALE:		4.012,00	2,10	TOTALE:		186.675,00	97,90		



Anni	Suolo impermeabile (%)	Anni	Suolo permeabile (%)
1961	2,10	1961	97,90
1963	3,62	1963	96,38
1967	4,17	1967	95,83
1981	11,97	1981	88,03
1990	22,09	1990	77,91
1994	23,64	1994	76,36
1997	26,18	1997	73,82
2004	26,87	2004	73,13
2009	37,17	2009	62,83
2012	37,33	2012	62,67
2014	39,13	2014	60,87
2016	39,71	2016	60,29
2021	39,75	2021	60,25
2023	39,75	2023	60,25
2024	40,34	2024	59,66

4. CONCLUSIONI

In questa tesi sono stati presi in analisi l'area di competenza dei Laboratori Nazionali di Legnaro ed il reticolo idrografico minore, con l'obiettivo di ricostruire l'evoluzione storica del territorio da un lato e di aggiornare le cartografie tematiche di dettaglio dall'altro.

La tecnologia della *Digital Earth* ha permesso di condurre l'analisi dell'area dei LNL, svolta con Google Earth Pro sulla base dei materiali satellitari, aerei e storici presi in esame, riportando che attualmente, dei 19 ettari di proprietà dei Laboratori, quasi 7,7 di essi sono stati utilizzati per costruire i vari fabbricati e le infrastrutture al loro servizio, mentre i restanti 11,3 sono rimasti, come in passato, permeabili. Dall'esame dell'uso del suolo eseguito risulta infatti che, quando vennero fondati, le strutture occupassero solamente circa 4.000 metri quadrati e la parte rimanente, invece, era adibita a zona agricola. Con gli anni, ovviamente, l'Istituto ha incrementato le sue strutture e si è potuto evidenziare che, nell'intervallo di tempo dalla sua istituzione fino ad oggi, l'impermeabilizzazione del suolo è stata lineare e crescente nel tempo, arrivando ad occupare praticamente il 40% della superficie attualmente disponibile. Il restante 60% non è più adibito, come un tempo, all'agricoltura ma a zona di prato con anche una parte di fitta vegetazione arborea ed erbacea. Osservando i grafici riportati al capitolo precedente si può concludere che, se l'impermeabilizzazione del suolo continuerà con lo stesso andamento avuto fino ad adesso, entro il 2040 si avrà una percentuale di suolo cementificato pari a più del 50% di superficie.

L'utilizzo dei SAPR e del GNSS con metodologia a rete RTK per rilevare la lunga estensione del reticolo idrografico minore e l'ampia area dei LNL si è rivelata una scelta idonea in quanto ha consentito di giungere a risultati centimetrici nonostante le grandi dimensioni del rilievo effettuato. I casi studio approfonditi al sottocapitolo 3.1 (integrazione delle metodologie di rilievo) hanno appurato che l'impiego dei due metodi di rilevamento era già stato adoperato per territori naturali e artificiali similari, riuscendo a giungere anche in quei casi a delle buone precisioni negli *output* cartografici finali. Sulla base sempre dagli stessi studi esaminati è possibile valutare che, considerando l'ampia estensione delle zone oggetto dei rilievi (11 Km di reticolo idrografico minore e 19 ettari di terreno dei Laboratori), sarebbe risultato più ottimale e opportuno utilizzare un drone

ad ala fissa invece che un multirottore come è stato fatto, poiché, grazie alla maggiore autonomia di volo, avrebbe consentito di mappare superfici maggiori riducendo il numero delle uscite in campo per effettuare tutte le prese fotografiche, purtroppo però, tale tipologia di drone, non era in dotazione allo *staff* del master GIScience e SPR al momento di svolgere il lavoro. Un'ulteriore sistema per ridurre il tempo trascorso in campo per eseguire i rilievi SAPR e GNSS sarebbe potuto essere quello di far uso di un drone munito di modulo RTK a bordo, in modo tale da poter distribuire e misurare un numero di GCP inferiore e quindi diminuire il tempo impiegato per rilevare i punti con il ricevitore GNSS, in quanto è risultata l'operazione più dispendiosa in termine di tempistica durante le uscite, ma riuscendo comunque ad ottenere buone precisioni nei risultati finali. Nel caso dei rilievi in questione non sarebbe risultato possibile sfruttare solamente un ipotetico APR-RTK, senza il rilevamento dei punti con il sistema GNSS, per il fatto che era necessario misurare anche la sezione dei canali consorziali, quindi acquisire la quota del fondale sott'acqua, e non solo le sponde a vista, per poter condurre le successive analisi idrauliche relative alla portata degli stessi. Nell'area dei Laboratori invece, al momento del rilievo in campo, ci si è imbattuti in una alta e fitta erba che, senza l'utilizzo dei GCP ma solo con APR-RTK, non sarebbe stato possibile misurare la corretta quota del terreno, tuttavia un drone di quel tipo sarebbe stato utile per rilevare i punti posizionati tra gli edifici senza avere disturbi al segnale GPS o possibili errori derivanti dal *multipath*, quindi in ogni caso non si sarebbe potuto sostituire totalmente il rilievo svolto con sistema GPS ma un'APR-RTK avrebbe potuto abbassare i tempi di permanenza in campo per svolgere il lavoro e, in alcuni occasioni, migliorare ed integrare le misure effettuate con il classico ricevitore GNSS.

BIBLIOGRAFIA

Achilli V., *Principi di funzionamento del sistema GPS*. (2020-2021, II° semestre). Topografia generale. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Albeaino G., Gheisari M., Franz B.W. (2019) *A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain*. ITcon, 24, 381-405. <https://www.itcon.org/2019/20>

Brigante R. (2010) *Metodologie automatiche nell'elaborazione di immagini satellitari stereoscopiche ad alta risoluzione per applicazioni ingegneristiche*. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italia. <http://www.aotec-geomatica.it/wp-content/uploads/2012/06/Brigante.pdf>

Carraro F., *Dalla fotogrammetria all'analisi dei modelli 3D*. (2020-2021, II° semestre). Drones for Good: Sistemi a Pilotaggio Remoto e Digital Earth. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Carraro F., *Fondamenti di fotogrammetria e rilievo fotogrammetrico da drone*. (2021-2022, I° semestre). Drones for Good: Sistemi a Pilotaggio Remoto e Digital Earth. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Choi-Fitzpatrick A., Chavarria D., Cychosz E. et al (2016) *Up in the Air: A Global Estimate of Non-Violent Drone Use 2009-2015*. <https://doi.org/10.22371/08.2016.001>

Comune di Legnaro, *Carta del rischio idraulico* (Aprile 2024): https://www.comune.legnaro.pd.it/c028044/images/Urbanistica_Territorio/Varie/PGRA/AH22_RI.pdf

Comune di Legnaro, *Carta della pericolosità idraulica* (Aprile 2024): https://www.comune.legnaro.pd.it/c028044/images/Urbanistica_Territorio/Varie/PGRA/AH22_PI.pdf

Comune di Legnaro, *Norme tecniche di attuazione PGRA* (Aprile 2024): https://www.comune.legnaro.pd.it/c028044/images/Urbanistica_Territorio/Varie/PGRA/Norme%20Tecniche%20Attuazione_6_.pdf

Craglia M., de Bie K., Jackson D. et al (2012) *Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade*. International Journal of Digital Earth, 5(1), 4-21.

<https://doi.org/10.1080/17538947.2011.638500>

Cretella E., Mataloni G., Pasculli A., Sciarra N. (2006) *Valutazione della stabilità spondale di un tratto in forte erosione del fiume Vomano (TE) mediante analisi 3D alle differenze finite*. Giornale di Geologia Applicata, 4, 20-30. DOI: 10.1474/GGA.2006-04.0-03.0131

D'Apostoli R., Giampaolo F. (2018) *Guida pratica al rilievo topografico con GPS e stazione totale*. EPC Editore, ISBN: 978-88-6310-866-8

D'Urso M.G., Gargiulo A., Rotondi A., Bracaglia R. (2015) *Un'applicazione al settore ambientale di fotogrammetria con piattaforma UAV*. 19^a Conferenza Nazionale ASITA, Lecco, Italia, 29 Settembre - 1 Ottobre, 347-354. Available: <http://atti.asita.it/ASITA2015/Pdf/183.pdf>

Fu W., Ma J., Chen P., Chen F. (2020) *Remote Sensing Satellites for Digital Earth*. In: Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. (eds) *Manual of Digital Earth*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_3

Goodchild M.F. (2007) *Citizens as sensors: The world of volunteered geography*. GeoJournal, 69, 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>

Goodchild M.F., Guo H., Annoni A. et al (2012) *Next-generation Digital Earth*. Proc Natl Acad Sci USA, 109(28), 11088–11094. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202383109>

Gore A. (1999) *The Digital Earth: understanding our planet in the 21st Century*. Photogramm Eng Remote Sens, 65(5), 528-530.

Grossner K.E., Clarke K.C. (2007) *Is Google Earth, "Digital Earth?" – Defining a Vision*. 1-10.

Guarnieri A., *I sistemi di posizionamento satellitare globale GNSS*. (2021-2022, I° semestre). Laboratorio di rilevamento e geomatica. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Guarnieri A., *Impiego della tecnologia GNSS nel rilievo del territorio*. (2021-2022, I° semestre). Laboratorio di rilevamento e geomatica. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Guo H., Liu Z., Jiang H., Wang C., Liu J., Liang D. (2017) *Big Earth Data: a new challenge and opportunity for Digital Earth's development*. International Journal of Digital Earth, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1264490>

Hallermann N., Morgenthal G., Rodehorst V. (2015) *Unmanned Aerial Systems (UAS) – Case Studies of Vision Based Monitoring of Ageing Structures*. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015), Berlin, Germany, September 15 - 17.

International Society for Digital Earth (1999) *Beijing Declaration on Digital Earth*. Approved at the First International Symposium on Digital Earth. Available: <http://www.digitalearth-isde.org/uploadfile/2020/1231/20201231115341795.pdf>

International Society for Digital Earth (2009) *Beijing Declaration on Digital Earth*. Approved at the Six International Symposium on Digital Earth. Available: <http://www.digitalearth-isde.org/uploadfile/2020/1231/20201231115321467.pdf>

International Society for Digital Earth (2019) *Florence Declaration*. Approved at the Eleventh International Symposium on Digital Earth. Available: <http://www.digitalearth-isde.org/uploadfile/2020/1231/20201231093014375.pdf>

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, *Chi siamo - Opuscolo LNL*. (Aprile 2024): <https://www.lnl.infn.it/wp-content/uploads/Opuscololnl.pdf>

Liu Z., Foresman T., van Genderen J., Wang L. (2020) *Understanding Digital Earth*. In: Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. (eds) *Manual of Digital Earth*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_1

Lo Brutto M. (2016) *I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche*. GEOLOGI DI SICILIA, 2, 21-33.

Mastrorocco G., Vanneschi C., Salvini R., Coltorti M., Mazzurco L. (2015) *SAPR photogrammetry for the study of damaging hydrogeological events: The example of Ripa Bianca natural reserve, Esino River (Marche, Italy)*. Rendiconti online della Società Geologica Italiana, 35, 204-207. <https://doi.org/10.3301/ROL.2015.101>

Memmolo A., Famiglietti N.A., Moschillo R., Grasso C., Vicari A. (2023) *UAS-LC-GNSS: Precision Surveying with a Low-Cost GNSS System for Commercial Drones*. Rendiconti Online della Società Geologica Italiana, 60, 134-139. <https://doi.org/10.3301/ROL.2023.37>

Menin A., *Dispense di topografia – Cenni sulla metodologia satellitare*. (2021-2022, II° semestre). Metodologie innovative per il rilievo 3-D. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Menin A., *Dispense di topografia – Fotogrammetria*. (2021-2022, II° semestre). Metodologie innovative per il rilievo 3-D. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Pappalardo S., *Sistema a pilotaggio remoto per l'analisi del territorio: elementi*. (2021-2022, I° semestre). Drones for Good: Sistemi a Pilotaggio Remoto e Digital Earth. Padova, Italia: Università degli Studi di Padova.

Sefercik U., Nazar M. (2023) *Consistency Analysis of RTK and Non-RTK UAV DSMs in Vegetated Areas*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 16, 5759-5768. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3288947

Vu N. Q. et al (2023) *A Comparative Study of UAV Lidar, UAV, and GNSS RTK on Infrastructure Survey*. The 4th International Conference on Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC-2023), Danang, Vietnam, August 26 – 28, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1289 (012098). DOI: 10.1088/1757-899X/1289/1/012098

SITOGRAFIA

Consorzio di Bonifica Bacchiglione, *Carte tematiche*.

<https://www.consorziobacchiglione.it/il-consorzio/carte-tematiche.html> (Maggio 2024).

Consorzio di Bonifica Bacchiglione, *Chi siamo*.

<https://www.consorziobacchiglione.it/il-consorzio/chi-siamo.html> (Maggio 2024).

Consorzio di Bonifica Bacchiglione, *Mappa canali*.

<https://www.consorziobacchiglione.it/servizi/mappa-canali.html> (Settembre 2023).

Corradeghini P., *Un rilievo integrato*. 3DMETRICA.

<https://3dmetrica.it/rilievo-integrato/> (Giugno 2024).

Corradeghini P., *Una foto dall'alto non è un'ortofoto*. 3DMETRICA.

<https://3dmetrica.it/ortofoto/> (Maggio 2024).

DJI, *DJI Mavic 2 Pro*.

<https://www.dji-store.it/prodotto/dji-mavic-2-pro/> (Giugno 2024).

HydroloGIS S.r.l., *SMASH Reference Manual*.

<https://www.geopaparazzi.org/smash/index.html> (Maggio 2024).

International Society for Digital Earth, *About ISDE*.

<http://www.digitalearth-isde.org/list-2-1.html> (Maggio 2024).

International Society for Digital Earth Council (2012), *What is Digital Earth*.

<http://www.digitalearth-isde.org/list-90-1.html> (Maggio 2024).

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, *Laboratori Nazionali di Legnaro*.

<https://www.inl.infn.it/i-laboratori-di-legnaro/> (Aprile 2024).

Laboratori Nazionali di Legnaro, *Sezione Galleria di immagini – Foto Storiche*.

<https://gallery.inl.infn.it/index.php?/category/22> (Agosto 2023).

Monito - Guida multimediale al monitoraggio delle frane, *Sistema di monitoraggio:*

Telerilevamento da satellite – Remote Sensing. Monitoraggio & Strumentazione.

<https://monito.irpi.cnr.it/sistema-di-monitoraggio-telerilevamento-da-satellite-remote-sensing/> (Maggio 2024).

Regione del Veneto, *Geoportale della Regione del Veneto – sezione Aerofototeca*.
<https://idt2.regione.veneto.it/portfolio/aereofototeca/> (Maggio 2023).

SPH Engineering, *Application – UgCS Photogrammetry Tool for UAV Land Survey Missions*.
<https://www.sphengineering.com/news/ugcs-photogrammetry-tool-for-uav-land-survey-missions> (Giugno 2024).

SPH Engineering, *Drone Flight Planning & Control – UgCS*.
<https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs> (Giugno 2024).

SPH Engineering, *Photogrammetry corridor*. Manual UgCS.
<https://manuals-ugcs.sphengineering.com/v4.20/docs/photogrammetry-corridor> (Giugno 2024).