



**Politecnico  
di Torino**

**Corso di Laurea Magistrale in  
Architettura Costruzione Città (LM-4)**

**Tesi di Laurea Magistrale**

**Il ruolo della Geomatica a supporto della valutazione dei danni al  
territorio a seguito di eventi alluvionali. Il caso dell'alluvione di Ottobre  
2020 a Limone Piemonte (CN).**

**Relatore:**

Prof.re Fabio Giulio Tonolo

**Correlatore:**

Prof.ssa Antonia Teresa Spanò

**Candidato:**

Marcello Cittadini Bellini

A. A. 2021 – 2022



*Ringraziamenti:*

*Ringrazio i miei relatori per il costante supporto e confronto, è stata un'esperienza coinvolgente e di grande crescita personale.*

*Ringrazio i miei amici e colleghi con cui ho vissuto una splendida vita accademica.*

*Ma ringrazio soprattutto i miei genitori, le persone a cui devo tutto e che mi hanno permesso di vivere serenamente i migliori anni della mia vita.*



# Indice

<b>Introduzione alla tesi</b> .....	1
<b>1. Geomatica: discipline, tecniche ed ambiti applicativi</b> .....	3
<b>1.1 Il rilievo topografico</b> .....	4
1.1.1 Metodi posizionamento satellitare .....	4
1.1.2 Rilievo cinematico in tempo reale (RTK) .....	7
<b>1.2 Telerilevamento</b> .....	8
1.2.1 Radiazione elettromagnetica.....	10
1.2.2 Interazioni energetiche con la superficie terrestre .....	13
1.2.3 Curve di riflettanza spettrale .....	14
<b>1.3 Fotogrammetria</b> .....	16
1.3.1 L'immagine digitale .....	17
1.3.2 Principi base della fotogrammetria .....	18
1.3.3 Processo fotogrammetrico .....	20
<b>1.4 Piattaforme</b> .....	24
1.4.1 Piattaforme satellitari.....	24
1.4.2 Piattaforme aeree senza pilota (UAV) o droni .....	26
<b>1.5 Strumenti e Sensori</b> .....	29
1.5.1 Risoluzione dei sensori .....	29
1.5.2 Tipologia dei sensori .....	31
<b>1.6 Tecniche</b> .....	33
1.6.1 Pre-elaborazione immagini satellitari.....	33
1.6.2 La Classificazione delle acquisizioni satellitari.....	34
1.6.3 Algoritmi SfM per estrazione di nuvole di punti 3D .....	36
<b>1.7 Prodotti</b> .....	38
1.7.1 Modelli di elevazione.....	38
1.7.2 Immagini georeferenziate e ortoproiettate .....	39
1.7.3 Nuvole di punti .....	39
<b>1.8 I Sistemi Informativi Geografici</b> .....	40
<b>2. Contributo della Geomatica a supporto della gestione di eventi alluvionali: la cartografia d'emergenza</b> .....	42
<b>2.1 Il telerilevamento satellitare nel monitoraggio danni nelle alluvioni</b> .....	43
<b>2.2 La fotogrammetria da drone a supporto della gestione delle emergenze</b> .....	46

<b>3 Caso studio: Limone Piemonte (CN)</b> .....	49
<b>3.1 I dati utilizzati</b> .....	52
<b>3.2 Indagini sull'edificato tramite dati dei Sistemi Informativi Geografici</b> .....	54
3.2.1 Sviluppo tessuto urbano dagli anni '60 ad oggi .....	54
3.2.2 Edificato esposto a pericolosità alluvionale .....	57
<b>3.3 Elaborazione dei dati satellitari</b> .....	61
3.3.1 Acquisizione ed elaborazione del dato satellitare .....	61
3.3.2 Classificazione dell'immagine satellitare .....	63
<b>3.4 Definizione ed analisi delle aree di interesse</b> .....	67
3.4.1 Analisi risultati della classificazione automatica sulle aree di interesse .....	68
<b>3.5 Elaborazione dati da drone</b> .....	75
3.5.1 Acquisizione dati tramite drone .....	75
3.5.2 Processamento dei dati raccolti tramite drone .....	77
<b>3.6 Valutazione dei prodotti di acquisizioni satellitari e da drone</b> .....	80
3.6.1 Confronto fra modelli di elevazione prima e dopo l'evento .....	80
3.6.2 Confronto dell'ortofoto da satellite e da drone .....	86
3.6.3 Elaborazione dati da drone .....	89
<b>4. Conclusioni</b> .....	96
<b>5. Bibliografia e sitografia</b> .....	98





## Introduzione alla tesi

L'obiettivo di questa tesi è quello di individuare e validare una procedura finalizzata all'identificazione e al rilievo di eventuali danni occorsi al territorio ed al patrimonio costruito dopo un evento alluvionale basandosi su tecniche, strumenti e discipline afferenti alla Geomatica, quali il Telerilevamento, la Fotogrammetria digitale ed i Sistemi Informativi Geografici (GIS).

In Italia, l'andamento dei fenomeni di dissesto idrogeologico negli ultimi cinquanta anni mostra un progressivo aumento del rischio per la popolazione e dei conseguenti danni subiti dal territorio. L'espansione urbana che ha interessato tutto il Paese in modo rilevante dal dopoguerra ha determinato l'antropizzazione di territori fragili, esponendo ad un rischio elevato la popolazione soprattutto in relazione all'intensificazione dei fenomeni estremi per effetto dei cambiamenti climatici (Lastoria, Bussetini, Mariani, Piva, & Braca, 2021).

La Geomatica comprende "l'acquisizione, la restituzione, l'analisi e la gestione di dati di natura metrica o tematica relativi alla superficie della Terra, o a porzioni di essa, ivi compreso l'ambiente urbano, le infrastrutture e il patrimonio architettonico, individuati dalla loro posizione spaziale e qualificati dalla precisione del rilevamento" (AUTeC - Associazione Universitari di Topografia e Cartografia, 1998). Alcune discipline derivate dalla Geomatica ed i loro recenti sviluppi tecnologici, come Telerilevamento e Fotogrammetria, possono contribuire in maniera decisiva alla generazione di conoscenza di un territorio affetto da tali eventi.

Nell'ottica di tali obiettivi la scelta del caso studio è ricaduta sul comune di Limone Piemonte (CN), territorio montano colpito da un importante evento alluvionale tra il 2 ed il 3 Ottobre 2020, oggetto di uno stage del team studentesco DiRECT (Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali - G4CH) del Politecnico di Torino finalizzato all'acquisizione di dati a supporto della valutazione dei danni al territorio.

Nell'ambito di queste attività è stata acquisita un'immagine satellitare ad alta risoluzione spaziale ed è stata eseguita la campagna di rilievo da parte del Team DiRECT che ha fornito i dati acquisiti tramite drone; ho avuto possibilità di partecipare ad una campagna in loco di rilievo topografico dei punti di controllo a terra e all'acquisizione di immagini tramite drone per la successiva elaborazione fotogrammetrica di una porzione dell'area di studio.

I dati cartografici di riferimento sono stati utilizzati come base per la presentazione dell'area di studio, valutando in particolare l'evoluzione temporale dell'occupazione del suolo, la probabilità di esposizione ad un possibile evento alluvionale dell'edificato e per l'analisi dei risultati ottenuti durante lo sviluppo della tesi.

L'acquisizione satellitare utilizzata fornisce informazioni nello spettro del visibile e dell'infrarosso: questa è stata processata con tecniche di classificazione automatica per identificare le macro aree colpite dall'evento alluvionale in oggetto. A seguito di questa operazione sono state identificate due

aree di interesse per valutare i danni occorsi al territorio e agli edifici attraverso l'analisi dei dati metrici 3D basati sul rilievo da drone.

I dati raccolti da drone, con la finalità di essere utilizzati in un processo fotogrammetrico, sono stati elaborati per creare prodotti cartografici come ortofoto e modelli digitali 3D dell'area indagata.

Lo studio è avvenuto tramite la produzione, il processamento, l'analisi ed il confronto di informazioni derivate da piattaforme diverse per l'identificazione ed il rilievo di eventuali danni occorsi al territorio ed all'edificato. A conclusione di questa ricerca verranno discusse criticità ed opportunità, analizzando i risultati ottenuti e le relative implicazioni operative.

## 1. Geomatica: discipline, tecniche ed ambiti applicativi

La Geomatica raccoglie in essa diverse discipline, tecniche e strumenti che permettono "l'acquisizione, la restituzione, l'analisi e la gestione di dati di natura metrica o tematica relativi alla superficie della Terra, o a porzioni di essa, ivi compreso l'ambiente urbano, le infrastrutture e il patrimonio architettonico, individuati dalla loro posizione spaziale e qualificati dalla precisione del rilevamento" (AUTeC - Associazione Universitari di Topografia e Cartografia, 1998).

"Le discipline e le tecniche che costituiscono la Geomatica sono: la Geodesia, determina la forma e la dimensione della Terra; la Topografia, combina procedure e strumenti per il rilievo diretto del territorio; la cartografia, fornisce una possibile descrizione della forma e dimensione della Terra e dei suoi dettagli naturali e artificiali mediante rappresentazione grafica o numerica di aree più o meno estese secondo regole fisse; la Fotogrammetria, determina la posizione e le forme degli oggetti misurandoli su immagini fotografiche; il Telerilevamento, per acquisire a distanza dati territoriali e ambientali; l'informatica (*computer science*), per rappresentare informazioni ed elaborare digitalmente operazioni applicabili attraverso lo sviluppo di strumenti tecnologici (es. hardware) e di metodi, modelli e sistemi (es. software)" (Gomarasca M. , 2009).

La gestione e condivisione dell'informazione geografica passa attraverso i Sistemi Informativi Geografici, infrastrutture per organizzare e distribuire diversi tipi di dati attraverso l'integrazione di questi con la loro posizione rispetto ad un sistema di riferimento noto (esri.com, 2021). Questi strumenti permettono di analizzare, modificare, accedere e visualizzare dai geografici tramite la componente informatica del sistema informativo, che raccoglie fisicamente le informazioni di cui si è parlato, utilizzate in questa tesi per la realizzazione di analisi geografiche, la visualizzazione 3D dei dati elaborati e la creazione di mappe tematiche.

## 1.1 Il rilievo topografico

Diverse delle tecniche che verranno presentate in questa tesi necessitano della conoscenza delle coordinate dei punti, rispetto ad un sistema di riferimento noto, che devono essere misurate tramite il rilievo topografico.

“La finalità essenziale della topografia è quella di determinare la posizione spaziale di un insieme di punti, appartenenti alla superficie fisica della Terra, e di darne poi una rappresentazione grafica a scala ridotta, su un piano orizzontale materializzato dal foglio di carta del disegno” (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012), per raggiungere tale risultato sono necessarie fasi operative che prendono il nome di rilievo topografico e comprendono operazioni di campagna, di calcolo e di restituzione grafica.

Nelle operazioni di campagna si devono ottenere le misure delle varie grandezze, come angoli, distanze e dislivelli, per un numero finito di punti scelti dall'operatore in base alla scala di rappresentazione del territorio da rilevare e alle caratteristiche morfologiche del sito. Essenzialmente si determinano in planimetria ed altimetria i vari punti, ovvero la posizione delle loro proiezioni su un piano orizzontale e la loro quota rispetto ad esso.

Sulle misurazioni effettuate si eseguono delle operazioni di calcolo volte a materializzare le coordinate spaziali dei punti in un sistema di riferimento, la complessità di questa fase è direttamente collegata agli strumenti utilizzati nella precedente.

Infine la restituzione grafica permette di rappresentare in una scala ridotta i punti misurati nelle operazioni di campagna, questa fase condiziona tutto il rilievo in quanto ne determina procedure e gli strumenti più idonei da utilizzare (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

Oggi è possibile misurare tali distanze tra punti mediante sistemi di posizionamento satellitare, infatti utilizzando due ricevitori è possibile misurare, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche e dal terreno circostante, il segmento (*baseline*) che li unisce e la sua proiezione sulla superficie di riferimento, questa tecnica prende il nome di posizionamento differenziale. Questi sistemi di posizionamento possono essere usati per rilievi speditivi dove uno dei ricevitori è in movimento continuo (rilievo cinematico) e sono particolarmente adatti al rilievo di particolari topografici (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012), in questa tesi verrà illustrata la sola tecnica di rilievo cinematico in tempo reale.

### 1.1.1 Metodi posizionamento satellitare

Al fine di ottenere la misurazione e rappresentazione di oggetti in ambito architettonico o di parti di territorio è necessario tenere in considerazione che le misure effettuate sono soggette ad un certo grado di errore e di approssimazione rispetto al dato reale. È possibile gestire e determinare l'entità e grado di tali errori tramite la misurazione durante un rilievo di punti di controllo (GCP –

*Ground Control Points*) disposti uniformemente sull'area di interesse a seconda della morfologia del territorio. La determinazione di tali punti, sotto forma di vertici e poligoni, è necessaria al fine di orientare l'oggetto in un sistema di riferimento di coordinate noto e avviene attraverso l'uso di sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*). "Rispetto alle tradizionali metodologie di rilievo, sono semplificate le operazioni di individuazione dei punti da rilevare, in quanto in ambito GNSS non è richiesta la reciproca visibilità tra di essi, come sono del tutto ininfluenti le condizioni atmosferiche" (Cannarozzo, Cucchiari, & Meschieri, 2012).

Il posizionamento satellitare è la determinazione della posizione di un punto sulla terra o in mare, in aria e nello spazio, per mezzo di satelliti artificiali, rispetto ad un sistema di riferimento noto. I sistemi operativi di posizionamento satellitare presuppongono che le posizioni dei satelliti siano note in ogni istante (*epoch*). Con il termine GNSS si indica ogni singolo sistema di posizionamento satellitare globale, nonché la combinazione o il "miglioramento" (*augmentation*) di questi sistemi, ne fanno parte quello statunitense GPS (*Global Positioning System*), quello russo GLONASS, quello europeo GALILEO e quello cinese BEIDOU. (Jin, Cardellach, & Xie, 2014).

I satelliti operativi forniscono principalmente all'utente la capacità di determinare la sua posizione, espressa, per esempio, per latitudine, longitudine e altezza. Questa operazione viene eseguita mediante il semplice processo di resezione (*resection*) ovvero utilizzando differenze tra distanze misurate rispetto ai satelliti. Si considerino i satelliti nello spazio in un dato istante (Fig. 1). Il vettore spaziale  $Q^s$  relativo alla distanza tra il centro della terra (*geocenter*) e ciascun satellite può essere calcolato dalle effemeridi, l'insieme di parametri sintetici necessari e sufficienti per calcolare la posizione del satellite nel tempo, trasmesse dal satellite mediante un algoritmo specifico. Se il ricevitore a terra definito dal suo vettore di posizione geocentrica  $Q_r$  utilizzasse un orologio che fosse impostato esattamente sull'ora del sistema di riferimento, la distanza geometrica o la distanza da ciascun satellite potrebbe essere misurata con precisione registrando il tempo di trasmissione richiesto affinché il segnale radio (codificato) raggiunga il ricevitore. Ogni distanza definisce una sfera (più precisamente la superficie di una sfera) con il suo centro nella posizione del satellite. Quindi, ammessa la sincronia del tempo, sarebbe necessario conoscere la posizione di soli tre satelliti poiché l'intersezione di tre sfere produca le tre incognite, ad esempio latitudine, longitudine e altezza (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Walse, 2008).

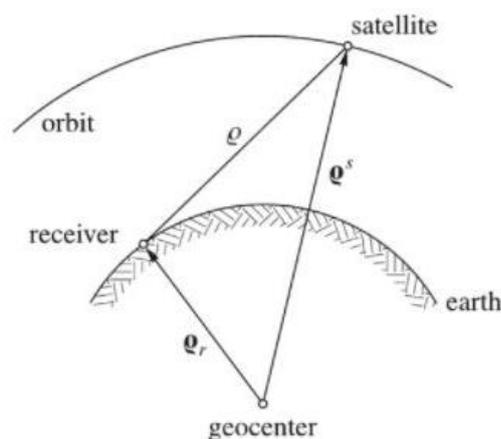


Fig. 1 Schema funzionamento ricevitore GNSS. Fonte (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Walse, 2008)

I moderni ricevitori a terra sono dotati di orologi con oscillatori al cristallo, meno precisi e assai più economici rispetto agli orologi atomici a bordo dei satelliti. Proprio per questo l'orario è sfasato rispetto all'ora reale del sistema e a causa di questo scostamento la distanza misurata dal satellite differisce da quella reale. Perciò le grandezze misurate sono distanze approssimative (pseudodistanze - *pseudoranges*) poiché rappresentano la distanza geometrica più una correzione della misura risultante dall'errore causato dall'orologio incorporato al ricevitore. È necessario quindi avere quattro distanze misurate simultaneamente da quattro satelliti per risolvere le quattro incognite; vale a dire le tre componenti di posizione più l'errore insito negli orologi (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Walse, 2008).

Ogni sistema GNSS è costituito da un segmento spaziale (i satelliti), un segmento di controllo (le stazioni a terra) e un segmento utente (i ricevitori GNSS), questi sistemi si basano su un'architettura e principi di funzionamento simili.

Il segmento spaziale di un GNSS è costituito da una serie di satelliti che trasmettono segnali radio, sono posti in orbite circolari, a circa 20000 km di altitudine, su piani paralleli inclinati rispetto al piano equatoriale. Operare a un'altitudine così elevata consente ai segnali di coprire un'area più ampia. I satelliti sono progettati e messi in orbite in modo tale che un ricevitore GNSS sulla Terra possa sempre ricevere segnali o informazioni da almeno quattro di essi in un ogni momento.

Ogni satellite contiene almeno tre orologi atomici ad alta precisione e trasmette costantemente segnali radio utilizzando il proprio codice di identificazione univoco. Ogni satellite trasmette segnali radio a bassa potenza su più frequenze nella zona delle microonde dello spettro elettromagnetico. I ricevitori GNSS sono progettati per ricevere questi segnali. Il segnale viaggia nella "linea di vista", il che implica che può passare attraverso nuvole, vetro e plastica, ma non attraverso la maggior parte degli oggetti solidi come edifici e montagne. Lo scopo principale di questi segnali codificati è quello di consentire il calcolo del tempo di percorrenza del segnale dal satellite al ricevitore dell'utente. Questo tempo di viaggio è anche chiamato tempo di arrivo o tempo di propagazione (Teunissen & Montenbruck, 2017).

Il segmento di controllo (denominato anche segmento di terra) è responsabile della gestione dell'intero sistema, tale attività include la distribuzione e la manutenzione del sistema, il tracciamento dei satelliti per la determinazione e previsione dei parametri orbitali (effemeridi) e di tempo, il monitoraggio dei dati ausiliari (es. parametri della ionosfera) e caricamento del messaggio di dati sui satelliti. Il segmento di controllo è inoltre responsabile di un'eventuale crittografia dei dati e della protezione dei servizi contro utenti non autorizzati. Generalmente, il segmento di controllo comprende una stazione di controllo principale che coordina tutte le attività e stazioni di monitoraggio che formano la rete di tracciamento. e le antenne di terra sono il collegamento di comunicazione ai satelliti (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Walse, 2008).

Il segmento di utenza è costituito da apparecchiature che elaborano i segnali ricevuti dai satelliti GNSS e li utilizzano per ricavare informazioni sulla posizione e sull'ora. L'attrezzatura spazia da

smartphone e ricevitori portatili utilizzati dagli escursionisti, a ricevitori sofisticati e specializzati utilizzati per applicazioni di rilevamento e mappatura.

Il segmento di utenza può essere classificato in categorie a seconda dei tipi di ricevitori e dei vari servizi di informazione. Le categorie di utenti sono suddivise in utenti militari e civili nonché in utenti autorizzati e non autorizzati. Gli utenti civili e non autorizzati non hanno accesso a tutti i segnali o servizi del GNSS. Oggi sul mercato è presente una consistente varietà di tipi di ricevitori. Una caratterizzazione si basa sulla capacità di tracciare una, due o anche più frequenze o anche distinguere tra ricevitori operanti per uno o più GNSS specifici. Sono stati istituiti diversi servizi di informazione governativi e privati per fornire informazioni e dati sullo stato dei vari sistemi di posizionamento agli utenti. Generalmente, le informazioni contengono rapporti sullo stato della costellazione, interruzioni programmate e dati orbitali. Questi ultimi sono forniti sotto forma di almanacco adatto a fare previsioni sulla visibilità satellitare e come effemeridi precise adatte a effettuare il posizionamento più preciso (Teunissen & Montenbruck, 2017).

### 1.1.2 Rilievo cinematico in tempo reale (RTK)

“Le tecniche di rilievo cinematico richiedono, in via preliminare, la determinazione di una baseline di partenza in modo da risolvere su di essa tutte le ambiguità, relative alle posizioni dei satelliti, nel software di post-elaborazione. Tale fase del rilievo cinematico prende il nome di “inizializzazione” (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

Questa fase si può realizzare attraverso sessioni di misura di alcuni minuti e consente al software dei ricevitori di valutare l’*ambiguità* per ciascun satellite agganciato.

Il rilievo con tecnica RTK (*Real Time Kinematic*) può essere effettuato tramite l’utilizzo di un ricevitore (*base*), che rimane in un punto fisso di posizione nota, e di un secondo ricevitore (*rover*) in movimento del quale si registrano, in maniera continua, le coordinate dei punti occupate da esso. La comunicazione tra base e rover avviene tramite radio, modem o internet ed è necessaria alla trasmissione delle correzioni delle misure di fase all’unità in movimento. Questa particolare tecnica richiede l’utilizzo di ricevitori a doppia frequenza dotati della tecnologia OTF (*on the fly* – al volo) per la risoluzione veloce dell’ambiguità intera, anche durante il movimento del ricevitore, e della “visibilità” di almeno 5 satelliti (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

Queste tecniche stanno trovando notevole diffusione grazie allo sviluppo di reti di stazioni GNSS, di proprietà di enti pubblici o commerciali, che consentono di ottenere misurazioni differenziali con l’utilizzo di un solo ricevitore, sia in tempo reale e sia in post-processamento, in contatto con le stazioni, permettendo così un notevole risparmio in tempi e costi (Teppati Losè, Chiabrando, & Giulio Tonolo, 2020).

## 1.2 Telerilevamento

“Il telerilevamento è un metodo per acquisire informazioni su oggetti o fenomeni che si basa sulla raccolta e sull’analisi di dati senza che lo strumento usato per raccogliere i dati stessi sia in contatto diretto con l’oggetto studiato” (European Space Agency, 2013), in questo lavoro di tesi tale disciplina è stata utilizzata per rilevare il territorio nelle condizioni precedenti e post evento.

Le informazioni rilevate derivano da sensori, installati su delle piattaforme, che sono in grado di misurare l’energia emessa, riflessa o diffusa da una superficie.

Questa energia può essere luce o un'altra forma di radiazione elettromagnetica, campi di forza o energia acustica. Una fotocamera convenzionale è un chiaro esempio di sensore remoto, attraverso l'obiettivo passa la luce riflessa da un oggetto e la pellicola fotosensibile la rileva, nel momento dell'esposizione viene registrata un'immagine latente. Sviluppare e fissare la pellicola nel laboratorio fotografico genera un record definito, la fotografia. Questa immagine è quindi soggetta a interpretazione. Oggi la maggior parte dei sensori remoti sono dispositivi elettronici e di conseguenza ci riferiamo ancora al dato registrato da un sensore elettronico come ad un'immagine (di rilevamento a distanza). (Tempfli, et al., 2009)



*Fig. 2 Illustrazione artistica satellite Geo-Eye 2. Fonte: (nature.com, 2020)*

I dati satellitari vengono acquisiti da una piattaforma che ha un'orbita stabile attorno alla Terra. Pertanto, i sensori per l’osservazione terrestre consentono di acquisire immagini coerenti e ripetitive dell'intero pianeta, comprese le aree remote e normalmente inaccessibili, come le aree polari, montane, desertiche e boschive. Ad esempio, il telerilevamento si è rivelato estremamente utile nella mappatura e nel monitoraggio delle calotte glaciali, per rilevare incendi boschivi remoti,

osservare fuoriuscite di petrolio incontrollate e valutare i danni da tsunami o inondazioni. La copertura globale fornita dai satelliti è particolarmente utile per monitorare e comprendere i processi dinamici che influenzano il nostro pianeta. Molte di queste questioni ambientali vengono affrontate in modo più efficace con un approccio planetario olistico, per il quale sono necessari set di dati, modelli e sistemi informativi globali. I set di dati specifici per paese o regione devono essere uniti e compilati per generare set di dati globali completi e immagini delle aree oggetto di studio. (Unninayar & Olsen, 2015)

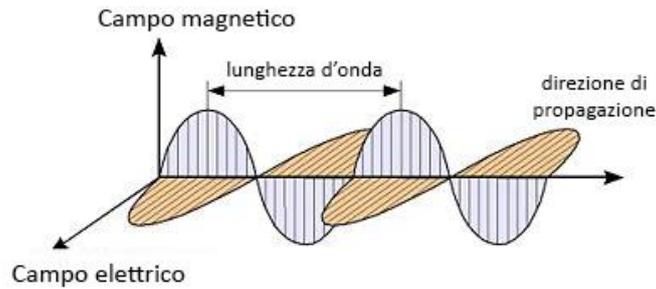
I satelliti per osservazione terrestre offrono una fonte rapida e coerente di dati raccolti in modo uniforme, dallo stesso strumento e piattaforma, con una copertura completa del pianeta per studi globali. I sensori satellitari sono situati lontano dalla superficie terrestre, osservando vaste aree e fornendo così una visione sinottica delle caratteristiche del paesaggio. Le immagini satellitari sono in grado di osservare e rappresentare fenomeni che sarebbero quasi impossibili utilizzando la prospettiva locale delle foto aeree. (Short & Blair, 1986)

Al giorno d'oggi tutti i sistemi di telerilevamento acquisiscono dati in formato digitale, facilitando una trasmissione in tempo reale alla stazione di ricezione a terra ed eventualmente all'utente finale. Ciò è particolarmente rilevante quando si verificano disastri e pericoli naturali che richiedono un rapido accesso alle immagini. Per la maggior parte dei sensori a risoluzione spaziale media e alta, le immagini possono essere ottenute abbastanza rapidamente utilizzando connessioni Internet veloci. Questi sistemi di sensori trasmettono le immagini quando si trovano all'interno dell'area di copertura dell'antenna o altrimenti registrano e mantengono i dati per la successiva trasmissione. L'utente ottiene l'immagine con un certo ritardo temporale rispetto all'acquisizione a causa della calibrazione e della pre-elaborazione dei dati.

In sintesi, ci sono molti vantaggi nell'utilizzo dei dati di telerilevamento per lo studio e il monitoraggio dei paesaggi terrestri. Tuttavia, ciò non implica che i satelliti per l'osservazione della Terra possano essere utilizzati per recuperare qualsiasi variabile ambientale. Il telerilevamento presenta anche limitazioni significative relative alle risoluzioni spaziali, spettrali e temporali disponibili. Le immagini potrebbero non essere registrate con i dettagli spaziali richiesti o non abbastanza frequenti da far fronte alle esigenze dell'utente. Inoltre, la copertura nuvolosa persistente può ridurre notevolmente i tempi di osservazione utili dei sensori ottici, limitando così gravemente le osservazioni nelle aree nuvolose. Sono quindi fondamentali le capacità dei sensori di acquisire dati fuori dalla regione visibile dello spettro elettromagnetico. Le osservazioni radar sono un'alternativa in quanto sono indipendenti dalla copertura nuvolosa, ma sono molto meno frequenti delle osservazioni ottiche. (Liang & Wang, 2020)

### 1.2.1 Radiazione elettromagnetica

La radiazione elettromagnetica consiste di onde elettromagnetiche, costituite da oscillazioni sincronizzate di campi elettrici e magnetici che nel vuoto viaggiano alla velocità della luce. La discriminante o proprietà differenziante di questa energia è la lunghezza d'onda ovvero la distanza tra due creste o fra due ventri della sua onda, indicata con la lettera Lambda ( $\lambda$ ), lunghezza di un ciclo dell'oscillazione. Viene solitamente misurato in micrometri ( $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ).

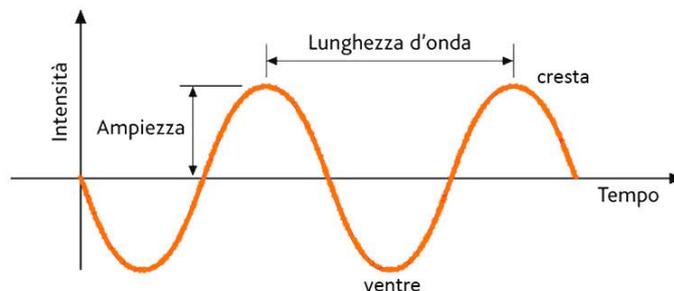


*Fig. 3 Radiazione elettromagnetica. Adattata da (University of Washington)*

La lunghezza di un'onda è definita all'interno dello spettro elettromagnetico e varia da dimensioni molto piccole dei raggi gamma a dimensioni maggiori delle onde radio comprendendo anche la regione visibile dall'occhio umano, ovvero compresa tra 0.38 to 0.76  $\mu\text{m}$ .

Chiamiamo la quantità di tempo necessaria ad un'onda elettromagnetica per completare un ciclo il periodo dell'onda. Il reciproco del periodo è chiamato frequenza dell'onda ( $\nu$ ). Pertanto, la frequenza è il numero di cicli dell'onda che si verificano in un secondo. Di solito misuriamo la frequenza in hertz (1Hz = 1 ciclo al secondo). Il periodo corrisponde alla lunghezza d'onda della radiazione. Poiché la velocità della luce ( $c$ ) è costante, la relazione tra lunghezza d'onda e frequenza è:  $c = \lambda \times \nu$ . (Fig. 4) (Elachi & Zyl, 2006)

### Fonti di energia elettromagnetica



*Fig. 4 Caratteristiche radiazione elettromagnetica. Fonte: elaborazione personale*

Tutta la materia con una temperatura superiore allo zero assoluto (0 K, dove  $n^\circ \text{C} = n + 273 \text{ K}$ ) irradia energia elettromagnetica a causa dell'agitazione molecolare, ovvero il movimento delle molecole.

Ciò significa che il Sole, e anche la Terra, irradiano energia in forma di onde. La materia che è in grado di assorbire e riemettere tutta l'energia elettromagnetica che riceve è nota come corpo nero. Per i corpi neri sia l'emissività, EPSILON, e l'assorbività, ALFA, sono uguali ad il valore massimo 1. La quantità di energia irradiata da un oggetto dipende dalla sua temperatura assoluta e la sua emissività, ed è in funzione della lunghezza d'onda. In fisica, questo principio è definito dalla legge di Stefan-Boltzmann. Un corpo nero irradia un continuum di lunghezze d'onda proporzionalmente alla sua temperatura. La radiazione emessa da un corpo nero a diverse temperature è mostrata in Fig. 5.

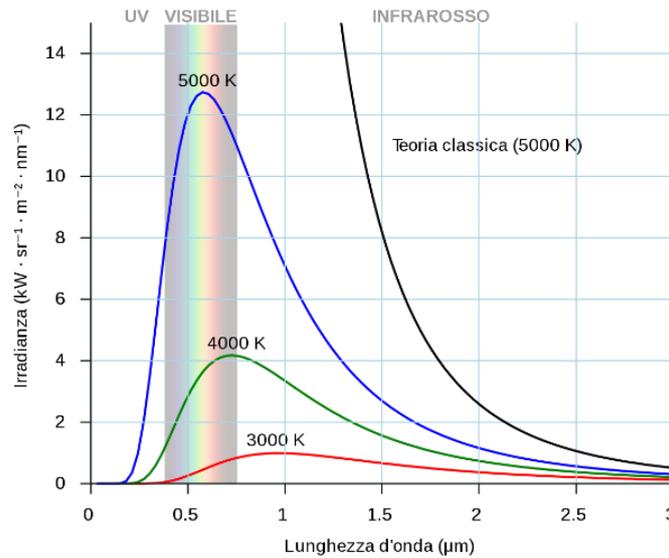


Fig. 5 Spettro elettromagnetico di un corpo nero. Fonte: (commons.wikimedia.org)

L'area sotto la curva, quindi, rappresenta la quantità totale di energia emessa a una temperatura specifica. Dalla Fig. 5 si può concludere che un valore superiore alla temperatura corrisponde un contributo maggiore di lunghezze d'onda più corte. La capacità emittente di un materiale reale rispetto a quella di un corpo nero è indicata come l'emissività del materiale. In realtà, corpi neri difficilmente si trovano in natura; la maggior parte degli oggetti naturali ha emissività inferiori a uno. Ciò significa che solo una parte, di solito tra l'80 e il 98%, dell'energia ricevuta viene nuovamente emessa e di conseguenza, parte dell'energia viene assorbita (Sabins, 2007).

## Spettro elettromagnetico

Chiamiamo spettro elettromagnetico la gamma totale di lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica. In Fig. 6 è illustrato lo spettro totale della radiazione elettromagnetica. Ci riferiamo alle diverse porzioni dello spettro per nome: raggi gamma, raggi X, radiazioni UV, radiazioni visibili (luce), radiazioni infrarosse, microonde e onde radio. Ciascuna di queste parti rappresenta un intervallo di lunghezze d'onda, non una lunghezza d'onda specifica. Lo spettro elettromagnetico è continuo e non ha confini di classe netti.

Porzioni diverse dello spettro sono di diversa rilevanza per l'osservazione della Terra sia per il tipo di informazioni che possiamo raccogliere sia per il volume di acquisizione dei dati geospaziali. La maggior parte delle acquisizioni dei dati geospaziali è ottenuta dal rilevamento nel campo del visibile

e dell'infrarosso. La parte ultravioletta (UV) copre le lunghezze d'onda più corte che sono di uso pratico per l'osservazione della Terra, esse posso rilevare ad esempio alcune proprietà dei minerali. All'altra estremità del campo utile per l'osservazione della Terra ci sono le microonde: possono, tra l'altro, fornire informazioni sulla rugosità superficiale e il contenuto di umidità dei suoli (Rees, 2013).

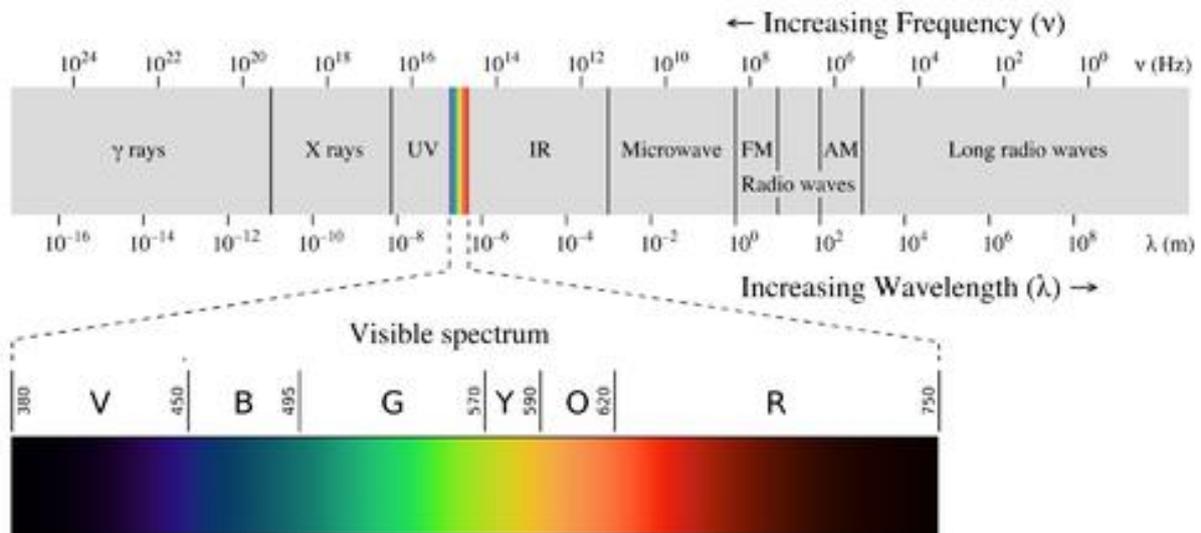


Fig. 6 Spettro elettromagnetico Fonte: (commons.wikimedia.org, 2020)

La porzione dello spettro visibile dall'occhio umano con lunghezze d'onda che generano i colori è solo una frazione molto piccola dell'intera gamma di lunghezze d'onda del campo elettromagnetico. Chiamiamo oggetti "verdi" le superfici che riflettono prevalentemente energia elettromagnetica di lunghezza d'onda  $0.54 \mu\text{m}$ .

La radiazione oltre la luce rossa verso lunghezze d'onda maggiori nello spettro viene chiamata infrarosso (IR). Possiamo discriminare i tipi di vegetazione e lo stato di stress delle piante analizzando la radiazione "vicino all'infrarosso" (*near infrared* - NIR) e "infrarosso medio" (*medium infrared* - Mid-IR) molto meglio che basandosi solo sui colori visibili. La vegetazione sana ha un'elevata riflettività nello spettro NIR, che diminuisce al peggioramento dello stato di salute. Il mid-IR è anche indicato come infrarosso a onde corte (SWIR – *short wave infrared*).

La radiazione infrarossa con una lunghezza d'onda maggiore di  $3 \mu\text{m}$  è definita infrarosso termico (*Thermal Infrared* - TIR) ed è emessa da ogni superficie con una temperatura superiore allo zero assoluto. NIR e il medio IR, al contrario, non sono correlate alla temperatura dell'oggetto rilevato. La temperatura superficiale è necessaria per studiare una varietà di problemi ambientali, utile ad esempio per analizzare la composizione minerale delle rocce, lo stato della vegetazione, ecc.

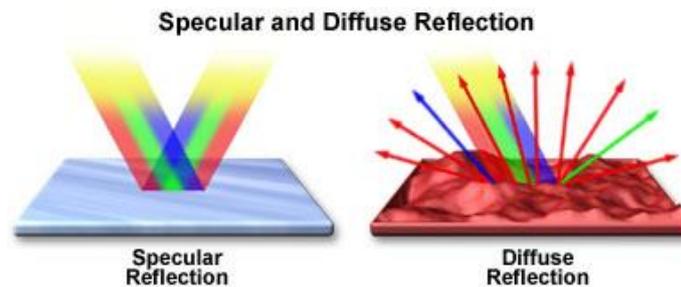
La porzione di spettro delle onde che variano da 1mm ad 1m comprende microonde, onde radio e lunghe onde radio. Tali onde sono prodotte da un'antenna la quale emette la radiazione elettromagnetica verso la superficie terrestre e successivamente un sensore rileva la frazione che viene retro-diffusa dagli oggetti presenti sulla superficie terrestre (Tempfli, et al., 2009).

La radiazione elettromagnetica subisce interazioni rilevanti mentre viaggia nell'atmosfera terrestre e quando "colpisce" una superficie. Le interazioni con l'atmosfera modificano parte dello spettro elettromagnetico e quindi sono necessarie operazioni di correzione per ottenere un dato fedele alla realtà. In questo lavoro di tesi non verrà illustrata l'interazione della radiazione elettromagnetica con l'atmosfera poiché i prodotti di telerilevamento utilizzati sono già corretti sotto questo punto di vista.

### 1.2.2 Interazioni energetiche con la superficie terrestre

Nelle applicazioni terrestri e marine del telerilevamento siamo più interessati alla radiazione riflessa perché questa può fornire informazioni sulle caratteristiche delle superfici.

La riflessione si verifica quando la radiazione "rimbalza" sul bersaglio e viene quindi reindirizzata. L'assorbimento si verifica quando la radiazione viene assorbita dal bersaglio. Quando la radiazione passa attraverso un bersaglio si verifica la trasmissione. Due tipi di interazioni, che rappresentano i due modi opposti in cui l'energia viene riflessa da un bersaglio, sono la riflessione speculare e la riflessione diffusa (Fig. 7). Nel mondo reale, di solito si trova una combinazione di entrambi questi tipi di interazione.



*Fig. 7 Riflessione speculare e diffusa delle superfici. Fonte: (Florida State University, 2019)*

La riflessione speculare si verifica in genere quando una superficie è liscia e tutta (o quasi) l'energia è diretta lontano da la superficie in un'unica direzione. È più probabile che si verifichi quando il Sole è alto nel cielo. La riflessione speculare può essere causata, ad esempio, da una superficie di acqua calma o da un tetto di una serra. Il risultato è un punto molto luminoso nell'immagine (chiamato anche "hot spot").

La riflessione diffusa si verifica in situazioni in cui la superficie è ruvida e l'energia viene riflessa quasi uniformemente in tutte le direzioni. Se una particolare superficie riflette specularmente o diffusamente, o in qualche maniera ibrida, dipende dalla rugosità superficiale rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione in arrivo. (Rees, 2013)

### 1.2.3 Curve di riflettanza spettrale

“Lo scopo del telerilevamento è quello di riuscire a stabilire una corrispondenza tra la qualità e la quantità dell’energia riflessa e la natura o stato dei corpi o delle superfici dai quali proviene, a seconda delle varie lunghezze d’onda, tracciando delle firme spettrali”. (Gomasca M. , 1998)

Considerando una superficie composta da un certo materiale, l'energia che la raggiunge è chiamata irraggiamento. L'energia riflessa dalla superficie si chiama radianza.

L'irraggiamento e la radianza sono espressi in “ $W \times m^{-2} \times sr^{-1}$ ”, energia per unità di superficie per unità angolo solido.

Per ogni materiale è possibile stabilire una curva di riflettanza specifica. Tali curve mostrano la frazione della radiazione incidente riflessa in funzione della lunghezza d'onda. Da tale curva è possibile trovare il grado di riflessione per ciascuna lunghezza d'onda (ad esempio a 0.5  $\mu m$ , 0.51  $\mu m$ , 0.52  $\mu m$ , etc.). La maggior parte dei sensori di rilevamento a distanza sono sensibili a bande di lunghezze d'onda più ampie, ad esempio da 0.4 a 0.8  $\mu m$ , e la curva può essere utilizzata per stimare la riflettanza complessiva in tali bande (Richards, 2009).

Le misurazioni della riflettanza possono essere eseguite in laboratorio o sul campo utilizzando uno spettrometro. Nelle seguenti sottosezioni sono presentate le caratteristiche di riflettanza di alcuni tipi comuni di copertura del suolo (Fig. 8).

#### Vegetazione

Le caratteristiche di riflettanza della vegetazione dipendono dalle proprietà delle foglie, compreso l'orientamento e la struttura della chioma fogliare. La proporzione della radiazione riflessa nelle diverse parti dello spettro dipende dalla pigmentazione delle foglie, dallo spessore e dalla composizione (struttura cellulare) e dalla quantità di acqua nei tessuti.

In Fig. 8 è rappresentata la curva di riflettanza ideale di una vegetazione sana. Nella parte visibile dello spettro, il riflesso di luce blu e rossa è relativamente basso, queste porzioni di radiazione vengono assorbite dalla pianta per la fotosintesi e così la vegetazione riflette relativamente più luce verde. La riflettanza nel vicino infrarosso è massima, ma la quantità dipende dallo sviluppo delle foglie e dalla struttura cellulare. Nel medio infrarosso, la riflettanza è determinata principalmente dall'acqua libera nel tessuto fogliare; più acqua libera si traduce in una minore riflettanza. Si chiamano quindi bande di assorbimento dell’acqua. Quando le foglie si seccano, ad esempio durante il periodo del raccolto delle colture, la pianta può cambiare colore (ad esempio, in giallo). In questa fase non c'è fotosintesi, causando una riflettanza maggiore nella porzione rossa dello spettro. Inoltre, le foglie si secceranno, determinando una maggiore riflettanza nel nell'infrarosso medio, mentre la riflettanza nell'infrarosso vicino può diminuire. Come

un risultato, i dati di telerilevamento ottico forniscono informazioni sul tipo di pianta e anche sulle sue condizioni di salute. (Neinavaz, Schlerf, Darvishzadeh, Gerhards, & Skidmore, 2021)

## Terreno nudo

La riflettanza superficiale dal suolo nudo dipende da così tanti fattori che è difficile fornire una tipica curva di riflettanza del suolo. I principali fattori che influenzano i coefficienti di riflessione sono il colore del suolo, il contenuto di umidità, la presenza di carbonati e contenuto di ossido di ferro. Anche in queste curve sono presenti dei ventri sempre dovuti alla presenza di acqua e umidità determinando assorbimenti (V.L.Mulder, Bruin, M.E.Schaepman, & T.R.Mayrc, 2011).

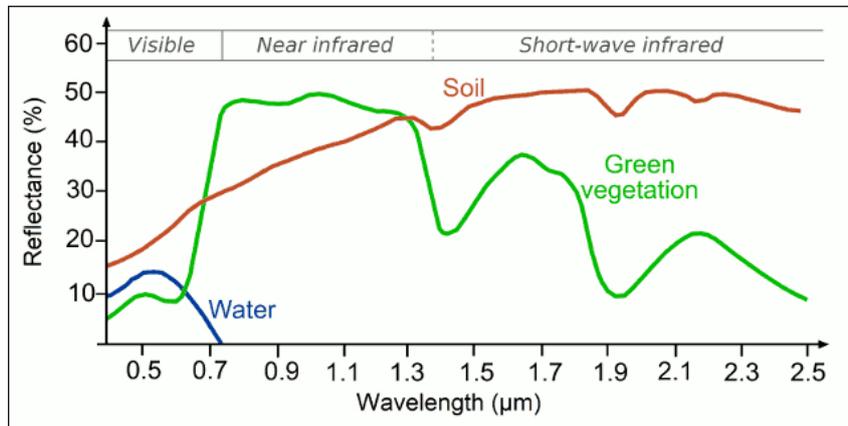


Fig. 8 Firme spettrali per i principali elementi naturali. Fonte: (seos-project.eu, 2017)

## Acqua

Rispetto alla vegetazione e al suolo, l'acqua ha la riflettanza inferiore. La vegetazione può riflettere fino al 50% dell'energia elettromagnetica, il suolo fino al 30-40%, mentre l'acqua riflette al massimo il 10% della radiazione in arrivo. L'acqua riflette l'energia elettromagnetica nel visibile fino al vicino infrarosso. Oltre 1,2 μm tutta l'energia viene assorbita. La massima riflettanza è presente in acque torbide e in acqua contenente piante con un picco di riflessione della clorofilla alla lunghezza d'onda verde (Gholizadeh, Melesse, & Reddi, 2016).

## Strutture antropiche

È più complessa invece la caratterizzazione fisica quantitativa delle proprietà di riflettanza dei tessuti urbani. Il risultato delle diverse qualità dei materiali da costruzione e delle coperture del suolo presenti all'interno del mosaico urbano a scale spaziali distinte è un'elevata variabilità sia spettrale sia nella riflettanza. Fattori storici e socioeconomici, ambientali, urbanistici hanno portato le città di tutto il mondo a caratterizzarsi con differenti valori di riflettanza. È rilevante mettere in luce anche la complessità della transizione urbano-rurale. (Small, 2005)

### 1.3 Fotogrammetria

La fotogrammetria permette di ricostruire la posizione, orientamento, forma e dimensione degli oggetti a partire dalle immagini; possono avere origine come immagini fotochimiche (fotografia convenzionale su pellicola) o come immagini fotoelettriche (fotografia digitale); è stata impiegata in questa tesi per ricavare modelli tridimensionali georeferenziati del territorio indagato con accuratezza centimetrica.

Si chiama fotogrammetria analogica quella branca della fotogrammetria che inizia con le fotografie convenzionali e in cui l'elaborazione avviene per mezzo di strumenti ottico-meccanici. Quella che si basa su fotografie convenzionali ma che risolve l'intero processo di analisi per mezzo di computer si chiama fotogrammetria analitica. Una terza fase di sviluppo è la fotogrammetria digitale. In tal caso la luce che cade sul piano focale della telecamera di ripresa viene registrata non per mezzo di un'emulsione fotosensibile ma per mezzo di rilevatori elettronici (CCD). A partire da tali fotografie digitali, l'intero processo di valutazione avviene per mezzo di computer: la visione e la percezione umane sono emulate dal computer. (Kraus, 2011)

In molti casi l'interpretazione del contenuto dell'immagine va di pari passo con la ricostruzione geometrica dell'oggetto fotografato. L'esito di tale interpretazione è la classificazione degli oggetti all'interno delle immagini secondo diverse caratteristiche: sia qualitative, è possibile in base alle proprie conoscenze riconoscere la presenza o lo stato di manufatti ed elementi naturali, sia quantitative, in particolare le dimensioni geometriche di un oggetto sono il risultato della ricostruzione. La fotogrammetria consente la ricostruzione di un oggetto e l'analisi delle sue caratteristiche senza contatto fisico con esso, è infatti una disciplina del telerilevamento. (Linder, 2003)

L'applicazione principale della fotogrammetria risiede nella produzione di mappe topografiche sia sotto forma di mappe lineari che mappe ortofoto. Gli strumenti fotogrammetrici funzionano come digitalizzatori 3D: in un'analisi fotogrammetrica viene formato un modello topografico digitale, che può essere visualizzato con l'ausilio della computer grafica, precedentemente a queste innovazioni le misurazioni avvenivano tramite stereoscopi dove la visualizzazione tridimensionale si ottiene quando due foto sovrapposte (chiamate coppia stereo) vengono visualizzate utilizzando uno stereoscopio. Ogni fotografia della coppia stereo fornisce una visione leggermente diversa della stessa area, che il cervello combina e interpreta come una visione tridimensionale. La fotogrammetria a distanza ravvicinata viene utilizzata nella disciplina architettonica: misurazione di precisione di cantieri e altri oggetti di ingegneria, sorveglianza di edifici e documentazione di danni, misurazione delle deformazioni delle strutture. Se le fotografie vengono scattate con fotocamere specializzate, l'elaborazione fotogrammetrica è relativamente semplice. Con l'aiuto di complessi algoritmi matematici e potenti software, tuttavia, l'elaborazione geometrica delle fotografie amatoriali è ora diventata possibile e questa tecnologia sta diventando sempre più ampiamente utilizzata. (Kraus, 2011)

I prodotti della fotogrammetria sono fotografie ottenute sotto forma numerica e organizzate in un grigliato di pixel e possono essere ottenute sia da una macchina digitale, sia per scansione di una fotografia tradizionale. In ogni caso i “prodotti” finali ottenibili dalla fotogrammetria possono essere: rappresentazioni grafiche, cioè carte topografiche, o, più in generale, disegni degli oggetti; rappresentazioni numeriche, cioè coordinate di punti appartenenti agli oggetti rilevati; ulteriori immagini, cioè fotografie elaborate come le immagini raddrizzate (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

### 1.3.1 L'immagine digitale

Un'immagine digitale è costituita da una matrice (raster) di elementi finiti ortogonali (pixel – *picture element*) di cui ognuno contiene un valore che può rappresentare un'informazione di un fenomeno reale; ogni pixel viene registrato all'interno del file di immagine in ragione del valore numerico che un sensore elettronico registra e la sua posizione nella griglia ( $m-1$ ,  $n-1$ ) ne determina la collocazione all'interno del file (Giulio Tonolo, 2018).

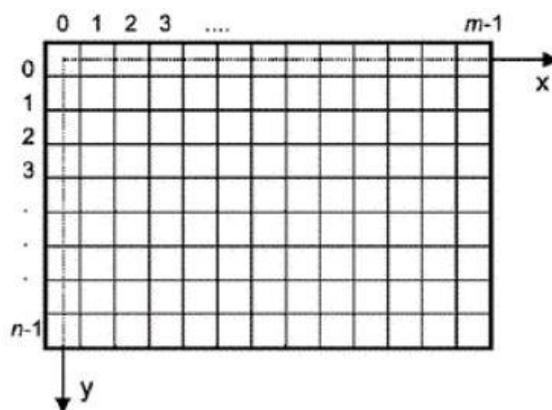


Fig. 9 Matrice di pixel di un'immagine digitale. Fonte: (Luhmann, Robson, Harley, & Kyle, 2006)

L'origine di questo sistema si trova nell'angolo in alto a sinistra, il primo elemento dell'immagine si trova nel pixel di numero di riga e colonna (0, 0) (Fig. 9). La larghezza e l'altezza di un pixel sono pari a 1 e ogni cella ha valori di coordinate interi. Quando un oggetto viene ripreso da un sensore caratterizzato da tale griglia, ciascun pixel acquisisce un valore di pixel corrispondente alla luminosità dell'immagine locale attraverso la sua area (Luhmann, Robson, Harley, & Kyle, 2006).

Il numero di pixel in cui ciascuna immagine determina la qualità geometrica dell'acquisizione e quindi le dimensioni del più piccolo dettaglio leggibile sull'immagine. Il valore che il pixel può assumere caratterizza invece la risoluzione radiometrica (vedi cap. 1.5.1 Risoluzione dei sensori): due soli valori determineranno un'immagine in bianco e nero (immagini binarie), aumentando i valori discretizzati si ottiene un risultato più interpretabile e chiaro ovvero immagini in scala di grigio, i valori dei pixel sono solitamente quantizzati con una profondità di 8 bit per fornire 256 livelli di grigio che vanno da 0 (nero) e 255 (bianco). Comunemente le immagini digitali a colori sono

acquisite tramite tre filtri per i tre colori fondamentali (rosso, verde, blu - RGB) in modo da registrare per ognuno di essi una matrice di valori che combinata con le altre genera l'immagine finale (Giulio

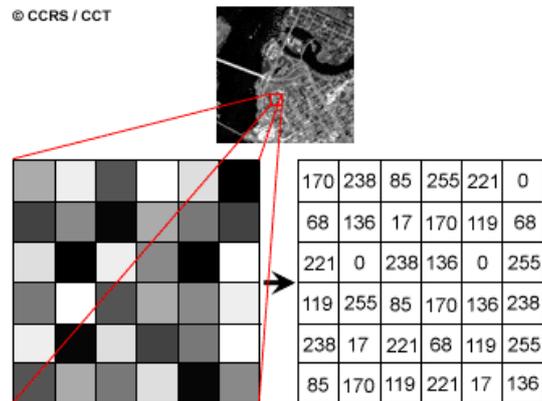


Fig. 10 Struttura di un'immagine digitale. Fonte: (Canada Center for Remote Sensing, 2015)

Tonolo, 2018).

### 1.3.2 Principi base della fotogrammetria

La fotogrammetria è l'uso delle misurazioni prese da immagini bidimensionali per ottenere coordinate tridimensionali di punti sugli oggetti acquisiti. Le coordinate ottenute dalla fotogrammetria possono essere notevolmente accurate soprattutto se le telecamere e le altre apparecchiature sono di qualità adeguata, se viene seguito un procedimento rigoroso e se il rilievo è ben progettato.

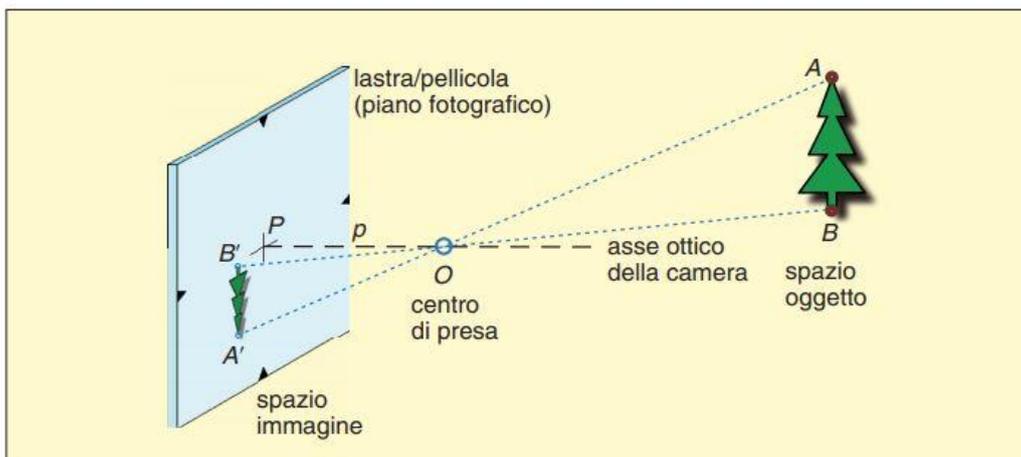


Fig. 11 Schema della geometria della presa fotografica. Fonte: (Cannarozzo, Cucchiari, & Meschieri, 2012)

Per l'introduzione ai concetti fotogrammetrici si cominci dalla considerazione di un solo punto ripreso dalla fotocamera. Da quel punto ripreso, c'è un raggio di luce che viaggia in linea retta,

passando attraverso il centro dell'obiettivo (detto "centro di presa") della fotocamera per raggiungere infine il piano fotografico nel suo punto omologo. Il raggio che viene utilizzato nelle operazioni fotogrammetriche è quel particolare raggio (chiamato anche "raggio principale") che viaggia in linea retta dall'oggetto, attraverso il centro della lente al piano dell'immagine (Freyer, Mitchell, & Chandler, 2007) (Fig. 11).

La distanza tra il piano fotografico ed il centro di presa è uguale alla distanza focale dell'obiettivo utilizzato, escludendo le distorsioni, ed è chiamata "distanza principale". "A questo proposito è possibile, con sufficiente approssimazione, pensare alla fotografia come a una prospettiva centrale, in base alla quale i raggi o segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con i loro corrispondenti sulle immagini (stella proiettante) si incontrano tutti in un punto O, ovvero nel centro di presa" (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012)

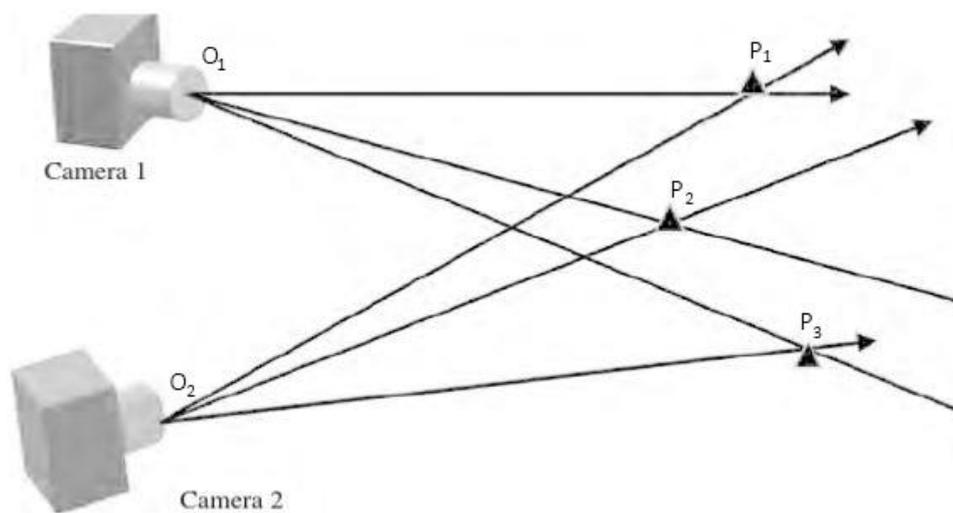


Fig. 12 Definizione di punti omologhi su oggetti tramite i raggi principali. Fonte: (Freyer, Mitchell, & Chandler, 2007)

Se sono noti la posizione e l'orientamento della telecamera, forniti dal produttore o ricavabili dalle stesse immagini tramite punti di appoggio topografico, è possibile stabilire la posizione spaziale del raggio principale, tuttavia non è possibile ricostruire la geometria della scena con un solo fotogramma. Quindi, se due immagini di quello stesso oggetto sono state ottenute da due posizioni diverse (presa stereoscopica), possono essere ricostruiti due raggi principali per un punto presente in entrambe le acquisizioni. Questa procedura può essere replicata per altri punti oggetto. In questo modo dovrebbe essere possibile dedurre la posizione spaziale di un numero sufficiente di punti per rappresentare la forma completa dell'oggetto. Il numero di immagini non deve essere limitato a solo due per ottenere un risultato di adeguata precisione (Freyer, Mitchell, & Chandler, 2007).

### 1.3.3 Processo fotogrammetrico

Per un corretto e funzionale rilievo fotogrammetrico, a partire dalle immagini della scena ottenute in fasi di *acquisizione*, sono necessarie anche operazioni di *orientamento* dei fotogrammi e di *restituzione* di elaborati o immagini raddrizzate (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

È buona pratica eseguire uno studio preliminare dell'oggetto di interesse per scegliere tecniche (es. prese aeree o terrestri) e strumenti più adatti a ciò che si vuole indagare e rappresentare. La discriminante tra le varie possibilità offerte dalla fotogrammetria è proprio la scala di rappresentazione che si vorrà ottenere. I fotogrammi rappresentano una vista prospettica centrale dell'oggetto e ciò causa un cambiamento del valore di scala dei fotogrammi, da punto a punto nella prospettiva, con il variare della distanza dei punti dal centro di presa.

#### Acquisizione

Pianificare una campagna di rilievo necessita di tenere in considerazione che ogni punto del manufatto o territorio da acquisire deve essere presente in almeno due fotogrammi, con scala appropriata, presi da punti di vista differenti (presa stereoscopica). Questa condizione, nel caso di prese terrestri, si attua spostando la camera parallelamente all'elemento da rilevare di un'adeguata distanza per ogni foto, lo scostamento tra le posizioni dei centri di presa di fotogrammi consecutivi è detto *base di presa*. La porzione di ambiente rilevata in due fotogrammi è l'area di *ricoprimento* (*overlap*), espressa in percentuale, deve essere minimo del 60% (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

Il rapporto tra la dimensione massima del fotogramma  $l$  e la corrispondente dimensione reale  $L$  dell'oggetto (abbracciamento) contenuto nella fotografia definisce la scala media dei fotogrammi:

$$1:l = 1:L$$

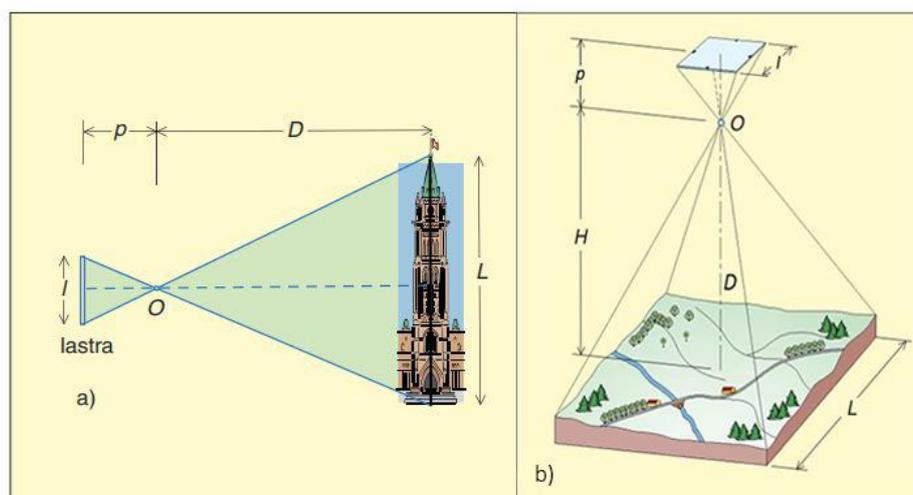


Fig. 13 Definizione della scala media dei fotogrammi: a) presa terrestre; b) presa aerea. Fonte: (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012)

Essendo a noi sconosciuta la sola dimensione dell'oggetto, poiché la distanza focale dell'obiettivo fotografico rimane costante in ogni fotogramma durante l'acquisizione ed è a noi nota così come la dimensione del piano fotografico, è perciò ricavabile il valore del rapporto precedente con un rapporto tra la distanza  $p$  (focale dell'obiettivo fotografico) e la distanza media ( $D$  o  $H$ ) dell'oggetto dal centro di presa  $O$  (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012) (Fig. 13 a).

Rimanendo costanti i parametri della camera utilizzata ( $f$  o  $p$ ), l'unica variabile rimane la distanza  $D$  che permetterà di ottenere la scala dei fotogrammi e garantire un grado di risoluzione adeguato alle necessità di studio. Nel caso di presa aerea (Fig. 13 b), la distanza media tra il suolo e la camera in volo, registrata anch'essa nelle informazioni del fotogramma, in genere viene indicata con  $H$ . La precedente espressione, in questo caso, assume la seguente notazione:

$$1:n = p:H$$

## Orientamento

I principi geometrici finora menzionati sono sufficienti per semplici misurazioni da fotografie analogiche o digitali. Per il calcolo preciso delle coordinate 3D, tuttavia, i percorsi dei raggi sia all'interno che all'esterno della telecamera devono essere ricostruiti matematicamente con elevata precisione. I parametri necessari per descrivere la geometria dei segmenti di raggi proiettanti sono dati dall'orientamento interno ed esterno della telecamera.

L'orientamento interno di una telecamera comprende la ricostruzione della geometria della prospettiva centrale di ogni fotogramma a partire dalla lunghezza focale, i parametri della distorsione radiale dell'obiettivo e la posizione del cosiddetto punto principale nel sistema di coordinate dell'immagine che saranno costanti per tutte le acquisizioni di un rilievo. Il punto principale è definito come l'intersezione dell'asse ottico con il piano dell'immagine e si trova relativamente vicino all'origine del sistema di coordinate dell'immagine al centro dell'immagine. Per le misurazioni all'interno dell'immagine, questo sistema di coordinate deve essere stabilito in modo permanente e fisso rispetto all'asse ottico. Per le fotocamere analogiche metriche questo è realizzato con punti fiduciali incorporati che sporgono dalla cornice dell'immagine e sono esposti su ciascuna fotografia (Fig. 14). (Luhmann, Robson, Harley, & Kyle, 2006)

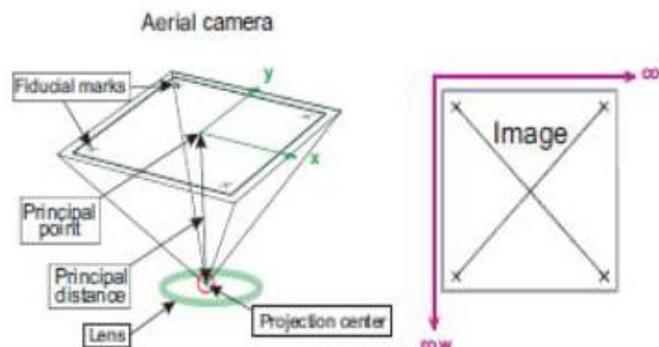


Fig. 14 Schema orientamento interno di una camera analogica aerea. Fonte: (Tempfli, et al., 2009)

Le fotocamere digitali non hanno bisogno di fiduciali perché un sistema di coordinate dell'immagine cartesiano è già fornito dalla matrice di celle di pixel del sensore della camera.

Esistono vari metodi di calibrazione della fotocamera per la determinazione dei valori di orientamento interno. (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2000)

Mentre le fotocamere metriche sono generalmente calibrate con metodi di laboratorio dal produttore, le fotocamere di piccolo formato standard utilizzate in fotografia non vengono fornite con rapporti di calibrazione. La calibrazione può essere fatta tramite test in loco o con metodi di auto-calibrazione. (Aber, Marzloff, & Ries, 2010)

L'orientamento esterno si compone di due fasi: una include la posizione X, Y, Z della telecamera nel sistema di coordinate al suolo (orientamento relativo) e la successiva determinazione delle tre rotazioni del sistema della telecamera rispetto al terreno (orientamento assoluto).

Con la prima operazione si ricrea la posizione relativa tra i due fotogrammi, determinando i punti omologhi attraverso l'intersezione dei raggi, quindi si ottiene un modello tridimensionale dell'oggetto ma in una scala arbitraria e con un posizionamento spaziale generico svincolato dal sistema di riferimento assoluto X, Y, Z legato esterno all'oggetto rilevato.

Nella seconda fase per dimensionare correttamente alla scala opportuna il modello e per riferirlo al sistema di riferimento assoluto si utilizzano punti a terra di cui si ha un'accurata conoscenza del posizionamento geografico. (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012)

Gli elementi dell'orientamento esterno possono essere determinati con i moderni sistemi GNSS/RTK (vedi cap. 1.1.2 Rilievo cinematico in tempo reale (RTK)) simultaneamente all'acquisizione delle immagini (Spanò, Chiabrando, & Lingua, 2019).

Il metodo comunemente usato per determinare l'orientamento esterno è la ricostruzione post-indagine utilizzando punti di controllo a terra con coordinate note. È richiesto un minimo teorico di tre GCP per l'orientamento di una singola fotografia: nella pratica, più fotografie sono solitamente orientate insieme utilizzando algoritmi di regressione dei minimi quadrati che consentono l'uso di meno di tre punti per immagine. La precisione e l'abbondanza di GCP sono cruciali per la precisione dell'orientamento esterno. Le misurazioni GPS standard o i punti di controllo raccolti dalle mappe sono abbastanza utili per lavorare con foto aeree tradizionali e immagini satellitari su piccola scala. Di solito ciò deve essere ottenuto contrassegnando preventivamente i punti di controllo nell'area di copertura e determinando le loro coordinate utilizzando un rilevamento della stazione totale. (Freyer, Mitchell, & Chandler, 2007)

## Restituzione

“La restituzione è l'insieme delle operazioni ottico-meccaniche, analitiche o digitali che consentono di passare dal modello stereoscopico dell'oggetto fotografato alla rappresentazione grafica (carta topografica, disegni ecc.) o numerica (file di coordinate)” (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012).

La procedura fotogrammetrica è cambiata radicalmente con lo sviluppo dei sistemi di presa e di elaborazione digitale. Utilizzando punti oggetto opportunamente mirati e la registrazione di

immagini digitali in linea, è possibile eseguire complesse attività fotogrammetriche in pochi minuti sul posto. Un'analisi completamente automatica dei punti di un oggetto sostituisce le procedure manuali di orientamento e misurazione. Gli speciali strumenti fotogrammetrici di misura non sono più necessari e vengono sostituiti da apparecchiature informatiche standard. L'alto grado di automazione consente anche agli utenti non specializzati di effettuare la registrazione fotogrammetrica e la valutazione dei dati. (Luhmann, Robson, Harley, & Kyle, 2006)

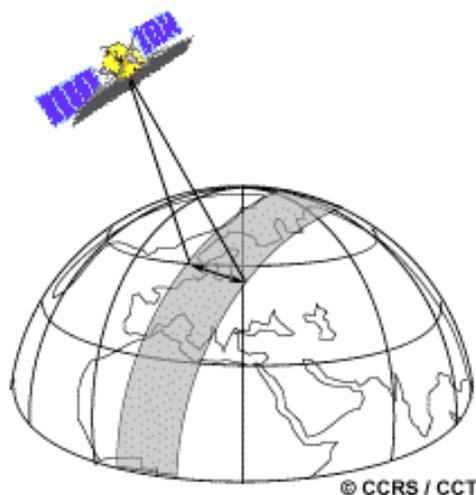
I sistemi digitali, poiché offrono automazione e brevi cicli di elaborazione, sono essenziali per l'utilizzo della fotogrammetria in applicazioni complesse, in particolare anche nella valutazione di danni al territorio e all'edificato.

## 1.4 Piattaforme

### 1.4.1 Piattaforme satellitari

Il telerilevamento da piattaforme satellitare permette l'acquisizione dei dati a livello globale e consente il monitoraggio e il rilevamento dei cambiamenti fisici e di fenomeni naturali. È diventato un metodo importante di studio della Terra e per molte applicazioni di interesse globale come il cambiamento climatico, il degrado ambientale, i disastri naturali e la crescita della popolazione.

Molte delle immagini di telerilevamento vengono acquisite da sensori a bordo di satelliti sia commerciali sia non commerciali con scopi scientifici e di divulgazione. I satelliti vengono lanciati in orbite predefinite per monitorare la terra per diversi anni. Vari parametri caratterizzano l'orbita di un satellite e questi includono: altitudine orbitale, angolo di inclinazione, tempo di rivoluzione, tempo di rivisitazione. Questi parametri orbitali determinano in larga misura le capacità di monitoraggio del satellite.



*Fig. 15 Rappresentazione della "striscia" di un satellite. Fonte: (Canada Center for Remote Sensing, 2015)*

L'altitudine orbitale si riferisce all'altezza (distanza verticale) del satellite rispetto alla superficie terrestre. I principali satelliti per l'osservazione della Terra orbitano a un'altitudine di 600-800km. L'altitudine orbitale influenza la copertura spaziale e la risoluzione dell'immagine risultante. Nella maggior parte dei casi, maggiore è l'altitudine orbitale, maggiore è il ricoprimento a terra (footprint) e minore è la risoluzione spaziale dell'immagine risultante.

L'angolo di inclinazione orbitale è definito come l'angolo (in gradi) tra il piano orbitale e il piano equatoriale. Insieme al campo visivo del sensore, l'angolo di inclinazione determina l'estensione latitudinale della porzione della Terra che un satellite può visualizzare. L'angolo di inclinazione di un satellite ne determina il tipo di orbita e conseguentemente la superficie terrestre osservabile. Tali piattaforme hanno inclinazioni orbitali maggiori di 90°, ciò significa che osservano tutte le aree

comprese tra le latitudini 90° sud e 90° nord, e sono sincrone al Sole, ovvero attraversano l'equatore alla stessa ora locale in ogni orbita generalmente intorno alle 10 garantendo lo stesso tipo di illuminazione per tutte le acquisizioni.

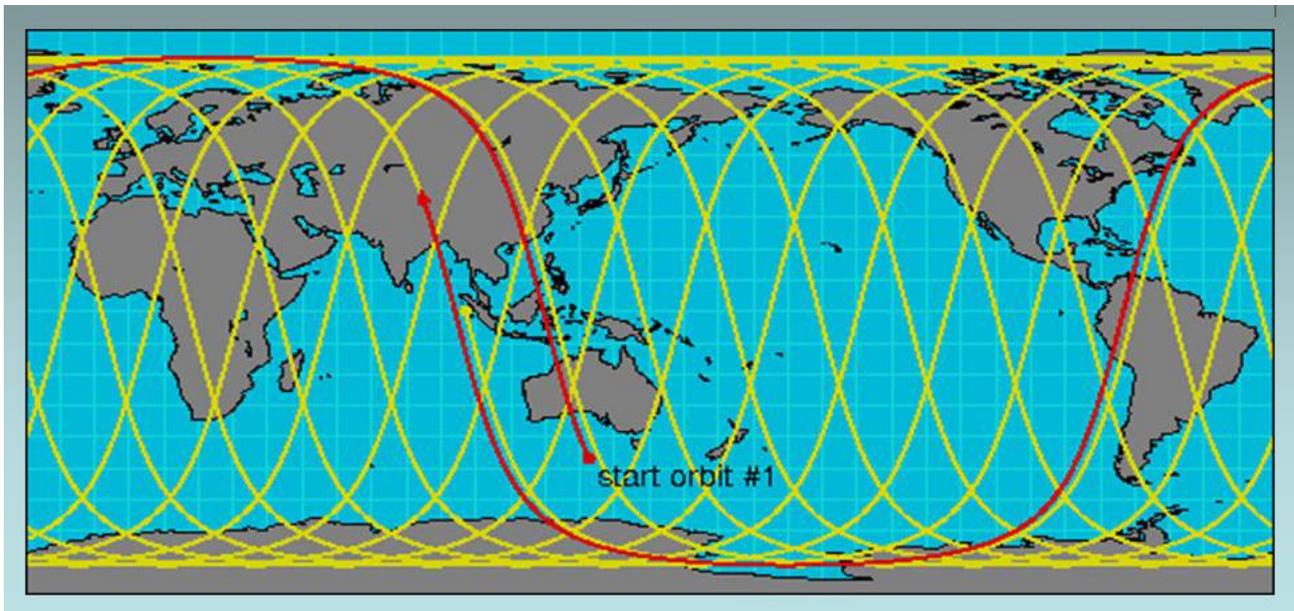


Fig. 16 Traccia a terra di un satellite con orbita eliosincrona. Fonte: (San Francisco State University, 2012)

Il tempo di rivoluzione è il tempo (in minuti) che impiega un satellite per completare un'orbita intorno al pianeta. Ciò ha implicazioni per la qualità dell'immagine, la risoluzione temporale e la risoluzione spaziale delle immagini risultanti. Tale periodo può variare considerevolmente in relazione alla risoluzione spaziale.

Il tempo di rivisitazione è definito come il numero di giorni tra due orbite identiche e consecutive. In altre parole, si riferisce alla frequenza con cui i sensori acquisiscono immagini della stessa porzione della superficie terrestre al nadir (l'intersezione della verticale passante per il punto di osservazione orientata verso il centro della Terra con la sfera celeste). I satelliti che hanno tempo di rivisitazione ridotto (cioè, alta frequenza di acquisizione) producono, per lo stesso periodo, più immagini di quelli con un tempo di rivisitazione più alto. C'è sempre un compromesso tra il ciclo di ripetizione e la risoluzione spaziale. I satelliti con tempo di rivisitazione minori producono principalmente immagini a bassa risoluzione spaziale e viceversa. (Montenbruck & Gill, 2000)

Esistono diverse costellazioni di satelliti per l'osservazione della Terra sia commerciali che non, tra le risorse disponibili in libero accesso c'è il programma Copernicus Sentinel dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che rende disponibili dati a livello globale basati su immagini satellitari a media risoluzione. (Agenzia Spaziale Europea- ESA)

## 1.4.2 Piattaforme aeree senza pilota (UAV) o droni

Per UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) si intende un veicolo aereo senza pilota a bordo, un termine alternativo è *Unmanned Aerial System* (UAS), mentre l'Organizzazione dell'aviazione civile internazionale (ICAO - *International Civil Aviation Organization*) si riferisce a macchine di questo tipo come aeromobili a pilotaggio remoto (RPAS - *Remotely Piloted Aircraft System*), nel linguaggio comune sono conosciuti come droni. Per la normativa italiana il parametro del peso al decollo è l'elemento utilizzato per definire gli ambiti in cui può operare un determinato drone.

I droni sono gestiti a distanza da un pilota a terra o operano autonomamente guidati da un piano di volo programmato prima delle acquisizioni. Negli ultimi anni infatti hanno trovato impiego in un'ampia gamma di applicazioni civili, che vanno dalla pianificazione urbana, al monitoraggio in ambito ambientale e civile, agricolo, di governance, servizi pubblici e applicazioni commerciali.

Nel campo del telerilevamento, i droni stanno aiutando a sostituire rapidamente la fotografia aerea convenzionale fornendo immagini aeree (ortofoto) ad alta risoluzione spaziale della superficie terrestre. Rispetto agli aerei con equipaggio, utilizzati nella fotografia aerea convenzionale, i droni sono più economici da acquisire e utilizzare e producono immagini con risoluzione spaziale simili o migliori. Come per le piattaforme satellitari una maggiore risoluzione comporta limitazioni nella copertura dell'area di un singolo volo. I droni possono, e spesso devono, essere pilotati ad altitudini molto basse (< 200 m) e con la frequenza consentita dalle risorse in termini di autonomia, come ad esempio le batterie. Queste e altre caratteristiche rendono i droni dei perfetti sistemi di monitoraggio per un'ampia gamma di fenomeni. (Watts, Ambrosia, & Hinkley, 2012)



Fig. 17 Esempi di drone quadri-rotore e di drone ad ala fissa. Fonte: (dji.com, 2020); (sensefly.com, 2019)

Esistono un'ampia varietà di forme, meccanismi, configurazioni e caratteristiche. I droni sono generalmente sviluppati per scopi specifici, il loro design hardware e software può essere differente a seconda delle esigenze dettate. Il tipo di veicolo da utilizzare dipende dalla configurazione fisica e ambientale dell'oggetto di studio, dall'articolazione e dalle sue dimensioni.

Queste caratteristiche determineranno la scelta della piattaforma più adatta, generalmente possiamo distinguere due tipologie: ad ala fissa, hanno bisogno di uno spazio adatto per il decollo e atterraggio in sicurezza ma possono operare a quote maggiori, quindi rilevano l'oggetto in meno tempo; multi-rotore, mezzi molto maneggevoli e capaci di operare in zone molto più ristrette e in grado di acquisire non solo immagini nadirali ma anche oblique, fornendo quindi informazioni non solo in planimetria ma anche in elevazione. Quest'ultimi si differenziano da quelli ad ala fissa soprattutto nel metodo di acquisizione, i mezzi multi-rotore stazionano in un punto fisso ad una quota costante (*hovering*) per ogni immagine del rilievo fotogrammetrico ottenendo quindi prodotti di qualità superiore, che comporta anche un'autonomia di utilizzo molto inferiore. (Spanò, Chiabrando, & Lingua, 2019)

I droni possono anche eseguire la fase di acquisizione in maniera autonoma, se viene predefinito un piano di volo. Tale operazione richiede l'utilizzo di un sistema di navigazione satellitare a bordo del drone, che ne determini la posizione in tempo reale, e di un modello digitale di terreno (DSM). I voli sono pianificati sempre a partire dalla scala di rappresentazione attesa, quindi dalla dimensione che avrà il pixel sull'oggetto rilevato, e di conseguenza verranno impostati valori congrui per quota di volo e distanza focale dell'obiettivo.

Generalmente durante i voli si acquisiscono fotogrammi seguendo percorsi con traiettorie parallele tra loro detti *strisciate*, se si ritenesse necessaria un'indagine più approfondita dell'oggetto di interesse è opportuno procedere alla realizzazione di altri voli con traiettorie diverse e mediante riprese oblique (*off-nadir*). Tramite dei software dedicati è possibile inoltre impostare la percentuale di area di ricoprimento (*overlap*) tra le immagini consecutive e tra le strisciate (ricoprimento laterale - *overside*) determinando così il numero di fotogrammi da acquisire e il tempo di volo calcolato. (Trajkovski, Grigillo, & Petrovic, 2020)

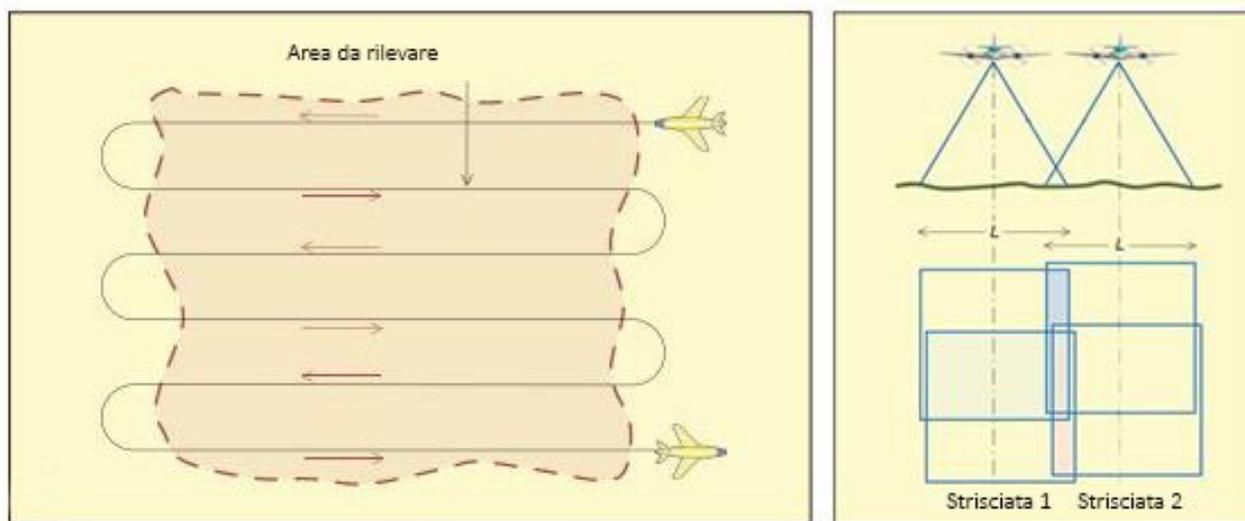


Fig. 18 Schema volo fotogrammetrico a sx; a dx sovrapposizione e ricoprimento tra immagini.  
Fonte: (Cannarozzo, Cucchiarini, & Meschieri, 2012)

La nuvola di punti generata dal sistema di mappatura da drone è generalmente in un sistema di riferimento arbitrario e deve essere registrata in un sistema di coordinate noto del mondo reale.

Nel processo tradizionale, ciò si ottiene associando ai punti indentificati nella nuvola di punti le coordinate note del mondo reale tramite GCP. La raccolta dei GCP, per eseguire questo processo, è un'operazione che richiede tempo e risulta efficiente con una grande quantità di attività sul campo. La precisione del metodo dipende dall'accuratezza dei punti nell'immagine e dalle misurazioni dei GCP. La strategia alternativa alla georeferenziazione è possibile tramite i sistemi di navigazione RTK a bordo del drone, che registrano in tempo reale la posizione 3D e l'assetto rispetto al suolo in un sistema di coordinate predefinito nella cosiddetta georeferenziazione diretta, eliminando le lunghe operazioni di raccolta dei GCP (Gabrlik, 2015).

## 1.5 Strumenti e Sensori

L'energia emessa o riflessa da una superficie viene misurata e registrata dai sensori e i dati risultanti possono essere utilizzati per ricavare informazioni sulle caratteristiche della superficie in esame.

Le misurazioni dell'energia elettromagnetica vengono effettuate da sensori che sono installati su una piattaforma statica o in movimento. I satelliti e altri velivoli (droni o aeromobili) sono generalmente utilizzati per trasportare uno o più sensori. La combinazione sensore-piattaforma determina le caratteristiche dei dati acquisiti. In base alle esigenze, alle informazioni da raccogliere, al budget e ai tempi è possibile determinare quali sensori sono più appropriati al proprio scopo. (Tempfli, et al., 2009)

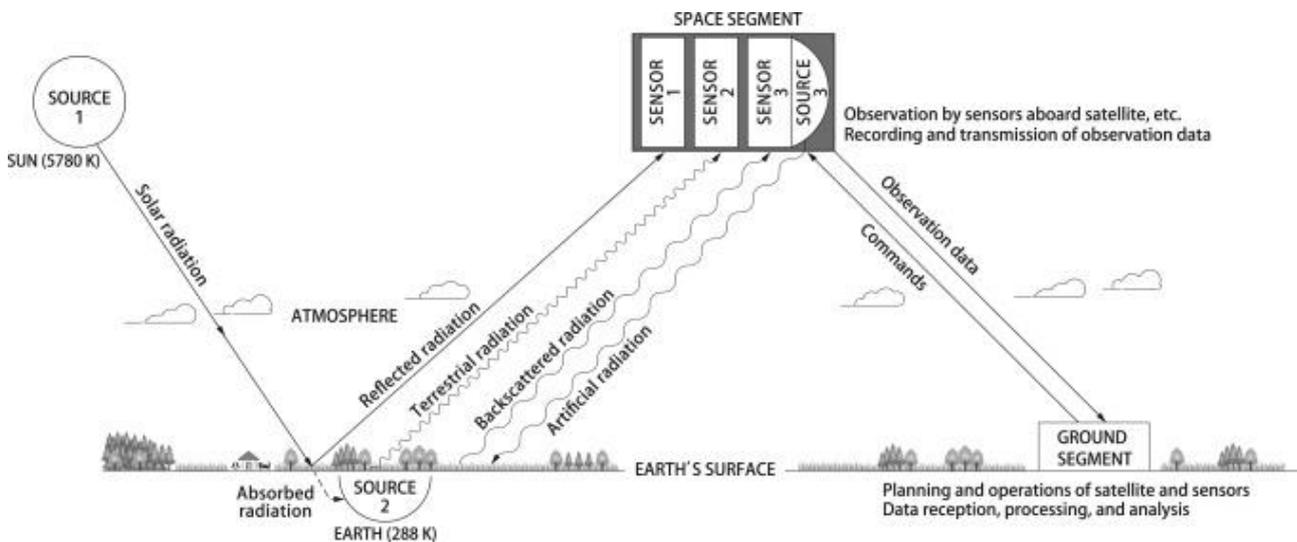


Fig. 19 Componenti di un sistema di telerilevamento satellitare. Fonte: (Kaku, 2019)

### 1.5.1 Risoluzione dei sensori

#### Risoluzione radiometrica

Per risoluzione radiometrica si intende la più piccola differenza nei livelli di energia che può essere distinta dal sensore. Essa dipende dal grado di discretizzazione del segnale ricevuto da un rilevatore elettronico, ad esempio un CCD (*Charge-Coupled Device - dispositivo ad accoppiamento di carica*). Tale dispositivo accumula carica convertendo i fotoni incidenti sulla sua superficie in elettroni. Quindi la carica può essere convertita in un segnale elettrico. Il segnale elettrico viene "campionato" e quantizzato. Questo processo è chiamato conversione analogico/digitale, il prodotto è un numero digitale (*digital number - DN*) all'interno di un intervallo binario fisso, che viene registrato. I sensori remoti più vecchi erano in grado di distinguere solo due livelli di intensità (0, 1), si aveva quindi una risoluzione radiometrica di 1 bit e un'immagine risultante in bianco e nero. Risoluzioni radiometriche maggiori comportano una differenziazione della radianza migliore, ad esempio immagini ad 8 bit forniscono 256 livelli (0, 1, ..., 255) visualizzati in scale di grigio, e offrono quindi dati con un contenuto di informazioni più elevato (Fig. 20). (Richards, 2009)

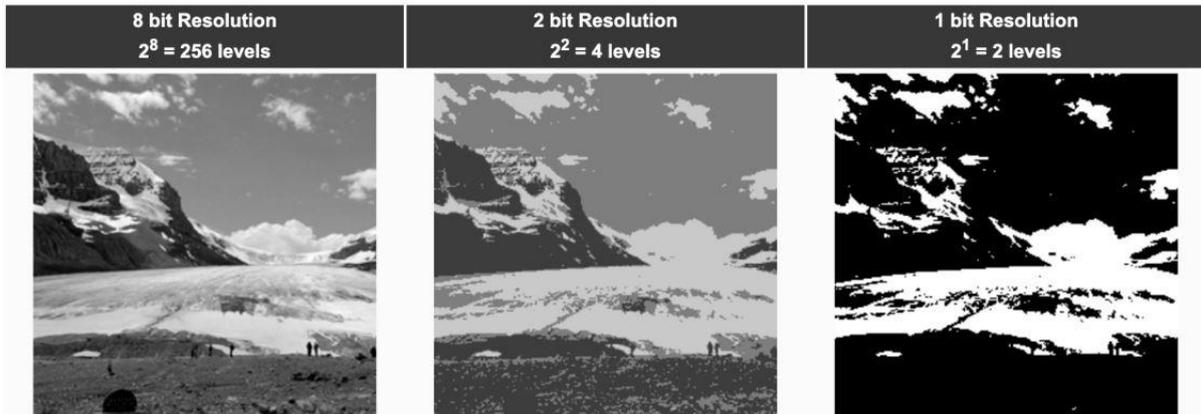


Fig. 20 Confronto tra tipi di risoluzione radiometrica. Fonte: (Humboldt State University, 2016)

### Risoluzione spaziale

Per risoluzione spaziale si intende la dimensione sul terreno di un pixel registrato in un'immagine raster, quindi migliore è la risoluzione di un sistema di registrazione più facilmente è possibile visualizzare e distinguere nell'immagine la struttura degli oggetti a terra.

Tale caratteristica dipende da diversi fattori come: il fattore di scala dell'immagine, all'aumentare dell'impronta a terra della ripresa la risoluzione spaziale diminuisce; la qualità del sistema ottico utilizzato; la struttura della pellicola o dei sensori (CCD); il contrasto presente nell'area coperta, maggiore è il contrasto tra gli oggetti e maggiore sarà tale parametro; il movimento della piattaforma rispetto al target, esso può provocare sfocature e perdita di risoluzione.

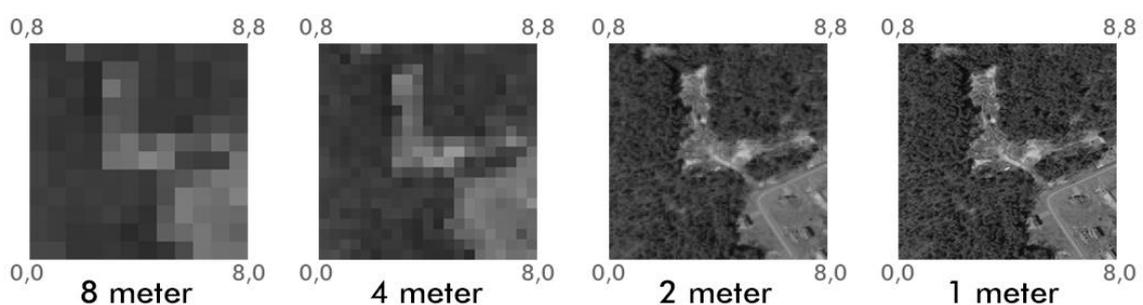


Fig. 21 Comparazione tra acquisizioni della stessa area ma con differenti risoluzioni geometriche. Fonte: (earthdatascience.org, 2020)

La dimensione di un CCD determina la dimensione dei pixel (unità base di un'immagine). Un pixel proiettato sul terreno ci fornisce la risoluzione al suolo della cella. La distanza tra i centri di due celle di risoluzione adiacenti dello stesso canale è chiamata distanza di campionamento del suolo (*Ground Sample Distance*). Si noti che il GSD è costante su tutta una linea di acquisizione se il terreno è pianeggiante e parallelo al piano focale (ad esempio, nel caso di una vista nadirale del terreno

orizzontale. Se fosse invece puntata obliquamente verso sinistra o destra rispetto alla traccia a terra dell'orbita (visualizzazione off-nadir), otteniamo un'immagine obliqua. La scala di un'immagine obliqua cambia in tutta l'immagine, così come la dimensione della cella di risoluzione al suolo e il GSD aumentano con l'aumentare della distanza dal nadir. (Tempfli, et al., 2009)

## Risoluzione spettrale

Con il termine risoluzione spettrale si intende la capacità di un sensore di definire intervalli di lunghezze d'onda discreti. Per ottenere risposte differenti dalle superfici indagate e quindi un elevato valore di discriminazione è necessario avere uno strumento molto sensibile, come i sensori iperspettrali, purtroppo un'elevata risoluzione spettrale riduce il rapporto segnale/rumore del segnale di uscita del sensore determinando una diminuzione della risoluzione spaziale. (Toth & Józków, 2016)

### 1.5.2 Tipologia dei sensori

I sensori sfruttati in questo lavoro di tesi sono sensori passivi. Questi dipendono solitamente da una fonte di energia esterna, il Sole, ma anche dal globo terrestre stesso. Gli attuali sensori passivi disponibili coprono lo spettro elettromagnetico dalla gamma di lunghezze d'onda inferiore a 1 picometro (raggi gamma) fino a più di 1 metro (microonde). Tra i sensori passivi il primo e più comune è la macchina fotografica, altri sono scanner multispettrali e scanner termici.

#### Sensori digitali ottici

Una fotocamera digitale è un sensore remoto elettro-ottico. Nella sua forma più semplice, è costituito dal corpo della fotocamera, da un obiettivo, e al posto della pellicola come sensore monta una serie di sensori CCD (*Charge-Coupled Device - dispositivo ad accoppiamento di carica*) sul piano focale e da un dispositivo di memorizzazione, ma non da componenti meccanici. La struttura di tali sensori può essere a matrice o lineare, di conseguenza si parla di fotocamera a matrice o in linea. Quest'ultima viene utilizzata esclusivamente su una piattaforma mobile, che può essere un'auto, un aeromobile o un veicolo spaziale. Una telecamera con sensori in linea acquisisce un'immagine digitale di un'area linea per linea lungo la traccia al suolo dell'orbita, questo tipo di acquisizione è nota con il termine "pushbroom". (Toth & Józków, 2016)

#### Scanner multispettrali

Uno scanner è uno strumento che ottiene osservazioni o punto per punto o riga per riga. In questo modo, uno scanner differisce fundamentalmente da una telecamera aerea, che registra un'intera immagine in una sola esposizione. Lo scanner multispettrale è uno strumento che misura la luce solare riflessa nello spettro visibile e infrarosso. Un sensore scansiona sistematicamente la superficie terrestre, misurando così l'energia riflessa dall'area visualizzata.

Questo viene fatto simultaneamente per diverse bande di lunghezze d'onda, da cui il nome scanner multispettrale (Fig. 22).

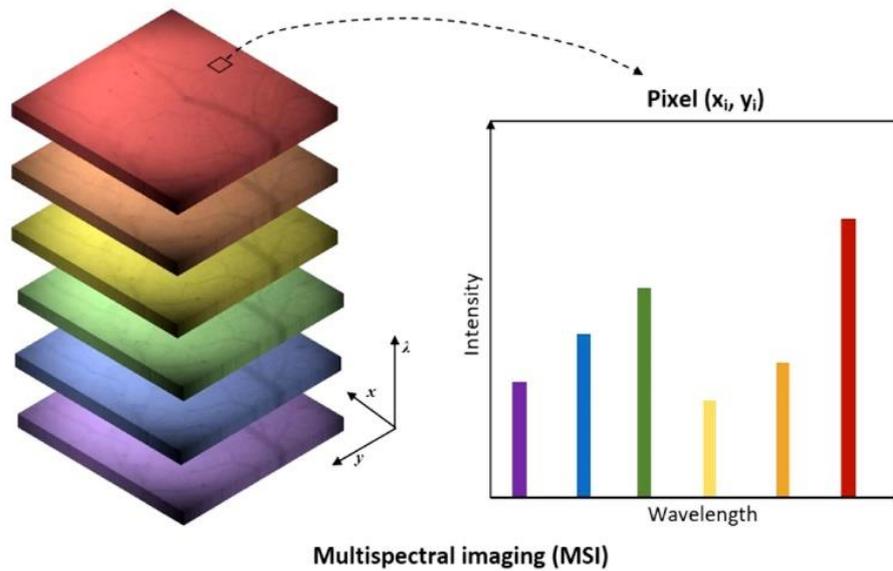


Fig. 22 Porzioni discrete dello spettro rilevate da un sensore multispettrale. Adattata da: (Giannoni, Lange, & Tachtsidis, 2018)

Una banda di lunghezze d'onda o banda spettrale è un intervallo dello spettro elettromagnetico per il quale viene misurata l'energia riflessa media. In genere, viene registrato un numero di bande di lunghezze d'onda distinte, poiché queste bande sono correlate a caratteristiche specifiche della superficie terrestre. Ad esempio, le caratteristiche di riflessione combinate delle bande del rosso e del vicino infrarosso possono fornire informazioni sulla vegetazione, come la biomassa e la salute. La definizione delle bande d'onda di uno scanner, quindi, dipende dalle applicazioni per le quali il sensore è stato progettato.

## 1.6 Tecniche

### 1.6.1 Pre-elaborazione immagini satellitari

Ai fini di ottenere immagini satellitari che siano veritiere ed utilizzabili per la visualizzazione, l'interpretazione e la comparazione multi-temporale è necessaria la modifica e correzione dei dati grezzi raccolti direttamente dai sensori.

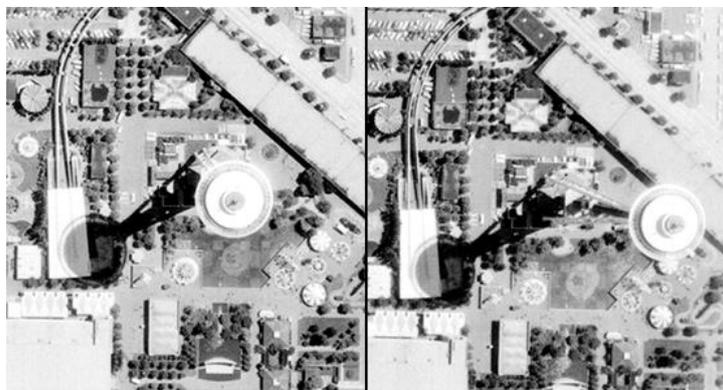
I valori di radianza della radiazione solare riflessa e/o la radiazione termica emessa da un certo target specifico (pixel) sulla superficie terrestre sono per i ricercatori le informazioni più preziose ottenibili da un sensore di telerilevamento.

La prima fase nella catena di elaborazione, spesso indicata come pre-elaborazione, coinvolge la radiometria e le correzioni geometriche. In assenza di tali processi, i dati contenuti in ogni pixel risulterebbero affetti da modifiche dovute alla posizione e altezza del sole, all'interazione dell'atmosfera, a distorsioni geometriche dovute alla piattaforma satellitare in movimento e al metodo di acquisizione del sensore. I livelli di elaborazione e le varie metodologie applicabili variano in funzione allo scopo per cui si ha intenzione di usarle. (Rees, 2013)

La correzione atmosferica e radiometrica del dato satellitare avviene generalmente da parte del distributore del dato. I prodotti derivati da piattaforma satellitare, utilizzati in questa tesi, sono già stati trattati sotto questo punto di vista e sono quindi già corretti, necessitano solo di correzione geometrica.

#### Correzione geometrica

Le deformazioni geometriche sono causate da fattori conseguenti al rapporto geometrico del sistema piattaforma / sensore / oggetto, quali: il movimento del satellite e la rotazione della Terra, la curvatura del globo, il metodo del sistema di acquisizione (lineare o a matrice, inquadramento non nadirale), la presenza di rilievi significativi nella scena.



*Fig. 23 Deformazioni geometriche. Fonte: (Humboldt State University, 2016)*

Tali deformazioni delle immagini satellitari sono state corrette per poter così generare un'immagine che abbia le caratteristiche e le proprietà di scala di una rappresentazione cartografica, corrispondendo il pixel dell'immagine alla sua collocazione sul territorio. (Fig. 24)

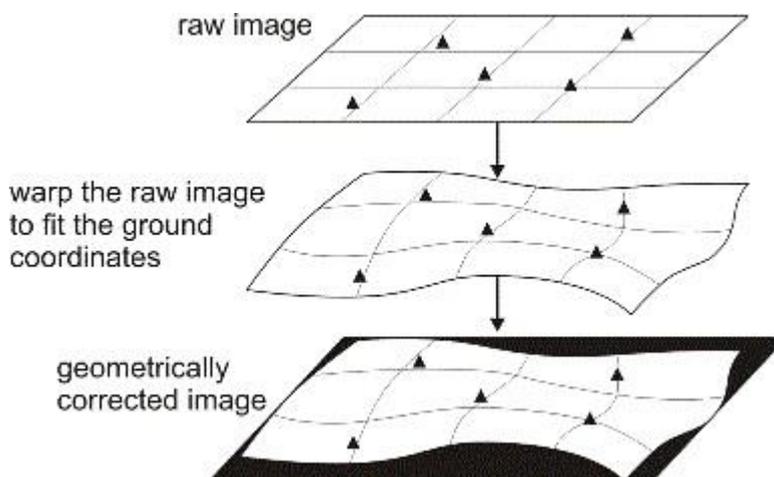


Fig. 24 Fasi del processo di correzione geometrica. Fonte: (catalyst.earth, 2008)

Esistono due tipologie di distorsioni geometriche: quelle sistematiche, tipiche di tutti i dati acquisiti da uno specifico sensore, e non sistematiche, presenti a seconda della posizione di ripresa della piattaforma; le prime possono essere corrette applicando formule di conversione fornite dal produttore del sensore, le seconde devono avvalersi di punti di controllo opportunamente distribuiti nell'immagine.

Le variazioni geometriche indotte dalle differenze altimetriche di rilievi o manufatti possono essere rimosse attraverso l'utilizzo di un modello digitale di terreno (DTM – *Digital Terrain Model*), contenente informazioni nelle tre dimensioni, questo processo è noto come ortoproiezione.

A conclusione di questi metodi per attuare correzioni geometriche, è necessario assegnare alla matrice corretta il valore di radianza di ogni pixel, tale processo è noto come ricampionamento. Il valore da assegnare può essere definito attraverso diversi modelli matematici che possono però causare modificazione dell'informazione radiometrica originaria. (Elachi & Zyl, 2006)

### 1.6.2 La Classificazione delle acquisizioni satellitari

La classificazione di un'immagine satellitare ha come scopo principale quello di estrarre contenuto informativo, in particolare una delle informazioni richieste può essere l'identificazione di tematismi di interesse (bosco, acqua, suolo, costruito, ecc.) presenti nell'immagine oggetto di studio.

La classificazione ha come obiettivo quello di associare ai pixel (o gruppi di pixel) di un'immagine, mediante tecniche automatiche, semi-automatiche o manuali, determinati tematismi delle

superfici. Attraverso tale procedura è quindi possibile realizzare delle vere e proprie mappe tematiche in cui per ciascun pixel, oltre alle coordinate spaziali, sono note informazioni di tipo semantico legate a una specifica categoria. (Lu & Weng, 2007)

La classificazione di un'immagine può essere effettuata tramite interpretazione visiva (metodo soggettivo-qualitativo) o mediante procedure automatiche (metodo oggettivo-quantitativo). Nel primo caso ci si riferisce alle tecniche di fotointerpretazione: un analista esperto identifica nell'immagine gli standard di colore, tessitura (*texture*), struttura, forma, ecc., e digitalizza direttamente sull'immagine poligoni corrispondenti ai diversi tematismi riconosciuti.

La classificazione automatica, caratterizzata da una limitata interazione con l'operatore umano, utilizza specifici algoritmi per definire, dal punto di vista matematico, le caratteristiche identificative dei tematismi di interesse nell'immagine. Nello specifico, la classificazione automatica lavora nello spazio multi-dimensionale a  $n$  dimensioni dove  $n$  è il numero di informazioni a disposizione per ciascun pixel (pari al numero di bande spettrali).

In generale, l'interpretazione visuale, sostanzialmente grazie alla capacità umana di distinguere diversi tematismi, permette di ottenere migliori risultati in termini di accuratezza e precisione; di contro il processo è molto lento in quanto ogni parte dell'immagine deve essere analizzata singolarmente per cui, nella classificazione di aree molto estese, può diventare molto dispendioso in termini di tempo e di denaro. La classificazione automatica, invece, è molto più efficiente quando si ha a che fare con grandi aree e si ha bisogno di risultati nel minor tempo possibile e a costi relativamente bassi. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015)

A seconda delle interazioni tra l'analista ed il dato è possibile distinguere due tipologie di classificazione automatica: supervisionata (*supervised*) e non supervisionata (*unsupervised*). Nella classificazione supervisionata, l'operatore definisce a priori i tematismi informativi e sceglie un certo numero di pixel come rappresentativi di ciascuno di essi: raccoglie le caratteristiche spettrali individuando delle aree campione (*training samples*); la classificazione supervisionata necessita, quindi, di una buona conoscenza dell'area trattata.

In una classificazione non supervisionata, invece, non sono definiti a priori i tematismi di interesse, quindi, non sono richieste informazioni in anticipo sulle categorie; vengono utilizzati degli algoritmi di raggruppamento (*clustering*) che, in maniera automatica, suddividono i pixel in un certo numero di insiemi: l'operatore interviene a posteriori per assegnare a ciascun cluster un tematismo di interesse riconosciuto. I cluster prodotti da questa tipologia di classificazione non sono classi d'informazioni, ma classi spettrali (gruppi di pixel con valori di riflettanza simili) (Zhao & Qian, 2004). In questa tesi verrà utilizzato solo il metodo supervisionato in quanto permette di ottenere risultati migliori in termini di accuratezza. "Questo metodo non richiede alcuna progettazione o design estensivi. L'efficienza computazionale è buona ma richiede calcoli complessi e l'accuratezza può dipendere completamente dalla progettazione e dalla selezione dei campioni di riferimento per ogni classe" (Nair & Bindhu, 2016).

Ci sono due opzioni per le tipologie di classificazione sopra citate: l'approccio "*pixel-based*" o "*object-based*", ovvero basate sul singolo pixel o su gruppi. Una limitazione fondamentale della classificazione basata sui singoli pixel è che le informazioni di quelli circostanti, che possono aiutare ad identificare correttamente il tematismo, non vengono utilizzate. Contrariamente a questi metodi, la classificazione basata su gruppi aggrega prima i pixel dell'immagine in oggetti spettralmente omogenei utilizzando un algoritmo di segmentazione, questo tiene conto delle caratteristiche di colore, forma e pattern quando effettua il raggruppamento. Poiché questo secondo approccio essenzialmente calcola la media dei valori dei pixel e tiene conto delle informazioni geografiche, gli oggetti creati dalla segmentazione assomigliano di più alle caratteristiche del mondo reale e produce risultati di classificazione più puliti, specialmente con le immagini ad alta risoluzione (Giulio Tonolo, 2018).

Di conseguenza, per la classificazione automatica presentata in questa tesi, è stato scelto un approccio *object-based* con il metodo supervisionato.

Lo scopo fondamentale di queste operazioni (*digital image processing*) sulle acquisizioni satellitari è la produzione di cartografia tematica delle superfici investigate. Per realizzare tale cartografia tematica è necessario classificare il territorio in tematismi corrispondenti alla realtà al suolo, ossia alla copertura del suolo. A tale scopo, si ricorre tramite algoritmi di riconoscimento delle caratteristiche spettrali che classificano nell'immagine satellitare i tematismi di interesse delle superfici esistenti al suolo. Come già accennato, ogni gruppo di pixel delle immagini telerilevate è caratterizzato infatti da una firma spettrale determinata dalla riflettanza relativa alle diverse lunghezze d'onda. La classificazione effettuata sul set di dati multispettrali permette di assegnare ciascun gruppo di pixel di un'immagine ad una particolare classe o tema sulla base di un'analisi statistica della probabilità che un pixel appartenga ad una classe. Se tale probabilità supera una determinata soglia, il pixel viene assegnato al tematismo di riferimento, in caso contrario esso viene considerato non assegnato, risultando così "non-classificato".

### 1.6.3 Algoritmi SfM per estrazione di nuvole di punti 3D

Gli algoritmi SfM (*Structure from Motion*) sono utilizzati per ricostruire le scene geometriche tridimensionali (*structure*) e i parametri di orientamento della telecamera durante l'acquisizione (*motion*) a partire dalle immagini bidimensionali.

Per fare ciò, viene implementato un particolare algoritmo in grado di estrarre e descrivere caratteristiche dei pixel su immagini stereoscopiche per la ricerca della corrispondenza di punti omologhi. Tali algoritmi, a partire dalle immagini grezze, forniscono come risultati del processo delle nuvole di punti ricostruite ricavando gli orientamenti relativi delle camere da presa, la posizione stimata dei punti omologhi e i parametri di calibrazione della camera. Il passo finale è la generazione di un orto-mosaico usando la superficie (*mesh*) ottenuta da nuvole di punti dense e immagini tratte da drone. Non c'è differenza di metodologie tra la generazione di orto-mosaici da immagini a bassa

quota ottenute da drone e tra fotografie tradizionali aeree. Sebbene il processo sia valido per entrambe, in fase di acquisizione dell'immagine con drone si usano camere convenzionali e non fotocamere metriche, ciò implica una minore risoluzione radiometrica e quindi è necessario prevedere una maggiore percentuale di sovrapposizione tra le immagini. (Fazeli, Samadzadegan, & Dadrasjavan, 2016)

## 1.7 Prodotti

### 1.7.1 Modelli di elevazione

I modelli digitali di elevazione (DEM – *Digital Elevation Model*) possono essere rappresentati come una funzione continua (funzione di interpolazione) o come una superficie di cui sono noti i vertici. Esistono due tipi di rappresentazioni discrete: le griglie con spaziatura regolare, rappresentazioni più comuni in cui l'elemento superficiale di base è un parallelepipedo, e griglie irregolari (*Triangulated Irregular Networks*) che rappresentano un'approssimazione di superficie basata sul triangolo che migliora la precisione complessiva. Questa rappresentazione consente l'adattamento della densità dei punti dove si rilevano più irregolarità nel terreno amplificando il realismo del DEM. (Hutchinson & Gallant, 2000)

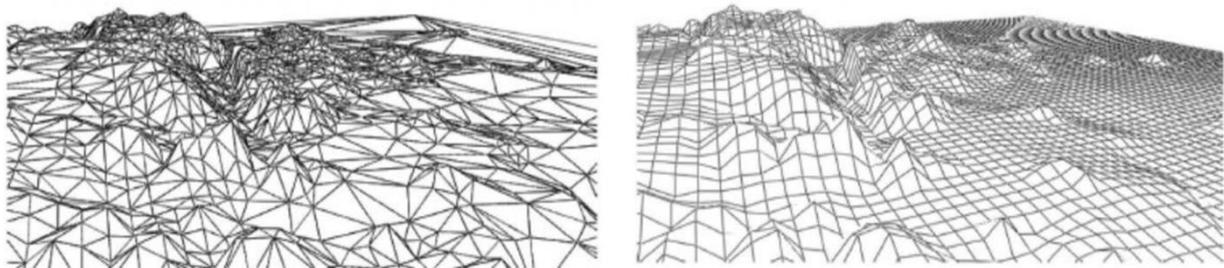


Fig. 25 Tipi di modelli di elevazione: griglia irregolare (sx); griglia regolare (dx) (Fonte: (Silva, Barcellos, Giraldi, Apolinario Jr, & Rodrigues, 2007)

Con DSM (*Digital Surface Model*) si intende un modello che descrive informazioni altimetriche della superficie rilevata per ogni pixel dell'immagine raster.

Al contrario un DTM (*Digital Terrain Model*) rappresenta la sola elevazione del terreno, escludendo la vegetazione e le strutture antropiche. (Giulio Tonolo, 2018)

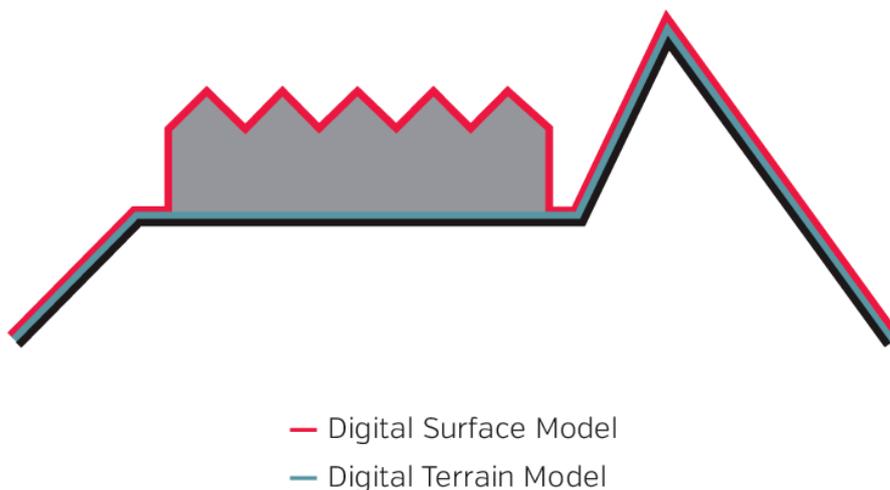


Fig. 26 Confronto tra modello di superficie e modello di terreno.  
Fonte: (Croneborg, Saito, Matera, McKeown, & van Aardt, 2020)

### 1.7.2 Immagini georeferenziate e ortoproiettate

Per immagine georeferenziata si intende una mappa o un'immagine digitale che è stata collegata a un sistema di coordinate terrestri noto in modo che gli utenti possano determinare dove si trova ogni punto sulla mappa o sulla foto aerea rispetto alla superficie terrestre.

Nel processo di georeferenziazione l'immagine digitale viene sottoposta a trasformazioni quali il ricalcolo del rapporto della scala tra pixel e oggetto, che permette le operazioni di misura e la possibilità di sovrapposizione di immagini da prese diverse, e il ricampionamento del valore dei pixel. Per georeferenziare le immagini raster, esse sono collegate a mappe digitali tramite i cosiddetti punti di controllo a terra.

L'ortoproiezione di una immagine è un processo di correzione tridimensionale degli effetti distorsivi tramite l'utilizzo di un modello digitale di terreno (DTM) di adeguata precisione e di GCP per garantire e validare l'accuratezza del posizionamento planimetrico. È possibile marcare e misurare dei punti di controllo sull'oggetto con dei *target* prima delle acquisizioni (nel caso di rilievi aerei), oppure i GCP vengono selezionati dopo le acquisizioni in base alle caratteristiche naturali o antropiche del territorio che sono ritenute più adatte a questo sebbene non siano così ben definite come *target* specifici (Hackeloeer, Klasing, Krisp, & L., 2013).

Le immagini ortoproiettate sono dei prodotti di scala uniforme planimetricamente corretti, possono quindi essere utilizzate per confronti quantitativi.

### 1.7.3 Nuvole di punti

Una nuvola di punti 3D rappresenta anch'essa un modello di superficie digitale se la sua densità di punti (spaziatura della griglia) è sufficiente per descrivere i cambiamenti nella forma della superficie. La distribuzione dei punti può avere una struttura regolare o una spaziatura irregolare. I bordi degli oggetti (linee di discontinuità - *breaklines*) possono essere rappresentati da codici speciali o da dati aggiuntivi basati su vettori come i poligoni.

Da questi modelli è possibile ricavare rappresentazioni standard come sezioni e planimetrie oppure modelli 3D con texture e informazioni dell'oggetto (Spanò, Chiabrandò, & Lingua, 2019).

## 1.8 I Sistemi Informativi Geografici

I Sistemi Informativi Geografici sono infrastrutture per la gestione e organizzazione di dati spaziali ovvero sistemi che implementano un quadro di dati geografici, metadati (informazioni descrittive del dato), utenti e strumenti collegati in modo interattivo per utilizzare i dati spaziali in modo efficiente e flessibile. Le componenti software base di Sistema Informativo Geografico sono: un software GIS per creare e aggiornare dati spaziali; un client software per visualizzare, interrogare e analizzare i dati spaziali, anche tramite web browser; un servizio per la ricerca, la navigazione e l'interrogazione di metadati, set di dati spaziali e altre risorse; un servizio che consente la visualizzazione e consegna dei dati tramite Internet; servizi di calcolo e di trasformazione; uno strumento di archiviazione di dati spaziali, il geodatabase (Giulio Tonolo, 2018).

I GIS mettono in comunicazione queste componenti attraverso l'uso di standard aperti e comuni tra gli operatori coinvolti per i vari formati dati geografici.

I GIS si adattano a scopi di identificazione di problematiche derivate da informazioni geografiche, monitoraggio di cambiamenti e andamenti temporali, gestione e risposta a vari tipi di emergenze, effettuare previsioni e supportare decisioni. La tecnologia GIS unisce la scienza geografica con strumenti per la comprensione e la collaborazione all'ottenimento di informazioni fruibili dai dati. Tali scopi sono possibili tramite dati, analisi spaziali, mappe e software (Giulio Tonolo, 2018).

Il GIS integra diversi livelli e tipi di dati utilizzando la loro posizione spaziale, questi possono essere immagini, oggetti (features) e mappe di base collegate a fogli di calcolo e tabelle. È possibile combinare dati e informazioni da molte fonti indipendenti e ricavare nuovi insiemi di informazioni (risultati) utilizzando una serie di strumenti o software per eseguire diversi tipi di analisi spaziale (esri.com).

Esistono due tipi di formati di dati principali: raster (vedi cap. 1.3.1 L'immagine digitale) e vettoriali. Il raster è costituito da una matrice di celle (o pixel) organizzate in righe e colonne (o una griglia) in cui ogni cella contiene un valore che rappresenta informazioni sui fenomeni del mondo reale come la temperatura. Il dato vettoriale è composto da elementi di geometria come punto, linea o poligono codificati e memorizzati in base alle loro coordinate dei loro vertici rispetto ad un sistema di riferimento noto. Ogni elemento vettoriale può contenere informazioni semantiche che descrivono caratteristiche dell'oggetto, espresse in formato alfanumerico (Giulio Tonolo, 2018).

Tutti i dati sono accompagnati dai cosiddetti metadati, informazioni che descrivono un set di dati, ed hanno lo scopo di favorire la corretta creazione, gestione e contestualizzazione dell'informazione nel tempo. Esistono linee guida e standard internazionali per definire correttamente dei metadati ma generalmente forniscono informazioni sull'identificazione, la qualità, il produttore, i riferimenti spaziali del dato.



## 2. Contributo della Geomatica a supporto della gestione di eventi alluvionali: la cartografia d'emergenza

“Le discipline della Geomatica sono state storicamente adottate per supportare le diverse fasi del ciclo di gestione delle emergenze con un focus principale sulla risposta all'emergenza, il ripristino alle condizioni iniziali e la preparazione (*preparedness*) attraverso l'acquisizione, l'elaborazione, la gestione e la diffusione dei dati geospaziali” (Ajmar, Boccardo, Disabato, & Giulio Tonolo, 2015).

La Geomatica assume un'importanza decisiva nello svolgimento di queste fasi attraverso il Rapid Mapping: nell'ambito del progetto europeo Copernicus è un servizio che consiste nella “consegna rapida (ore o giorni) e su richiesta di informazioni geospaziali a supporto delle attività di gestione delle emergenze nelle ore immediatamente successive al disastro” (Copernicus EMS, 2020).

La crescente disponibilità di immagini telerilevate e di dati geospaziali in termini di dati topografici di riferimento, resi disponibili da agenzie catastali nazionali o territoriali e da iniziative online di mappatura collaborativa come OpenStreetMap, pone la Geomatica al centro del dibattito nella definizione di strumenti operativi e di servizi a supporto delle attività di gestione delle emergenze. L'attivazione di tali servizi è richiesta da utenti autorizzati quali enti nazionali o internazionali attivi nel campo della gestione di emergenze che necessitano, nel minor tempo possibile, di informazioni sull'entità e portata dell'evento e di stime su danni a edifici ed infrastrutture (Ajmar, Boccardo, & Giulio Tonolo, 2019).

Il Rapid Mapping mira a fornire tali informazioni agli utenti finali nel più breve tempo possibile, sfruttando principalmente sensori satellitari opportunamente scelti in base alla tipologia di evento, sotto forma di mappe cartografiche con contenuti informativi dal valore aggiunto. In questo specifico contesto sono necessari anche dati relativi alla situazione pre-evento, relativi alle caratteristiche topografiche e ottenute direttamente dagli enti che li hanno creati, in modo da ottenere così un'adeguata contestualizzazione e un'analisi più accurata dell'evento.

I principali passi operativi in un processo di mappatura speditiva consistono innanzitutto nel reperire immagini dell'evento, nel minor tempo possibile e con un'adeguata qualità; tali immagini vengono quindi processate per applicare correzioni geometriche ed ottenere prodotti rigorosi. Nel caso non siano disponibili dati da enti ufficiali, sull'area di interesse, precedenti all'emergenza si ricorre ad operazioni di estrazione semi-automatica di informazioni o alla collaborazione di team di volontari come ad esempio Humanitarian OpenStreetMap Team.

Le immagini post-evento, una volta corrette, sono trattate con le stesse procedure di estrazione di dati, possono essere sia automatiche sia tramite esperti foto interpreti, al fine di produrre mappe con informazioni dal valore aggiunto sullo stato dell'evento agli utenti finali (Ajmar, Boccardo, Disabato, & Giulio Tonolo, 2015).

I requisiti dell'utente finale, la tipologia di emergenza e il livello di dettaglio richiesto comportano una scelta tra le tecniche, piattaforme e sensori utilizzabili (Ajmar, et al., 2017).

## 2.1 Il telerilevamento satellitare nel monitoraggio danni nelle alluvioni

L'impiego di piattaforme satellitari è oggi una risorsa fondamentale al fine di supportare la gestione di emergenze alluvionali, soprattutto in virtù della crescente disponibilità di dati acquisiti sia da operatori privati che da enti nazionali. Le analisi derivate dal telerilevamento satellitare supportano sia i decisori che i soccorritori sul campo durante le diverse fasi delle attività di risposta alle emergenze.

In linea generale le piattaforme satellitari sono le più utilizzate sia perché consentono di monitorare grandi aree su tutta la superficie terrestre anche in zone con accessibilità scarsa o nulla sia perché i moderni satelliti possono essere attivati e orientati (acquisizioni off-nadir) in un tempo molto breve permettendo così, di avere immagini che coprono le aree di interesse entro poche ore nel migliore dei casi, dalla richiesta. Altri aspetti tecnici e funzionali dei satelliti offrono la possibilità di rivisitazione della stessa area nel tempo, a seconda dei parametri orbitali delle piattaforme, permettendo così il monitoraggio di un evento in evoluzione. L'effettiva tempestività di un'acquisizione satellitare dipende da diversi fattori tecnici come l'ora locale nelle aree interessate, la distribuzione delle stazioni di controllo a terra e i requisiti tecnici dell'utente in termini di immagini richieste (Ajmar, et al., 2017).

Un requisito fondamentale delle acquisizioni raccolte dalle piattaforme satellitari è la risoluzione spaziale, approssimabile con la GSD (vedi cap. 1.5.1 Risoluzione dei sensori): questa caratterizza il livello di dettaglio dell'immagine stessa, ovvero la dimensione della singola cella della foto (pixel) sul terreno, ed è indicativa dell'effettiva interpretabilità e livello di dettaglio delle informazioni. C'è una correlazione diretta tra la dimensione del pixel e l'impronta a terra che i sensori riescono a rilevare, infatti con il migliorare della risoluzione si riduce sia la superficie complessiva inquadrata dall'immagine sia la risoluzione spettrale. Contrariamente invece le acquisizioni contraddistinte da una risoluzione spaziale maggiore coprono un'impronta a terra maggiore e possono avere una risoluzione spettrale elevata, entrambe caratteristiche utili al monitoraggio di eventi a scala regionale (Ajmar, et al., 2017).

Nel caso sia necessario monitorare un evento per diversi giorni è opportuno tenere in considerazione che bassi tempi di rivisitazione implicano generalmente una risoluzione spaziale più bassa oppure è necessario sfruttare dati da più piattaforme di una costellazione di satelliti anche ottenendo acquisizioni off-nadir dell'area di interesse. Tale scelta comporta una riduzione di GSD (anche non trascurabile) e possibili difficoltà di interpretazione dell'immagine dovuta a distorsioni e ombre (Ajmar, et al., 2017).

Le costellazioni di satelliti più recenti possono fornire acquisizioni con un'altissima risoluzione spaziale (GSD <0.5 m) e con un'elevata accuratezza di posizionamento (Boccardo & Giulio Tonolo, Remote Sensing Role in Emergency Mapping for Disaster Response, 2015).

Per sensori passivi la copertura nuvolosa e le ombre, dovute alle condizioni atmosferiche o alla topografia dell'area di interesse, può essere causa di rilevanti difficoltà nel poter analizzare

un'immagine satellitare fino a quasi risultare non utilizzabili soprattutto durante un'alluvione e nelle ore successive (24 h-48 h) (Ajmar, Boccardo, Disabato, & Giulio Tonolo, 2010).

La tecnologia radar (sensore attivo) risulta molto utile nello studio degli effetti di un'alluvione su vasta scala in quanto sono facilmente identificabili le aree coperte dall'acqua (acque calme) poiché queste, riflettendo specularmente la radiazione "lontano" dai sensori, sono caratterizzate da bassi valori di retrodiffusione, identificati generalmente da toni scuri nelle relative immagini.

Il confronto con dati acquisiti precedentemente ad un evento alluvionale può fornire la portata e l'evoluzione del fenomeno alluvionale in svolgimento, è possibile notare in Fig. 27 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** le aree allagate in toni di nero. Questa tecnologia può essere sfruttata anche per acquisizioni notturne, incrementando così il tempo di rivisitazione (Boccardo & Giulio Tonolo, Remote Sensing Role in Emergency Mapping for Disaster Response, 2015).

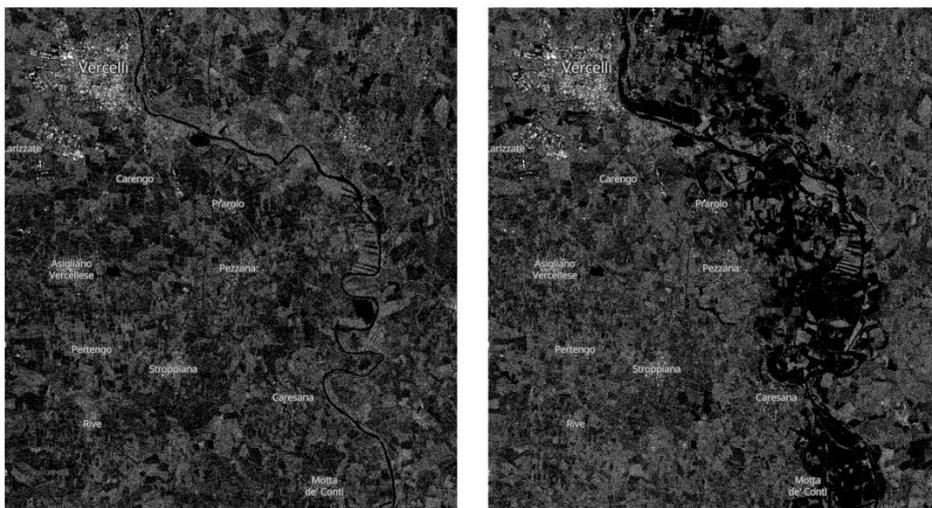


Fig. 27 Confronto tra immagine radar pre evento (27/09/2020) a sx. e durante l'evento (03/10/2020) a dx sul fiume Sesia a Vercelli. Fonte: (sentinel-hub, 2020)

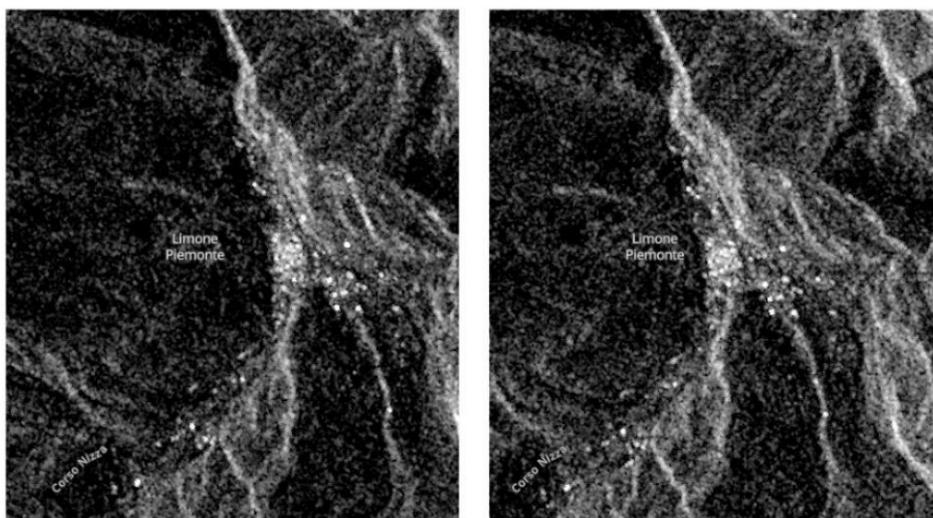


Fig. 28 Confronto tra immagine radar pre evento (27/09/2020) a sx e durante l'evento (03/10/2020) a dx su Limone Piemonte. Fonte: (sentinel-hub, 2020)

Le informazioni ricavate da tali sensori radar hanno alcune limitazioni dovute al metodo di acquisizione, al tipo di tecnologia impiegato e al tipo di superficie da rilevare (Richards, 2009) (Fig. 27). Risulta meno complesso e più accurato lo studio di aree pianeggianti ma anche di eventi a lungo termine e fenomeni su scala territoriale più ampia, in parte anche in virtù del fatto che le risoluzioni spaziale di immagini radar ad accesso pubblico (*open access*) come i dati di Sentinel 1 del programma Copernicus, sono nell'ordine di 10 metri per pixel o superiore (Fig. 28).

Per lo studio di eventi di estensione minore, come l'alluvione di Ottobre 2020 a Limone Piemonte (CN), e di aree di interesse con rilievi montuosi e grandi dislivelli, l'utilizzo della tecnologia radar risulta di scarsa fruttuosità se si dispone di soli dati *open access*, per tali motivi non verrà considerato in questo lavoro di tesi.

In ogni emergenza alluvionale è fondamentale il tempo che trascorre tra il momento di attivazione del servizio e la produzione della mappa, mediamente l'operazione che richiede più tempo è proprio quella di accesso al dato satellitare e acquisizione dell'area di interesse, tale fase è soggetta ai requisiti posti dagli utenti e alla disponibilità di dati validi ad estrarne informazioni utili alla risposta emergenziale (Ajmar, et al., 2017).

## 2.2 La fotogrammetria da drone a supporto della gestione delle emergenze

I droni sono sempre più frequentemente impiegati per acquisire dati post-evento su aree limitate di interesse. Il vantaggio principale derivato dall'impiego di piattaforme aeree è l'aumento della risoluzione spaziale delle immagini unito alla possibilità di ricavare sia ortofoto sia dati complementari come i modelli digitali di superficie (DSM) e caratteristiche tridimensionali (in linea teorica è un risultato ottenibile anche tramite dati satellitari ma non è ancora sistematicamente integrato in un flusso di lavoro operativo) (Ajmar, et al., 2017).

Una fotocamera digitale è il sensore più frequentemente utilizzato nel rilievo su un drone, registrando sia la geometria sia le informazioni spettrali degli oggetti target e fornendo le informazioni necessarie per completare le attività di mappatura. I risultati della procedura fotogrammetrica delle immagini sono, in genere, meno precisi lungo la direzione parallela all'asse ottico della fotocamera, è un problema comune derivante dalla compressione delle informazioni lungo tale direzione (Liu, et al., 2014). In secondo luogo, la qualità delle normali immagini fotografiche è fortemente connessa alle condizioni di illuminazione dell'ambiente. Nonostante i droni riescano ad acquisire dati al di sotto delle nuvole, e quindi forniscono informazioni non rilevabili da una piattaforma satellitare con sensori passivi, gli effetti delle ombre sono un problema serio che diminuisce la qualità delle immagini registrate. Infine, le immagini RGB comuni non forniscono informazioni spettrali sufficienti per distinguere automaticamente i vari oggetti target, in questo modo l'identificazione e l'elaborazione automatica diventano meno attuabili (Liu, et al., 2014). Per superare questi problemi, potrebbero essere impiegati altri sensori di mappatura: laser scanner, radar e sensori di immagini multispettrali sono tutti potenziali candidati.

La rapidità nei tempi di acquisizione deve essere efficacemente bilanciata con i tempi di elaborazione e restituzione, così come il rapporto tempi-costi deve essere favorevole, optando per il miglior compromesso possibile tra tempestività e precisione finale attesa (Sammartano, 2018).

Un vantaggio di queste piattaforme risiede anche nel miglioramento della sicurezza degli operatori che possono svolgere tali attività a distanza e con un'esposizione minore, anche in termini di tempo, in zone pericolose (Calantropio, Chiabrandò, & Spanò, 2019).

Una sfida comune alle piattaforme di mappatura mobile è affrontare l'enorme quantità di set di dati raccolti. Questo è un problema particolarmente importante per un drone, poiché il suo vantaggio principale rispetto ad altri tipi di piattaforme è la sua rapida reattività. Utilizzando i droni, è possibile ottenere una quantità molto grande di osservazioni in un periodo molto breve, ma le analisi successive richiedono ancora un'elaborazione ampia e complessa prima di poter ottenere i prodotti di cartografia (*mapping*) finali (Liu, et al., 2014). Un altro aspetto da tenere in considerazione è l'operatività di tali piattaforme, questa è soggetta all'autonomia di volo che generalmente è limitata a poche decine di minuti e possono quindi rilevare aree di modesta estensione con un solo set di batterie.

I droni permettono di acquisire, oltre a viste nadirali, anche immagini oblique dell'area di interesse, queste in ambiente urbano forniscono dati non solo sulle coperture degli edifici ma anche sulle facciate e sull'impronta a terra dei fabbricati. Questo utilizzo specifico richiede attenzione nella pianificazione del volo sia per coprire l'intero oggetto con il tempo minimo sia per tenere in conto di eventuali occlusioni derivabili dal contesto di azione (Aicardi, et al., 2016).

Diversi studi (Spanò, Chiabrandò, & Lingua, 2019) e (Boccardo, Chiabrandò, Dutto, Tonolo, & Lingua, 2015) dimostrano l'efficacia del dispiegamento di droni per scopi di mappatura e la possibilità di sfruttare i dati acquisiti nei contesti di risposta alle emergenze.

L'impiego di droni che sfruttano un approccio di georeferenziazione diretta (ovvero senza necessità di misurare punti di controllo a terra) consente di ottenere prodotti, come le ortofoto e le nuvole di punti, con una precisione del posizionamento nell'ordine di pochi centimetri (Boccardo, Chiabrandò, Dutto, Tonolo, & Lingua, 2015). Questa tecnica permette di trascurare completamente le operazioni preliminari relative alla materializzazione e alla misurazione degli obiettivi sul terreno, ed è un chiaro vantaggio in termini di tempi rispetto ad un (Chiabrandò, Giulio Tonolo, & Lingua, 2019).

La georeferenziazione diretta può essere ottenuta sia in post-processamento (PPK - *Post-Processed Kinematic*) sia in tempo reale (RTK): la prima consiste nello stimare i parametri di orientamento della camera e del posizionamento nello spazio della piattaforma, teoricamente questa tecnica consente di ottenere risultati con un'accuratezza migliore; la seconda permette di calcolare l'orientamento della camera in tempo reale tramite le informazioni, che una stazione GNSS di riferimento invia al rover, sulle correzioni alla posizione misurata a bordo del drone (Chiabrandò, Giulio Tonolo, & Lingua, 2019). Sebbene la post-elaborazione dei dati del volo fotogrammetrico sia attuabile con piattaforme più economiche, è necessario avere specifiche competenze nella fase di elaborazione per trattare correttamente le informazioni grezze del posizionamento GNSS (Teppati Losè, Chiabrandò, & Giulio Tonolo, 2020).

Rigorosi test di valutazione dell'accuratezza del posizionamento (Teppati Losè, Chiabrandò, & Giulio Tonolo, 2020), (Boccardo, Chiabrandò, Dutto, Tonolo, & Lingua, 2015) dimostrano chiaramente che anche utilizzando un approccio di georeferenziazione diretta, è possibile ottenere accuratèzze orizzontali entro 1,5 m. "Valori simili sono ovviamente adatti alla fase di risposta immediata, permettendo agli utenti di identificare in modo univoco le infrastrutture e fabbricati colpiti e di valutarne il grado di danno nelle immagini post-evento" (Boccardo, Chiabrandò, Dutto, Tonolo, & Lingua, 2015).

L'approccio RTK può essere utilizzato anche in contesti con aree complesse da rilevare se viene correttamente studiato il piano di volo: è bene sottolineare che il drone dovrebbe essere in contatto costante con una stazione GNSS di riferimento e che gli operatori sul campo siano formati per far fronte a queste necessità e a possibili problemi di copertura del segnale di rete (Teppati Losè, Chiabrandò, & Giulio Tonolo, 2020). Inoltre condizioni meteo avverse come scarsa visibilità, piogge intense e soprattutto forti venti possono causare consistenti ritardi nel dispiegamento dei droni volta raggiunta l'area dell'emergenza.



### 3 Caso studio: Limone Piemonte (CN)

Tra il 2 e il 3 ottobre 2020 il Piemonte è stato interessato da precipitazioni eccezionali per intensità che hanno coinvolto l'intera regione, con particolare insistenza nelle zone dell'alta val Tanaro, biellese, vercellese e nel verbanico. Nell'alta val Tanaro la stazione pluviometrica di Limone Piemonte (CN) ha registrato quasi 600 mm di pioggia, quasi tutti nella giornata del 2 ottobre, tali valori rappresentano a livello di stazione più del 50% della precipitazione media annuale (Arpa Piemonte, 2020).

Il comune di Limone Piemonte (CN) ha subito gravi danni alla viabilità e all'edificato, causati dall'esondazioni dei torrenti presenti nella valle che ha comportato fenomeni di erosione e accumulo di materiale detritico sul territorio.



*Fig. 29 Danni all'edificato nella zona di Tetti Mecci (CN). Fonte: fotogramma video di Local Team*

La scelta del caso studio è ricaduta su Limone Piemonte perché l'emergenza potrebbe ripresentarsi nel sito e con la conoscenza del territorio si potrebbe diminuire il rischio su persone e fabbricati. Si evidenzia inoltre che tale decisione è stata presa per la disponibilità di dati raccolti dal Team DiRECT del Politecnico di Torino quali un'immagine satellitare ad altissima risoluzione e acquisizioni fotogrammetriche dell'area di studio, l'intento della campagna di acquisizione e rilievo era quello di generare conoscenza sul territorio per la valutazione dello stato di fatto post emergenza.

Questo lavoro di tesi si propone come obiettivo quello di utilizzare i soli dati recuperabili dal Sistema Informativo Geografico della Regione Piemonte per confrontare il territorio oggetto di studio con i risultati ottenuti: una panoramica sullo sviluppo dell'edificato nel territorio di Limone Piemonte supporterà questo confronto, suggerendo come l'urbanizzazione non sensibile alla fragilità del territorio sia stata in parte causa dell'entità dei danni; infatti l'edificazione spinta da motivazioni prevalentemente economico-commerciali evidenzia drammaticamente la sua scarsa sostenibilità.

La fortunata posizione geografica del comune di Limone Piemonte, lungo la storica via di comunicazione per il commercio del sale tra il Piemonte, la riviera ligure e la Francia, lo ha reso fin dall'epoca romana un punto nevralgico di passaggio. Nel 1882 viene aperto il valico carrozzabile sotto il Colle di Tenda e pochi anni dopo, nel 1900 è inaugurata la galleria ferroviaria a servizio della linea Cuneo-Ventimiglia-Nizza (Palmero, 1998). Proprio lo sviluppo di questi moderni collegamenti ha reso Limone facilmente raggiungibile e meta di *loisir* grazie al clima alpino mite, prenderà così avvio il grande turismo invernale ed estivo che porterà negli anni successivi allo sviluppo di Limone (Fiandra & Bellone, 2013). Tale sviluppo ha interessato, oltre il suo storico centro, anche vaste aree lungo la valle fluviale verso la montagna che hanno subito un'ingente urbanizzazione.

In Fig. 30 viene rappresentato il territorio del comune di Limone Piemonte in formato cartografico tramite l'elaborazione grafica personale dei dati messi a disposizione sul Geoportale Piemonte.



### 3.1 I dati utilizzati

I dati sono stati reperiti principalmente tramite il Sistema Informativo Territoriale della regione Piemonte: il Geoportale Piemonte permette di visionare, interrogare e scaricare i principali dati geografici della Regione. Tale servizio raccoglie anche la Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti (BDTRE) ovvero la base dati geografica del territorio piemontese promossa dalla Regione Piemonte, con i contenuti propri di una cartografia tecnica. È importante sottolineare che questi dati sono prodotti da fonti cartografiche ufficiali e che possiedono metadati conformi agli standard internazionali.

Per questo lavoro di tesi sono state prese in esame tre cartografie differenti: la Cartografia di base prodotta dall'Istituto Geografico Militare del 1960 digitalizzata, reperita sul Geoportale Nazionale in formato raster in scala 1:25000 (Geoportale Nazionale); la Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) aggiornata al 1991, in formato vettoriale ed in scala 1:10000 sul Geoportale Piemonte (Geoportale Piemonte, 2020); la Base Cartografica di Riferimento 2019 derivata da BDTRE, in formato vettoriale ed in scala 1:10000 (Geoportale Piemonte, 2020).

Il modello di terreno (DTM) utilizzato in questa tesi, disponibile anch'esso sul Geoportale Piemonte in scala 1:5000, risalente al 2011, è l'unico modello di elevazione disponibile che presenti una precisione in quota adeguata agli scopi di questa tesi,  $\pm 0.30$  m ( $\pm 0.60$  m nelle aree di minor precisione, corrispondenti alle aree boscate e densamente urbanizzate), e con una risoluzione spaziale di 5 m.

Nell'ottica degli obiettivi della tesi si è ritenuto di interesse raccogliere dati sugli scenari di pericolosità, prodotti reperibili su Geoportale da BDTRE in scala 1:25000 individuati dalla Regione Piemonte nel Piano gestione Rischio Alluvioni (PGRA), con lo scopo di creare mappe per identificare l'edificato che sorge su aree soggette a rischio alluvionale già noto.

Per la fotointerpretazione sono stati utilizzati come dati di riferimento immagini satellitari precedenti all'evento, risalenti al 2015 e 2018, disponibili sul Geoportale Regionale ma solo in visualizzazione.

I dati raccolti dal Team DiRECT e poi elaborati in questa tesi sono un'immagine satellitare post evento ad altissima risoluzione, acquisita a due giorni dal termine dell'evento alluvionale, e acquisizioni di immagini tramite drone per il rilievo fotogrammetrico dell'abitato e delle aste fluviali effettuate in diversi momenti dopo l'evento (Novembre 2020, Giugno 2021). Sebbene questi dati siano stati acquisiti successivamente all'evento nella maggior parte dei casi hanno potuto documentare danni occorsi non ancora ripristinati.

L'elaborazione fotogrammetrica dei dati acquisiti da drone è stata portata a termine tramite l'utilizzo del software Agisoft Metashape Professional (versione 1.7.6). Tali dati sono stati poi

utilizzati per operazioni geo-spaziali, effettuate in ambiente GIS tramite il software ArcGIS Pro (versione 2.7.2) (utilizzato anche per l'elaborazione geometrica dei dati satellitari), al fine di estrarre informazioni a valore aggiunto e predisporre le adeguate rappresentazioni sull'area di studio.

## **3.2 Indagini sull'edificato tramite dati dei Sistemi Informativi Geografici**

### **3.2.1 Sviluppo tessuto urbano dagli anni '60 ad oggi**

Attraverso i dati messi a disposizione dalla Regione Piemonte è stata creata una mappa relativa all'evoluzione del tessuto edilizio nel territorio comunale di Limone Piemonte basandosi sulle informazioni ricavate da tre Carte Tecniche Regionali prese in esame. La cartografia in formato raster è stata prima digitalizzata per consentire le analisi in ambiente GIS.

Per raggiungere tale obiettivo, operativamente, si è partiti dal dato vettoriale sull'edificato più recente, quello riferito al 2019. Attraverso operazioni di geo-processing tra i diversi dati cartografici è stato possibile evidenziare, sul set di dati più recente, gli edifici già presenti nel 1960 e nel 1995 ed è stato aggiunto un attributo semantico che indicasse l'anno della fonte e quindi la loro presenza sul territorio in tale data.

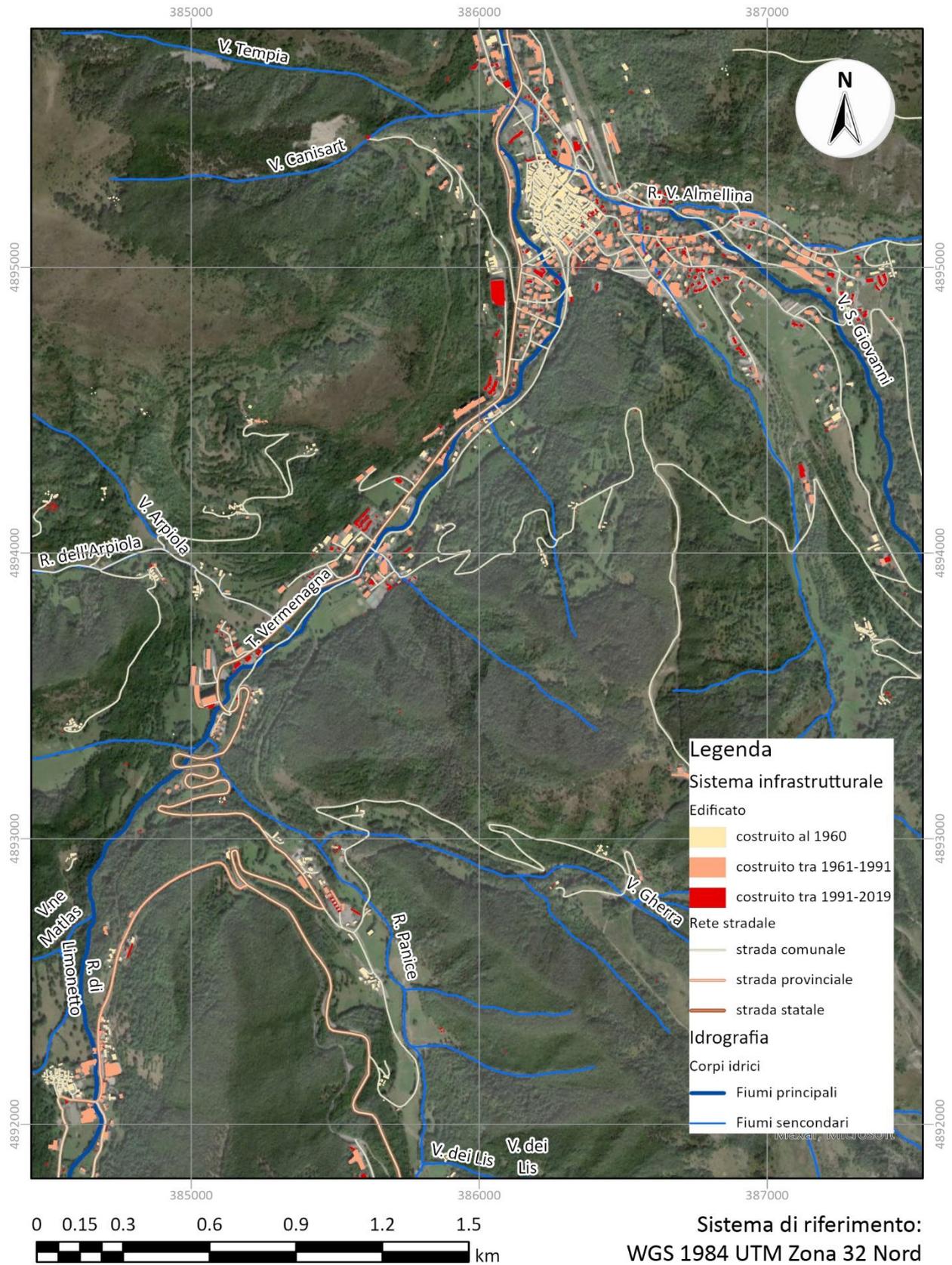
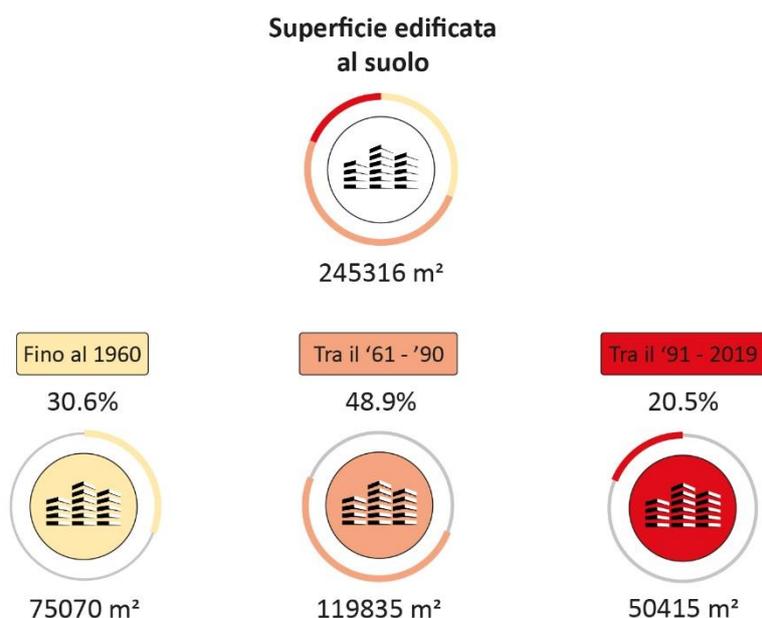


Fig. 31 Stralcio carta evoluzione del costruito, scala 1:20000

Nella mappa ottenuta in Fig. 31, attraverso l'uso di dati georeferenziati, è possibile la creazione di informazioni aggiunte che verranno utilizzate in seguito per generare conoscenza su eventuali edifici possibilmente coinvolti o danneggiati a seguito dall'evento alluvionale. Nella mappa sono stati differenziati i vari edifici in base al loro anno di comparsa sulle fonti cartografiche. Attraverso la gestione dei dati tramite ambiente GIS è possibile visualizzare le informazioni, in questo caso la distribuzione di nuove costruzioni sul territorio, ed estrarre dati di sintesi sulle informazioni contenute nella mappa come il grafico seguente in Fig. 32.

Tramite operazioni geospaziali in ambiente GIS è stato possibile ricostruire la quantità di superficie al suolo occupata dal patrimonio costruito fino agli anni '60, al periodo tra il '61 ed il '90, e al periodo tra il '91 ed il 2019 rispetto al totale edificato identificato nelle fonti.

Il grafico ricavato quantifica il notevole incremento di superficie che si è protratto dagli anni '60 al 2019 evidenziando come la superficie di suolo occupato dall'edificato sia più che triplicata in questo lasso di tempo.



*Fig. 32 Grafico riassuntivo della superficie edificata al suolo per i periodi considerati (percentuali rispetto all'estensione totale del costruito al 2019)*

### 3.2.2 Edificato esposto a pericolosità alluvionale

Per mappare ed identificare gli edifici esposti ad un possibile evento alluvionale si è fatto ricorso ad alcuni dati del Piano di gestione del rischio di alluvioni, istituito dalla Direttiva Europea 2007/60/CE e recepito nel diritto italiano con D.Lgs. 49/2010 è uno strumento per “dirigere l’azione sulle aree a rischio più significativo, organizzate e gerarchizzate rispetto all’insieme di tutte le aree a rischio e definisce gli obiettivi di sicurezza e le priorità di intervento a scala distrettuale, in modo concertato fra tutte le Amministrazioni e gli Enti gestori, con la partecipazione dei portatori di interesse e il coinvolgimento del pubblico in generale” (Regione Piemonte, 2020).

In particolare in questo lavoro di tesi sono stati utilizzati i dataset degli scenari di pericolosità di un evento alluvionale: sono perimetrazioni di porzioni di territorio che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo scenari di scarsa probabilità di alluvioni e quindi di eventi estremi o media probabilità di alluvioni (tempo di ritorno probabile maggiore di cento anni) o elevata probabilità di alluvioni.

Partendo da questi dati di base, in ambiente GIS, è stata creata una mappa che evidenzia quali superfici edificate al suolo del comune di Limone Piemonte insistono su aree a pericolosità alluvionale nota e di queste conoscerne il periodo di realizzazione tramite l’incrocio con le fonti cartografiche elaborate in precedenza (Fig. 33).

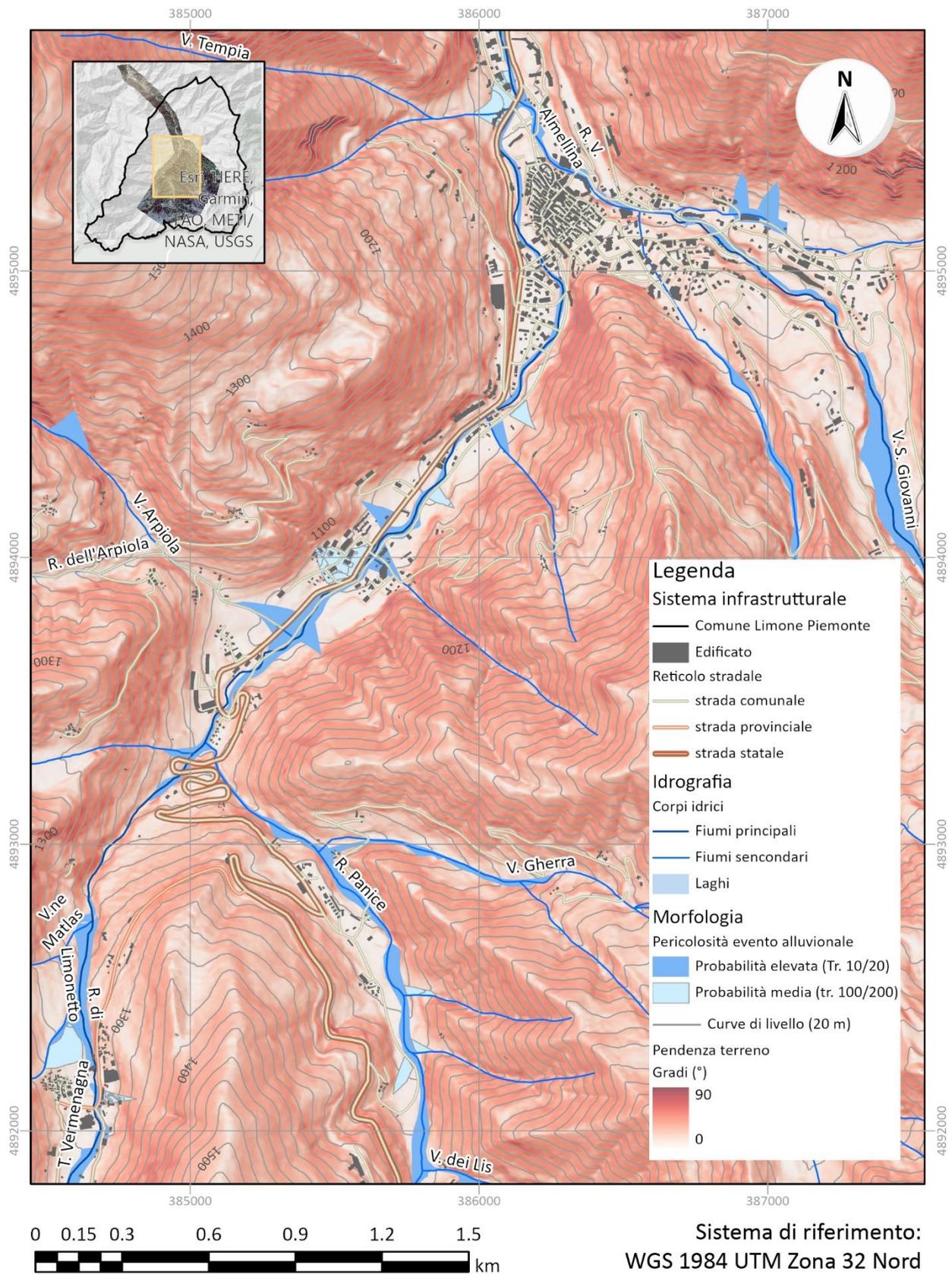


Fig. 33 Stralcio carta della pericolosità alluvionale, scala 1:20000

I seguenti grafici sintetizzano le informazioni sulle superfici edificate distinguendole in base all'anno delle fonti cartografiche.

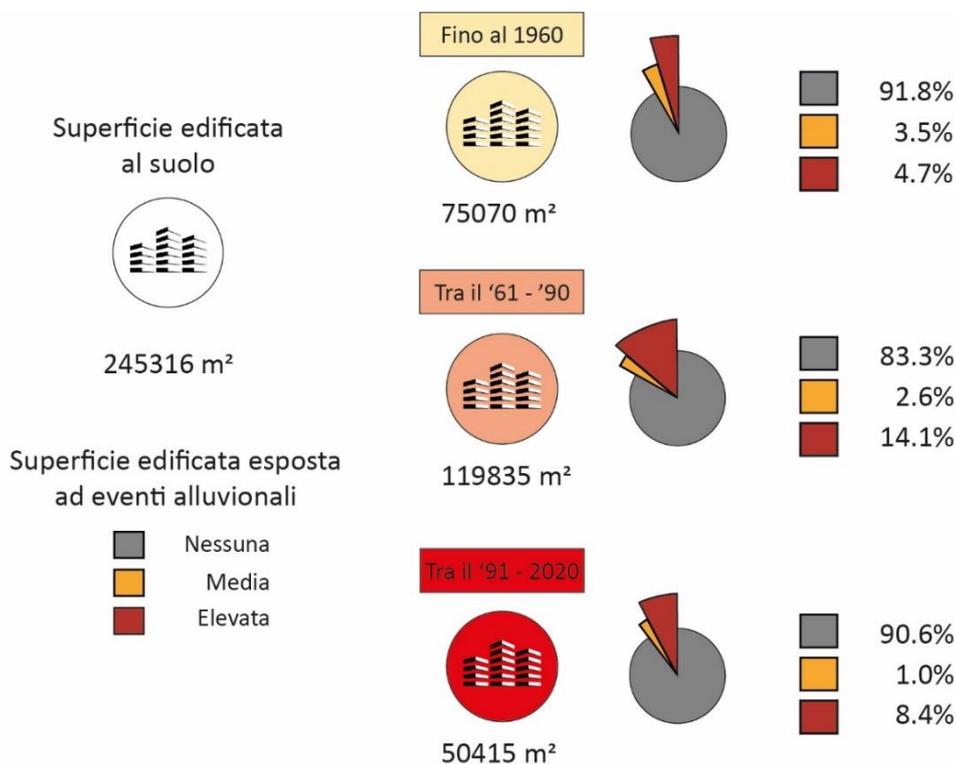


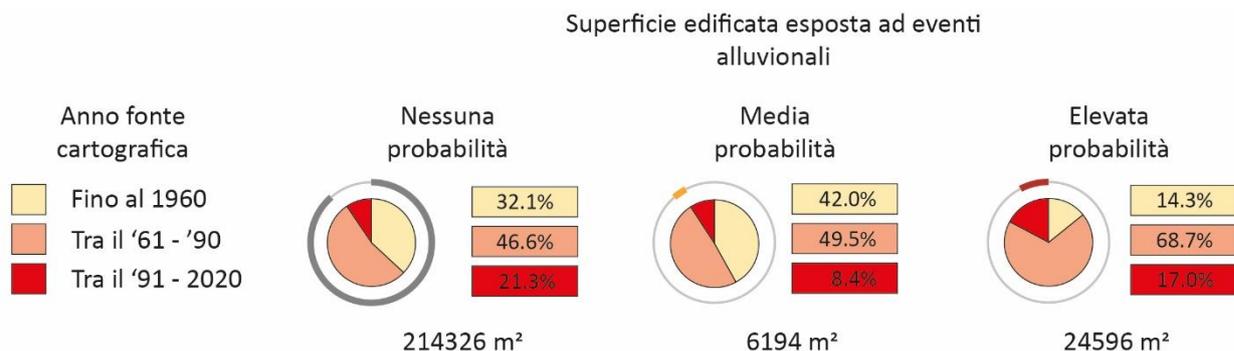
Fig. 34 Grafici riassuntivi delle superfici edificate esposte ad eventi alluvionali per i periodi temporali considerati.

Nel grafico in Fig. 34 le superfici edificate sono state divise in base al periodo di comparsa nelle fonti cartografiche e ne è presentata la percentuale di probabilità di essere esposte ad un evento alluvionale (nessuna, media, elevata).



Fig. 35 Grafico riassuntivo sulle superfici edificate esposte alle diverse classi di probabilità di evento alluvionale rispetto al totale

Il grafico in Fig. 35 esplica quale siano le percentuali di superficie edificata al suolo esposte a pericolosità alluvionale rispetto al totale per il comune di Limone Piemonte, si evince come il 2.5% della superficie edificata sia esposta ad una probabilità alluvionale media mentre il 10% è esposto ad un'elevata probabilità.



*Fig. 36 Grafico che esprime i periodi di sviluppo di superficie edificata per ogni classe di esposizione ad un evento alluvionale*

Il grafico in Fig. 36 evidenzia per ogni classe di pericolosità (nessuna probabilità, media probabilità, elevata probabilità) le percentuali di superficie al suolo occupate per i temporali considerati. Si noti come le zone di media probabilità, rappresentanti il 2.5% di tutta la superficie edificata al suolo, siano state realizzate per oltre il 58% dopo il '61.

Le superfici edificate esposte ad un'elevata probabilità risultano essere il 10% del totale, anche di queste oltre l'85% è stato occupato dopo il '61.

Le elaborazioni effettuate in ambiente GIS consentono di chiarire come gli standard di valutazione della pericolosità e del rischio avessero sostanzialmente preannunciato la probabilità che tale edificato potesse essere coinvolto in un evento alluvionale.

### 3.3 Elaborazione dei dati satellitari

#### 3.3.1 Acquisizione ed elaborazione del dato satellitare

L'immagine satellitare utilizzata in questa tesi è stata acquisita dal satellite GeoEye-1 con un angolo di inclinazione di  $23.3^\circ$  rispetto al nadir, composta da 4 bande spettrali, 3 nel visibile (Rosso, Verde, Blu) ed una nell'infrarosso, ricampionata con un GSD di 0.5 metri. Tale acquisizione è stata effettuata il 5 Ottobre 2020 alle 10:27 UTC, 3 giorni dopo l'evento alluvionale, in quanto si sono verificate migliori condizioni atmosferiche (minima copertura nuvolosa dell'area interessata) e il passaggio del satellite sopra l'area di interesse. Il dato satellitare ricevuto è un prodotto di secondo livello, quindi già corretto radiometricamente: necessita però di un'ulteriore correzione geometrica, l'ortoproiezione, per essere utilizzato come dato di studio.

Per portare avanti questa operazione come modello di terreno è stato utilizzato un dato pubblicato dalla Regione Piemonte riferito al 2011 che è caratterizzato da una risoluzione geometrica di 5 m e da una precisione altimetrica che varia da 0.3 m a 0.6 m in base alle caratteristiche del territorio (zone pianeggianti e regolari hanno una migliore accuratezza). Per quanto riguarda i punti di controllo questi sono stati acquisiti durante una campagna di rilievo e sono stati acquisiti attraverso un approccio NRTK (*Network real time kinematic*) tramite ricevitori GNSS connessi con la rete nazionale di stazioni GNSS. L'ortoproiezione dell'immagine è possibile tramite software ArcGIS Pro tramite metodo generalizzato (Rational Polynomial Coefficients) (Boccardo, Borgogno Mondino, & Giulio Tonolo, 2005).

Il processo all'interno del software prevede l'identificazione di una serie di punti di controllo a terra sul set di dati raster, in questo caso sono stati utilizzati posizioni facilmente identificabili come incroci di strade o elementi naturali chiaramente riconoscibili delle quali si conoscono con precisione le coordinate spaziali di riferimento.

Per tale operazione sono stati utilizzati 3 GCP e 3 punti CP (*Control Points*), per la verifica della precisione del risultato.

Il numero di punti di controllo che bisogna identificare dipende dalla morfologia del territorio. Tuttavia, l'aggiunta di più GCP non produrrà necessariamente una migliore accuratezza di posizionamento.

Il risultato ottenuto è un prodotto ortoproiettato che possiede un'accuratezza di posizionamento planimetrica adatta agli scopi prefissati (stimata pari a 1 m attraverso i punti di controllo), ovvero l'identificazione di aree eventualmente coinvolte in contesto emergenziale.

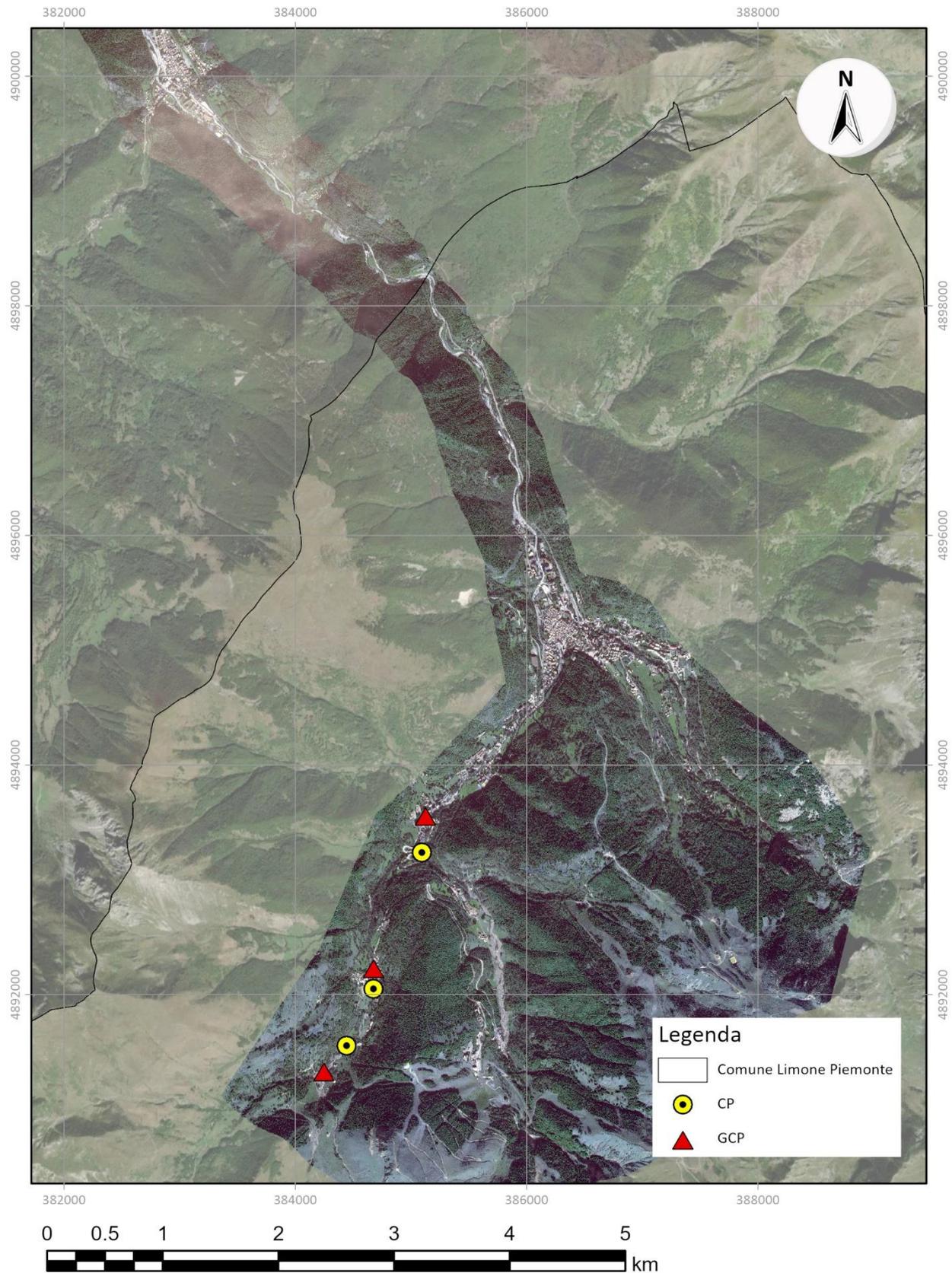


Fig. 37 Posizionamento dei punti di controllo e di verifica per il processo di correzione geometrica

### 3.3.2 Classificazione dell'immagine satellitare

Le tecniche di classificazione delle immagini possono essere utilizzate sia per creare mappe tematiche sia per identificare zone colpite ed edificato coinvolti in un'emergenza alluvionale.

L'acquisizione satellitare, è stata elaborata tramite il software ArcGIS Pro con una classificazione *object-based* con metodologia *supervised*; in mancanza di un'acquisizione satellitare precedente all'evento con simili risoluzioni geometriche e spettrali non è possibile svolgere un confronto multi-temporale attraverso algoritmi di *change detection*. In alcune aree di estensione limitata sarà presentata un'analisi quantitativa dei danni basata su processo di fotointerpretazione.

Il processo di estrazione delle informazioni a valore aggiunto è il risultato di tre operazioni principali: segmentazione dell'immagine, derivazione di informazioni analitiche sui cluster e classificazione. L'output di ogni operazione è l'input per le operazioni successive, in cui l'obiettivo è produrre una mappa che rappresenti le classi tematiche del territorio.

La segmentazione è un'operazione automatica iterativa, eseguita dal software, che raggruppa pixel adiacenti che possiedono determinate caratteristiche che dipendono da 3 parametri: dettaglio spettrale, dettaglio spaziale e dimensione minima del segmento. È possibile variare i valori di questi dettagli in base a quale sia la caratteristica di interesse ottenendo così risultati più o meno uniformi e dettagliati (desktop.arcgis.com, 2020).

La seconda operazione consiste nell'identificare ed assegnare ad alcuni gruppi di pixel dell'immagine una classe di appartenenza rappresentante una specifica classe tematica del territorio (zone urbanizzate, foreste, campi coltivati, corsi d'acqua, suolo nudo, ecc...). Questi gruppi di pixel vengono definiti *training samples* e sono utilizzati per l'addestramento degli algoritmi.

I campioni raccolti vengono analizzati attraverso diverse categorie di algoritmi, per questa tesi è stato scelto l'algoritmo di machine-learning "*random trees*" che "si basa sulla costruzione di un numero definito di alberi decisionali addestrati utilizzando piccole variazioni degli stessi dati di addestramento ed espone come risultato della classificazione l'albero decisionale più votato" (desktop.arcgis.com, 2020).

In questo processo è fondamentale la scelta dei campioni di addestramento in quanto questi devono contenere solo i pixel che appartengono ad un determinato tematismo, contenere un numero significativo di pixel ed essere distribuiti equamente su tutta l'area acquisita.

Durante la fase di selezione dei campioni sono state create varie classi anche dedicate alle regioni in ombra ("costruito in ombra", "prato in ombra", "dissesti in ombra", ecc): questa distinzione è fondamentale in quanto, per i sensori ottici, le superfici in ombra riflettono meno energia e presentano quindi firme spettrali differenti dalle stesse aree illuminate.

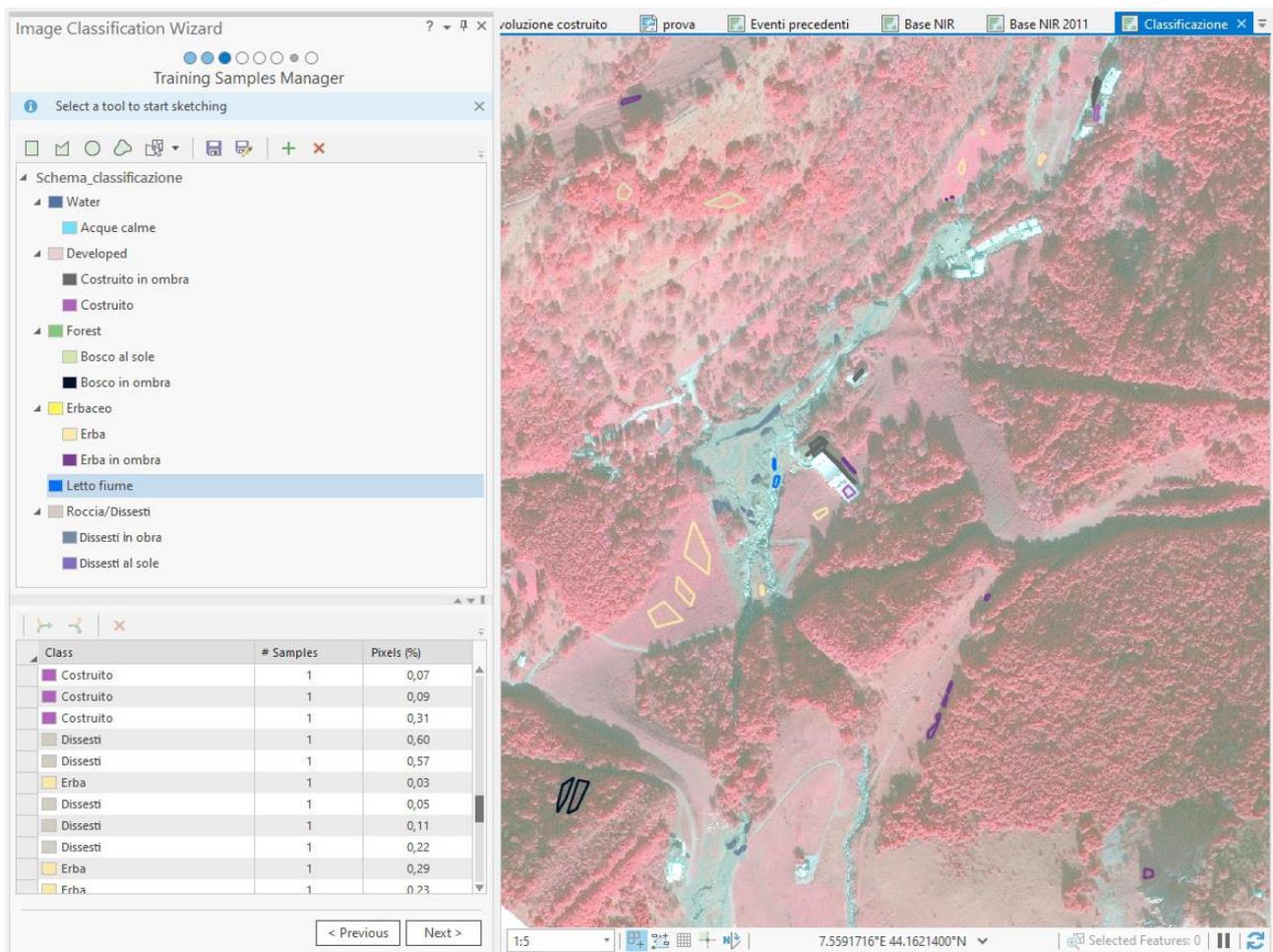
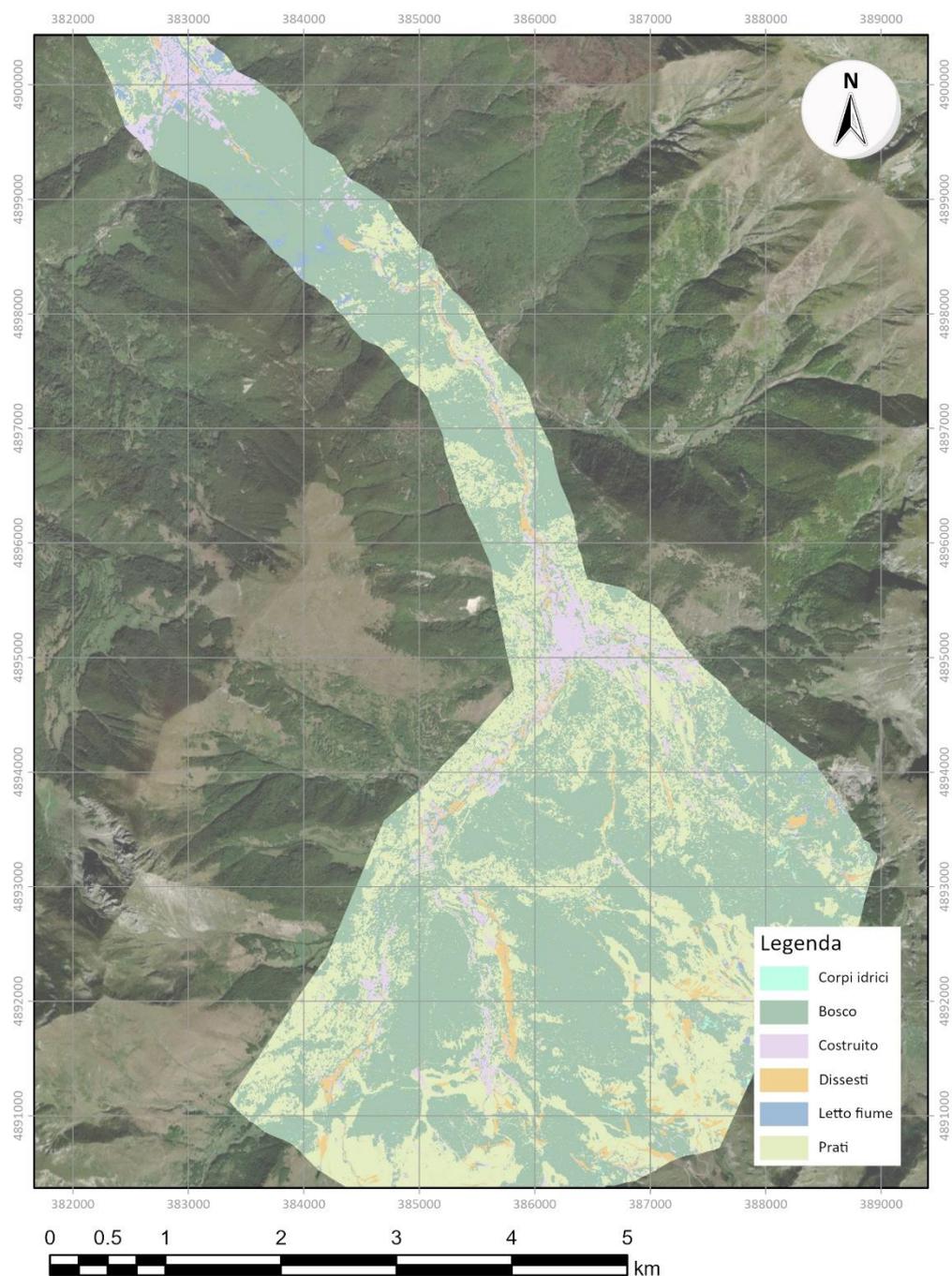


Fig. 38 Esempi di raccolta dei campioni di addestramento all'interno del software ArcGIS Pro

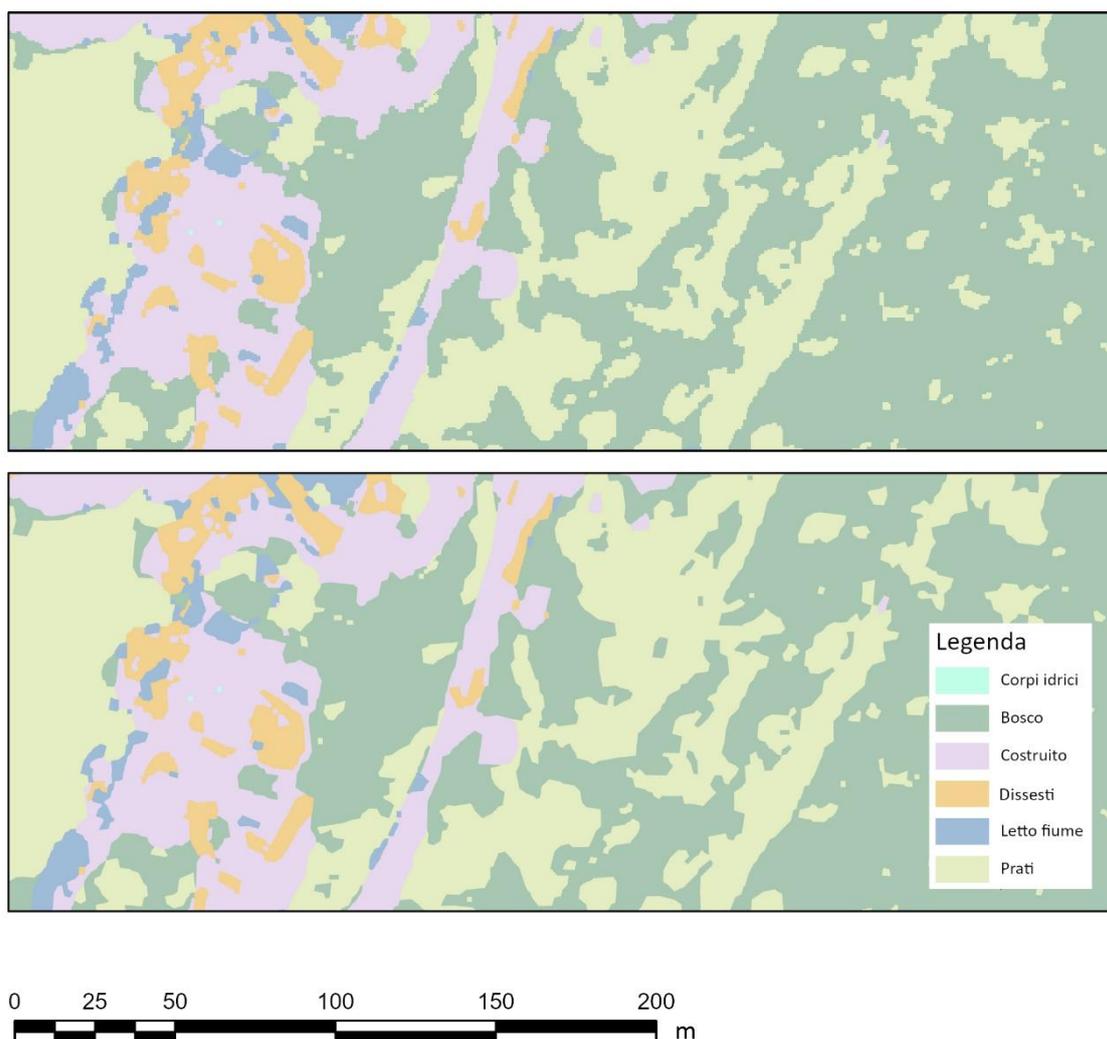
Il dato satellitare, durante la classificazione, è stato visualizzato in falsi colori (Red=Infrarosso, Green=blu; Blue=verde) in modo da esaltare la vegetazione (vedi cap. 1.2.3 Curve di riflettanza spettrale): ciò rende il processo di interpretazione e riconoscimento dei campioni più agevole (Fig. 38).

Nell'ultima operazione, la classificazione vera e propria, tutti pixel dell'immagine saranno assegnati automaticamente alle classi scelte. È possibile controllare il risultato preliminare, unire più classi che rappresentino un'unica entità (la stessa tipologia di superficie in ombra e non) e applicare manualmente modifiche al risultato.



*Fig. 39 Risultato della classificazione automatica dell'immagine satellitare, scala 1:50000*

Il risultato della classificazione può essere ulteriormente perfezionato: sia refinendolo, tramite processi per regolarizzare i bordi irregolari dei confini delle classi (essendo la classificazione basata su un dato raster) e aumentarne la coerenza; sia filtrandolo, attraverso strumenti che riconvertono regioni isolate costituite da pochi (o singoli) pixel assegnandole al tematismo spazialmente adiacente. In relazione ai dettagli spettrali e spaziali dell'immagine, è stato scelto come dimensione minima delle regioni da riconvertire 9 pixel, corrispondente a 2.25 m<sup>2</sup>, buon compromesso tra la riduzione del rumore e la raccolta di informazioni significative all'identificazione di eventuali danni al territorio.



*Fig. 40 Confronto tra risultato il grezzo della classificazione automatica (in alto) ed il risultato finale perfezionato (in basso)*

Rispetto ad una normale fotointerpretazione questa tecnica “semi-automatica” permette di velocizzare tale stima evidenziando le zone colpite con una buona precisione. È importante sottolineare i vantaggi che offre la commistione tra il dato satellitare, acquisito tramite sensori multispettrali, e le tecniche di classificazione delle immagini, è possibile analizzare così un’estesa area soggetta ad un evento alluvionale ed identificare zone ed edifici coinvolti in tali eventi. Possedere dati iperspettrali risulterebbe più efficace per la differenziazione dei campioni ma non per la risoluzione spaziale, che diminuisce per motivi intrinseci alle tecnologie dei sensori (vedi cap. 1.5.2 Tipologia dei sensori).

Gli svantaggi di questa tecnica risiedono soprattutto nella classificazione di zone in ombra, queste vengono spesso erroneamente classificate per zone edificate ed è per questo che sono stati raccolti come campioni separati per ogni classe, e di tematismi caratterizzati da firme spettrali simili: come in alcuni casi le coperture degli edifici e tratti di manto stradale.

### 3.4 Definizione ed analisi delle aree di interesse

Le precedenti analisi ed elaborazioni dei dati satellitari hanno l'obiettivo di identificare le aree maggiormente colpite nell'evento alluvionale: di queste ne sono state prese in considerazione due ritenute significative per la valutazione dei danni al territorio.

Queste aree sono state scelte per valutare la correttezza del risultato di alcuni dei tematismi tramite il confronto con la fotointerpretazione.

I tematismi più significativi da valutare per gli obiettivi di questa tesi sono gli edifici, inquadrati nel tematismo "Edificato", e le zone colpite dall'evento alluvionale raccolte nel tematismo "Dissesti".

Le aree scelte sono la zona degli impianti sciistici della frazione di Limonetto ed un'area della frazione di Tetti Mecci, mostrate in Fig. 41.

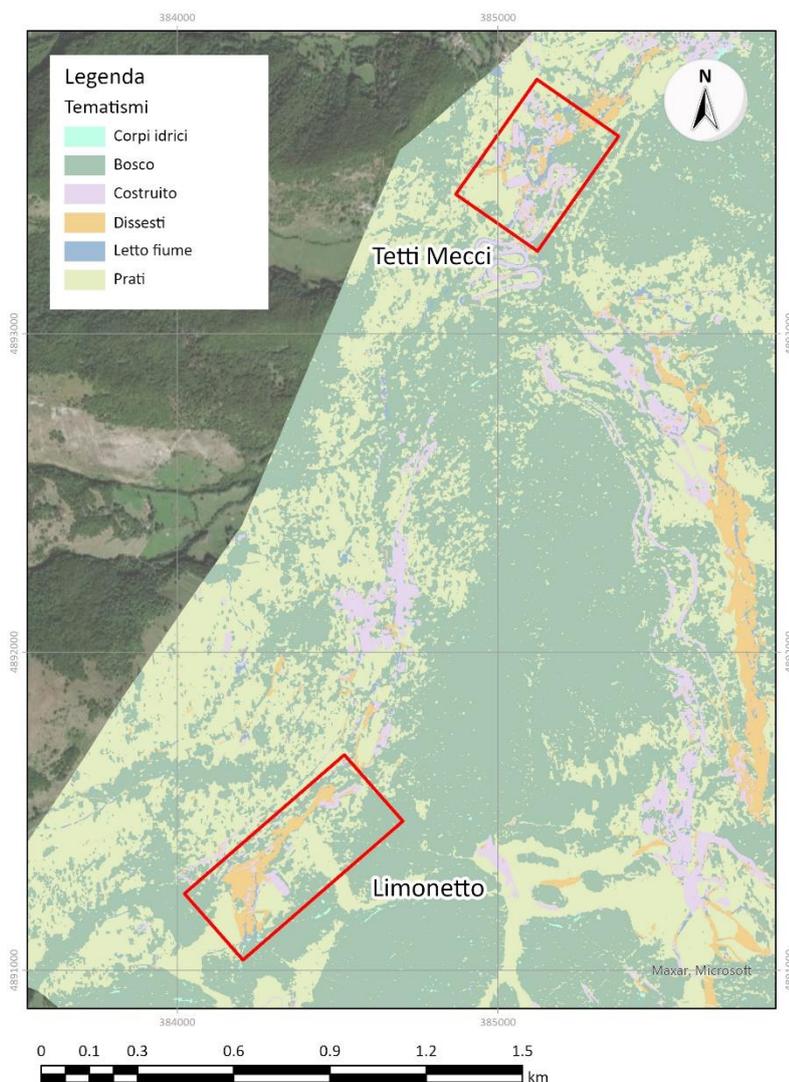


Fig. 41 Aree di interesse per la valutazione del risultato della classificazione automatica

### 3.4.1 Analisi risultati della classificazione automatica sulle aree di interesse

La fotointerpretazione consiste nell'interpretazione visiva ed eventuale digitalizzazione dei tematismi presenti al suolo, la cui accuratezza tematica è in funzione dell'esperienza dell'operatore: vengono generalmente considerati dati di "Ground truth" in quanto la fotointerpretazione consente di raggiungere accuratezze tematiche elevate. Verranno presentati i risultati prima per l'area di interesse degli impianti sciistici di Limonetto e poi per la zona di Tetti Mecci.

Operativamente, sono state digitalizzate sull'acquisizione satellitare ortoproiettata le superfici riconosciute come danneggiate e quelle relative agli edifici: queste ultime verranno poi confrontate quantitativamente con il risultato della classificazione automatica.

Il tematismo "letto fiume" rappresenta le superfici con presenza di attività torrentizia inusuale, è stato poi raccolto nel tematismo "Dissesti" così da identificare la superficie di territorio coinvolta nell'alluvione.

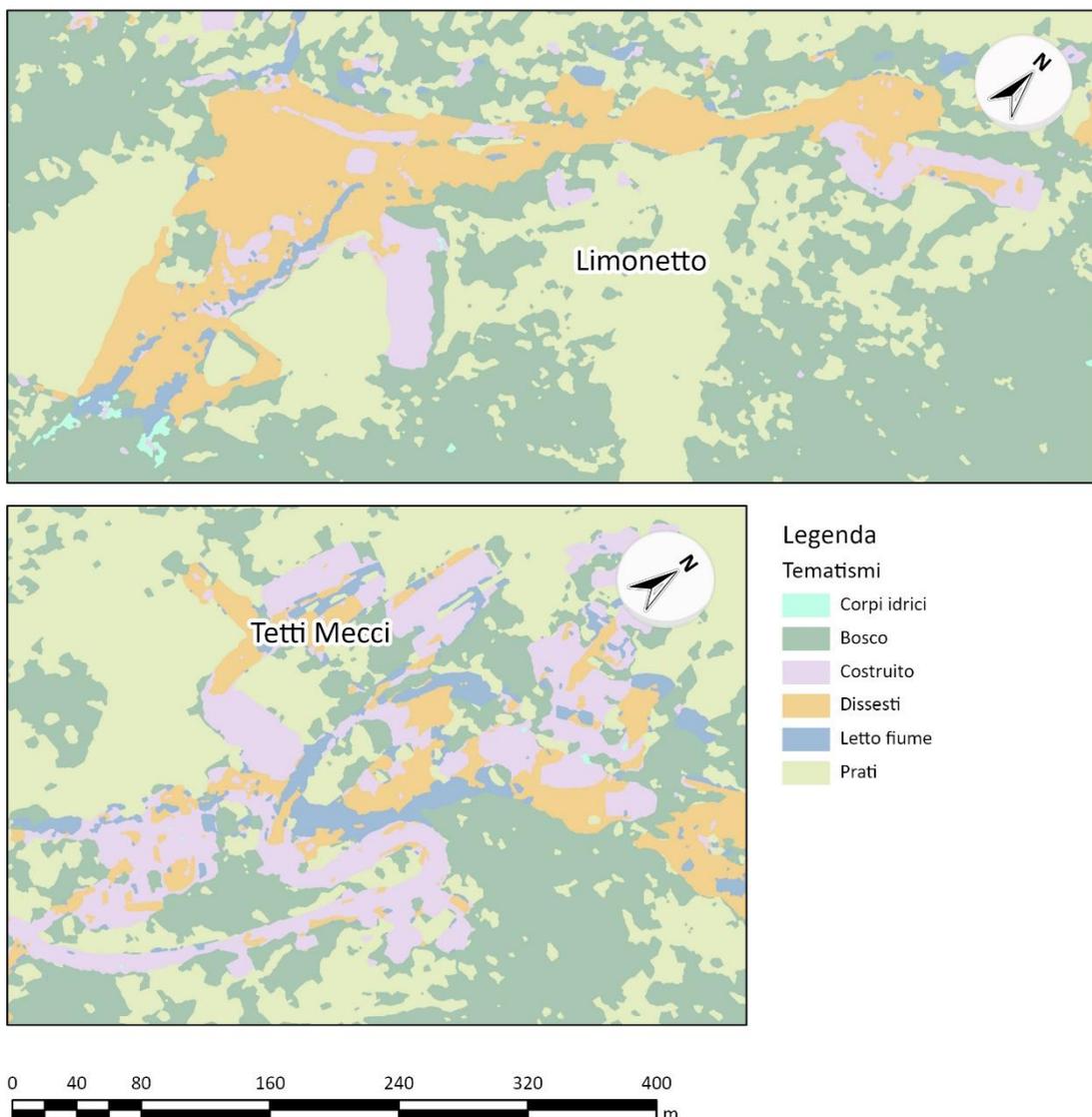


Fig. 42 Aree di interesse: impianti sciistici di Limonetto (sopra); Tetti Mecci (sotto)

## Analisi risultati su zona impianti a Limonetto

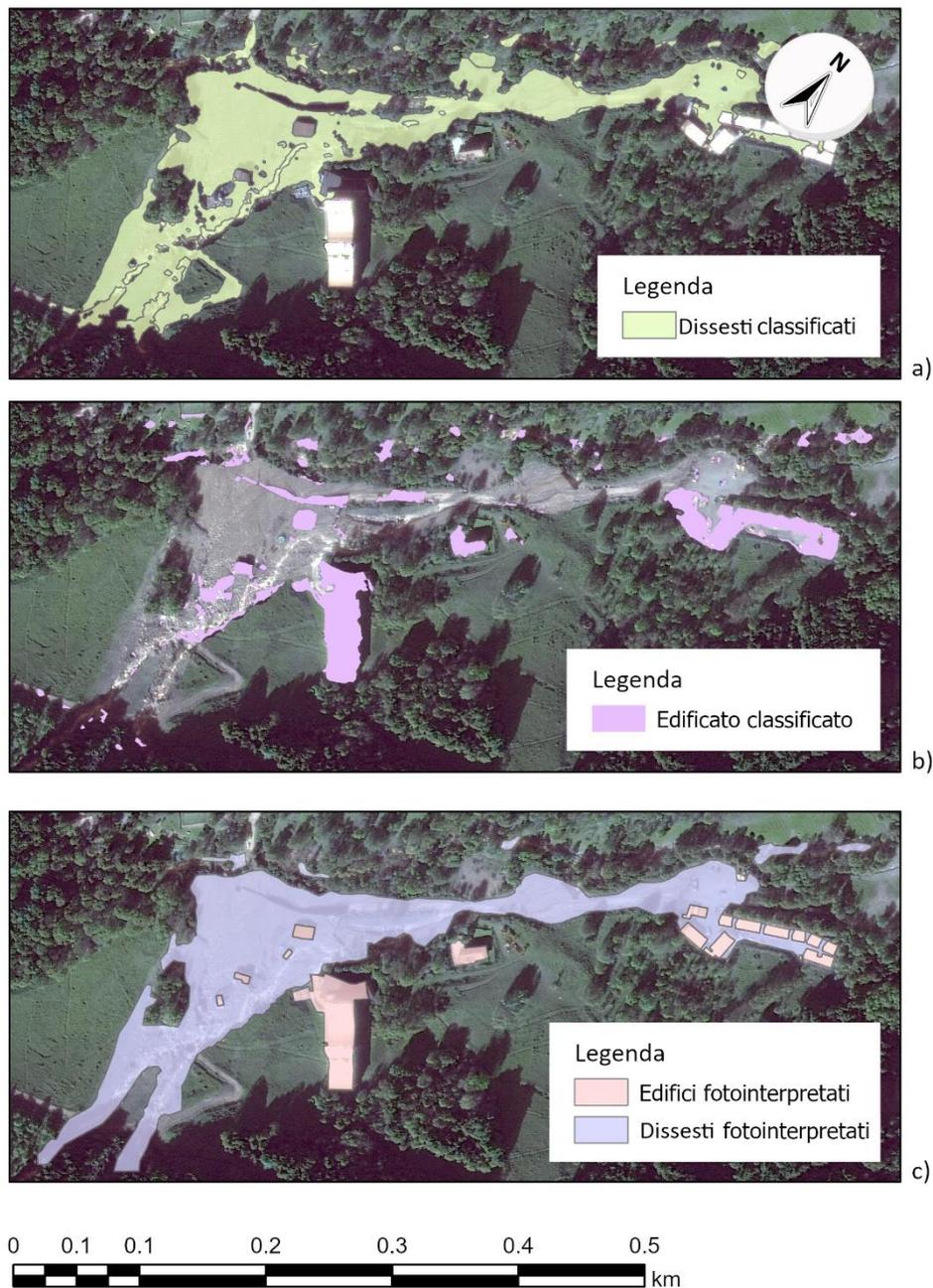


Fig. 43 Risultati della classificazione e della fotointerpretazione per l'area di Limonetto

I risultati della classificazione (Fig. 43 a, b) sono stati confrontati quantitativamente con i risultati della fotointerpretazione (Fig. 43 tramite software ArcGIS Pro. Per individuare le superfici classificate correttamente è stata eseguita un'intersezione geometrica (strumento: "intersection") tra i risultati di fotointerpretazione e classificazione per entrambi i tematismi di interesse; le superfici classificate non correttamente ed i falsi positivi sono stati ricavati per sottrazione (Fig. 44).



Fig. 44 Analisi quantitativa dei risultati della classificazione per i tematismi di interesse (Limonetto)

Per quanto riguarda il tematismo “Disesti” (Fig. 45) si riscontra una corrispondenza dell’81,5%, questo valore fa supporre la buona riuscita del risultato sebbene tali superfici siano state leggermente sovrastimate: i “falsi positivi” sono il 20,1% del totale delle superfici riconosciute dalla classificazione. La ragione di questi errori risiede nella simile risposta radiometrica che hanno porzioni di terreno, superficie stradale e superfici erose.

Per quanto concerne il tematismo “Edificato” (Fig. 45) il risultato ottenuto è meno soddisfacente: sebbene la corrispondenza si attesti all’89,8% i falsi positivi risultano essere il 45,4% del totale delle superfici riconosciute nella classificazione, questo accade soprattutto per le zone in ombra e per il manto stradale poiché hanno una risposta radiometrica simile.

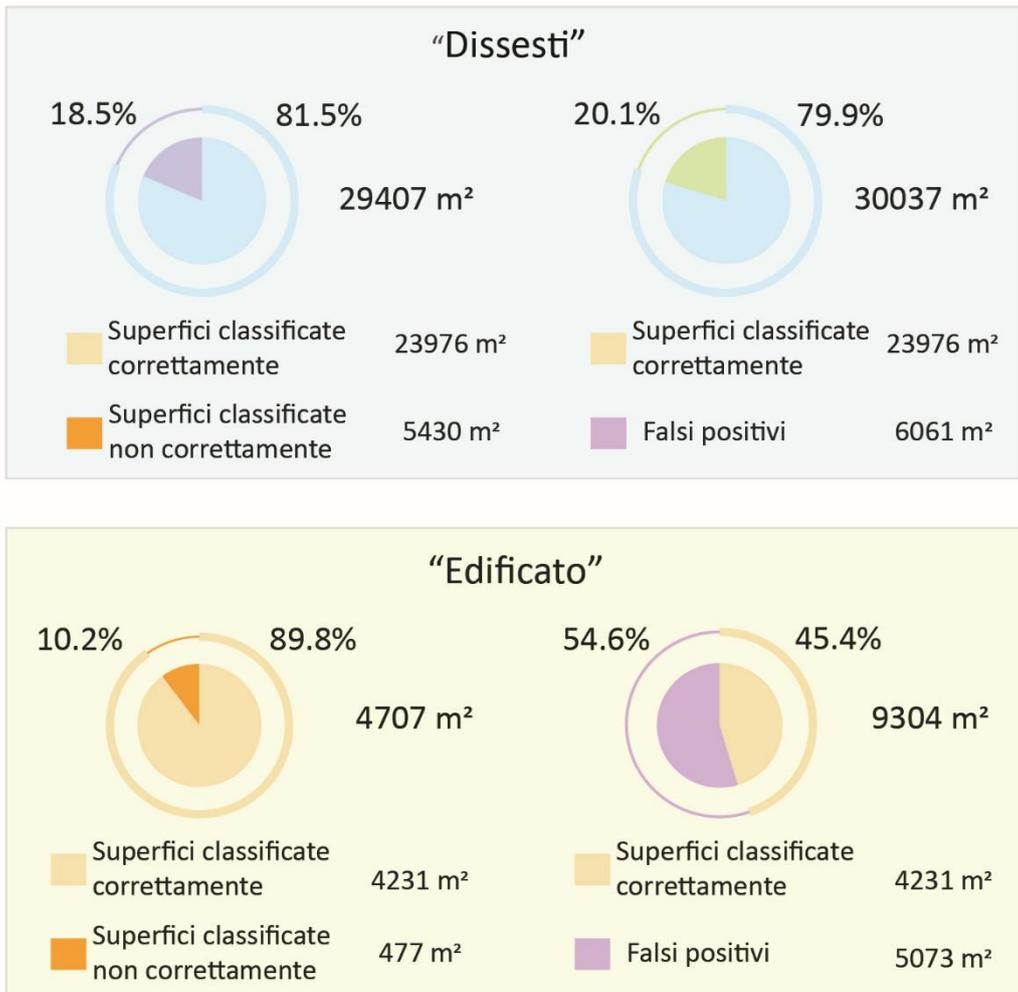


Fig. 45 Grafici dell'analisi dei risultati per i tematismi nell'area di Limonetto

## Analisi risultati su zona Tetti Mecci

Anche per la seconda area di interesse sono state effettuate le stesse analisi dei risultati illustrate precedentemente (Fig. 46, Fig. 47).

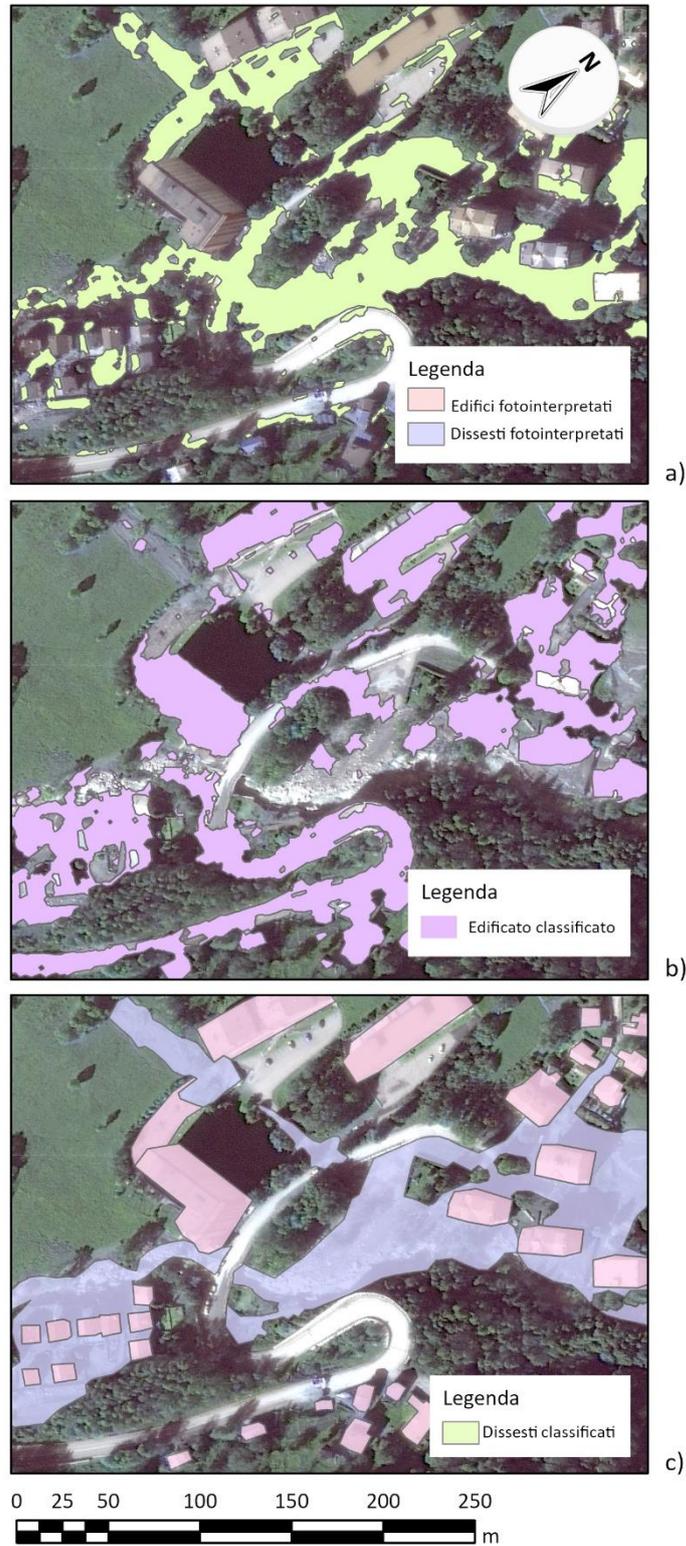


Fig. 46 Risultato della classificazione e fotointerpretazione per l'area di Tetti Mecci

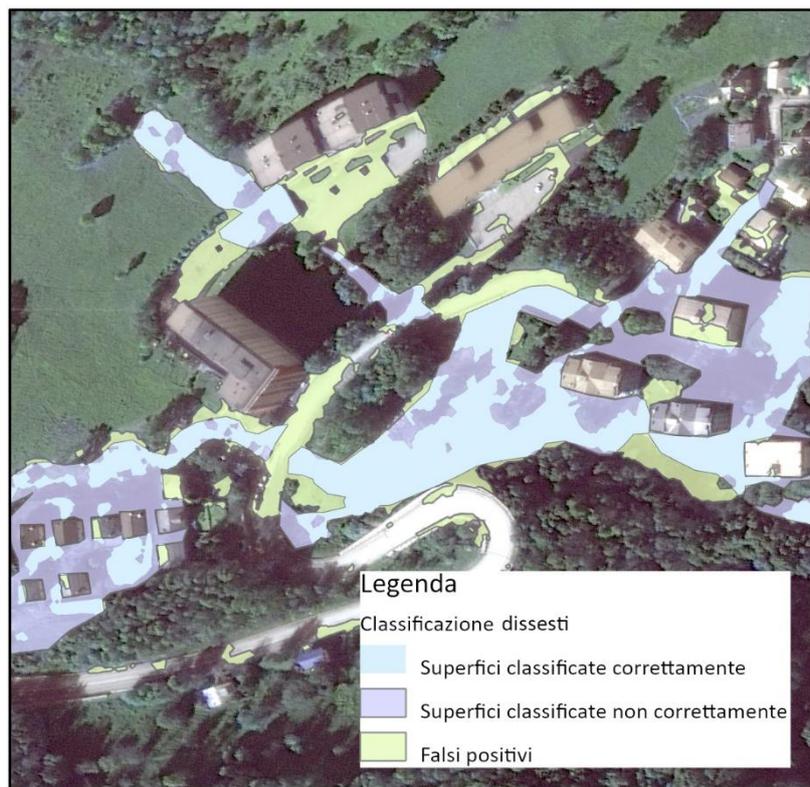
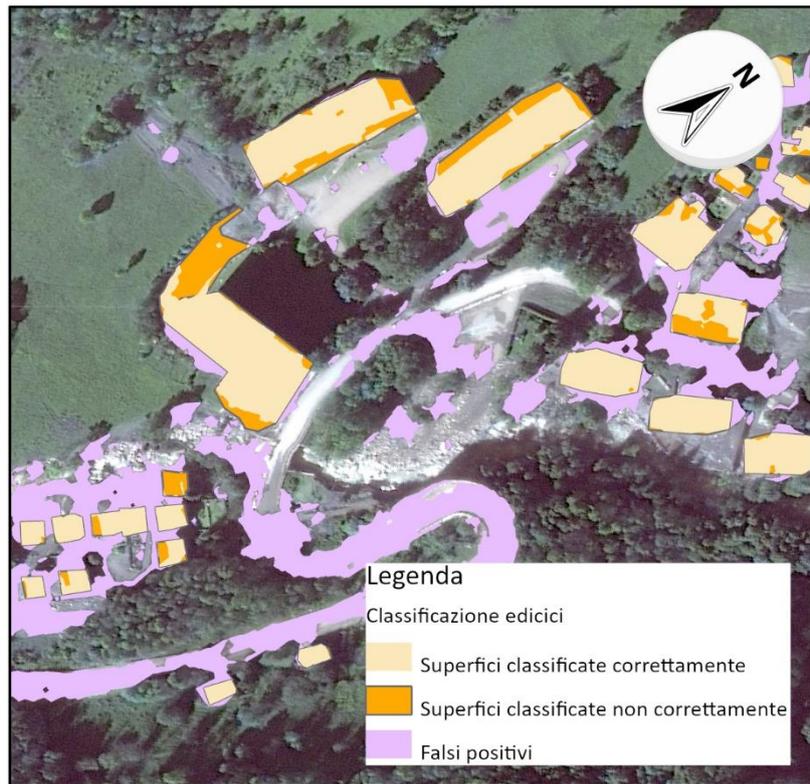


Fig. 47 Analisi quantitativa dei risultati della classificazione per i tematismi di interesse (Tetti Mecci)

Le superfici identificate nella classificazione come “Dissesti” risultano corrette al 60.2% (Fig. 48), i falsi positivi (39.8%) sono spesso dovuti alla simile risposta radiometrica che hanno porzioni di terreno, superficie stradale e superfici erose.

L’abbondanza di falsi positivi per il tematismo “Edificato” (61.9%) è dovuta alle proprietà delle superfici presenti: le coperture degli edifici, il manto stradale e zone in ombra spesso possiedono simili risposte radiometriche e vengono associati a questo tematismo.

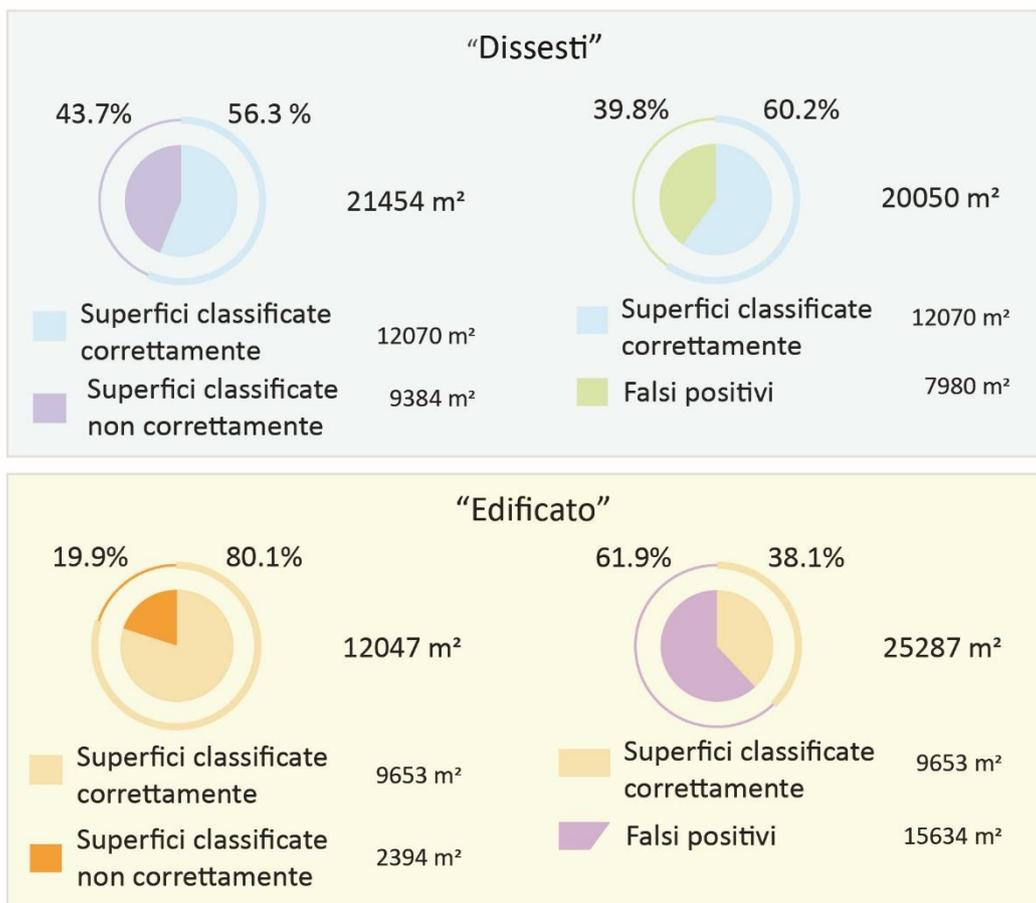


Fig. 48 Grafici dell’analisi dei risultati per i tematismi nell’area di Tetti Mecci

È importante sottolineare che sebbene questi dati provenienti da acquisizioni satellitari abbiano un’ottima risoluzione geometrica è possibile incorrere in errori di interpretazione che possono pregiudicare in parte la correttezza del risultato. Inoltre queste immagini nadirali possono essere sfruttate solo per delimitare in planimetria le aree colpite da un evento alluvionale, per ottenere dati in elevazione e con una risoluzione nell’ordine di centimetri è necessario un processo fotogrammetrico tramite l’impiego di droni.

In futuro si potranno testare algoritmi di classificazione Deep Learning da poco disponibili per l’estrazione degli edifici da immagini satellitari ad altissima risoluzione.

### 3.5 Elaborazione dati da drone

#### 3.5.1 Acquisizione dati tramite drone

L'acquisizione di dati tramite drone, eseguita dal TEAM DiRECT, è stata pianificata per mappare il centro abitato di Limone Piemonte e l'intorno delle aste fluviali ed è stata completata in più momenti: ho avuto occasione di partecipare ad una campagna di rilievo svoltasi nella giornata del 21 Giugno 2021 sulle zone di Tetti Mecci e Limonetto.

È importante riportare il fatto che il rilievo fotogrammetrico presentato in questa tesi si riferisce allo stato dei luoghi mesi dopo l'evento, sebbene sarebbe stato più interessante effettuare delle acquisizioni a ridosso dell'evento (come il dato satellitare utilizzato). È possibile comunque dimostrare l'utilità di possedere tali dati per l'identificazione dei danni occorsi al territorio ed all'edificato.

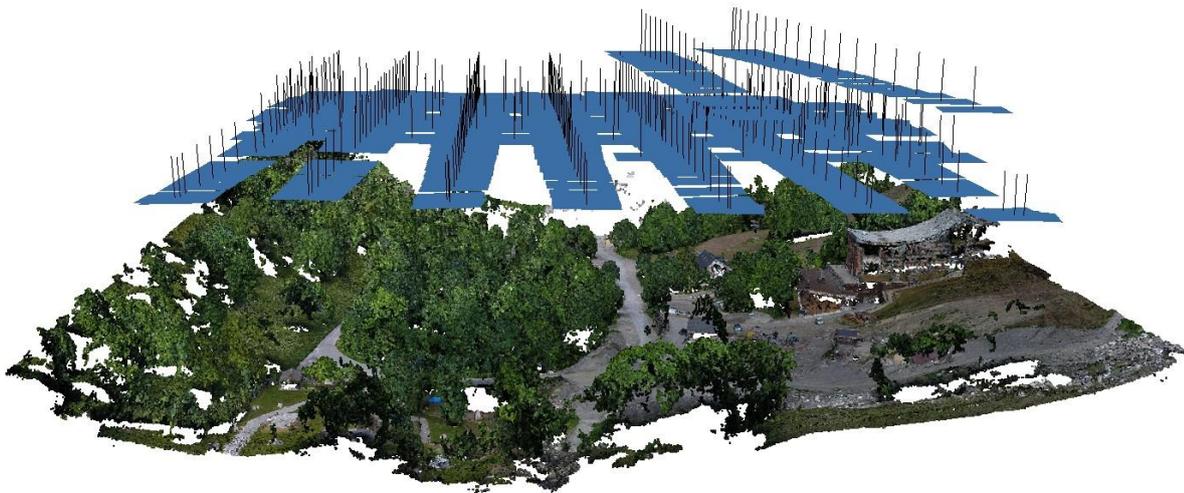
La campagna si è svolta con una fase di posizionamento e rilievo topografico dei target (pannelli quadrati di lato 0.40 m) tramite l'utilizzo di un solo ricevitore dotato di sensori GNSS (vedi cap 1.1.2 Rilievo cinematico in tempo reale (RTK)), la loro posizione viene calcolata in tempo reale grazie alla tecnologia NRTK e alla disponibilità di un servizio di stazione virtuali che consentono di ottenere una precisione centimetrica in tempo reale di tali misurazioni (attraverso l'utilizzo di opportune correzioni differenziali). Successivamente è stata eseguita l'acquisizione di immagini per il processo fotogrammetrico tramite drone quadricottero dotato anch'esso della stessa tecnologia.



Fig. 49 Fasi del rilievo dei GCP

La seguente descrizione delle operazioni di acquisizione si riferisce al blocco fotogrammetrico rilevato nella zona degli impianti sciistici di Limontetto.

I voli, pianificati tramite software specifici o manualmente, sono stati eseguiti ad una quota di circa 100 metri rispetto al punto di decollo per evitare ostacoli e in funzione dell'altimetria del terreno: sono stati programmati per avere una sovrapposizione tra i fotogrammi dell'85% ed un ricoprimento laterale dell'80%. La fotocamera trasportata dal drone è una camera digitale standard.



*Fig. 50 Nuvola sparsa di punti con la posizione dei centri di presa (Limonetto)*

Per l'area di interesse di Tetti Mecci è stato eseguito un approccio di georeferenziazione diretta sfruttando un drone con tecnologia RTK e quindi senza utilizzare punti di controllo e punti di verifica. L'acquisizione è stata eseguita ad una quota di circa 150 m, per evitare dei fabbricati molto sviluppati in elevazione, ed è stata pianificata per avere una sovrapposizione dei fotogrammi dell'85% ed un ricoprimento laterale dell'80%.

Terminata la fase di acquisizione è possibile scaricare i dati raccolti dal drone per poter eseguire il processamento delle immagini tramite software ed ottenere prodotti georeferenziati come nuvole dense di punti (Fig. 52, Fig. 53), modelli di superficie (Fig. 54, Fig. 56) e ortofoto (Fig. 59, Fig. 61).

### 3.5.2 Processamento dei dati raccolti tramite drone

Le immagini raccolte tramite drone sono state processate, tramite il software Agisoft Metashape Professional, seguendo il processo fotogrammetrico standard. Come prima operazione il software allinea le immagini stimando i centri di presa e l'orientamento del sensore e contemporaneamente genera una nuvola di punti sparsa attraverso l'orientamento esterno relativo basato su ricerca automatica di punti omologhi tra le immagini. Al termine di questa fase iniziale è possibile controllare l'allineamento e rimuovere le immagini che possono indurre errori, come immagini sfocate o che rappresentano solo aree con tessitura tale da rendere gli algoritmi di autocorrelazione poco efficaci (ad esempio aree vegetate).

In seguito vanno inseriti all'interno del software le coordinate dei punti di appoggio necessari per l'orientamento esterno assoluto e dei punti di controllo (CP) per la verifica della precisione: una volta specificate le coordinate questi appaiono sulla nuvola sparsa e vanno poi collimati in corrispondenza del centro del marker in ogni immagine dove compaiono. I punti rilevati hanno un'accuratezza nell'ordine di 0.05 metri o inferiore, consentendo così di ricostruire la geometria dell'oggetto di studio con precisione centimetrica e con un livello di dettaglio elevato.

The screenshot displays the 'Reference' panel in Agisoft Metashape Professional. It contains two tables: 'Cameras' and 'Markers'. The 'Cameras' table lists 11 DJI cameras with their respective Easting, Northing, and Altitude coordinates, and an accuracy of 10.000000 m. The 'Markers' table lists 11 markers (m006 to m011) with their coordinates and accuracies ranging from 0.031000 m to 0.050000 m. A 'Total Error' section shows 'Control points' and 'Check points' with no errors listed. At the bottom, 'Scale Bars' are shown for Distance (m), Accuracy (m), and Error (m). The right side of the image shows a 3D point cloud view of a textured surface with a yellow marker labeled 'm008' placed on it.

Cameras	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)
DJI_0668	7.551519	44.164906	1480.212000	10.000000
DJI_0669	7.551720	44.165058	1480.212000	10.000000
DJI_0670	7.551934	44.165203	1480.212000	10.000000
DJI_0671	7.552153	44.165350	1480.212000	10.000000
DJI_0672	7.552371	44.165498	1480.112000	10.000000
DJI_0673	7.552584	44.165643	1480.112000	10.000000
DJI_0674	7.552803	44.165791	1480.112000	10.000000
DJI_0675	7.553020	44.165939	1480.212000	10.000000
DJI_0676	7.553236	44.166085	1480.112000	10.000000
DJI_0677	7.553452	44.166233	1480.112000	10.000000

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)
m006	384240.387689	4891452.899792	1348.328028	0.050000
m007	384147.707126	4891402.696388	1359.246766	0.049000
m008	384197.809000	4891256.046000	1367.898000	0.036000
m009	384247.230627	4891338.147017	1361.498582	0.031000
m010	384306.423860	4891387.539145	1349.280519	0.039000
m011	384443.345000	4891556.416000	1329.655000	0.034000

**Total Error**  
Control points  
Check points

Scale Bars: Distance (m), Accuracy (m), Error (m)

Fig. 51 Allineamento dei punti di appoggio e di controllo all'interno del software Agisoft Metashape Professional (area di Limonetto)

Una volta stimati l'orientamento esterno assoluto ed interno è possibile far eseguire al software la creazione della nuvola densa di punti dalla quale possono essere generati il modello di superficie (DSM) e successivamente l'ortofoto(mosaico) dell'area di studio.

È possibile notare nella nuvola densa aree con mancanza del dato dovute alla fitta vegetazione (dove gli algoritmi di autocorrelazione hanno minore efficacia) o nelle zone più esterne del modello a causa della ridotta copertura stereoscopica delle immagini.



*Fig. 52 Nuvola densa di punti dell'area di Limonetto*

I prodotti finali, modelli 3D e ortofoto, sono caratterizzati da una risoluzione geometrica di 0.03 m e valori di accuratezza di posizionamento 3D di circa 0.04 m.

Per l'area di interesse di Tetti Mecci sono stati ricavati gli stessi prodotti ma avendo utilizzato la georeferenziazione diretta non è stato necessario l'impiego di punti di controllo e di verifica (Fig. 53).



*Fig. 53 Nuvola densa di punti per l'area di Tetti Mecci*

### 3.6 Valutazione dei prodotti di acquisizioni satellitari e da drone

#### 3.6.1 Confronto fra modelli di elevazione prima e dopo l'evento

Per valutare i danni occorsi durante l'evento è possibile confrontare il modello di terreno pre evento, distribuito dalla Regione Piemonte, con i modello generato dal processo fotogrammetrico.

È necessario specificare che il dato della regione è un modello di terreno (DEM), quindi rappresenta solo l'elevazione del terreno, mentre il prodotto generato in fase di studio è un modello di superficie (DSM) e quindi descrive le informazioni altimetriche di tutte le superfici presenti sul territorio rilevato come la vegetazione e gli edifici (vedi cap. 1.7.1 Modelli di elevazione).

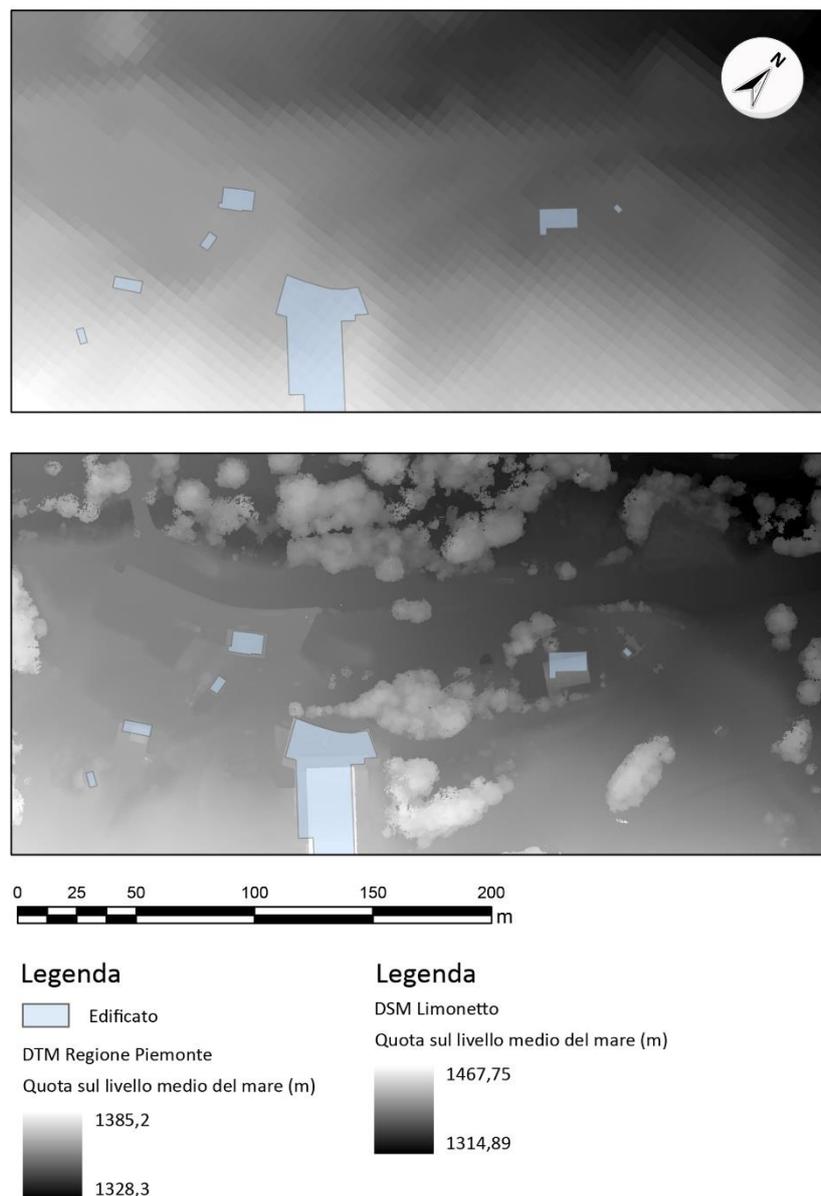


Fig. 54 Confronto tra DEM precedente all'evento (sx) ed il DSM post-evento (dx) per l'area di Limonetto

Nonostante la differente tipologia di dato altimetrico, è possibile analizzare le differenze di altimetria per identificare le aree che hanno subito danni durante l'evento alluvionale.

Il confronto altimetrico è stato eseguito in ambiente GIS tramite un'operazione di sottrazione tra i due dei modelli di elevazione: al DSM è stato sottratto il DEM, tale operazione comporta come risultato la presenza di valori positivi per gli edifici e la vegetazione e valori negativi per le superfici erose. Il modello (DSM) derivato dal processo fotogrammetrico ha una precisione centimetrica ( $<0.05$  m) mentre il modello della regione ha un'accuratezza di 0.60 m, questo valore è stato impostato come soglia per evitare di considerare come aree danneggiate quelle che rientrano in tale *range* di possibile errore. È importante evidenziare che la risoluzione spaziale del DEM è 5 m mentre quella del DSM è 0.08 m.

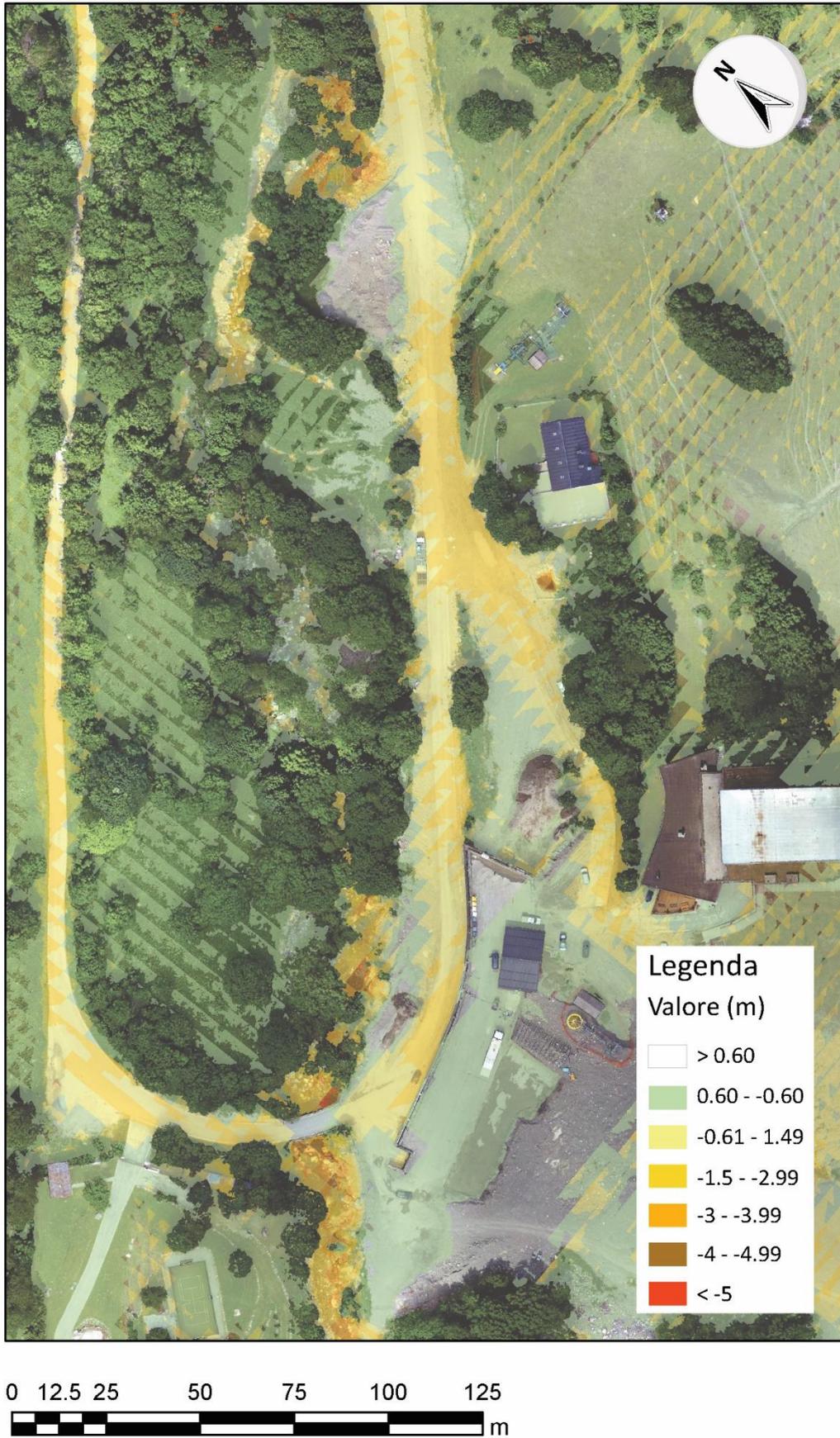


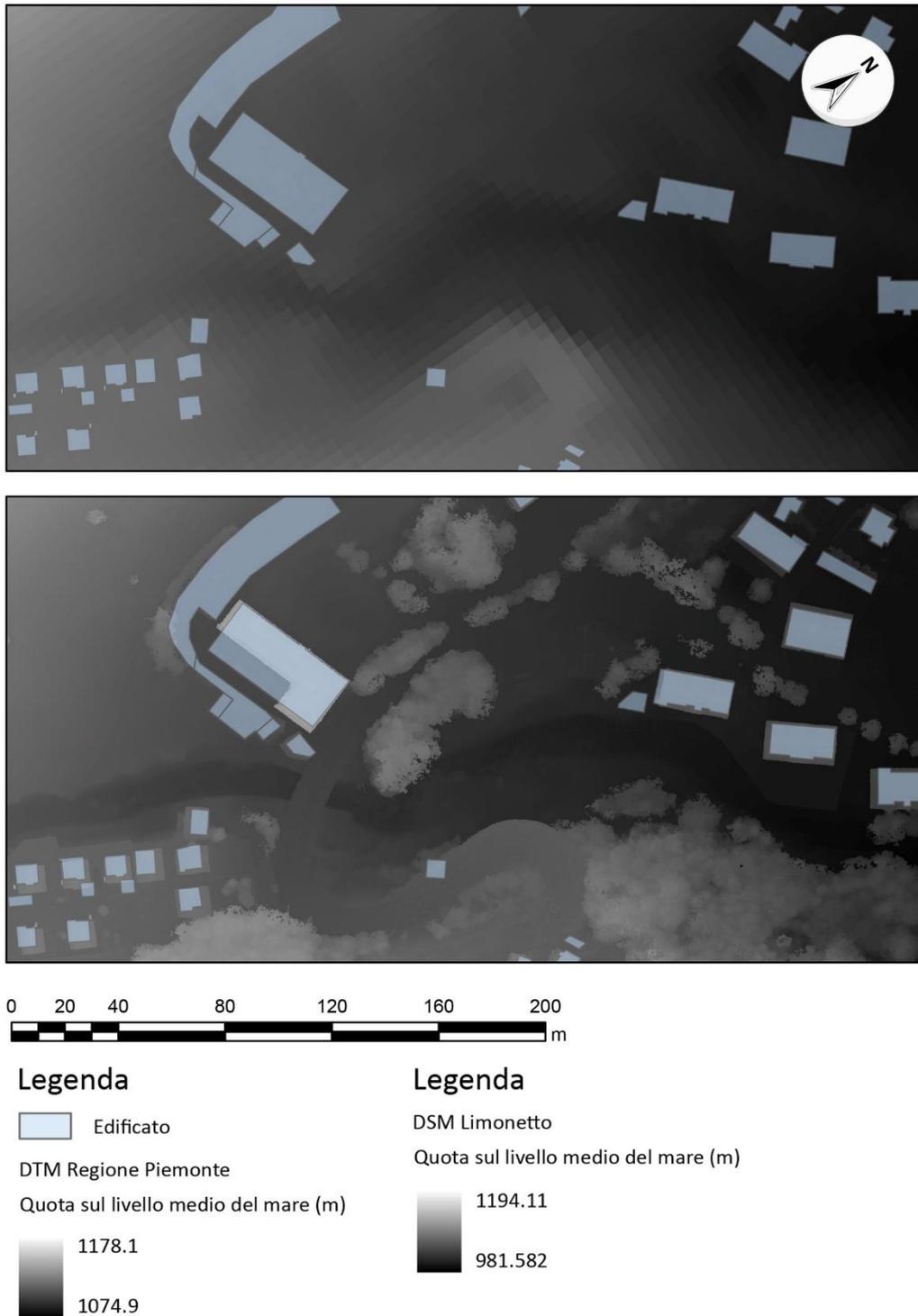
Fig. 55 Differenza altimetrica tra modelli di elevazione: Post evento – Pre evento (Limonetto)

Il risultato ottenuto è una mappa dove sono rappresentate in gradazioni dal giallo al rosso le superfici che risultano avere una quota altimetrica inferiore rispetto alle condizioni registrate prima dell'evento, parti del territorio dove si presume possano essersi verificati danni. Le superfici dove la differenza di questi due modelli risulta compresa tra -0.60 m e +0.60 m (in verde chiaro) non verranno considerate come zone danneggiate per evitare possibili errori dovuti all'accuratezza dei dati di partenza.

Nella mappa anche parte della superficie del tracciato stradale a nord-ovest del corpo idrico risulta nelle aree che hanno una quota altimetrica inferiore rispetto alla situazione prima dell'evento, questo è dovuto al mancato aggiornamento del dato della Regione Piemonte. I valori superiori a 0.6 m sono stati esclusi dalla rappresentazione in quanto rappresentano vegetazione, edifici non presenti nel DEM ed eventuali depositi di detriti.

Quest'analisi dimostra l'importanza di possedere dei dati antecedenti all'evento, con una simile risoluzione geometrica a quella di un rilievo tramite drone, per territori che già presentano fragilità e sono soggetti a rischio alluvionale noto. Ciò permetterebbe di quantificare in maniera più precisa e speditiva i danni subiti dal territorio e dall'edificato.

Per la seconda area di interesse è stato portato avanti lo stesso metodo di elaborazione e confronto di tali prodotti qui di seguito presentati.



*Fig. 56 Confronto tra DEM precedente all'evento (sx) ed il DSM post-evento (dx) per l'area di Tetti Mecci*

Il risultato (Fig. 57) evidenzia gli ingenti danni subiti dal territorio lungo il corpo idrico ma anche in alcune parti di edificato a ridosso di questo.

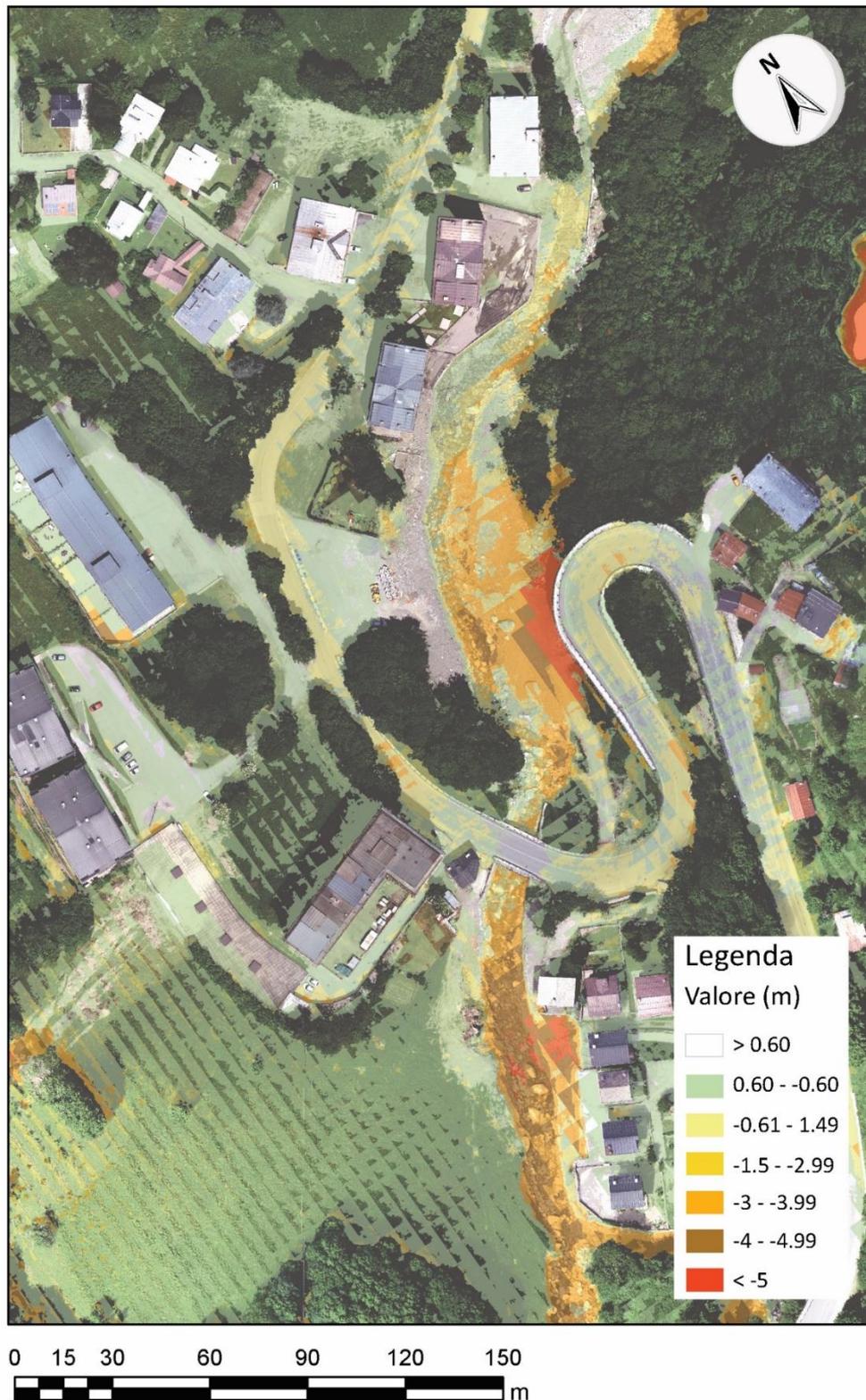


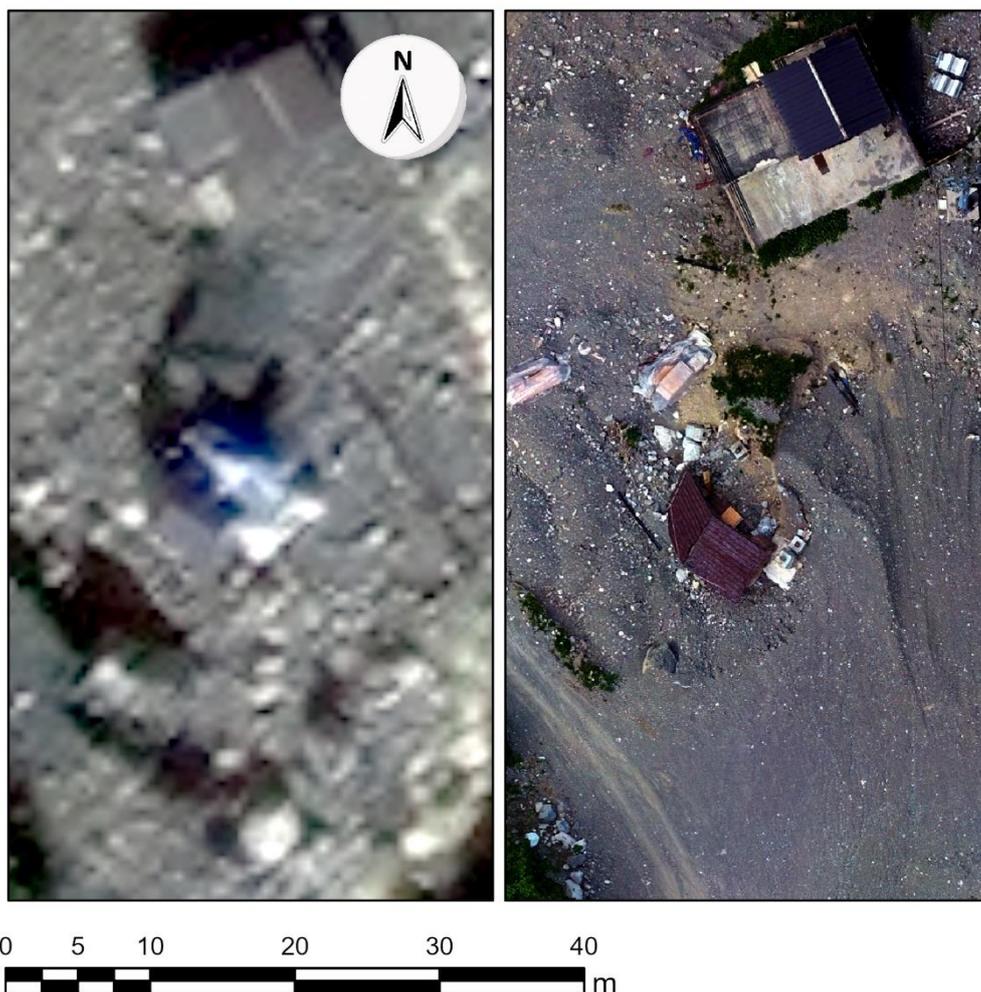
Fig. 57 Differenza altimetrica tra modelli di elevazione: Post evento – Pre evento (Tetti Mecci)

### 3.6.2 Confronto dell'ortofoto da satellite e da drone

Al termine del processo fotogrammetrico sono state create le ortofoto relative alle due aree di interesse. In questo capitolo verranno confrontate qualitativamente l'ortofoto acquisita da piattaforma satellitare e l'ortofoto acquisita tramite drone (Fig. 58, Fig. 60).

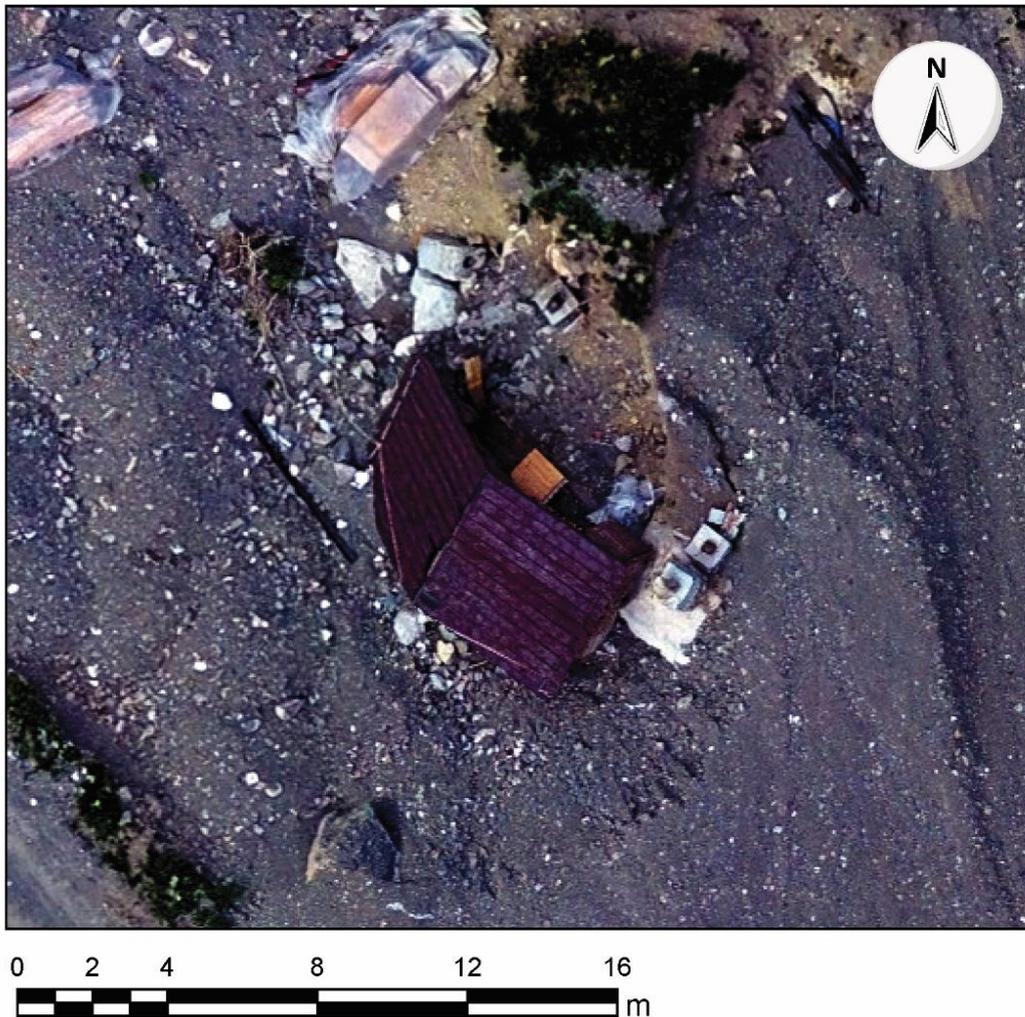
Il dato satellitare è caratterizzato da una risoluzione geometrica di 0.5 m, che consente di identificare gli edifici maggiormente coinvolti e di delimitare ed identificare le aree colpite da un evento alluvionale su un'ampia scala territoriale come visto precedentemente.

Attraverso l'impiego di un drone, per aree più delimitate (< 1km<sup>2</sup>), è possibile tramite consolidate tecniche della fotogrammetria ottenere un modello georeferenziato con una precisione centimetrica ed una risoluzione spaziale altrettanto elevata, in questo caso specifico 0.03m. Tale ricchezza del dato consente di poter valutare i danni alla singola scala dell'edificio.



*Fig. 58 Confronto qualitativo tra ortofoto satellitare (sx) e ortofoto da drone (dx) sull'area di Limonetto*

La Fig. 58 mostra la stessa area degli impianti di Limonetto in scala 1:200, dall'immagine satellitare è possibile intuire la presenza di edifici danneggiati sebbene sia difficile coglierne l'entità, soprattutto per eventi di minore portata

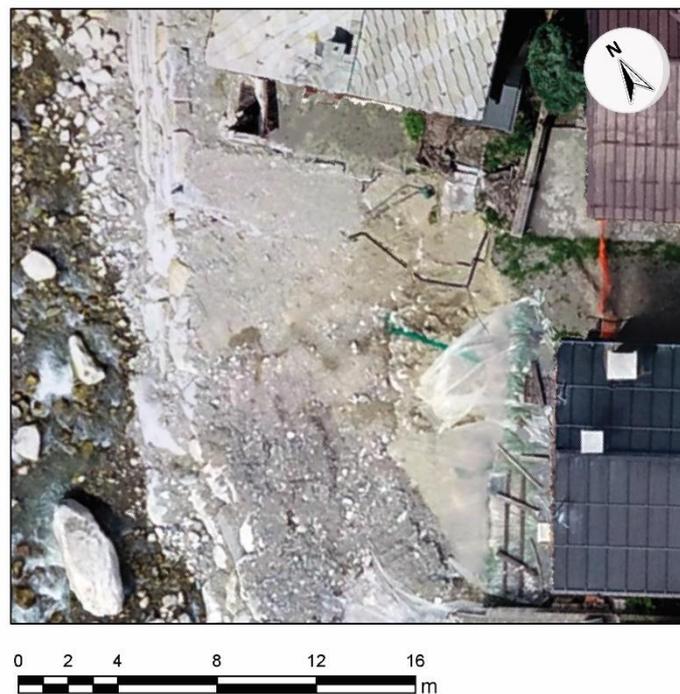


*Fig. 59 Dettaglio ortofoto aerea da drone, scala 1:200 (Limonetto)*

Dall'interpretazione dell'ortofoto acquisita tramite drone (Fig. 59) è possibile la valutazione del danno con estrema accuratezza, si nota infatti come l'edificio in figura sia collassato a seguito dell'evento alluvionale riportando la compromissione totale della struttura, questi danni non sono identificabili dalla sola immagine satellitare.



*Fig. 60 Confronto qualitativo tra ortofoto satellitare (sx) e ortofoto da drone (dx) sull'area di Limonetto*



*Fig. 61 Dettaglio ortofoto aerea da drone, scala 1:200 (Tetti Mecci)*

Nel secondo caso, la zona di Tetti Mecci, dall'immagine satellitare si intuisce la presenza di danni all'edificio posto a ridosso del corso d'acqua ma risulta di difficile interpretazione a causa di ombre e risoluzione geometrica. Studiando l'ortofoto prodotta tramite drone è possibile notare il cedimento di parte dell'edificio verso il fiume.

### 3.6.3 Elaborazione dati da drone

I prodotti derivati dal processo fotogrammetrico da drone sono stati elaborati e trattati per ottenere rappresentazioni in 3D dell'area di studio ad una scala maggiore rispetto a quella satellitare.

#### Area di interesse impianti di Limonetto



Fig. 62 Ortofoto aerea da drone dell'area di Limonetto (21/06/2021) e linee di sezione

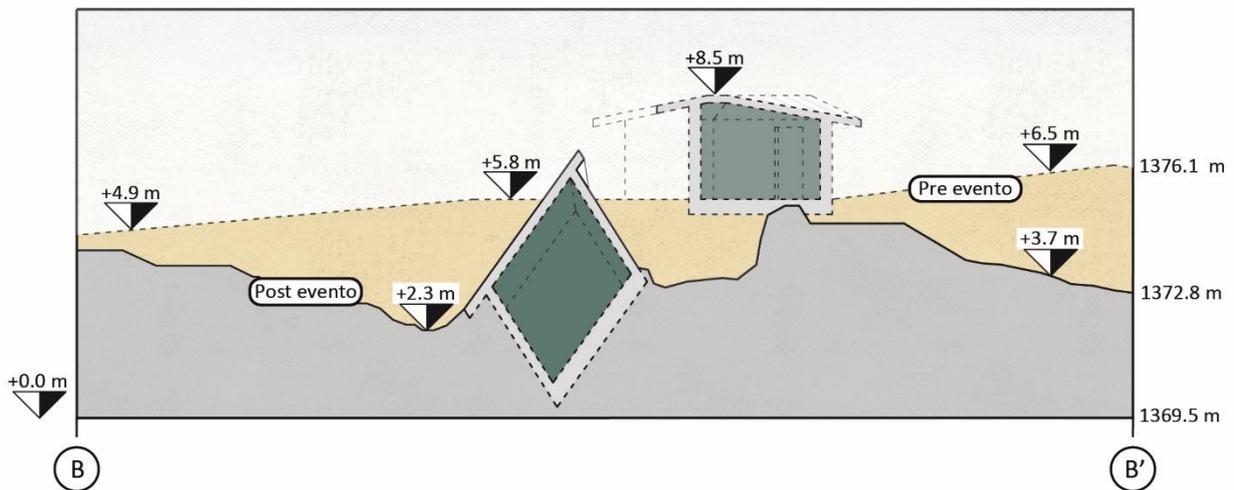
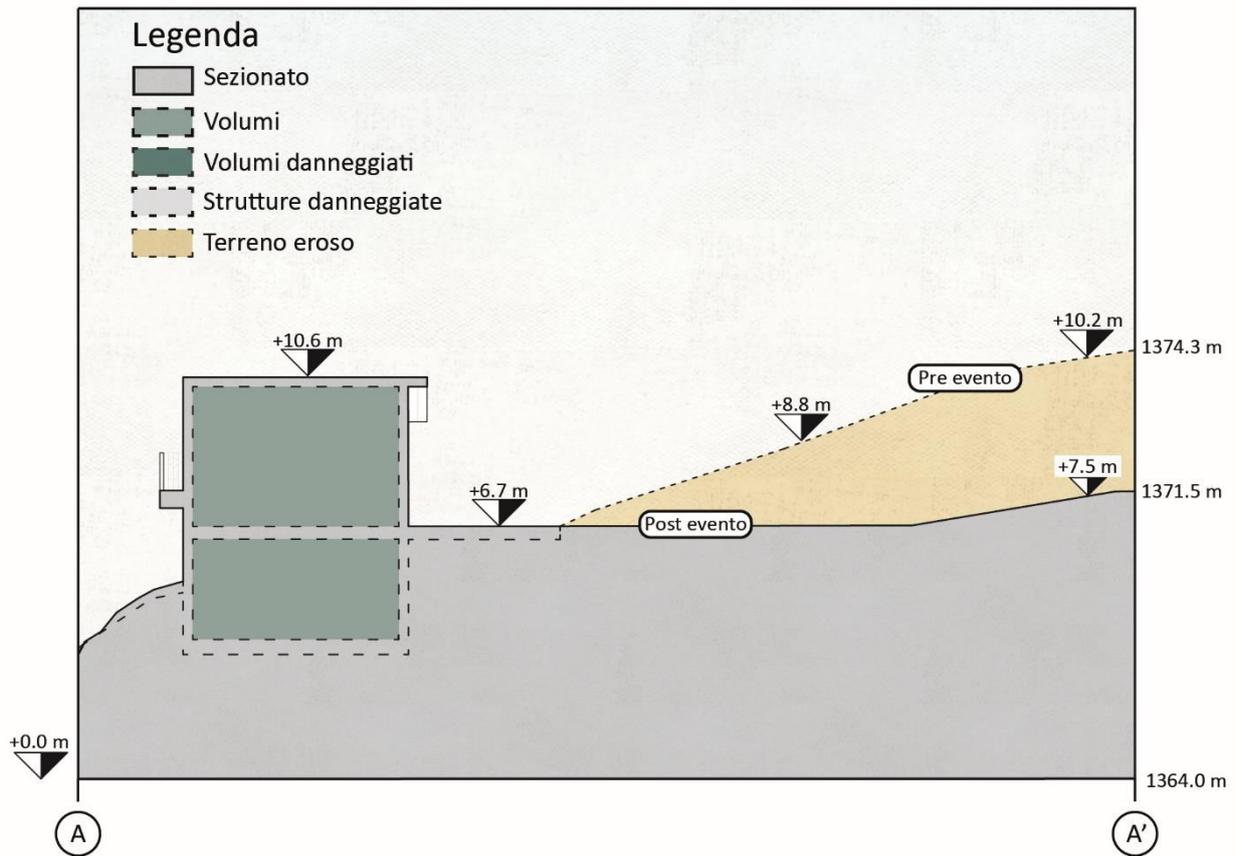


*Fig. 63 Modello geometrico 3D texturizzato dell'area di Limonetto (21/06/2021) e linee di sezione*

Il modello geometrico 3D texturizzato è stato ricavato dal processo fotogrammetrico tramite immagini acquisite da drone e il rilievo di GCP: il risultato rappresenta un modello tridimensionale georeferenziato dell'area indagata di accuratezza centimetrica (<0.05 m) (Fig. 63).

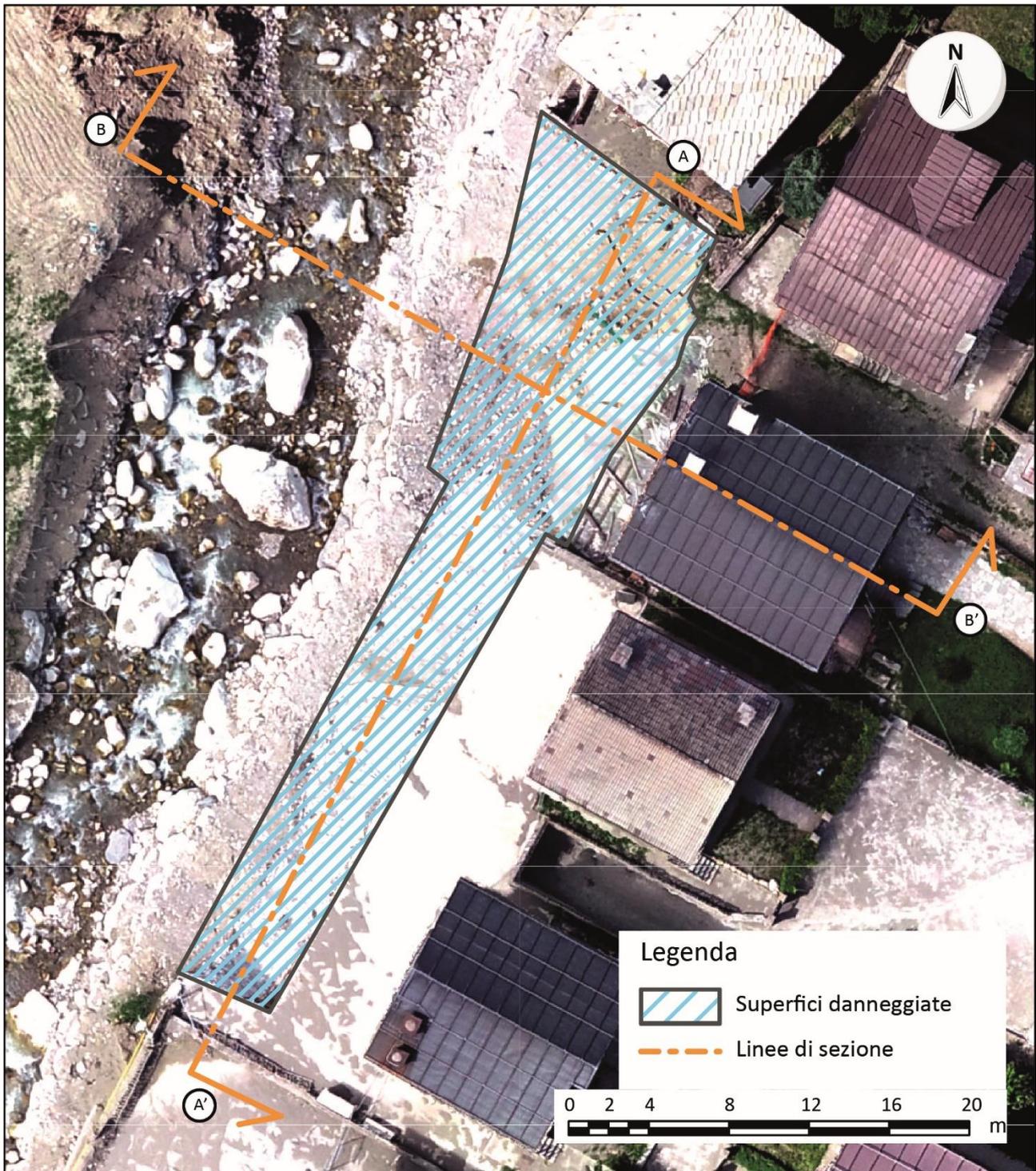
Le sezioni in scala 1:100 (Fig. 64, Fig. 65) sono state realizzate sul DSM post evento (precisione 0.05 m) e sul DTM (precisione 0.60m) rappresentante la condizione precedente all'evento: sono state poi unite per realizzare un confronto tra le due situazioni indagate. I dimensionamenti degli interni degli edifici sono stati ricavati qualitativamente da immagini dell'area di studio.

La sezione B-B' (Fig. 65) mostra anche la posizione dell'edificio prima che venisse danneggiato dall'evento.



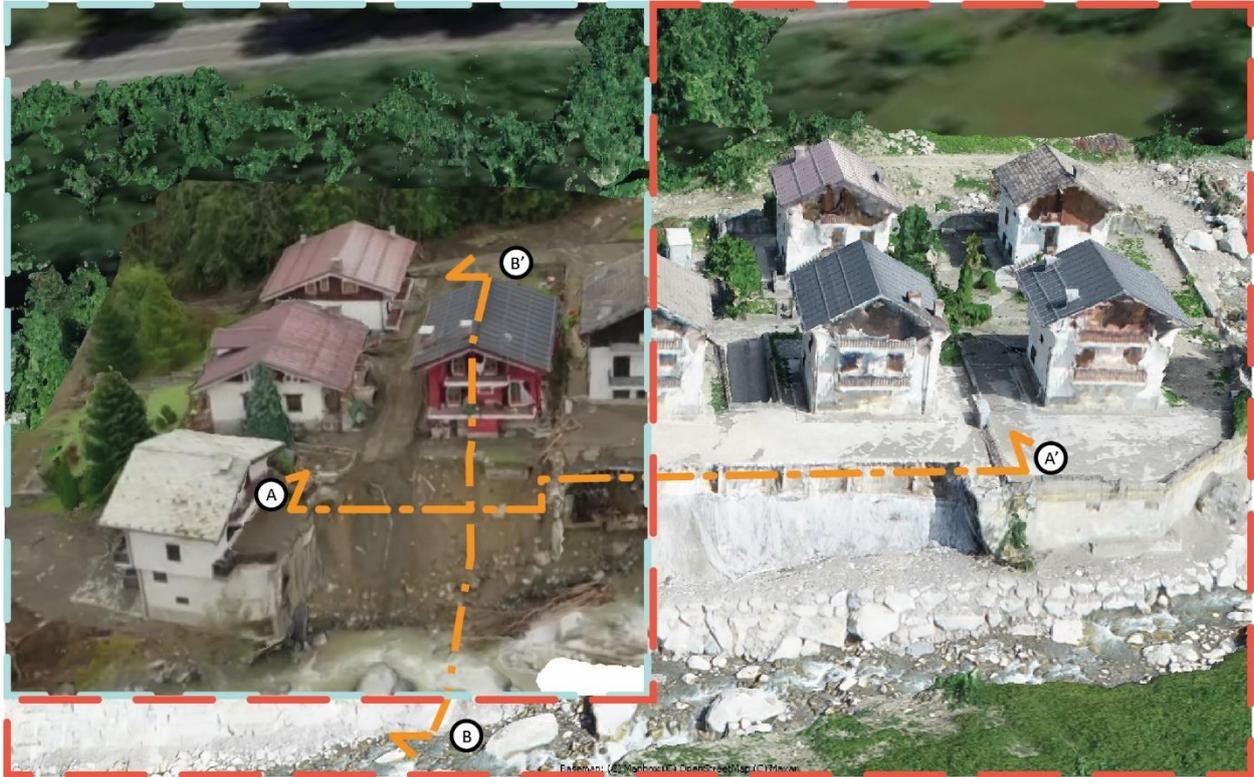
Questi prodotti, caratterizzati da risoluzione geometrica e accuratezze centimetriche quantificano le importanti modifiche subite dal territorio e gli ingenti danni all'edificato.

## Area di interesse di Tetti Mecci



*Fig. 66 Ortofoto aerea da drone dell'area di Tetti Mecci (21/06/2021)*

Sull'ortofoto è stata digitalizzata la superficie edificata che ha subito danni nell'area di Tetti Mecci (Fig. 66).

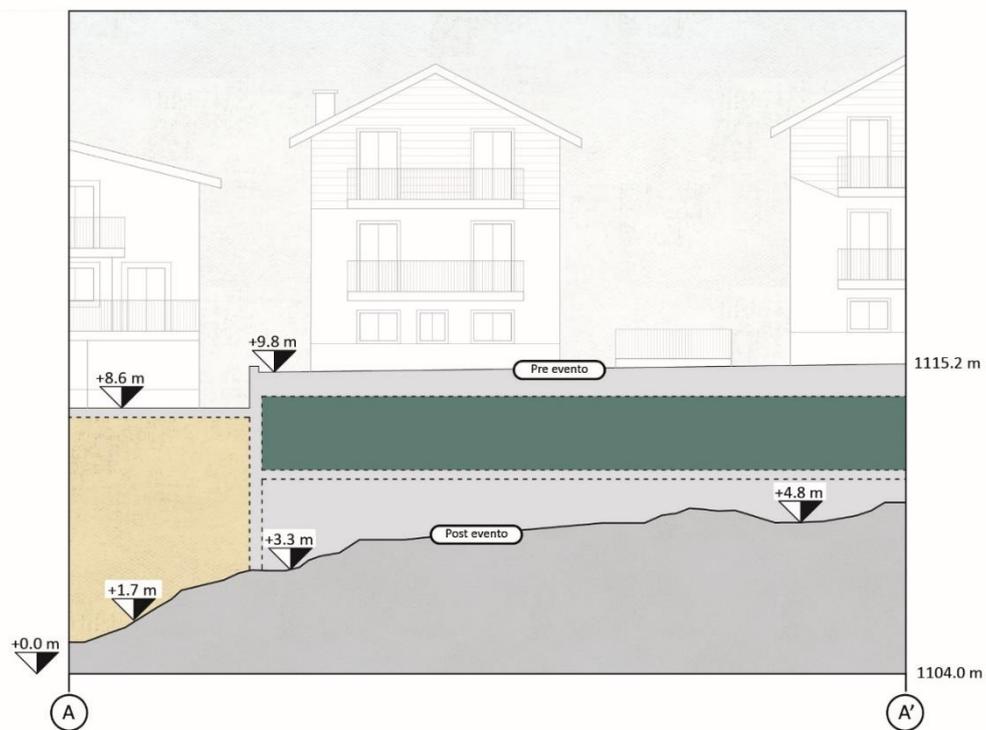
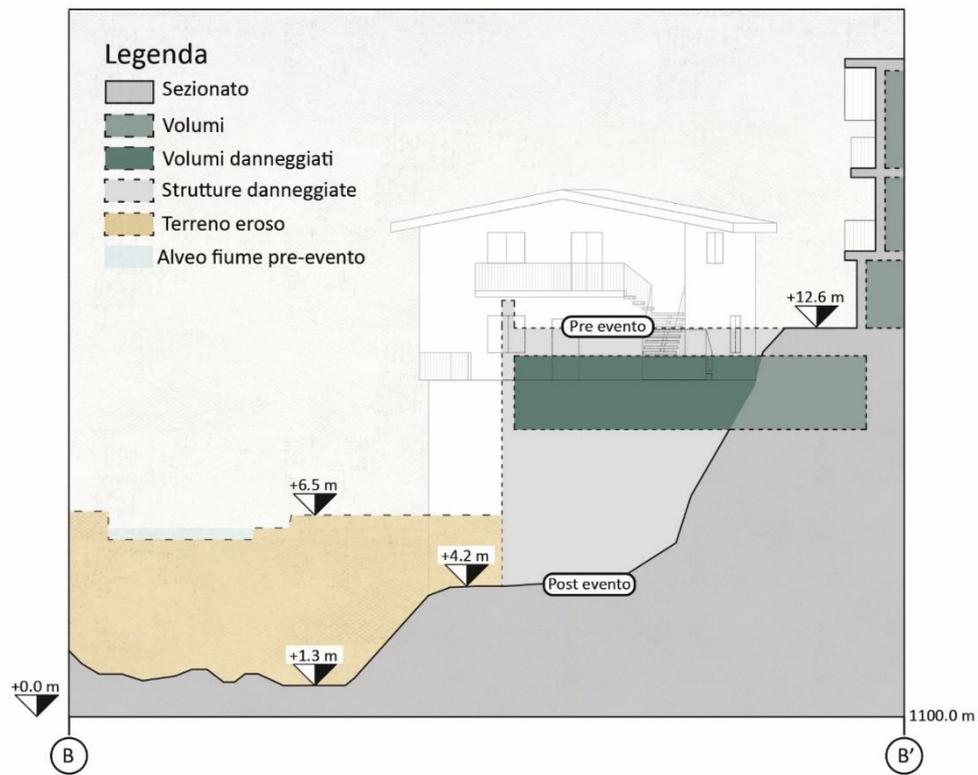


*Fig. 67 Confronto tra modello 3D texturizzato derivato da immagini acquisite durante l'evento (05/10/2020) a sx con modello 3D post evento (21/06/2021) a dx*

La vista in Fig. 67 è composta da due modelli 3D texturizzati sviuppati con acquisizioni di due momenti diversi dell'area di interesse di Tetti Mecci: a sinistra durante l'emergenza alluvionale, è stato realizzato tramite fotogrammi di un video dei Vigili del Fuoco in sorvolo sull'area; e a destra a seguito dell'evento tramite rilievo fotogrammetrico con tecnologia RTK.

L'acquisizione di dati ed informazioni tramite drone si rivela estremamente utile per il rilievo di precisione di danni al territorio e all'edificato (Fig. 69 e Fig. 68).

I prodotti elaborati identificano e quantificano i danni al territorio ed all'edificato riportati a seguito dell'evento alluvionale.





## 4. Conclusioni

Lo studio è avvenuto tramite la produzione, il processamento ed il confronto di informazioni acquisite da piattaforme e derivate da tecniche diverse per l'identificazione ed il rilievo di eventuali danni occorsi al territorio ed all'edificato a seguito di un evento alluvionale.

Lo studio ed elaborazione dei dati cartografici, resi disponibili tramite geoportali cartografici della Regione Piemonte, hanno permesso di analizzare l'evoluzione dell'edificato nel comune di Limone Piemonte, evidenziando l'urbanizzazione non sensibile ad un territorio fragile per i periodi temporali considerati. Un'ulteriore elaborazione dei dati in ambiente GIS permette di classificare e quantificare le percentuali di superficie edificata esposta a rischio alluvionale noto: dai risultati si evince come gli standard di valutazione della pericolosità e del rischio avessero sostanzialmente previsto l'elevata probabilità di coinvolgimento delle aree edificate in eventi alluvionali nel territorio di Limone Piemonte.

Il servizio europeo Copernicus EMS ha prodotto il 09/10/2020 una mappa che identifica le aree colpite ed esprime il grado di danno ad infrastrutture ed edifici tramite interpretazione visuale di un'immagine satellitare multispettrale per l'area di Limone Piemonte (Copernicus EMS, 2020), dall'attivazione della richiesta alla produzione della mappa sono passati 5 giorni.

In questo lavoro l'analisi ed elaborazione dell'acquisizione satellitare post evento ad altissima risoluzione geometrica, tramite tecniche di classificazione automatica di immagini, hanno consentito di individuare con una buona accuratezza tematica (oltre l'80%) le macro aree di territorio colpite dall'evento alluvionale nelle aree di interesse. La particolare elaborazione di questo tipo di dati multispettrali permette di ottenere in breve tempo (poche ore) informazioni a valore aggiunto per aree di notevole estensione (>100 km<sup>2</sup>) considerando sempre i vincoli intrinseci: la copertura satellitare, il metodo di acquisizione, le condizioni metereologiche e l'ora locale dell'area di interesse.

L'acquisizione, il processo fotogrammetrico e la rielaborazione dei dati raccolti tramite drone a seguito dell'evento hanno permesso di indagare porzioni più limitate del territorio (<1km<sup>2</sup>) ma ad una risoluzione ed accuratezza molto maggiore rispetto ai dati satellitari.

Il confronto qualitativo tra l'ortofoto satellitare e quelle da drone rivela in primo luogo l'efficacia dei dati satellitari, oggi facilmente disponibili anche in configurazioni varie e ricche, che spesso consentono la stima generale dei danni da remoto. In secondo luogo il confronto rivela la maggiore ricchezza di dettaglio informativo dei dati da drone, dovuto alla scala maggiore, è possibile interpretare accuratamente gli elementi danneggiati.

Il confronto quantitativo tra i modelli 3D post evento e quello precedente all'evento ha permesso di evidenziare e rappresentare, in formato cartografico, le porzioni di territorio che hanno subito danni a seguito dell'evento alluvionale, a meno dell'accuratezza del dato di partenza della Regione Piemonte.

Il rilievo 3D tramite drone si rivela di grande efficacia per la risoluzione geometrica, i brevissimi tempi di acquisizione, la possibilità di ottenere acquisizioni in alzata, la sicurezza degli operatori e la possibilità di operare tramite georeferenziazione diretta con un notevole risparmio in tempi e costi ma comunque con un'adeguata precisione adatta al rilievo.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli precedenti all'evento messi a disposizione dalla Regione Piemonte, quest'ultimi spesso hanno risoluzione ed accuratezza inferiori rispetto ai dati ricavati da acquisizioni da drone. Per i territori fragili e soggetti a questo tipo di eventi si rivelerebbe di grande utilità possedere dati informativi territoriali aggiornati e di adeguata precisione, ciò renderebbe più speditivo e più accurato il rilievo dei danni.

È importante sottolineare che tutti i dati utilizzati e i prodotti creati in questa tesi sono stati visualizzati, analizzati ed elaborati all'interno di software GIS: è stato possibile produrre e sintetizzare nuove informazioni geospaziali precedentemente non disponibili.

Le procedure elaborate e validate in questo lavoro hanno prodotto informazione aggiunta, sul territorio e sul patrimonio costruito del comune di Limone Piemonte, che può rivelarsi di ampia utilità agli enti e alle autorità responsabili di territori noti al rischio alluvionale sia per il ripristino delle condizioni di sicurezza sia per avere una visione più ampia nel governo del territorio e del patrimonio costruito.

Nei recenti contesti emergenziali i droni sono impiegati, oltre che dal team DiRECT, anche dai Vigili del Fuoco per operazioni di documentazione e soccorso. In futuro, considerando l'intensificazione di questi fenomeni estremi, lo sviluppo ed integrazione di tali discipline e delle recenti tecnologie portano essere di notevole impatto per la gestione di contesti emergenziali.

## 5. Bibliografia e sitografia

- Aber, J. S., Marzoff, I., & Ries, J. (2010). *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Applications*.
- Aicardi, I., F., C., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., & Spanò, A. (2016). UAV PHOTOGRAMMETRY WITH OBLIQUE IMAGES: FIRST ANALYSIS ON DATA ACQUISITION AND PROCESSING . *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Ajmar, A., Boccardo, P., & Giulio Tonolo, F. (2019). Mappatura speditiva dei danni da immagini satellitari a supporto della risposta all'emergenza. *Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino*.
- Ajmar, A., Boccardo, P., Broglia, M., Kucera, J., Giulio Tonolo, F., & Annett, W. (2017). Response to flood events: the role of satellite-based emergency mapping and the experience of the Copernicus Emergency Management Service (EMS). In D. Molinari, S. Menoni, & F. Ballio, *Flood Damage Survey and Assessment* (p. 213-228).
- Ajmar, A., Boccardo, P., Disabato, F., & Giulio Tonolo, F. (2010). Near real time flood monitoring tool.
- Ajmar, A., Boccardo, P., Disabato, F., & Giulio Tonolo, F. (2015). Rapid Mapping: geomatics role and research opportunities.
- Boccardo, P., & Giulio Tonolo, F. (2015). Remote Sensing Role in Emergency Mapping for Disaster Response. In M. A. Lollino G., *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*.
- Boccardo, P., Borgogno Mondino, E., & Giulio Tonolo, F. (2005). Correzione geometrica di immagini satellitari ad alta risoluzione: metodi non.
- Boccardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F. G., & Lingua, A. (2015). UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications. *Sensors*.
- Calantropio, A., Chiabrando, F., & Spanò, N. (2019). Fotogrammetria digitale speditiva a supporto degli interventi di realizzazione di opere provvisori. *Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino*.
- Cannarozzo, R., Cucchiari, L., & Meschieri, W. (2012). *Misure, rilievo, progetto*.
- Chiabrando, F., Giulio Tonolo, F., & Lingua, A. (2019). Uav direct georeferencing approach in an emergency mapping context. the 2016 central Italy earthquake case study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Croneborg, L., Saito, K., Matera, M., McKeown, D., & van Aardt, J. (2020). *Digital Elevation Models : A Guidance Note on How Digital Elevation Models are Created and Used - Includes Key Definitions, Sample Terms of Reference, and How Best to Plan a DEM-Mission*.
- Elachi, C., & Zyl, J. J. (2006). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Wiley.
- Fazeli, H., Samadzadegan, F., & Dadrasjavan, F. (2016). EVALUATING THE POTENTIAL OF RTK-UAV FOR AUTOMATIC POINT CLOUD GENERATION IN 3D RAPID MAPPING. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Fiandra, R., & Bellone, M. (2013). *Limun d'in bot*.

- Freyer, J., Mitchell, H., & Chandler, J. (2007). Applications of 3D Measurement from Images.
- Gabrlík. (2015). The Use of Direct Georeferencing in Aerial Photogrammetry with Micro UAV. *International Federation of Automatic Control*.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors*.
- Giannoni, L., Lange, F., & Tachtsidis, I. (2018). Hyperspectral imaging solutions for brain tissue. *Journal of Optics*.
- Giulio Tonolo, F. (2018). Dispense corso "Satellite Remote Sensing and GIS" - 01UDBPQ Politecnico di Torino.
- Gomarasca, M. (1998). Il Telerilevamento. *Geomedia*, 2(2), 4-9.
- Gomarasca, M. (2009). *Basic of Geomatics*. Springer Netherlands.
- Hackeloeer, A., Klasing, K., Krisp, J. M., & L., M. (2013). Georeferencing: a review of methods and applications. *Annals of GIS*.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Walse, E. (2008). *GNSS - global navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer.
- Hutchinson, M. F., & Gallant, J. C. (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In J. P. Wilson, *Terrain Analysis: Principles and Applications*.
- Jin, S., Cardellach, E., & Xie, F. (2014). *GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications*. Springer.
- Kaku, K. (2019). Satellite remote sensing for disaster management support: A holistic and staged approach based on case studies in Sentinel Asia. *International journal of disaster risk reduction*.
- Kraus, K. (2011). *Photogrammetry*.
- Lastoria, B., Bussettini, M., Mariani, S., Piva, F., & Braca, G. (2021). Rapporto ISPRA.
- Liang, S., & Wang, J. (2020). *Advanced Remote Sensing Terrestrial Information Extraction and Applications*.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*.
- Linder, W. (2003). *Digital Photogrammetry: Theory and Applications*.
- Liu, P., Albert Y. Chen, A. Y., Huang, Y., Han, J., Lai, J., Kang, S., . . . Tsai, M. (2014). A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *SMART STRUCTURES AND SYSTEMS*.
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*.
- Luhmann, T., Robson, S., Harley, I., & Kyle, S. (2006). *Close range photogrammetry : Principles, techniques and applications*.
- Montenbruck, O., & Gill, E. (2000). *Satellite Orbits: Models, Methods, and Applications* . Springer.
- Nair, M., & Bindhu, J. S. (2016). Supervised Techniques and Approaches for Satellite Image Classification. *International Journal of Computer Applications*.

- Neinavaz, E., Schlerf, M., Darvishzadeh, R., Gerhards, M., & Skidmore, A. K. (2021). Thermal infrared remote sensing of vegetation: Current status and perspectives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Palmero, B. (1998). Limone Piemonte. In *Schedario storico-territoriale dei comuni piemontesi*.
- Rees, G. (2013). *Physical principles of remote sensing*.
- Richards, J. A. (2009). *Remote Sensing with Imaging Radar*.
- Sabins, F. F. (2007). *Remote Sensing: Principles and Applications, Third Edition*.
- Sammartano, G. (2018). Optimization of Three-Dimensional (3D) Multi-Sensor Models For Damage Assessment in Emergency Context: Rapid Mapping Experiences in the 2016 Italian Earthquake. In F. Remondino, A. Georgopoulos, D. González-Aguilera, & P. Agrafiotis, *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*; (p. 141-168).
- Short, N. M., & Blair, R. W. (1986). *Geomorphology from Space: A Global Overview of Regional Landforms*. NASA STIF.
- Silva, L. R., Barcellos, B., Giraldo, G., Apolinario Jr, A. L., & Rodrigues, P. S. (2007). Surface flow animation in digital terrain model. *Conference: SVR - IX Symposium on Virtual and Augmented Reality*.
- Small, C. (2005). A global analysis of urban reflectance. *International journal of remote sensing*.
- Spanò, N., Chiabrandò, F., & Lingua, A. (2019). Nuove tecnologie di rapid mapping. Ricerche di soluzioni innovative ed esperienze formative. *Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino*.
- Tempfli, K., Huurneman, G., Bakker, W., Janssen, L., Feringa, W., Gieske, A., . . . Schetselaar, E. (2009). *Principles of remote sensing : an introductory textbook*.
- Teppati Losè, L., Chiabrandò, F., & Giulio Tonolo, F. (2020). ARE MEASURED GROUND CONTROL POINTS STILL REQUIRED IN UAV BASED LARGE SCALE MAPPING? ASSESSING THE POSITIONAL ACCURACY OF AN RTK MULTI-ROTOR PLATFORM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Teppati Losè, L., Chiabrandò, F., & Giulio Tonolo, F. (2020). Boosting the Timeliness of UAV Large Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*.
- Teunissen, P., & Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer.
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Trajkovski, K. K., Grigillo, D., & Petrovic, D. (2020). Terrain, Optimization of UAV Flight Missions in Steep . *Remote sensing*.
- Unninayar, U., & Olsen, L. (2015). Monitoring, Observations, and Remote Sensing – Global Dimensions. *Earth Systems and Environmental Sciences*.
- V.L.Mulder, Bruin, S., M.E.Schaepman, & T.R.Mayrc. (2011). The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma*.

- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) based Remote Sensing*.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2000). *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*.
- Zhao, C., & Qian, L. (2004). Comparative Study of Supervised and Unsupervised Classification in Remote Sensing Image. *Journal of henan university (natural science)*.

## Sitografia

- Agenzia Spaziale Europea- ESA. (s.d.). Tratto da <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>
- Arpa Piemonte. (2020). *Eventi Alluvionali in Piemonte: Evento del 2-3 Ottobre 2020* . Tratto da Arpa Piemonte: <http://www.arpa.piemonte.it/>
- AUTeC - Associazione Universitari di Topografia e Cartografia. (1998). Tratto da [autec-geomatica.it](http://www.autec-geomatica.it): <http://www.autec-geomatica.it/chiSiamo.html>
- Canada Center for Remote Sensing. (2015). Tratto da <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- catalyst.earth*. (2008). Tratto da [https://catalyst.earth/knowledgecenter/document\\_center/?casestudies](https://catalyst.earth/knowledgecenter/document_center/?casestudies)
- commons.wikimedia.org*. (2020). Tratto da [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Black\\_body.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Black_body.svg)
- Copernicus EMS. (2020). Tratto da <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR468>
- Copernicus EMS. (2020). *emergency.copernicus.eu*. Tratto da <https://emergency.copernicus.eu/>
- desktop.arcgis.com*. (2020). Tratto da <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/image-classification-using-spatial-analyst.htm>
- dji.com*. (2020). Tratto da <https://www.dji.com/it>
- earthdatascience.org*. (2020). Tratto da <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-data/introduction-multispectral-imagery-r/>
- esri.com*. (2021). Tratto da <https://www.esri.com/it-it/what-is-gis/overview>
- European Space Agency. (2013). *esa.int*. Tratto da [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_IT/SEM45VZRA0G\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_IT/SEM45VZRA0G_0.html)
- Florida State University. (2019). Tratto da [education.fsu.edu](http://education.fsu.edu): <https://micro.magnet.fsu.edu/optics/lightandcolor/reflection.html>
- Geoportale Nazionale. (s.d.). Tratto da <http://www.pcn.minambiente.it/viewerMobile/>
- Geoportale Piemonte. (2020). Tratto da <https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/home>

*Humboldt State University*. (2016). Tratto da [http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson3-1/resolution.html](http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson3-1/resolution.html), 2019. URL [http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson3-1/resolution.html](http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson3-1/resolution.html).

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali - G4CH. (s.d.). Tratto da <https://www.g4ch.polito.it/wordpress/team-direct/>

*nature.com*. (2020). Tratto da [nature.com/collections/ciedddhbhe/](https://www.nature.com/collections/ciedddhbhe/)

Regione Piemonte. (2020). Tratto da [https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/difesa-suolo/strumenti-per-difesa-suolo/piano-gestione-rischio-alluvionale-pgra#:~:text=Piano%20di%20gestione%20del%20rischio%20alluvionale%20\(PGRA\)%20%7C%20Regione%20](https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/difesa-suolo/strumenti-per-difesa-suolo/piano-gestione-rischio-alluvionale-pgra#:~:text=Piano%20di%20gestione%20del%20rischio%20alluvionale%20(PGRA)%20%7C%20Regione%20)

*San Francisco State University*. (2012). Tratto da <https://www.sfsu.edu/>

*sensefly.com*. (2019). Tratto da <https://www.sensefly.com/drones/>

*sentinel-hub*. (2020). Tratto da <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>

*seos-project.eu*. (2017). Tratto da <https://seos-project.eu/classification/classification-c01-p05.html>

University of Washington. (s.d.). *depts.washington.edu*. Tratto da [https://depts.washington.edu/cmditr/modules/lum/electromagnetic\\_radiation.html](https://depts.washington.edu/cmditr/modules/lum/electromagnetic_radiation.html)