



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea in Tecnologie forestali e ambientali

Utilizzo di fotogrammetria e GIS per le indagini
dendrometriche di bosco

Relatore

Prof. Francesco Pirotti

Correlatore

Dott. Larissa Maria Granja

Laureando

Emanuele Moser

Matricola n. 1221446

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Sommario

1. Riassunto	4
1.1 Abstract	5
2. Introduzione	7
2.1 Obiettivo	8
3. Inquadramento della zona	9
3.1 Storia selvicolturale della zona	10
3.2 Descrizione del bosco preso in esame	12
4. Le tecnologie LiDAR e fotogrammetriche	15
4.1 Le tecnologie LIDAR nell'ambito forestale	15
4.2 La fotogrammetria in ambito forestale.....	18
4.3 LiDAR e fotogrammetria a confronto	20
5. Materiali e metodi	21
5.1 Drone con fotocamera ad alta risoluzione e GPS	21
5.1.1 Regolamento EASA per il volo con i droni	22
5.2 Portale WebGIS della Provincia Autonoma di Trento	26
5.3 3DF Zephyr.....	29
5.4 RStudio.....	40
5.5 QGIS.....	46
6. Risultati e discussioni	49
6.1 Presentazione dei risultati.....	49
7. Conclusioni.....	57
Bibliografia	58

1. Riassunto

Vi sono diversi modi per stimare l'utile di un bosco. Il metodo di rilevazione aerea sembra essere quello migliore per la stima di popolamenti locati in territori impervi. Il *LiDAR* è uno degli strumenti che si prestano meglio per questi tipi di rilievi ma è anche una tecnologia ad oggi molto costosa. Per gli enti pubblici l'onere che le operazioni inventariali comportano possono essere un problema marginale, al contrario del piccolo proprietario forestale. Differentemente dal *LiDAR* la *fotogrammetria* è un metodo di rilievo più economico e può risultare molto valido se impostato nel modo corretto.

Lo studio vuole mettere a confronto i due metodi, fotogrammetria e *LiDAR*, per verificare se il primo può essere uno strumento valido quanto il secondo, di norma più utilizzato.

L'area campione presa in esame riguarda i boschi pino nero (*Pinus nigra*) situati nel comune di Avio, in Trentino-Alto Adige. Il pino nero è una pianta non originaria della zona ed è stata introdotta con le due guerre mondiali per far fronte ai disboscamenti massicci e per mantenere la stabilità dei versanti. Oggigiorno questi boschi risultano deperienti e vedono una progressiva reintroduzione naturale delle specie originarie dove il pino nero viene a mancare.

Come abbiamo detto il *LiDAR* e la fotogrammetria sono entrambi dei metodi di ricostruzione validi. Il *LiDAR* è una tecnica che utilizza impulsi laser per misurare distanze precise e creare modelli tridimensionali dettagliati. La sua capacità di penetrazione delle chiome lo rende uno strumento molto utile e versatile perché offre la possibilità di ricostruire il profilo del suolo anche dove vi sono ostacoli.

Grazie alla sovrapposizione di immagini anche la fotogrammetria ha la capacità di misurare distanze e creare modelli tridimensionali dettagliati ma al contrario del *LiDAR* non ha la capacità di penetrare attraverso le chiome e può ricostruire solo lo strato superficiale.

Per la realizzazione di questo studio il drone è stato uno strumento essenziale per il rilievo fotogrammetrico. Esso ha permesso di scattare foto di alta qualità con cui abbiamo potuto fare la ricostruzione 3D ed ottenere la nuvola di punti da cui partire.

Per i dati *LiDAR* ci siamo serviti del plug-in STEM della Provincia Autonoma di Trento che ci ha permesso di scaricare la nuvola di punti dell'area interessata dal nostro studio.

Attraverso diversi programmi di elaborazione dei dati geospaziali è stato possibile ottenere le stime delle piante dividendo gli individui di pino nero dalle latifoglie. I risultati ottenuti ci hanno permesso di fare delle osservazioni sulla validità del rilievo fotogrammetrico, sulle dinamiche del bosco e sulle problematiche derivate dal portamento delle latifoglie.

In conclusione, il rilievo fotogrammetrico si dimostra essere un sistema efficace che però necessita del supporto del rilievo LiDAR per quanto riguarda il *DTM* che non è stimabile con la fotogrammetria.

1.1 Abstract

There are several ways to estimate the value of a forest. Aerial surveying seems to be the best method for estimating stands located in rugged territories. LiDAR is one of the tools best suited for these types of surveys, but it is also a very expensive technology. For public entities, the burden of inventory operations may be a marginal issue, unlike for small forest owners. Unlike LiDAR, photogrammetry is a more economical surveying method and can be very effective if properly set up.

The study aims to compare the two methods, photogrammetry and LiDAR, to verify if the former can be as valid a tool as the latter, which is usually more utilized. The sample area examined concerns the black pine (*Pinus nigra*) forests located in the municipality of Avio, in Trentino-Alto Adige. The black pine is a non-native species to the area and was introduced during the two World Wars to cope with massive deforestation and to maintain slope stability. Nowadays, these forests are declining and are witnessing a gradual natural reintroduction of native species where the black pine is lacking.

As mentioned, both LiDAR and photogrammetry are valid reconstruction methods. LiDAR is a technique that uses laser pulses to measure precise distances and create detailed three-dimensional models. Its canopy penetration capability makes it a very useful and versatile tool because it offers the possibility to reconstruct the ground profile even where there are obstacles.

Thanks to the overlap of images, photogrammetry also has the ability to measure distances and create detailed three-dimensional models, but unlike LiDAR, it cannot penetrate through canopies and can only reconstruct the surface layer. For this study, the drone was an essential

tool for photogrammetric surveying. It allowed us to take high-quality photos with which we could create the 3D reconstruction and obtain the point cloud as a starting point.

For LiDAR data, we used the STEM plugin from the Autonomous Province of Trento, which allowed us to download the point cloud of the area of interest for our study. Through various geospatial data processing programs, it was possible to obtain plant estimates by dividing black pine individuals from broadleaves. The results obtained allowed us to make observations on the validity of photogrammetric surveying, forest dynamics, and issues arising from the growth habit of broadleaves.

In conclusion, photogrammetric surveying proves to be an effective system, but it requires the support of LiDAR surveying for the DTM, which cannot be estimated with photogrammetry.

2. Introduzione

Per ogni amministrazione pubblica è importante avere un'idea di quello che è il patrimonio di cui dispone. Che si parli di patrimonio finanziario, culturale, naturale etc. uno dei migliori strumenti per avere una stima di quanto si dispone è certo l'inventario.

Parlando di inventari ce n'è uno che contribuisce su più patrimoni come quello economico e naturale, l'*Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC)*. L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC) è un'indagine campionaria periodica che mira a conoscere la qualità e la quantità delle risorse forestali del Paese, fornendo statistiche forestali a livello nazionale e regionale (CREA, 2021). Ebbene questo inventario ha bisogno di dati campionati dalle foreste dislocate sul territorio nazionale ed è proprio questo uno dei ruoli del corpo forestale, condurre delle indagini sul territorio per avere una stima del patrimonio naturale nazionale.

Essere a conoscenza di quanto disponiamo ci permette non solo di effettuare delle analisi statistiche ma anche di valutare come gestire questo patrimonio. Proprio per questo il corpo forestale insieme ai *processi inventariali* redige delle linee guida sulle operazioni da condurre in bosco.

Queste linee guida vengono descritte nei cosiddetti piani di assestamento forestale che sono dei documenti che racchiudono a livello di comune una descrizione dettagliata dei boschi, delle caratteristiche edafiche, degli obiettivi di gestione, dei piani di monitoraggio, normative e aspetti economici.

La pianificazione di un bosco comporta una serie di operazioni in campo spesso difficoltose e talvolta pericolose se fatta da terra su terreni impervi. Negli ultimi anni l'utilizzo di *GIS* (Geographic Information System) è sempre più riconosciuto come potente strumento per la pianificazione in quanto questi sistemi stanno sviluppando una grande precisione di rielaborazione dei dati (Venanzi & Picchio, 2021).

Questi sistemi permettono di fare misure, calcoli e stime senza recarsi in campo, semplicemente interrogando dati presi da voli aerei o dati da droni, permettendo di fare facilmente stime di boschi non accessibili o di aree molto più vaste.

Uno dei sistemi di rilievo aerei più comuni è l'utilizzo di sensori LiDAR. Questi sistemi sono molto precisi ma molto costosi, al contrario della *fotogrammetria* che è molto più economica in quanto necessita di una semplice fotocamera montata sul velivolo.

Considerando che circa il 63% del patrimonio forestale nazionale è privato (Federforeste, 2023) e caratterizzato da una forte frammentazione (Torreggiani, 2024), poter-fruire di rilievi dendrometrici ad un prezzo accessibile risulta necessario per privati con piccole particelle boschive.

2.1 Obiettivo

Il presente studio si propone di condurre un confronto tra i metodi di fotogrammetria e LiDAR in un'area campione situata nei pressi del paese di Avio, nella regione del Trentino-Alto Adige. Attraverso l'analisi delle nuvole di punti ottenute sia dal rilievo LiDAR che dal rilievo fotogrammetrico, l'obiettivo è la ricostruzione del Modello Digitale del Terreno (DTM) e del Modello Digitale di Superficie (*DSM*) dell'area di studio, nonché la stima delle posizioni degli alberi presenti.

Per l'elaborazione dei dati acquisiti, verranno impiegati strumenti informatici dedicati, tra cui il software QGIS per la gestione e l'analisi dei dati spaziali e l'ambiente software R per l'analisi statistica. In particolare, sarà sfruttato il pacchetto lidR, appositamente progettato per la manipolazione e l'analisi dei dati LiDAR.

Saranno adottati gli stessi procedimenti di elaborazione per entrambi i metodi di rilevamento al fine di garantire uniformità nel processo valutativo. Questa scelta metodologica permetterà di considerare i metodi di fotogrammetria e LiDAR come le uniche variabili del processo, consentendo un confronto accurato e dettagliato delle prestazioni e delle potenzialità di entrambi i sistemi di rilevamento.

3. Inquadramento della zona

Descriveremo ora le caratteristiche della zona nella quale si trova l'area boscata oggetto dell'indagine dendrometrica del nostro studio. L'area si trova nelle vicinanze del paese di Avio.

Avio è uno dei paesi più a sud della Vallagarina e conosciuto per il suo Castello medievale. Come la Valle dell'Adige, la Vallagarina rappresenta un tipico esempio di valle glaciale alpina caratterizzata da pendenze modeste nel fondovalle e sempre più elevate man mano che si sale di quota. La valle è inoltre caratterizzata dal profondo solco erosivo provocato dal fiume Adige, il quale determina l'aspetto principale dell'ambiente e delle valli laterali discendenti dai Lessini e dal Monte Baldo.

Dal punto di vista tettonico la valle si imposta lungo una piega *sinclinale* con asse di direzione NNE-SSW. La direzione è la medesima dell'asse relativo alla piega *anticlinale* che forma l'adiacente e parallela catena del Monte Baldo più a ovest.

La zona gode di un clima subcontinentale con influenze mediterranee grazie alla vicinanza al Lago di Garda. Questo clima e le caratteristiche morfologiche citate favoriscono una vegetazione diversificata, con boschi che vedono la presenza di specie tipiche di climi freschi come il faggio (*Fagus sylvatica* L.) o l'abete rosso (*Picea abies* (L.) H.Karst.) in alta quota e specie di climi più caldi come Pini (*Pinus sylvestris* L. e *Pinus nigra* J.F.Arnold), introdotti nel dopoguerra, e latifoglie come carpini (*Ostrya carpinifolia* Scop.) e querce (*Quercus ilex* L. e *Quercus pubescens* Willd.).

Per quanto riguarda l'agricoltura, le coltivazioni che caratterizzano i paesaggi collinari e del fondo valle lungo il corso del fiume Adige sono per la maggior parte quelle della vite con la presenza sempre maggiore negli ultimi anni di actinidia. Come già detto, il clima subisce delle influenze mediterranee grazie al Lago di Garda, questo permette anche la coltivazione dell'olivo, pianta caratteristica del mediterraneo e della località dell'Alto Garda, che rende il paesaggio di questo paese ancora più caratteristico (Veneto Agricoltura – Centro forestale di Verona, 2008).

3.1 Storia selvicolturale della zona

Sin dal XIX secolo, la gestione forestale predominante in Trentino, specialmente nella sua parte meridionale, è stata quella del ceduo. Questa pratica, caratterizzata dal taglio periodico degli alberi per favorirne la ricrescita, ha costituito una risorsa fondamentale per le comunità locali, fornendo legname per il riscaldamento, nonché per molteplici usi domestici ed economici.

Tuttavia, con l'avvento delle due guerre mondiali, i boschi trentini sono stati sottoposti a pressioni straordinarie. In particolare, durante la Prima Guerra Mondiale le esigenze belliche delle truppe occupanti hanno determinato un utilizzo intensivo e indiscriminato delle risorse forestali. Il legname veniva impiegato non solo per la costruzione di trincee e fortificazioni, ma anche come combustibile e materiale da costruzione per gli insediamenti militari (Salvador & Avanzini, 2015). Questo sfruttamento massiccio ha lasciato le foreste impoverite, con una copertura vegetale ridotta e una stabilità ecologica gravemente compromessa.

La situazione non migliorò durante la Seconda Guerra Mondiale, quando la pressione sulle risorse forestali si intensificò ulteriormente. La popolazione locale, già provata dagli anni di conflitto, si rivolse nuovamente ai boschi per sopravvivere, servendosi del legname come principale fonte di energia e materiale di vario utilizzo. Questo sfruttamento massiccio e incontrollato, insieme agli effetti devastanti dei conflitti, ha portato a un deterioramento significativo delle foreste, rendendole ancora più vulnerabili e a rischio di frane e dissesti idrogeologici.

Le conseguenze di questo periodo di sfruttamento intensivo furono profonde. Le foreste si trovavano in condizioni di grave degrado, spesso prive di una copertura vegetale adeguata e con una struttura ecologica compromessa. Per affrontare queste problematiche, si sono resi necessari interventi significativi volti a ristabilire l'equilibrio idraulico-strutturale dei versanti e a ripristinare la funzionalità ecologica ed economica delle foreste. Tra le azioni intraprese figuravano la riforestazione, la stabilizzazione dei pendii e l'introduzione di pratiche di gestione sostenibile, mirate a recuperare la salute e la produttività delle foreste trentine.

In risposta a questa situazione negli anni '50 vi fu una sorta di presa di coscienza ed alcuni responsabili dei Servizi Forestali provinciali si imposero di modificare la gestione selvicolturale

abbandonando i concetti di coetaneità, di *monospecificità*, della massima produzione legnosa ed esaltando i valori della complessità dell'ecosistema forestale. Cristofolini, uno dei responsabili, nel 1981 scrive "La conversione del ceduo in fustaia, o almeno (dove non sia economicamente conveniente) in ceduo composto coniferato, è dunque un'esigenza d'ordine idrogeologico; senza contare che alle altre funzioni d'utilità sociale della foresta (igienica, naturalistica, ricreativa, paesaggistica) l'alto fusto risponde incomparabilmente meglio del ceduo."

Per chiarire i problemi da affrontare negli anni '50 Cristofolini, Ferrari e Giuliarelli, l'allora capo dei Servizi Forestali Regionali del Trentino, si avvalsero dell'aiuto del professore Lucio Susmel, che aveva già svolto un lavoro importante nei boschi del Cadore. Questo confronto fu segnato dal congresso forestale di Firenze del 1954 e il dibattito continuò per tutti gli anni '60 quando i forestali trentini fissarono alcune linee di intervento per ottenere popolamenti misti e disetanei (Agnoletti, 1998).

Queste linee di intervento hanno determinato diversi cambiamenti come la necessità di non utilizzare più il taglio raso, che in alcune zone era praticato da secoli, e scoraggiare la pratica dei rinnovi artificiali che non erano in linea con la *selvicoltura naturalistica* a cui puntavano.

Nei primi decenni del 1900 in Trentino sono stati fatti degli interventi per favorire una composizione mista di ceduo e fustaia in tutti i boschi mediterranei favorendo la conversione degli individui già presenti oppure inserendo specie resinose come pino silvestre e pino nero (Stefanelli, 1967). Questo intervento è stato ispirato da un lavoro realizzato anni prima in Francia, sempre con lo scopo di permettere una stabilità maggiore e una multifunzionalità dei boschi mediterranei.

Oltre al rallentamento di questi interventi a causa della Seconda guerra mondiale, negli anni si sono incontrate delle difficoltà nella conversione anche a causa della tradizione culturale, delle esigenze locali e delle scarse tecnologie a disposizione. In particolare nel Basso Sarca, nella Val d'Adige e nella Vallagarina il ceduo ha mantenuto comunque il suo dominio per vari motivi:

- altissima densità di popolazione che richiedeva combustibile;
- forte richiesta di legna e carbone anche dalla pianura veneta;

- le specie della bassa montagna non producono legna con un buon valore economico e hanno una forte capacità pollinifera;
- nelle fasce climatiche di quelle zone specie più pregiate come il faggio tendono più facilmente ad un habitus da ceduo e a sopraffare specie ad alto fusto come l'abete rosso;
- alto costo di approvvigionamento a causa della scarsità di mezzi e strumenti.

Considerando ora la situazione attuale vogliamo prendere in analisi un particolare tipo di formazione boschiva della zona della Vallagarina, e cioè boschi di pino nero piantati nel dopoguerra.

Come abbiamo detto, la nuova visione di gestione del bosco ha avuto forti ostacoli attuativi in queste zone per via di varie problematiche culturali, economiche e tecnologiche.

Queste problematiche, la forte acclività dei pendii della Vallagarina e il valore molto basso del pino nero, introdotto nel dopoguerra, hanno concorso a quella che è la situazione degradata e poco fertile attuale.

3.2 Descrizione del bosco preso in esame

I boschi di pino nero presenti nel comune di Avio e nel resto della Vallagarina si presentano come *formazioni* vetuste, spesso ricche di necromassa e caratterizzate da una bassa fertilità del suolo. Al tempo della loro piantumazione, tali boschi erano stati concepiti per svolgere un ruolo protettivo dei versanti e delle aree abitate, venendo introdotti con l'obiettivo di mitigare la pericolosità dei pendii. Questi ultimi, infatti, avevano visto la scomparsa della vegetazione a seguito delle devastazioni del primo dopoguerra e dell'avvento del secondo conflitto mondiale.

Tuttavia, nel corso degli anni, la popolazione locale e i servizi forestali hanno mostrato un limitato interesse nella gestione e nello sfruttamento di queste foreste, principalmente a causa dell'impervietà delle loro ubicazioni e del basso valore economico del pino nero. Questo disinteresse ha portato a un progressivo declino della funzione protettiva originariamente attribuita a questi boschi, che sono rimasti in gran parte privi di rinnovazione naturale, ad eccezione di alcune situazioni.

Le principali cause della scarsa rinnovazione includono l'elevata densità degli alberi e l'acidità dello strato superficiale del suolo, provocata dalla decomposizione degli aghi di pino. Questi

fattori hanno ostacolato l'insediamento di nuove piante che avrebbero dovuto rigenerare la foresta nel corso degli anni (Bolognani & Servizio foreste e fauna, 2014). La stabilità limitata delle formazioni vetuste e la quasi totale assenza di rinnovazione creano una situazione di potenziale pericolosità. Qualora un ampio gruppo di alberi dovesse cadere, si verrebbe a creare una zona scoperta incapace di contenere eventuali movimenti di materiali clastici.

Le aree che hanno subito disturbi significativi, come incendi o attacchi parassitari, rappresentano un'eccezione. In tali zone, la vegetazione originaria della Vallagarina sta riuscendo a insediarsi con successo all'interno delle formazioni di pino nero, contribuendo ad aumentare la complessità specifica e strutturale dei boschi. Questo processo favorisce l'integrazione di specie autoctone, che migliorano la resilienza ecologica dell'area.

L'area campione oggetto di questo studio è situata in una di queste aree dove la vegetazione originaria di latifoglie sta riuscendo ad inserirsi con successo. Le specie più rappresentative in questa fase di transizione sono il carpino nero e l'orniello (*Fraxinus ornus* L.) . Tuttavia, si prevede che, una volta stabilizzata la nuova vegetazione, l'orniello cederà il posto a specie quercine, in particolare alla roverella, contribuendo così alla diversificazione ecologica e alla stabilità a lungo termine dell'ecosistema forestale (Baldo & Servizio Foresta e Fauna, 2022).

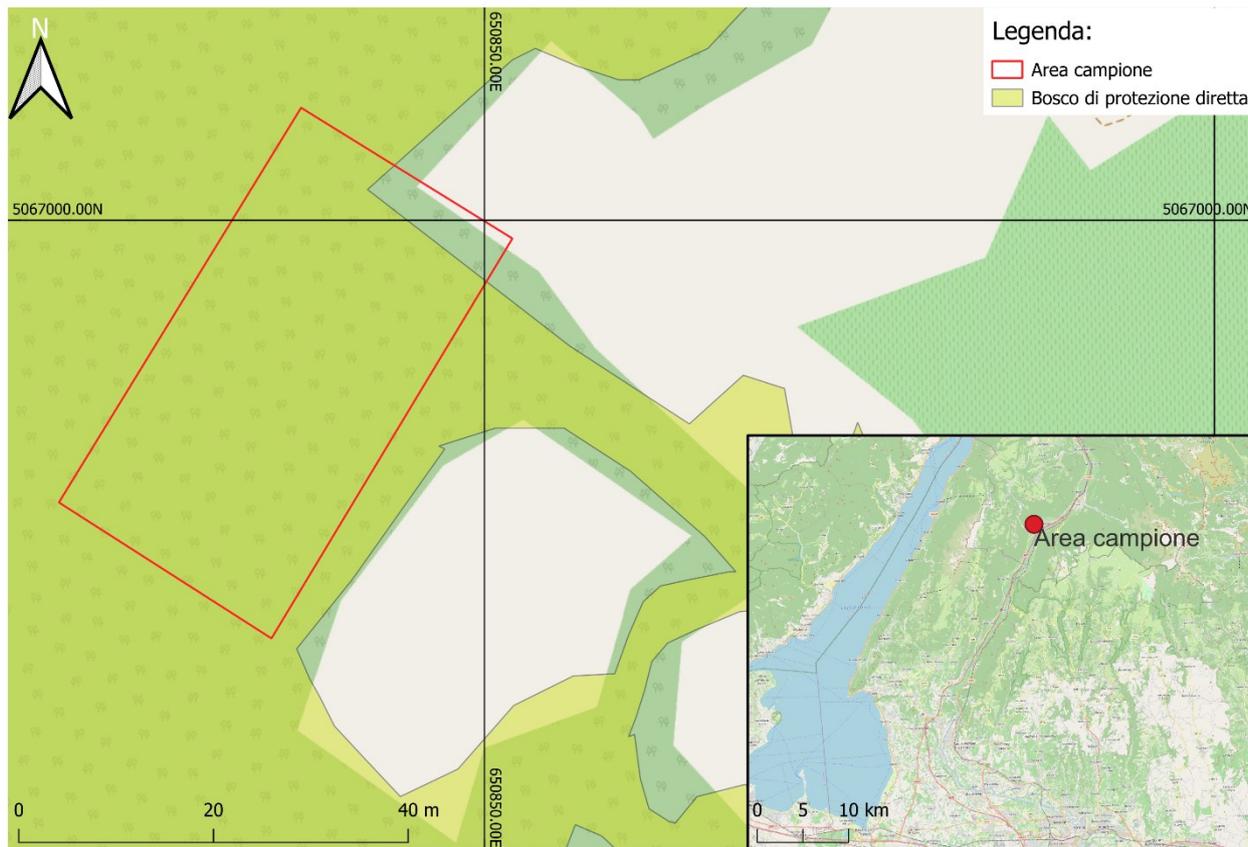


Figura 3.2.1 Inquadramento della locazione dell'area in esame (Immagine creata dall'autore).

4. Le tecnologie LiDAR e fotogrammetriche

Negli ultimi decenni, la rapida evoluzione delle tecnologie di rilevamento aereo ha rivoluzionato il campo della *geodesia* e della cartografia, introducendo strumenti e metodi che consentono una raccolta dati più precisa, dettagliata ed efficiente. Tra le tecnologie più rilevanti in questo contesto, la fotogrammetria e il LiDAR (Light Detection and Ranging) si sono affermate come metodologie fondamentali per il rilievo topografico e la modellazione del territorio.

L'integrazione della fotogrammetria e del LiDAR nei rilievi aerei offre vantaggi significativi, combinando la ricchezza visiva delle immagini fotogrammetriche con la precisione metrica dei dati LiDAR. Questa sinergia permette non solo di migliorare l'accuratezza dei modelli digitali del terreno (DTM) e dei modelli digitali di superficie (DSM), ma anche di ottimizzare i processi di pianificazione, monitoraggio e gestione del territorio.

In questo capitolo, esploreremo in dettaglio i principi fondamentali, le metodologie e le applicazioni della fotogrammetria e del LiDAR nei rilievi aerei. Analizzeremo i vantaggi e le limitazioni di ciascuna tecnologia e le applicazioni pratiche che evidenziano l'importanza di queste tecniche avanzate nella moderna geodesia e cartografia.

4.1 Le tecnologie LIDAR nell'ambito forestale

LiDAR, acronimo di Light Detection and Ranging, è una tecnologia di telerilevamento che utilizza impulsi laser per misurare distanze precise e creare modelli tridimensionali dettagliati della superficie terrestre e degli oggetti presenti su di essa. Questa tecnologia è ampiamente utilizzata in diversi campi, tra cui la cartografia, l'archeologia, la geologia, la gestione forestale, e molte altre applicazioni scientifiche e industriali (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2012).

Il funzionamento del LiDAR si basa sull'emissione di impulsi laser da un trasmettitore e la misurazione del tempo impiegato da questi impulsi per ritornare al ricevitore dopo aver colpito un oggetto o una superficie. Conoscendo la velocità della luce, è possibile calcolare la distanza tra il sensore LiDAR e l'oggetto colpito (Figura 4.1.1). Questa tecnica permette di

raccogliere dati estremamente accurati su grandi aree in tempi relativamente brevi (MathWorks, 2023).

Un sistema LiDAR tipico comprende tre componenti principali (IBM, s.d.) (Figura 4.1.2):

1. Laser: emette impulsi di luce che vengono riflessi dagli oggetti presenti sulla superficie terrestre.
2. Scanner e Specchi Oscillanti: dirigono gli impulsi laser verso l'area da mappare.
3. Ricevitore: cattura gli impulsi laser riflessi e misura il tempo di ritorno.

Oggigiorno esistono diverse tipologie di LiDAR, ciascuna con specifiche applicazioni e vantaggi. Nel caso dei rilievi di superfici, urbane e non, viene usata la tipologia del "Airborne LiDAR (ALS)". Questa tipologia è solitamente montata su aeromobili o droni, è viene utilizzata principalmente per mappare vaste aree terrestri e creare modelli digitali del terreno (DTM) e della superficie (DSM) (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2012).

Grazie alla sua capacità di fornire dati dettagliati ad alta risoluzione, il LiDAR trova applicazione in numerosi settori. Alcune delle principali applicazioni includono la gestione forestale dove possiamo svolgere il monitoraggio della vegetazione, l'analisi della biomassa oppure la mappatura delle risorse forestali. (Podest, Erika, 2021)

Vantaggi e gli svantaggi di questa tecnologia:

- il LiDAR fornisce misurazioni estremamente precise e dettagliate, permettendo la creazione di modelli tridimensionali accurati;
- ha la capacità di coprire ampie aree in tempi brevi rendendolo molto efficiente rispetto ai metodi di rilevamento tradizionali;
- i laser LiDAR possono penetrare parzialmente la vegetazione, permettendo di mappare il terreno sottostante;
- di contro i sistemi LiDAR possono essere costosi da acquisire e mantenere;
- non per ultimo la performance può essere influenzata negativamente da condizioni atmosferiche avverse, come nebbia, pioggia o neve.

Il LiDAR rappresenta una delle tecnologie di telerilevamento più avanzate e versatili disponibili oggi. La sua capacità di fornire dati dettagliati e ad alta risoluzione ha rivoluzionato molti campi scientifici e industriali, rendendo possibile la creazione di modelli tridimensionali del mondo

che ci circonda con un livello di dettaglio senza precedenti. Nonostante alcune limitazioni, i vantaggi offerti dal LiDAR lo rendono uno strumento indispensabile per la moderna ricerca e gestione del territorio.

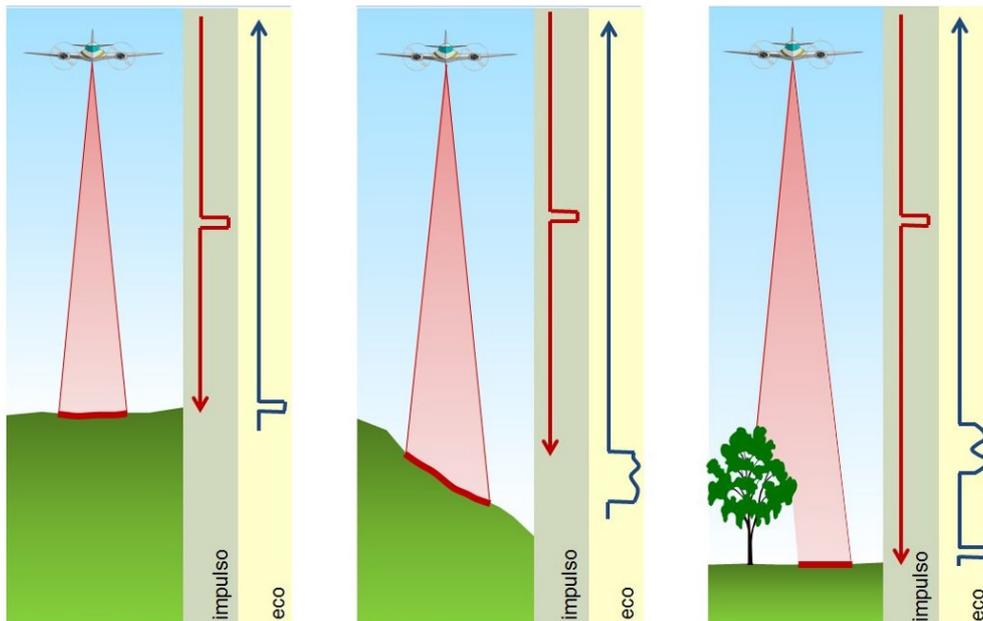


Figura 4.1.1 Esempio esplicativo di come il LiDAR riesce a rilevare il suolo e la vegetazione (Meschieri, Unità I2 - Rilievo 3D con i Laser scanner, 2009).

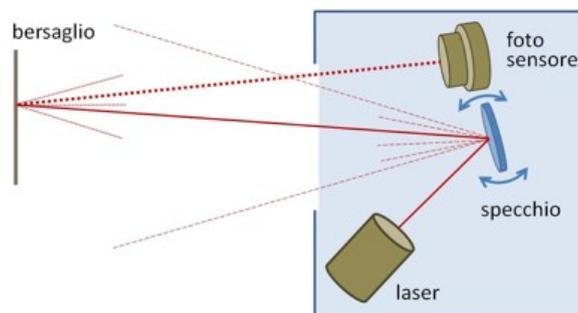


Figura 4.1.2 Componenti di un LiDAR (Meschieri, Unità I2 - Rilievo 3D con i Laser scanner, 2009).

4.2 La fotogrammetria in ambito forestale

La fotogrammetria è una tecnica avanzata di rilevamento che impiega fotografie per misurare e analizzare le dimensioni di oggetti e superfici raffigurati in esse. In termini operativi, questa metodologia prevede l'acquisizione di una serie di immagini aeree o terrestri di un'area di interesse specifico. Queste immagini, attraverso un processo rigoroso di sovrapposizione e correlazione, vengono utilizzate per generare modelli tridimensionali estremamente precisi o mappe dettagliate del territorio in esame (Figura 4.2.1).

La fotogrammetria sfrutta principi geometrici e algoritmi di calcolo complessi per estrarre informazioni metriche dalle fotografie, consentendo di ricostruire la forma, la posizione e le dimensioni degli oggetti ripresi. Questo processo comporta la calibrazione delle immagini per correggere eventuali distorsioni ottiche e l'orientamento spaziale delle fotografie per allinearle correttamente in uno spazio tridimensionale.

L'applicazione della fotogrammetria è particolarmente vasta e include settori come la cartografia, l'architettura, l'archeologia, l'ingegneria civile, la gestione del territorio e l'ambiente. Attraverso l'uso di software sofisticati, le immagini catturate vengono elaborate per produrre *ortofoto*, modelli digitali di elevazione (DEM) e modelli digitali del terreno (DTM), che sono strumenti essenziali per l'analisi spaziale e la pianificazione.

Nel contesto dei rilievi forestali, la fotogrammetria rappresenta una risorsa di fondamentale importanza per la cartografia forestale e la gestione del territorio (Corona, Marchi, Chirici, & Marra, 2022). Di seguito sono illustrati alcuni esempi specifici di applicazione della fotogrammetria in ambito forestale:

1. Mappatura della Copertura Forestale: L'impiego di droni o aerei equipaggiati con fotocamere ad alta risoluzione permette di acquisire immagini dettagliate dei boschi. Queste immagini, elaborate mediante fotogrammetria, consentono di creare mappe precise della copertura forestale, identificando le specie arboree presenti, la densità della vegetazione e le variazioni del terreno. Tali mappe sono essenziali per una gestione efficiente e sostenibile delle risorse forestali.
2. Analisi del Cambiamento Forestale: Le immagini aeree ripetute nel tempo sono uno strumento fondamentale per monitorare i cambiamenti nella copertura forestale.

Attraverso queste immagini, è possibile rilevare fenomeni come la deforestazione, la crescita delle foreste o l'incidenza di malattie e incendi. Queste informazioni sono cruciali per la pianificazione di strategie di gestione forestale sostenibile e per la valutazione degli effetti delle attività antropiche e naturali sui boschi.

3. **Valutazione del Rischio di Incendi:** La fotogrammetria consente di identificare aree ad alto rischio di incendi forestali mediante l'analisi della densità della vegetazione, della morfologia del terreno e di altri fattori rilevanti. Le informazioni ottenute possono essere utilizzate per pianificare misure preventive efficaci e per organizzare una risposta rapida ed efficiente agli incendi in corso, riducendo così i danni ambientali ed economici.
4. **Inventario Forestale:** La fotogrammetria supporta la creazione di inventari forestali dettagliati, permettendo di stimare con precisione la quantità di legname disponibile, la diversità delle specie arboree e altri parametri rilevanti per la gestione forestale e l'industria del legno. Questo strumento è essenziale per una gestione sostenibile e per il monitoraggio delle risorse forestali.
5. **Modellazione del Terreno:** Utilizzando immagini aeree e tecniche di fotogrammetria, è possibile creare modelli digitali del terreno ad alta risoluzione. Questi modelli sono utili per la pianificazione di infrastrutture forestali, la valutazione dell'erosione del suolo e per altri studi ambientali. Essi forniscono una rappresentazione tridimensionale accurata del terreno, fondamentale per molteplici applicazioni in campo forestale e ambientale.

In conclusione, la fotogrammetria rappresenta una potente tecnica per il rilevamento e la gestione dei boschi, offrendo una vasta gamma di applicazioni che possono contribuire alla conservazione, alla pianificazione e alla sostenibilità delle risorse forestali (Corona, Marchi, Chirici, & Marra, 2022).

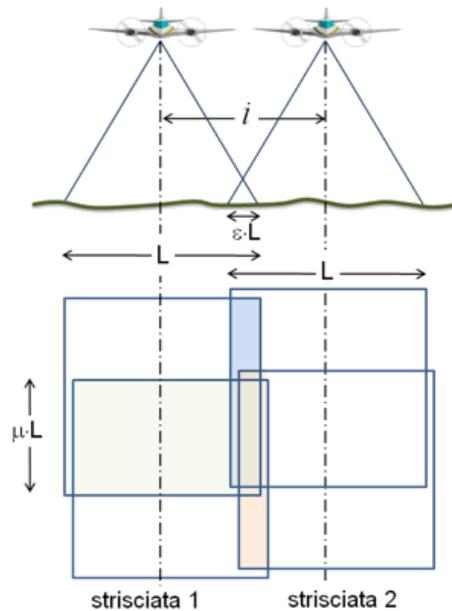


Figura 4.2.1 Esempio di come viene effettuata una fotogrammetria aerea (Meschieri, 2008).

4.3 LiDAR e fotogrammetria a confronto

L'utilizzo di LiDAR e fotogrammetria ha vantaggi e svantaggi e la scelta tra le due metodologie dipende da vari fattori, inclusa la missione specifica. LiDAR è più efficace in aree con alta copertura vegetale grazie alla sua capacità di penetrare tra foglie e rami, rendendolo ideale per la costruzione di modelli digitali del terreno (DTM). Tuttavia, la fotogrammetria può essere efficace in aree con copertura vegetale meno densa e offre una rappresentazione visiva immediata del terreno.

LiDAR è preferibile anche in condizioni di scarsa illuminazione o di notte e per la misurazione di oggetti piccoli o stretti come cavi e condutture.

I dati LiDAR forniscono una dettagliata nuvola di punti 3D, mentre la fotogrammetria crea modelli basati su immagini reali. La scelta tra LiDAR e fotogrammetria dipende dalle esigenze specifiche, con LiDAR che eccelle in situazioni che richiedono alta precisione, penetrazione attraverso la vegetazione e raccolta di dati in condizioni difficili, mentre la fotogrammetria è più utilizzata per applicazioni che richiedono una rappresentazione visiva immediata e accessibile del terreno.

5. Materiali e metodi

5.1 Drone con fotocamera ad alta risoluzione e GPS

Per quanto concerne la fotogrammetria, abbiamo utilizzato un drone che può essere classificato come *consumer*. Questo termine indica un dispositivo non particolarmente costoso e che non richiede competenze specifiche per il suo utilizzo. Nello specifico, abbiamo utilizzato il DJI Mini 4 Pro, un *quadricottero* progettato principalmente per effettuare riprese paesaggistiche con una notevole stabilità e ad altissima definizione.

Il DJI Mini 4 Pro è in grado di registrare video con una risoluzione 4K, offrendo quindi immagini estremamente dettagliate e nitide. Questo modello è inoltre dotato di un sistema GPS integrato, il quale consente la georeferenziazione automatica delle fotografie scattate. La georeferenziazione è una caratteristica particolarmente utile in fotogrammetria, poiché permette di associare ad ogni immagine le coordinate geografiche precise del luogo in cui è stata scattata. Ciò facilita notevolmente l'elaborazione e l'analisi dei dati raccolti, rendendo possibile la creazione di mappe e modelli tridimensionali accurati del territorio.

Un ulteriore vantaggio del DJI Mini 4 Pro risiede nella sua classificazione normativa. Come tutti i modelli della linea "Mini" del produttore DJI, questo drone non richiede il possesso di un patentino rilasciato dall'EASA (Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea). Questo è dovuto al fatto che il drone ha un peso inferiore ai 250 grammi. Secondo le normative europee, i droni che rientrano in questa categoria sono classificati come C0, dispositivi considerati a basso rischio operativo. Di conseguenza, l'utilizzo del DJI Mini 4 Pro è meno soggetto a restrizioni rispetto a droni di categorie superiori, rendendolo una scelta accessibile e pratica per chiunque necessiti di svolgere attività di fotogrammetria senza dover affrontare iter burocratici complessi.

In sintesi, il DJI Mini 4 Pro rappresenta una soluzione efficiente e versatile per applicazioni di fotogrammetria, coniugando facilità d'uso, alta qualità delle riprese e conformità alle normative europee in materia di sicurezza aerea.

Come è stato detto, il quadricottero utilizzato per la fotogrammetria ha una classificazione che prevede poche restrizioni rispetto ad altri modelli più grandi; quindi, senza obbligo di patentino è stato possibile effettuare il sorvolo regolandoci con le limitazioni generali destinate al nostro tipo di volo (Capitolo 5.1.1).

Prima di effettuare il nostro rilievo abbiamo deciso il piano di volo per determinare il percorso del drone, assicurarci che rientrasse nelle operazioni di tipo OPEN (Capitolo 5.1.1) e decidere quante foto effettuare al secondo in modo da essere sicuri di avere una parte sovrapponibile per ogni foto e permettere al programma di elaborazione di creare un modello 3D del bosco (Capitolo 4.2).

Una volta che il volo è stato pianificato ci siamo avvicinati all'area di interesse e abbiamo trovato uno spazio aperto vicino che permettesse di far decollare il drone in sicurezza e di poterlo vedere chiaramente senza ostacoli nel nostro campo visivo. Abbiamo effettuato il volo con la telecamera puntata ortogonalmente al suolo e controllato che la missione non avesse intoppi. Finito il sorvolo abbiamo controllato in loco se le immagini sono state acquisite correttamente, senza sfocature o con la presenza di elementi di disturbo come uccelli in volo o altro.

Finito il rilievo abbiamo caricato le foto sul computer e le abbiamo importate nel programma di elaborazione, nel nostro caso 3DF Zephyr, con l'obiettivo di ottenere una nuvola di punti dalla collimazione delle foto effettuate.

5.1.1 Regolamento EASA per il volo con i droni

Come sulla terra anche lo spazio aereo ha bisogno di essere regolamentato. EASA è l'agenzia europea che si occupa di questo. Dal momento che i quadricotteri sono ormai strumenti molto comuni, EASA ha provveduto a costruire un regolamento che permette il loro utilizzo senza che questi vadano a creare danno ad oggetti, persone o altri velivoli come aerei ed elicotteri.

Possiamo riassumere queste regole in base al tipo di volo che si vuole compiere, cosa si vuole compiere e le dimensioni del quadricottero.

I tipi di volo si dividono in:

- FPV: First Person View - Sistema di pilotaggio remoto nel quale il pilota "vede" come se fosse realmente a bordo del velivolo;

- VLOS: Visual Line of Sight – Volo a vista;
- EVLOS: Enhanced Visual Line Of Sight - Volo a vista in cui il pilota principale si avvale del supporto di altri piloti, i quali possono prendere il comando del drone;
- BVLOS: Beyond Visual Line Of Sight – Volo oltre la linea visibile, che può essere un ostacolo o un orizzonte.

Ben più complesso è invece il discorso di cosa si vuole compiere. EASA ha individuato principalmente tre categorie di operazioni possibili: OPEN, SPECIFIC e CERTIFIED. La categoria OPEN include tutti quei voli a basso rischio che vedono l'utilizzo di un sistema VLOS. I voli non devono superare i 120 m di altezza, il peso del velivolo deve restare entro i 25 kg e non è consentito sorvolare o avvicinarsi troppo ad infrastrutture sensibili come aeroporti o basi militari. Tutto quello che non rispetta questi limiti rientra automaticamente nelle operazioni SPECIFIC o CERTIFIED.

Entrando più nello specifico nella categoria OPEN, per ridurre i rischi che possono derivare dal pilotaggio dei quadricotteri, l'EASA ha messo come prerequisito l'obbligo di sottoporsi ad un esame che permette ai piloti di ottenere un patentino necessario per determinate operazioni di volo e categorie di drone.

Questo patentino si divide su 3 livelli di certificazione (Tabella 1) che determinano i tipi di voli che il pilota può effettuare e anche il tipo di drone che può utilizzare.

Le tipologie di drone sono veramente varie: droni giocattolo, autocostruiti, con sensori ottici, con fotocamera, con GPS o con altri accessori adatti ad utilizzi specifici, etc. A causa di questa varietà EASA ha deciso di suddividere i droni prendendo in considerazione un aspetto comune a tutti, il peso, dividendoli in quattro categorie:

- C0: *MTOM* < 250 g
- C1: *MTOM* < 900 g
- C2: *MTOM* < 4 kg
- C3: *MTOM* < 25 kg

Nelle operazioni OPEN vi sono tante eccezioni ed accorgimenti da prendere in base alla categoria del drone e alla vicinanza da infrastrutture. Per esempio, la categoria di drone C0 è quella con meno vincoli di utilizzo perché non prevede la registrazione del pilota, che è

obbligatoria invece per gli altri tipi di drone e operazioni di volo. Questa categoria inoltre non prevede un ID elettronico di riconoscimento e nemmeno l'obbligo di patentino.

La categoria di operazioni SPECIFIC è quella categoria che racchiude tutti i voli che non rispettano almeno una delle limitazioni OPEN e che quindi richiedono una valutazione del rischio più rigorosa e procedure di autorizzazione. Per esempio, voli non a vista (EVLOS e BVLOS) o con spargimento di materiali (fertilizzanti, acqua, pacchi, etc.) sono tutti voli che richiedono una autorizzazione da parte dell'ente nazionale ENAC. La categoria CERTIFIED è in espansione perché comprende tutti quei droni che permettono il trasporto di persone, droni di trasporto cargo e droni automatici per il trasporto di materiali in ambito urbano, come la consegna dei pacchi. Questo è un settore ancora in evoluzione che richiederà molte certificazioni, per esempio il pilota di droni per il trasporto di persone dovrà anche essere in possesso della certificazione di pilota d'aerei, e vedrà un'evoluzione anche per quanto riguarda le normative aeronautiche.

Operazioni		UAS					Registrazione operatore JAS
Sottocategoria	Ares di operatività (lontani da aerodromi, massimo a 120m di altezza)	Competenza del pilota a distanza (età secondo la legislazione MS)	Classe	MTOM / Joule (J)	Principali requisiti tecnici	ID Elettronico / Geo sensibilità	
A1 Volare sopra le persone	Si può volare al di sopra di persone estranee (non sopra le folle)	leggere le istruzioni d'uso	Costruiti privatamente	<250 g	N/a	No	No
			C0		Informazioni per il consumatore, direttiva giocattoli o < 19 m/s, senza spigoli vivi, limite di altezza selezionabile		
A2 Volare vicino le persone	Si può volare a distanza di sicurezza da persone estranee	- Istruzioni - training online - test online	C1	< 80 J oppure < 900 g	Informazioni per il consumatore, < 19 m/s, energia cinetica, robustezza meccanica, gestione dei collegamenti perduti, senza spigoli vivi, limite di altezza selezionabile	Si + Unico SN per l'identificazione	Si
			C2	< 4 kg	Informazioni per il consumatore, robustezza meccanica, gestione dei collegamenti perduti, senza spigoli perduti, limite di altezza selezionabile, frangibilità, modalità a bassa velocità		
A3 Volare lontano dalle persone	Si dovrebbe: - volare in un'area dove è ragionevolmente atteso che persone estranee non saranno - mantenere le distanze di sicurezza dalle aree urbane	- istruzioni - training online - test online	C3	< 25 kg	Informazioni per il consumatore, gestione dei collegamenti perduti, limite di altezza selezionabile, frangibilità	Se richiesto dalla zona operativa	
			C4		Informazioni per il consumatore, nessun volo automatico		
			Costruiti privatamente		N/a		

Tabella 5.1.1 Tabella riassuntiva delle regole applicate sul pilotaggio di droni (EASA, 2014).

5.2 Portale WebGIS della Provincia Autonoma di Trento

Nel nostro studio abbiamo utilizzato i dati LiDAR forniti dalla Provincia Autonoma di Trento attraverso il portale WebGIS chiamato STEM. Il progetto STEM, finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento e coordinato dal Servizio Foreste, ha sviluppato un sistema informatico avanzato per l'archiviazione, l'elaborazione e la diffusione delle informazioni telerilevate, cruciali per i processi di pianificazione, gestione e monitoraggio territoriale. Una componente chiave del progetto è rappresentata dai plugin per l'ambiente open-source QGIS, progettati per la classificazione dell'uso del suolo e la stima di parametri forestali come volume legnoso, altezza, densità e struttura (Servizio Foreste e Servizio Faunistico, 2022).

Componenti e Funzionalità del Sistema

1. Elaborazione Dati LiDAR

- a. Filtraggio della Nuvola di Punti: Pulizia e gestione dei dati LiDAR per ottenere informazioni precise.
- b. Unione e Ritaglio di File LAS/LAZ: Manipolazione dei file per la creazione di dataset coerenti.
- c. Estrazione del Modello delle Chiome (*CHM*): Creazione di modelli che rappresentano la copertura delle chiome degli alberi.
- d. Rasterizzazione di File LAS/LAZ: Conversione dei dati LiDAR in *raster* per ulteriori analisi.
- e. Estrazione delle Caratteristiche dai File LiDAR: Analisi dettagliata delle caratteristiche del terreno e della vegetazione.

2. Elaborazione Immagini

- a. Ritaglio e Somma di Bande: Manipolazione delle immagini per migliorare l'analisi visiva e quantitativa.
- b. Filtri di Riduzione del Rumore: Pulizia delle immagini per migliorare la qualità dei dati.
- c. Stima dei Parametri Forestali
- d. Volume Legnoso: Utilizzo di formule allometriche specifiche per il Trentino, stimatore lineare e Support Vector Regression per calcolare il volume legnoso.

- e. Caratteristiche di Tessitura, Geometriche e di Vegetazione: Estrazione di queste caratteristiche dai file raster per analisi approfondite.

3. Classificazione Supervisionata

- a. Algoritmi Utilizzati: Support Vector Machine, minima distanza e massima verosimiglianza per la classificazione accurata delle immagini e dei dati.
- b. Individuazione degli Apici delle Piante e Contorni delle Chiome: Tecniche avanzate per delineare le strutture delle chiome degli alberi.

STEM quindi rappresenta un progetto dalle grandi potenzialità che fornisce un supporto e un database utile a molti dipartimenti della Provincia, nel nostro caso per esempio ci ha aiutati ad ottenere la nuvola di punti dalla quale partire per fare la stima delle posizioni degli alberi e con cui fare il confronto con il rilievo fotogrammetrico.

La versione online di STEM si presenta come un GIS (Geografic Information System) con la sagoma vuota del Trentino e due tendine ai lati, a sinistra per la navigazione e a destra per le ricerche.

Per ottenere il dato LiDAR in formato LAZ da questo portale abbiamo utilizzato il seguente procedimento. Per trovare l'area di ricerca abbiamo selezionato il *layer* toponomastica dalla tendina "ricerca" e scelto il campo "top_nomai". A questo punto abbiamo digitato il nome del paese e selezionato "cerca" (Figura 5.2.1). A questo punto la piattaforma ci ha proposto una lista di risultati che comprendeva diversi nomi di località con all'interno il nome "Avio". È bastato premere sul nome del paese per essere rimandati al punto preciso sulla mappa.

Per essere sicuri di essere nel punto giusto abbiamo selezionato il *layer* "Ortofoto PAT 2015" dalla cartella "Ortofoto", il quale ci ha permesso di avere una visione satellitare. A questo punto con il mouse è stato possibile visualizzare al meglio l'area di interesse spostando la mappa e aggiustando l'ingrandimento secondo le necessità.

A questo punto per ottenere i dati di rilievo ci è bastato spostarci sulla tendina "ricerca", nella sezione "scarica" per trovare uno strumento di selezione per indicare l'area interessata e una serie di dati scaricabili dal portale.

Nel caso della nuvola di punti, lo strumento di selezione propone di scaricare i dati "da Quadro Unione" oppure da "traccia Area" coi quali ci lascerà disegnare l'area interessata. Nel nostro caso abbiamo selezionato il dato "LiDAR PAT 2014 - dato grezzo - laz" e l'area di

interesse attraverso “da Quadro Unione”. Premendo sul pulsante “Download selezione” abbiamo ottenuto un link nella sezione sottostante che ci ha permesso di scaricare una cartella compressa con il dato richiesto (Figura 5.2.2).

The screenshot shows the STEM WebGIS interface. On the left, there is a 'Livelli' (Layers) panel with a search bar and a list of layers under 'Tematismi'. The central map shows an aerial view of a town. On the right, the 'Ricerca' (Search) panel is active, showing a search bar with 'Avio' entered, and two dropdown menus: 'Selezionare il layer' (set to 'Toponomastica') and 'Selezionare il campo' (set to 'top_nomai'). Below the search bar, it says 'Ricerca completata: 12 oggetti'. At the bottom, a table displays search results. A red arrow labeled '1' points to the 'Selezionare il layer' dropdown, '2' points to the 'Selezionare il campo' dropdown, and '3' points to the search results table.

gid	top_id	top_cl	top_nomai	sez_id	geom
13098	2613601	P471	PONTE GAVI...	62060	
13156	2619101	P115	MONTE PAVI...	62060	
17723	3013301	P630	S.P. N. 208 A...	101030	
17837	3023401	P630	S.P. N. 208 A...	101040	
17911	3301	P440	AVIO	101080	
17922	3031601	P510	CASTELLO ...	101080	
17960	3034801	P640	CASELLO A...	101080	
17990	81901	P460	MASI D'AVIO	101080	
18001	3038401	P460	MAMA D'AVIO	101080	

Figura 5.2.1 Come trovare un luogo su STEM in versione WEBGIS Il portale offre la possibilità di trovare un luogo rapidamente digitandolo nella barra di ricerca e selezionando tra una serie di layer (1), e il campo da esso contenuto (2) prima di effettuare la ricerca. I risultati della ricerca ci verranno illustrati in una tendina apposita (3) (Immagine creata dall'autore).

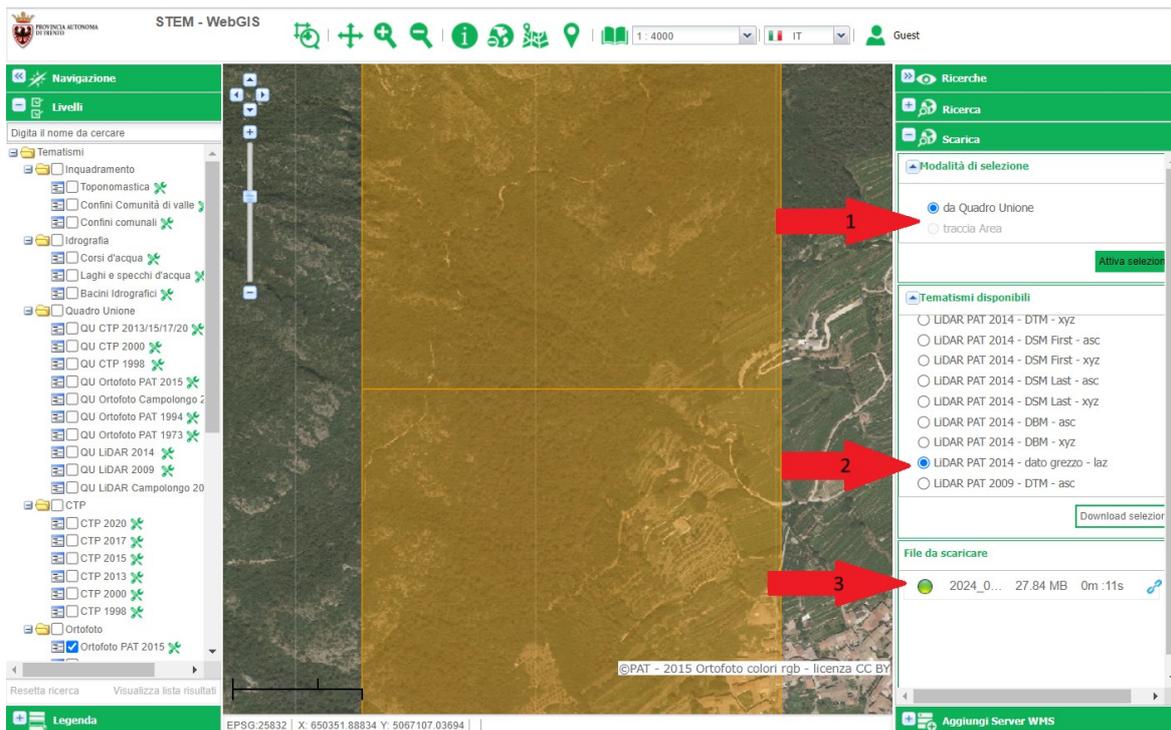


Figura 5.2.2 Come scaricare i dati LAZ da STEM in versione WEBGIS
 Per ottenere dei dati da STEM basta indicare i dati interessati (2),
 selezionare l'area e scaricarli quando il collegamento
 della cartella compressa è pronto (3) (Immagine creata dall'autore).

5.3 3DF Zephyr

3DF Zephyr è un software avanzato sviluppato da 3Dflow per la fotogrammetria, progettato per consentire la creazione di modelli tridimensionali a partire da immagini bidimensionali. Questo strumento è compatibile con una vasta gamma di sensori fotografici, droni e laser scanner, garantendo una notevole flessibilità nell'acquisizione dei dati.

3DF Zephyr trova applicazione in numerosi settori, tra cui architettura, archeologia, cartografia, realtà virtuale e aumentata, oltre a molte altre applicazioni industriali e creative. La scelta di questo programma è spesso motivata dalla sua semplicità d'uso, derivante da due caratteristiche principali.

- Fotogrammetria Automatica: 3DF Zephyr è capace di elaborare automaticamente le fotografie per generare modelli 3D dettagliati. L'algoritmo impiegato è ottimizzato per

gestire grandi set di dati, risultando utilizzabile anche da utenti senza una profonda conoscenza tecnica.

- **Compatibilità con Vari Formati:** 3DF Zephyr supporta una vasta gamma di formati di input e output, inclusi i più comuni file di immagini (JPEG, PNG, TIFF, ecc.) e formati di modelli 3D (OBJ, STL, PLY, FBX, ecc.), garantendo così una notevole interoperabilità con altri strumenti e piattaforme.

In conclusione, 3DF Zephyr rappresenta uno strumento potente e versatile per la fotogrammetria, adatto a una vasta gamma di applicazioni professionali e creative.

Per ottenere la ricostruzione in 3D del bosco in esame abbiamo seguito i seguenti passaggi:

Abbiamo avviato un nuovo progetto utilizzando l'apposito comando "Nuovo Progetto" presente nel menu a tendina "Elabora" (Figura 5.3.1). Successivamente, si è aperta una finestra che ci ha fornito un'anteprima delle operazioni da eseguire, delle istruzioni per ottenere una ricostruzione ottimale e la possibilità di scegliere tra tre opzioni aggiuntive (Figura 5.3.2).

Premendo il pulsante "Successivo" è stato possibile caricare la cartella contenente le foto georeferenziate realizzate con il drone DJI Mini 4 Pro durante il volo (Figura 5.3.3). Inoltre, abbiamo provato a importare anche delle immagini da un video di rilievo fatto durante il volo.

Per importare le immagini dal filmato, il programma apre una seconda finestra che richiede il file da importare, la destinazione dei fotogrammi estratti e vari parametri di estrazione come il formato di salvataggio e la soglia di similarità. Una volta impostati questi parametri, è stato sufficiente premere "Estrai fotogrammi ed importali nello spazio di lavoro" per ottenere le foto utili alla ricostruzione. Purtroppo, le immagini ottenute non hanno alcun tipo di georeferenziazione e quindi sono risultate non utilizzabili per la ricostruzione 3D.

Completato il caricamento delle immagini, è stato sufficiente premere nuovamente "Successivo" per permettere al programma di analizzare le immagini e calibrare i parametri rilevati (dimensioni, lunghezza focale, ecc.) (Figura 5.3.4).

Utilizzando ancora il pulsante "Successivo", si accede alla sezione in cui si specifica al programma il tipo di immagini caricate; in questo caso, abbiamo selezionato "foto aeree" poiché la ricostruzione del bosco è stata effettuata con foto scattate dal drone. Abbiamo

selezionato anche il livello di precisione dell'analisi delle immagini in base a tre livelli che determinano la velocità e la precisione dei calcoli (Presets). Nel nostro caso abbiamo selezionato "Analisi Profonda" perché indicata quando si riscontrano problemi con l'opzione di "Default" (Figura 5.3.5).

Premendo per l'ultima volta "Successivo" abbiamo avuto accesso al riassunto delle immagini da importare. Dal momento che le nostre immagini sono georeferenziate, insieme al riassunto il programma ci ha reso possibile vedere una mappa OSM (Open Street Map) con la posizione nello spazio di ogni immagine. Dopo aver visionato il riassunto, è stato sufficiente premere "Avvia" per avviare il processo di importazione, durante il quale il programma verifica quali immagini possono essere utilizzate e quali no (Figura 5.3.6).

Completata l'importazione delle immagini, il programma ci ha fornito una nuvola di punti che potevamo esportare e utilizzare per calcoli con RStudio. Tuttavia, visto che si trattava di una nuvola con pochi punti abbiamo scelto di generare una nuvola di punti densa per ottenere un file ottimale per i calcoli. È stato sufficiente selezionare il comando "Generazione Modello 3D" dal menu a tendina "Elabora" per aprire la finestra che consente di ottenere una nuvola di punti densa e il modello 3D (Figura 5.3.7).

La finestra presenta alcune spiegazioni su come funziona la ricostruzione e permette di scegliere le fotocamere da utilizzare; in questo caso, abbiamo utilizzato tutte le fotocamere disponibili (Figura 5.3.8).

Premendo "Successivo" si accede alle opzioni per la creazione della nuvola di punti densa, dove è possibile selezionare il tipo di ricostruzione (Categoria) e la precisione di stima (Presets). In questo caso, abbiamo impostato il tipo di ricostruzione su "Foto Aeree" e la precisione su "Dettagli Elevati" (Figura 5.3.9).

Utilizzando ancora il pulsante "Successivo", siamo arrivati alle opzioni di elaborazione del modello 3D, che sono le stesse della nuvola di punti: "Categoria" e "Presets". Poiché non ci serviva una ricostruzione 3D accurata, abbiamo impostato la stessa categoria della nuvola di punti densa ma per i presets abbiamo scelto "Anteprima" (Figura 5.3.10).

Prima di avviare l'elaborazione, come per l'importazione, viene mostrato un riepilogo delle operazioni che il programma eseguirà. Dopo aver verificato che i parametri selezionati fossero corretti, abbiamo premuto il pulsante "Avvia" (Figura 5.3.11).

Al termine dell'elaborazione, il programma ci ha mostrato il risultato su cui abbiamo impostato un CRS utile per orientare il modello e visualizzarlo sui programmi GIS (Figura 5.3.12).

Infine, abbiamo esportato la nuvola di punti densa in formato "LAS" selezionando "Esporta Nuvola di Punti Densa" dal menu a tendina "Esporta". Attraverso la finestra preposta per l'esportazione abbiamo potuto selezionare la nuvola da esportare ed impostare il formato di esportazione. Abbiamo concluso il processo di ottenimento della nuvola di punti dal rilievo fotogrammetrico salvando il file in una cartella dedicata (Figura 5.3.13).

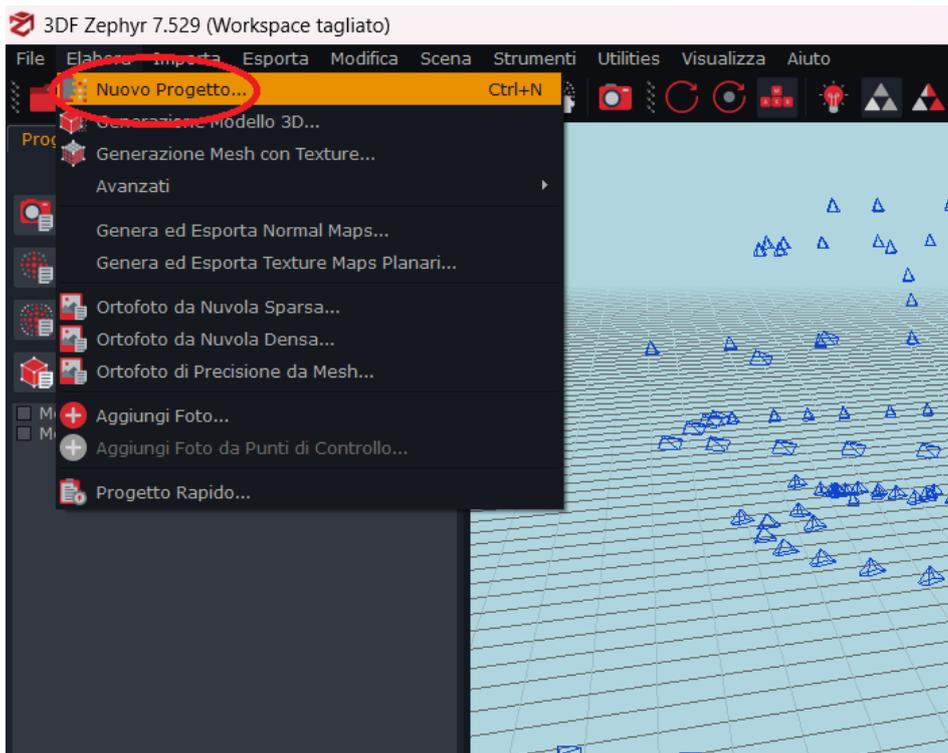


Figura 5.3.1 Screenshot del programma 3DF Zephyr che illustra come iniziare un nuovo progetto (Immagine creata dall'autore).

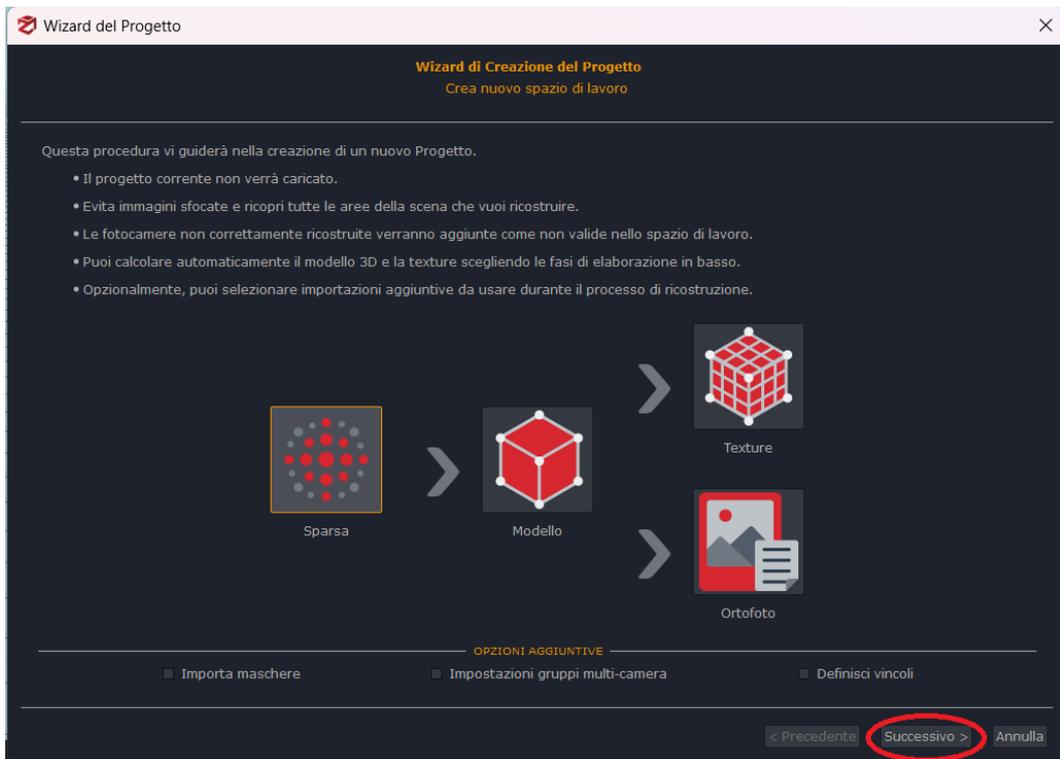


Figura 5.3.2 Finestra di inizio importazione (Immagine creata dall'autore)

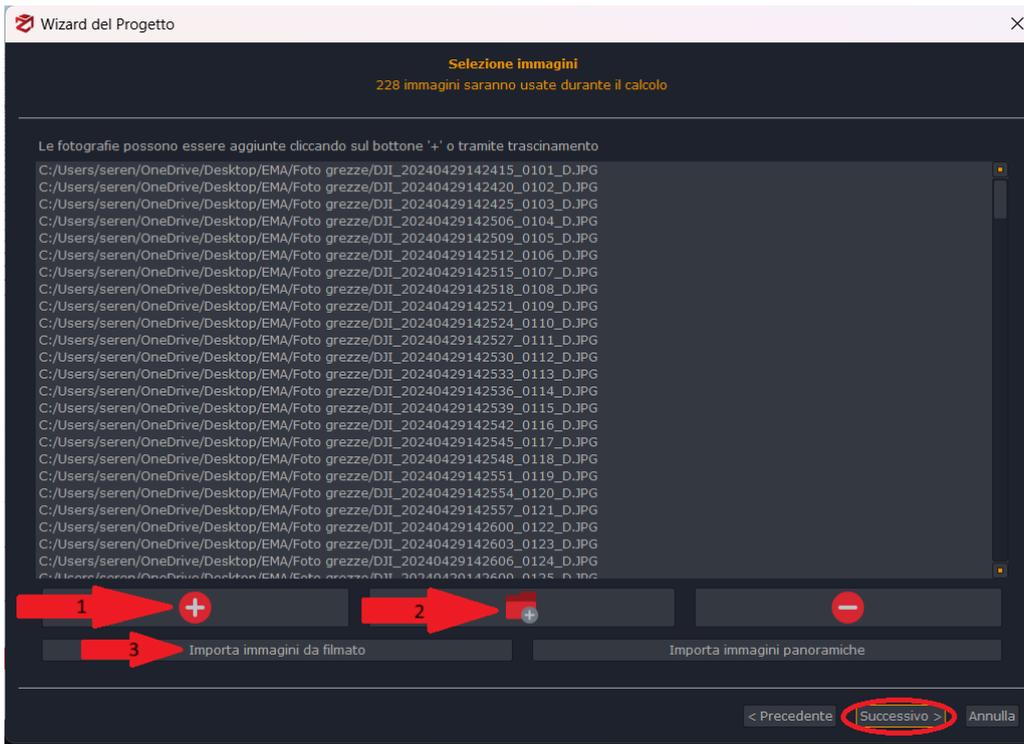


Figura 5.3.3 Secondo passaggio dell'inizio di un nuovo progetto: importazione delle immagini È possibile importare le singole foto (1), una cartella di foto (2) o importare immagini da un filmato (3) (Immagine creata dall'autore).

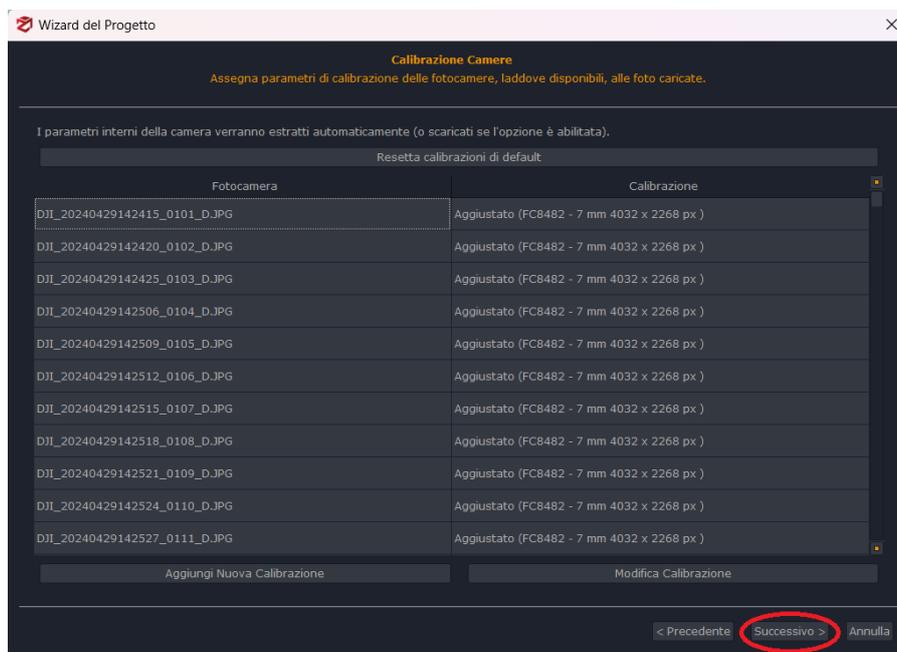


Figura 5.3.4 Terzo passaggio dell'inizio di un nuovo progetto: analisi dei parametri delle immagini (Immagine creata dall'autore).

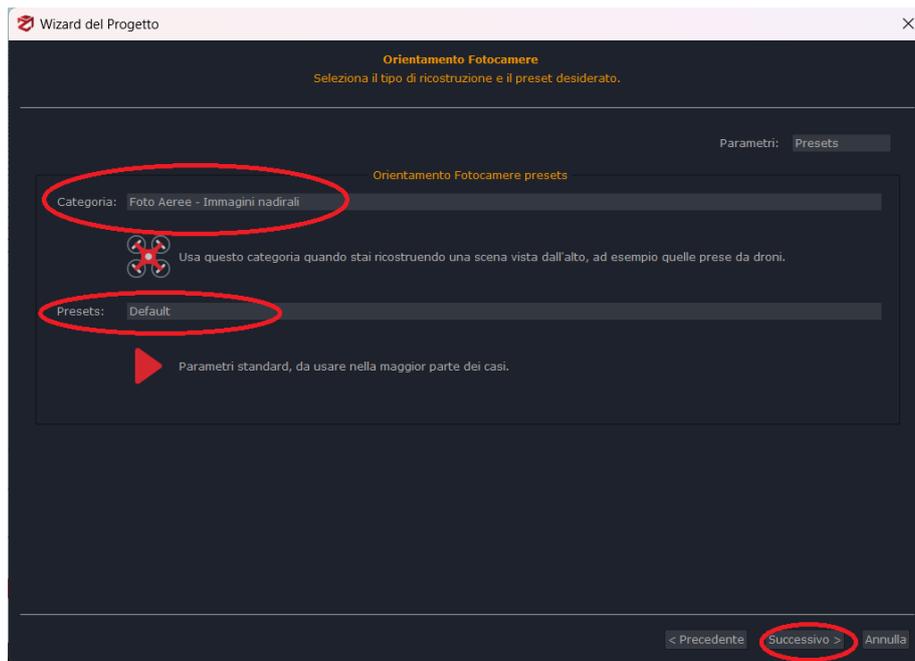


Figura 5.3.5 Quarto passaggio dell'inizio di un nuovo progetto: impostazione dei parametri di ricostruzione (Immagine creata dall'autore).

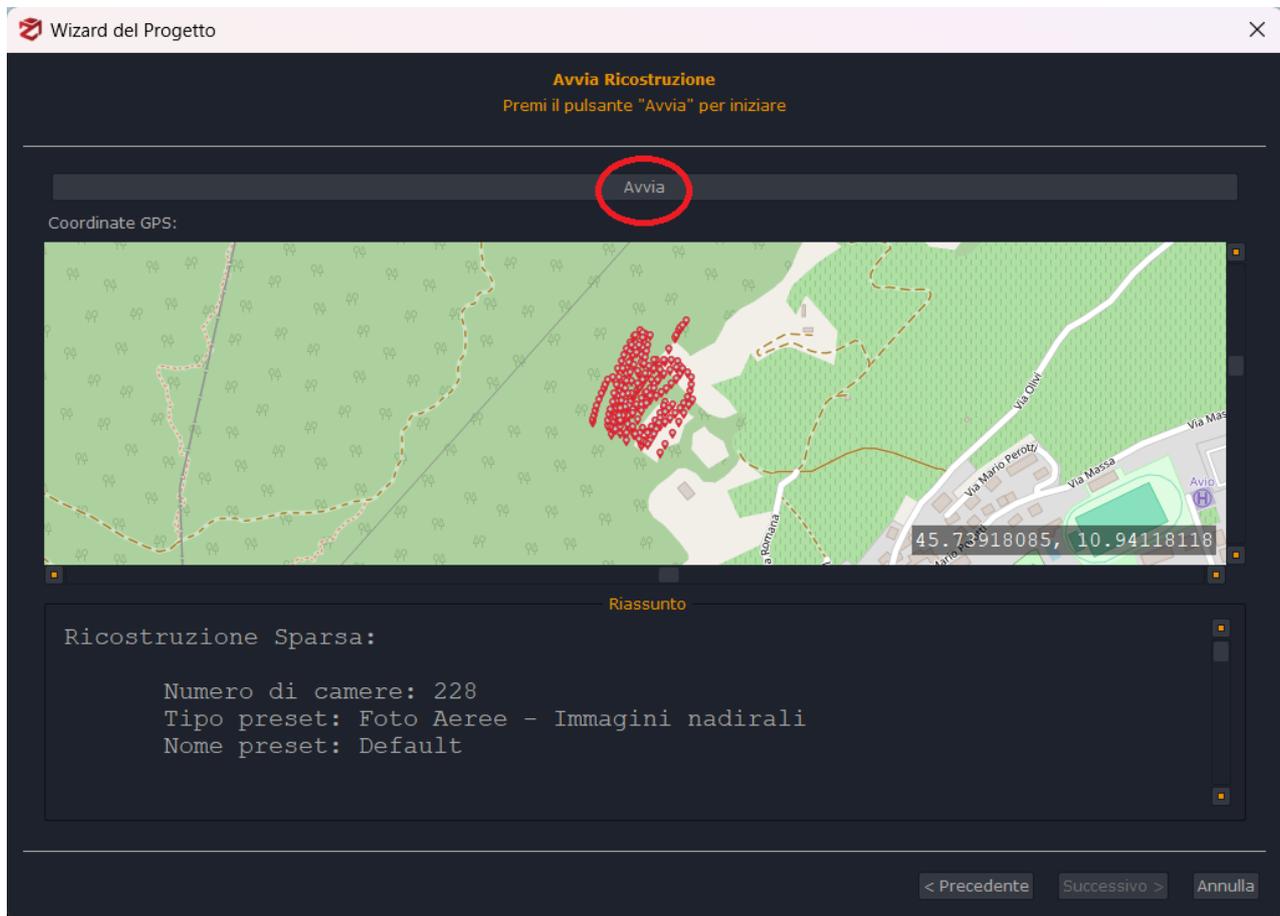


Figura 5.3.6 Quinto passaggio dell'inizio di un nuovo progetto: riepilogo dell'importazione con mappa della posizione delle foto (Immagine creata dall'autore).

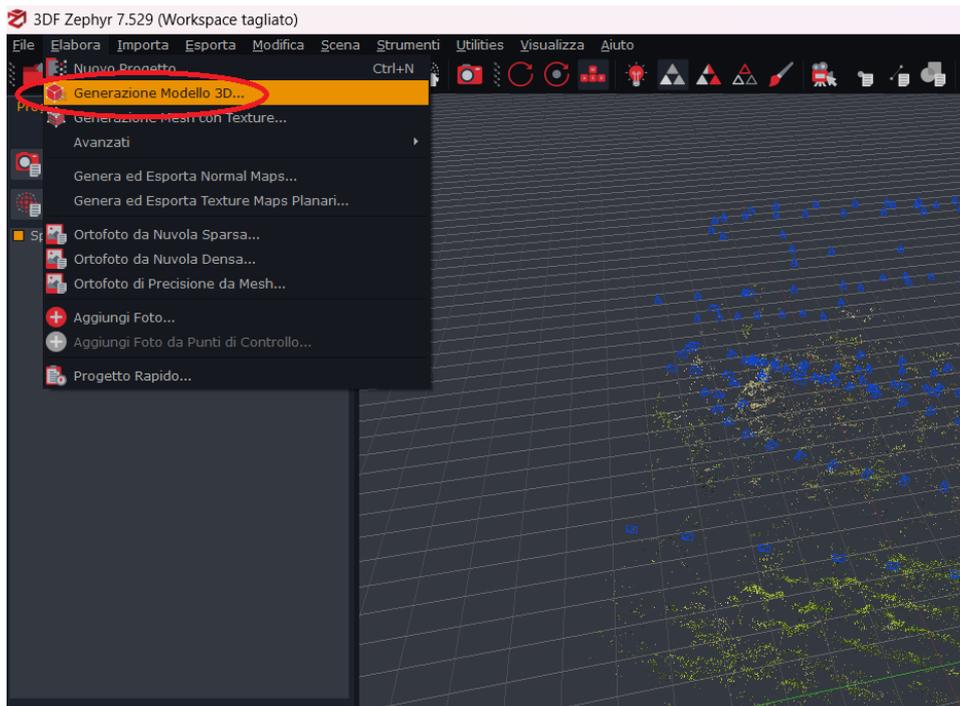


Figura 5.3.7 Screenshot del programma 3DF Zephyr che illustra come generare un modello 3D (Immagine creata dall'autore).

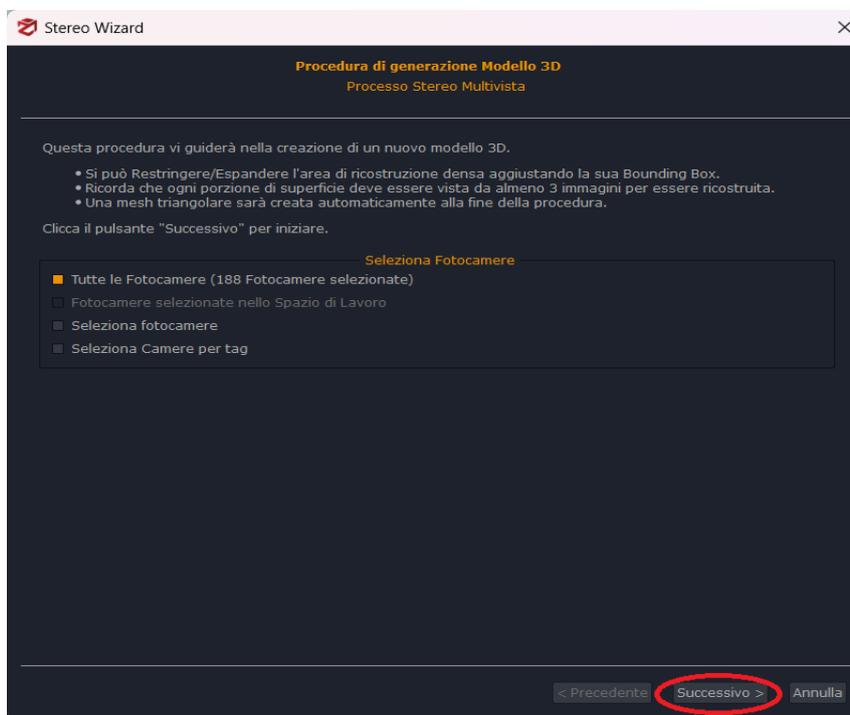


Figura 5.3.8 Primo passaggio della generazione di un modello 3D: Breve spiegazione e selezione delle fotocamere utili alla ricostruzione (Immagine creata dall'autore).

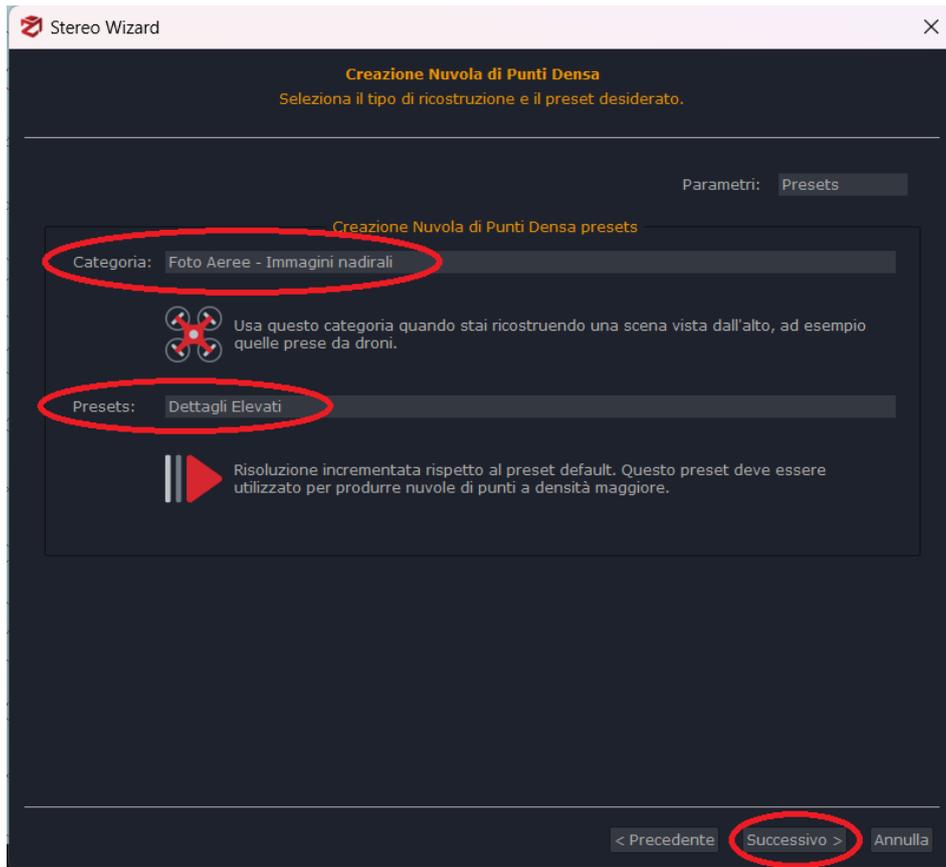


Figura 5.1.9 Secondo passaggio della generazione di un modello 3D: impostazione dei parametri per la generazione della nuvola di punti densa (Immagine creata dall'autore).

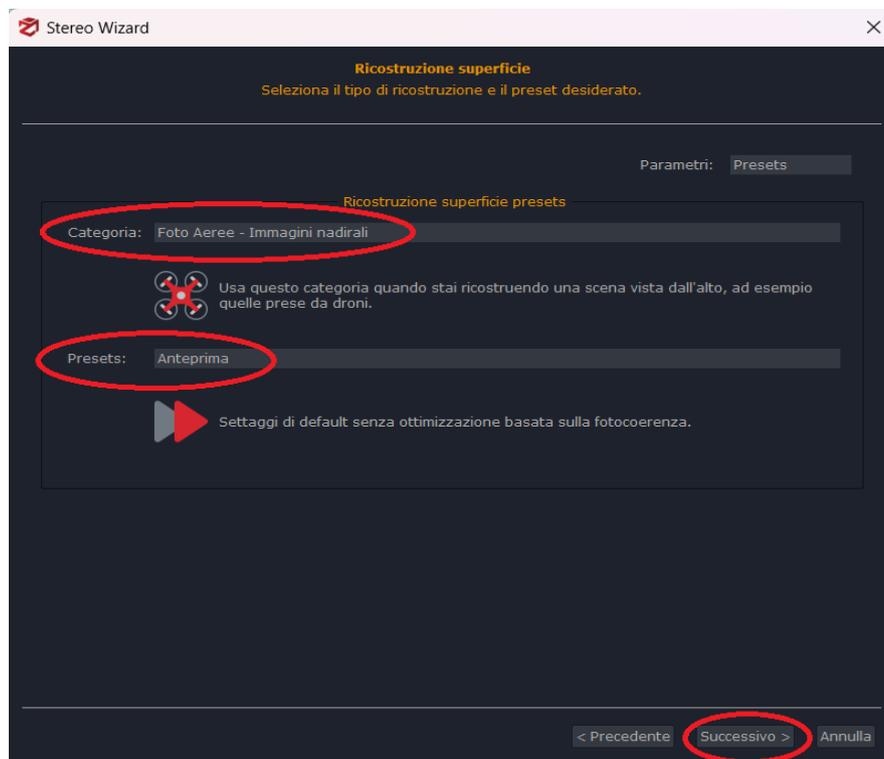


Figura 5.3.10 Terzo passaggio della generazione di un modello 3D: impostazione dei parametri per la generazione del modello 3D (Immagine creata dall'autore).

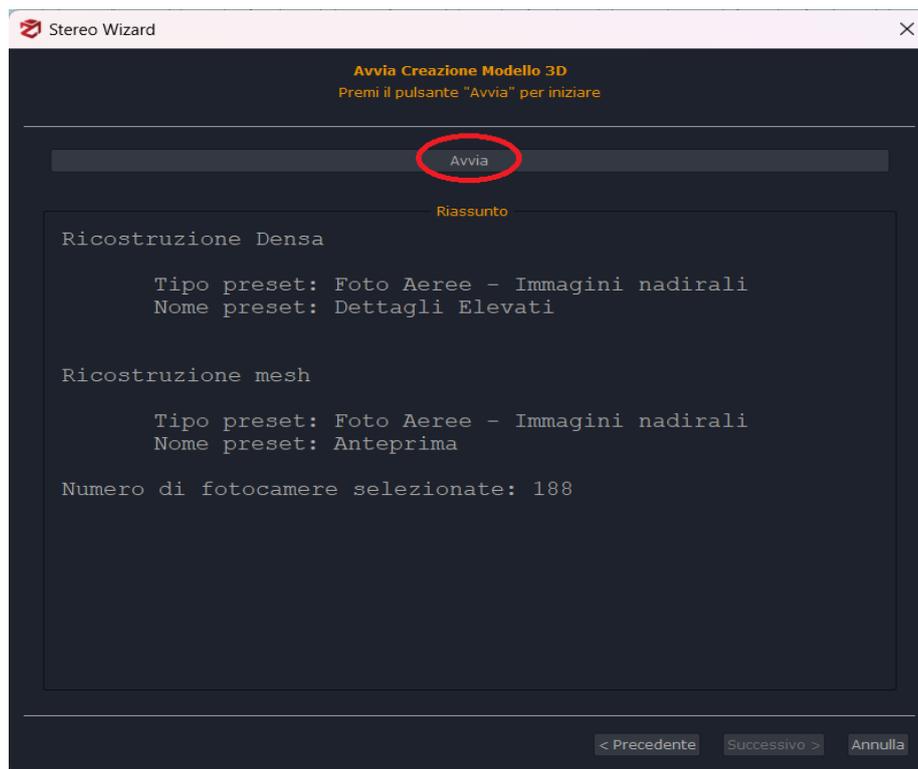


Figura 5.3.11 Quarto passaggio della generazione di un modello 3D: Riepilogo dei parametri impostati (Immagine creata dall'autore).

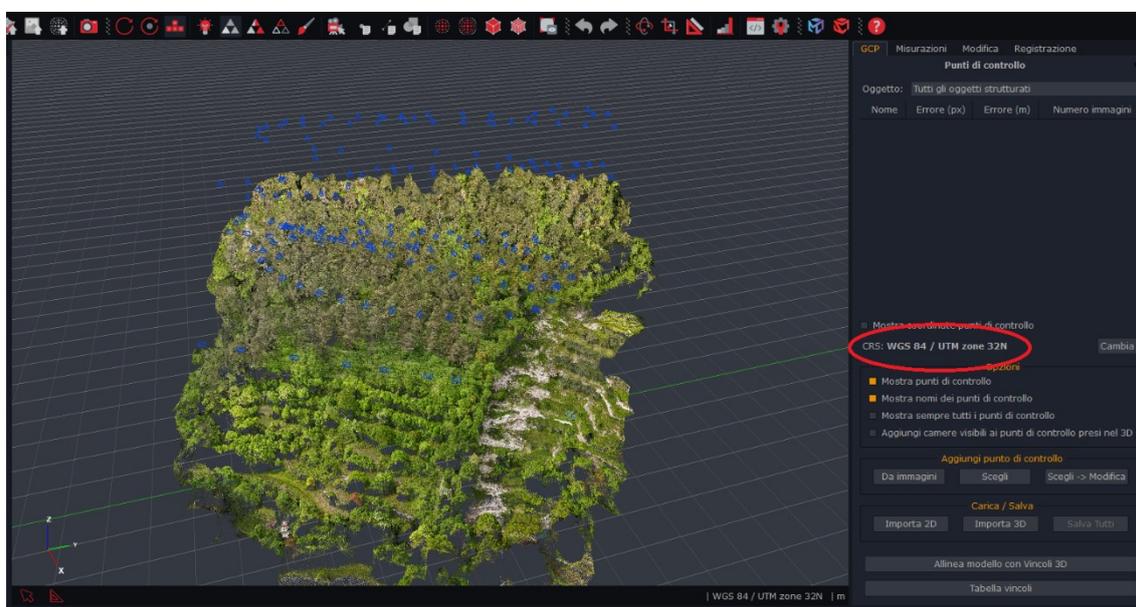


Figura 5.3.12 Impostazione opzionale de CRS del mio progetto (Immagine creata dall'autore).

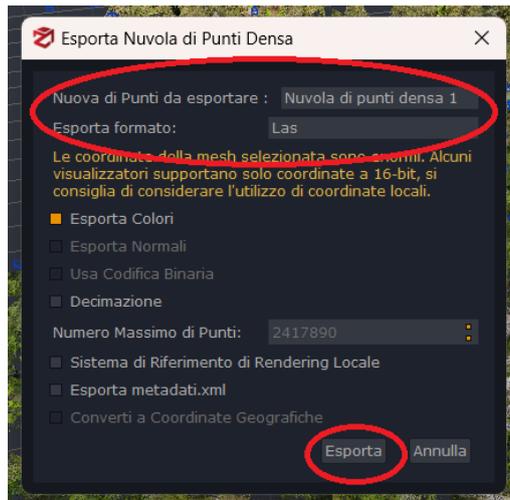


Figura 5.3.13 Impostazione della nuvola di punti da esportare e il formato con cui esportarla (Immagine creata dall'autore).

5.4 RStudio

RStudio è un ambiente di sviluppo integrato per R, un linguaggio di programmazione per il calcolo statistico e la grafica, disponibile con la GNU Affero General Public License versione 3, una licenza open source che garantisce la libertà di condividere il codice. È disponibile in due formati: RStudio Desktop e RStudio Server. RStudio Desktop è un'applicazione desktop normale, mentre RStudio Server funziona su un server remoto e permette di accedere a RStudio tramite un browser web.

Uno dei punti di forza di RStudio è il supporto per analisi riproducibili con le vignette di R Markdown. Queste permettono agli utenti di mescolare testo con codice in vari linguaggi (come R, Python, Julia, SQL, JavaScript, C, e altri). Inoltre, il programma offre un meccanismo per eseguire funzioni R interattivamente tramite il menu Addins, permettendo ai pacchetti di includere interfacce grafiche (GUI) per una maggiore accessibilità.

Come accennato, RStudio consente l'utilizzo dei pacchetti R che ampliano le potenzialità di calcolo dell'ambiente. Per la nostra elaborazione è stato utilizzato principalmente il pacchetto lidR, con il supporto dei pacchetti "Terra", "sf" e "raster". Questi pacchetti di supporto sono serviti per l'elaborazione di dati "SpatialRaster", la loro visualizzazione ed esportazione.

Il pacchetto lidR è progettato per la manipolazione e l'analisi dei dati LiDAR, ed offre uno strumento potente e flessibile per la modellazione tridimensionale della superficie terrestre, della vegetazione e delle strutture tridimensionali. Tra le sue funzionalità principali vi sono la lettura e la scrittura di dati LAS o LAZ, il filtraggio e la segmentazione di punti o nuvole di punti, l'elaborazione e l'analisi di modelli come DTM, DSM e CHM.

Questo pacchetto ci ha permesso di elaborare il LAS ottenuto dal portale della Provincia e la nuvola di punti derivata dalla fotogrammetria effettuata con il drone, per confrontarli e valutare la discrepanza tra le stime della fotogrammetria e quelle ottenute dai dati LiDAR della Provincia.

Durante l'elaborazione dei dati, è stata effettuata la classificazione dei punti delle nuvole come "terra" o "altro" (Figura 5.4.1), sia per il LAS della fotogrammetria sia per il LAS della Provincia Autonoma di Trento. Successivamente, per il LAS della Provincia, sono stati ricostruiti il DTM e

il DSM utilizzando i comandi "rasterize_terrain()" e "rasterize_canopy()" (Codice 5.4.2; Codice 4.4.3). Per la nuvola della fotogrammetria è stato ricostruito soltanto il DSM, poiché la fotogrammetria non consente di ottenere punti a terra sotto le chiome. Si presume inoltre che i punti a terra siano gli stessi per entrambi i rilievi, dato che la morfologia del suolo non cambia significativamente nel tempo, salvo eventi particolari.

In un secondo momento, sono stati calcolati ed esportati i CHM: per i dati della Provincia sottraendo il DTM dal DSM, e per la fotogrammetria sottraendo il DTM della Provincia dal DSM stimato (Codice 5.4.4).

I CHM ottenuti sono stati caricati nel programma QGIS per essere visualizzati e verificarne l'allineamento e l'aspetto simile. Le operazioni e le osservazioni effettuate sono descritte nel capitolo 5.5. Dal momento che i raster non sono risultati perfettamente allineati, abbiamo apportato le necessarie correzioni ai LAS di partenza ed abbiamo ripetuto le operazioni per ottenere DSM, DTM e CHM. In seguito, li abbiamo ricaricati su QGIS per assicurarci definitivamente dell'allineamento.

Con i raster allineati è stato possibile fare delle prime osservazioni: entrambi i CHM provenienti dai due rilievi mostrano delle zone mediamente più alte ed altre più basse.

Sapendo che il bosco è caratterizzato dal deperimento del piano dominante e dall'inserimento di carpini e ornielli nel piano dominato, abbiamo considerato le chiome mediamente più alte come aree dove è predominante il pino nero e le chiome mediamente più basse come aree dove il pino nero non è più dominante quindi con prevalenza di carpino e orniello.

Queste considerazioni sono state avvalorate dall'osservazione delle foto fatte per la fotogrammetria e dall'utilizzo della ricostruzione 3D del rilievo fotogrammetrico con l'applicazione della *mesh* con la texture delle foto fatte.

Effettuati gli allineamenti e le varie osservazioni sopra descritte, si è arrivati alla stima delle posizioni degli alberi, delle rispettive altezze e del volume estraibile potenziale, così da poter confrontare i due metodi di stima.

A partire dal CHM, è stato utilizzato l'algoritmo "locate_trees()" del pacchetto lidR, con il quale, impostando una *finestra* fissa, è stata ottenuta una tabella con le stime delle posizioni degli alberi e delle rispettive altezze (Codice 5.4.5). Successivamente, è stato impiegato l'algoritmo

“plot()” per visualizzare le posizioni degli alberi sul CHM con annessa una scala delle altezze delle piante, permettendoci di controllare il risultato.

Per rendere il rilievo più accurato abbiamo diviso in base all’altezza le piante del piano dominante e le piante non più dominate. La discriminante è stata stimata prendendo un valore medio tra le altezze degli individui che visivamente facevano parte delle piante del piano dominante o delle piante non più dominate (Figura 5.4.1).

Una volta fatta la distinzione dei due piani per entrambi i rilievi sono state assegnate le coordinate "X" e "Y" ed infine sono state esportate come file "csv" (Codice 5.4.6).

Successivamente i file csv esportati sono stati caricati su QGIS per confrontare i risultati e valutare le differenze tra i due metodi di stima, sia per i pini neri che per le latifoglie (Capitolo 5.5).

La stima è continuata seguendo quattro procedimenti paralleli: due stime per il rilievo LiDAR (pino nero e latifoglie) e due stime per il rilievo fotogrammetrico (pino nero e latifoglie).

A questo punto è stato possibile stimare i volumi di legno estraibile per entrambi i metodi di rilievo. Per questo passaggio il pacchetto lidR offre la possibilità di sfruttare diversi algoritmi dedicati alla segmentazione delle chiome. Nel nostro caso abbiamo utilizzato l’algoritmo “dalponte2016()” che ci è sembrato essere quello che si prestava meglio all’elaborazione.

Grazie ai parametri “th_tree” e “max_cr” è possibile calibrare la stima delle chiome in base alle caratteristiche generali del popolamento. Come ribadito più volte nel caso dell’area in esame, dalle immagini prese dal sorvolo drone, si nota come il pino nero abbia chiome molto ridotte che si concentrano sulla cima e si nota anche la presenza di un piano dominato con un forte insediamento di specie originarie (Capitolo 3.2). Queste osservazioni aiutano a impostare correttamente l’algoritmo che una volta lanciato, insieme alla funzione “segment_trees()”, restituisce dei poligoni rappresentativi delle chiome della specie presa in esame che abbiamo potuto visualizzare grazie alla funzione “plot()” (Codice 5.4.6).

Il passaggio successivo è stato quello di misurare le dimensioni delle chiome degli alberi attraverso la funzione “crown_metrics()” la quale ha aggiunto quest’ultime come nuovo attributo al file delle chiome segmentate. A questo punto è bastato esportare il file come

Shapefiles poligonale per elaborarlo su QGIS ed ottenere una stima della densità degli alberi e del volume estraibile.

```
library(lidR)
library(raster)
library(terra)
library(sf)
las<-readLAS("CLIP LAS PAT unito 2.las")
las <- classify_ground(las, algorithm = pmf(ws = 5, th = 1))
plot(las, color = "Classification", size = 3, bg = "white")
```

Codice 5.4.1 Importazione del LAS in RStudio (Immagine creata dall'autore).

```
#costruzione DTM
dtm <- rasterize_terrain(las, res = 1, algorithm = tin())
plot_dtm3d(dtm, bg = "white")
writeRaster(dtm, filename = "DTM, DSM, CHM/DTM PAT.tif", overwrite = TRUE)
```

Codice 5.4.2 Costruzione del DTM partendo dal LAS caricato e successiva esportazione (Immagine creata dall'autore).

```
#elaborazione DSM
dsm <- rasterize_canopy(las, 1, pitfree(subcircle = 0.2), pkg = "terra")
plot_dtm3d(dsm, bg = "white")
writeRaster(dsm, filename = "DTM, DSM, CHM/DSM PAT.tif", overwrite = TRUE)
```

Codice 5.4.3 Costruzione del DSM partendo dal LAS caricato e successiva esportazione (Immagine creata dall'autore).

```

chm <- dsm - dtm
plot(chm, main = "Canopy Height Model (CHM)")
writeRaster(chm, filename = "DTM, DSM, CHM/CHM PAT.tif", overwrite = TRUE)

```

Codice 5.4.4 Sottrazione del DSM e del DTM per costruire il CHM e successiva esportazione (Immagine creata dall'autore).

```

ttops <- locate_trees(chm, lmf(f))
col <- height.colors(50)
plot(chm, main = "CHM PITFREE", col = col); plot(sf::st_geometry(ttops), add = T, pch = 3)

```

Codice 5.4.5 Individuazione degli alberi per massimi locali (Immagine creata dall'autore).

```

#segmentazione delle chiome
algo <- dalponte2016(chm, ttops_filtered, max_cr = 6)
las <- segment_trees((las), algo) # segmento la nuvola di punti
plot((las), bg = "white", size = 4, color = "treeID") #visualizzo il risultato

```

Codice 5.4.6 Segmentazione delle chiome attraverso l'algoritmo "dalponte2016()" (max_cr: diametro massimo della chioma) (Immagine creata dall'autore).

```

crowns <- crown_metrics((las), func = .stdtreemetrics, geom = "convex")
plot(crowns["convhull_area"], main = "Crown area (convex hull)")
plot(sf::st_geometry(crowns), reset = FALSE)

```

Codice 5.4.7 Stima dell'estensione delle aree delle chiome degli alberi (Immagine creata dall'autore).

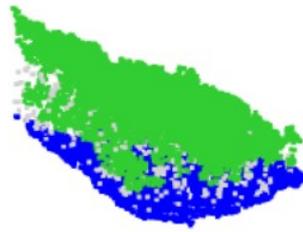


Figura 5.4.1 Risultato della classifica del LAS. I punti blu sono stati classificati come "punti terra", mentre i punti verdi e grigi sono classificati come "altro" (Immagine creata dall'autore).

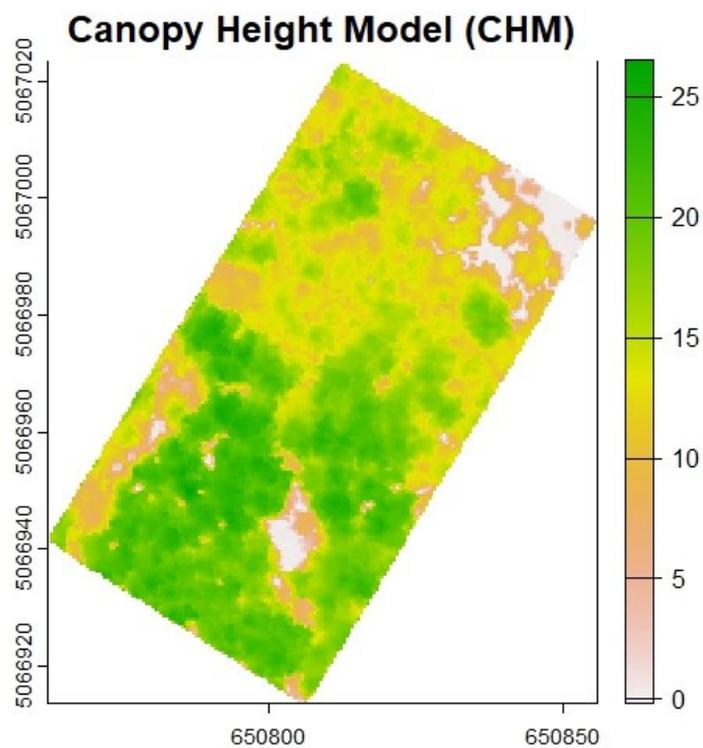


Figura 5.4.1 Visualizzazione del CHM con annessa scala cromatica con le altezze di ogni pixel (Immagine creata dall'autore).

5.5 QGIS

I Sistemi informatici geografici (GIS, Geographic Information System) sono sistemi che vanno ad elaborare banche dati, immagini, informazioni etc. attribuendogli una posizione e un orientamento geografico con l'obiettivo di ottenere delle elaborazioni descrittive all'interno di un'area di interesse. Si potrebbero definire altrimenti come “combinazione di *hardware*, *software*, risorse umane e procedure che hanno lo scopo di acquisire, gestire e analizzare dati spaziali referenziati (Goodchild & Kemp, 1970).

Sono tecnologie che negli ultimi anni hanno visto una forte evoluzione tecnologica che gli ha permesso di ampliare i settori di possibile impiego: geologia, urbanistica e pianificazione territoriale, monitoraggio ambientale, beni culturali, archeologia, agronomia e gestione forestale, studi sociosanitari etc.

Questi sistemi hanno permesso il passaggio dalla cartografica classica, descrittiva e raffigurativa dell'ambiente attorno, a un approccio analitico e quantitativo. Tale passaggio è stato favorito dall'ammontare sempre maggiore dei dati, dallo sviluppo delle tecnologie che hanno permesso di perfezionare gli strumenti a nostra disposizione e dall'accettazione culturale della complessità spaziale del mondo in cui viviamo.

Grazie ai GIS abbiamo abbandonato la cartografia che indica semplicemente le posizioni e le forme delle cose, artificiali o naturali che siano, e siamo passati ad una cartografia molto più analitica che delinea “le caratteristiche quantitative di ‘cose’ e ‘fenomeni’, le loro correlazioni, per rintracciare una possibile spiegazione e quindi formulare leggi di comportamento dei fenomeni stessi” (Lodovisi & Torresani, 1996).

Oggigiorno i *software* GIS disponibili sono molti, da quelli commerciali a pagamento a quelli *opensource* che, come detto in precedenza, negli anni si sono evoluti distinguendosi per versatilità, performance e settore di utilizzo. Tra i tanti programmi a disposizione QGIS è uno degli *opensource* di maggiore impiego. Famoso per la plasticità e il suo utilizzo semplice e intuitivo, QGIS permette un utilizzo in moltissimi campi grazie all'ausilio di algoritmi aggiuntivi come GDAL, SAGA e GRASS. La sua versatilità è dovuta proprio grazie al suo essere gratuito e completamente disponibile, la licenza GNU (General Public Licence) permette di accedere fino al codice sorgente del

programma e di adattarlo facilmente ad ogni esigenza. Questo fa in modo che il programma ad oggi veda una grossa comunità di utenti che hanno contribuito a rendere il programma sempre più stabile e versatile.

Anche enti pubblici si avvalgono spesso della plasticità di questo programma, come la Provincia Autonoma di Trento, la quale ha sviluppato un plug-in di nome STEM che è sfruttabile non solo come plug-in ma anche da portale web, come abbiamo illustrato nel capitolo 5.2.

Grazie alla disponibilità di numerosi strumenti, QGIS è stato utile per sovrapporre e confrontare i dati ottenuti dalle elaborazioni di RStudio, consentendoci di ottenere risultati il più confrontabili possibile.

La prima operazione effettuata è stata l'allineamento della nuvola di punti iniziale utilizzando punti noti dei due CHM ottenuti in precedenza (Capitolo 5.4). I due raster, quello della Provincia e quello della fotogrammetria, sono stati caricati e sovrapposti per verificare che fossero allineati e utilizzassero lo stesso sistema di riferimento. Dalla comparazione abbiamo notato un disallineamento dei CHM che non ha permesso di confrontare la stima degli alberi. Per risolvere il problema, abbiamo creato un layer che riportava i punti noti punti del CHM della Provincia e quelli della fotogrammetria. Successivamente è stata misurata la distanza tra i punti noti e attraverso un modulo dedicato di RStudio i LAS originali sono stati riallineati.

La correzione dei LAS ha permesso di rielaborare i CHM con l'allineamento corretto, consentendo il successivo confronto tra le posizioni degli alberi stimati dai due LAS con RStudio (Capitolo 5.4). Una volta ottenute le posizioni degli alberi, i file "csv" esportati sono stati caricati come testo delimitato, specificando al programma il delimitatore delle colonne e le colonne delle coordinate.

Caricati i layer, è stata verificata la somiglianza delle quattro stime. Per fare questo è stato sufficiente unire il vettore degli alberi rilevati con LiDAR con quello degli alberi della fotogrammetria per ottenere un layer che mostrasse la distanza tra la posizione di un albero stimato dalla fotogrammetria e l'albero più vicino stimato con LiDAR.

Questi due nuovi layer hanno permesso di classificare gli alberi della fotogrammetria in base alla distanza dagli alberi rilevati con LiDAR e di verificare il numero di alberi rilevati dalla fotogrammetria distanti più di 3 metri dagli alberi stimati con il LiDAR. È stato considerato un

marginale di errore di 3 metri perché per distanze maggiori l'errore è troppo grande per non considerare gli alberi come due individui distinti.

Ottenute le posizioni degli alberi e verificata la correlazione tra i due rilievi, il passaggio successivo è quello di stimare il *DBH* (Diameter Breast Height) per ogni albero a partire dall'altezza della pianta e il diametro della chioma (Balenović, Jazbec, Marjanović, Paladinić, & Vuletić, 2015).

Per fare questo è bastato importare lo Shapefile ottenuto dall'elaborazione di RStudio con le chiome degli alberi (Capitolo 5.4), trovare il diametro di ogni chioma attraverso il *calcolatore dei campi* ed applicare la formula per la stima del *DBH* (Equazione 4.5.1).

Per calcolare il volume di legna estraibile per ogni pianta è stato necessario associare ad ogni chioma l'altezza della pianta attraverso lo strumento di processing "Unisci attributi per posizione" così da poter avere in un unico layer le due variabili, altezza e *DBH*, necessarie per applicare l'equazione della Provincia dedicata al pino nero per la stima del volume estraibile (Equazione 4.5.2), escludendo i *DBH* minori di 17,5 m.

Ottenuta l'unione degli attributi, abbiamo applicato l'equazione di stima del volume e abbiamo ottenuto la sommatoria dei volumi all'ettaro. Quest'ultima permette di confrontare i dati con il piano di assestamento e verificare che la stima sia verosimile.

$$\sqrt{DBH} = \beta_0 + \beta_1 \cdot CD + \beta_2 \cdot H$$

Equazione 5.5.1 Formula per la stima del diametro del tronco ad altezza petto uomo (DBH) partendo dal diametro della chioma (CD) e dalla altezza della pianta (H). $\beta_0 = 2,225$; $\beta_1 = 0,377$; $\beta_2 = 0,099$ (Balenović, Jazbec, Marjanović, Paladinić, & Vuletić, 2015).

$$a \cdot (DBH - d_0)^b \cdot H^c$$

Equazione 5.5.2 Modello a doppia entrata per la cubatura del pino nero secondo le tariffe della Provincia Autonoma di Trento. H= altezza; DBH= diametro del tronco ad altezza petto d'uomo; a= 0,000128924310780902; b= 1,76308589457555; c= 0,938444909041497; d0= 3.69465 (Scrinzi, Galvagni, & Marzullo, 2010).

6. Risultati e discussioni

Come anticipato nel capitolo 5.5. ogni elaborazione fatta con RStudio è stata esportata nell'ambiente QGIS, dove è stata elaborata e successivamente tematizzata per rendere più facilmente interpretabili i risultati. Successivamente i risultati ottenuti sono stati messi a confronto tra loro e infine ne è stata verificata l'attendibilità comparandoli con i dati forniti dal piano di assestamento di Avio.

6.1 Presentazione dei risultati

Nel capitolo 3.2 è stato già esposto che, dal punto di vista evolutivo del bosco, la presenza del pino nero si trova verso la fine del suo ciclo evolutivo. La sua origine, non tipica della Vallagarina, ha impedito a questa specie di rinnovarsi facilmente, portandola a scomparire e a lasciare spazio a specie autoctone che occupavano quei pendii prima della guerra e della sua introduzione.

Proprio per questo, come spiegato nel capitolo 5.4, per entrambi i metodi di rilievo sono state effettuate due stime: una per il piano dominante e una per il piano non più dominato (Figura 6.1.1 e 6.1.2). Successivamente, queste stime sono state messe a confronto calcolando gli indici di incidenza tra i due rilievi.

Per fornire una rappresentazione chiara della distribuzione dell'errore lungo l'area campione, riportiamo una mappa con le posizioni degli alberi in funzione della distanza tra le piante stimate da LiDAR e quelle stimate da fotogrammetria (Figura 6.1.1 e 6.1.2). Ricordiamo inoltre che, come spiegato nel capitolo 5.5, abbiamo considerato 3 metri di distanza come valore massimo per poter considerare due individui come un unico individuo.

Per quanto riguarda il piano dominante, composto da pino nero, la stima di correlazione è pari all'83,87%. Invece, la stima di correlazione del piano non più dominato, che sappiamo essere rappresentato per la maggior parte da latifoglie, è del 78,46%.

Entrambi i coefficienti di correlazione sono relativamente bassi, ma bisogna considerare il tempo trascorso tra i due rilievi e le caratteristiche dei soggetti rilevati. Per quanto concerne la

correlazione tra le posizioni dei pini neri, è importante notare che tra il rilievo LiDAR e il rilievo fotogrammetrico sono passati diversi anni. Durante questo periodo, il bosco ha subito la morte di diversi individui e anche interventi da parte del proprietario.

La perdita di questi individui comporta che nella stima LiDAR compaiano alberi che nella stima fotogrammetrica non esistono più, diminuendo così l'indice di correlazione tra le due stime. Questo indice sarebbe significativamente più alto se questi alberi fossero ancora presenti.

Per quanto concerne invece il problema del coefficiente di correlazione delle latifoglie, questo è attribuibile a una caratteristica intrinseca di queste tipologie di piante. Il portamento espanso tipico delle latifoglie conferisce loro un aspetto tendenzialmente globoso, dovuto all'incapacità di mantenere una cima definita. Questo implica che, quando si applicano algoritmi per l'individuazione delle cime in una nuvola di punti, il medesimo individuo o punti diversi della chioma possono essere identificati più volte.

Inoltre, anche per le latifoglie si osserva una diminuzione del numero di individui nel corso degli anni. Osservando i modelli digitali delle chiome (CHM) derivati dai due rilievi, è possibile notare la scomparsa di circa una decina di piante nella parte superiore destra.

La difficoltà di identificare una cima precisa per la chioma delle latifoglie, combinata con la variazione della popolazione nel tempo, porta a una stima poco accurata per determinare se gli individui di latifoglie stimati con il metodo fotogrammetrico siano gli stessi individuati con il metodo LiDAR.

Come le posizioni degli alberi sono state stimate distinguendo tra pino nero e latifoglie, analogamente le chiome sono state classificate secondo questo principio, come illustrato nelle figure 5.1.3 e 5.1.4.

Sovrapponendo la segmentazione delle chiome ottenuta dai due metodi di stima ai rispettivi CHM si può avere l'impressione di non aver considerato sezioni significative della chioma. Questo perché le condizioni ambientali in cui si trova questo bosco non sono ottimali ed è una caratteristica tipica del pino nero che si trova in una situazione di stress l'eliminazione della chioma non più funzionale alla crescita (Bocchini, 2021).

Questo comportamento ha portato, negli anni, a un graduale innalzamento della chioma durante la fase di crescita, per poi ridursi progressivamente nella fase senescente, con il rallentamento della crescita. Di conseguenza, si osservano spesso spazi che permettono di visualizzare il piano dominato, composto da individui in fase giovanile, non ancora utilizzabili e difficilmente stimabili.

Per quanto riguarda i volumi, si può osservare dalle figure 5.1.5 e 5.1.6 che, sia per le latifoglie sia per i pini, i due metodi di stima non si discostano significativamente: per il metodo LiDAR la variabilità dei risultati ottenuti è di $0,2327 \text{ m}^3$, mentre per il metodo della fotogrammetria è di $0,1674 \text{ m}^3$. Entrambe le variabilità sono molto basse e, se è vero che la stima del bosco attraverso metodologia LiDAR è considerata un ottimo strumento, allora anche la fotogrammetria può essere considerata uno strumento molto valido.

Queste osservazioni si riferiscono specificamente alla stima del pino nero. Se si confronta la precisione di stima per le latifoglie, è evidente che il rilievo LiDAR, con una precisione di $0,0357 \text{ m}^3$, si presta meglio alla stima del legno estraibile rispetto al metodo fotogrammetrico, che riporta una variabilità di $0,0410 \text{ m}^3$. Sebbene entrambi i valori di variabilità siano molto bassi e suggeriscano una stima molto precisa, tali osservazioni sono invalide perché una delle principali difficoltà con questi metodi è l'identificazione effettiva del corno centrale delle latifoglie.

Come già ribadito in questo capitolo, il tipico portamento espanso delle latifoglie conferisce a queste piante un aspetto che non permette una stima precisa delle posizioni, rischiando di stimare due individui che nella realtà sono uno solo. Inoltre, le chiome delle latifoglie possono avvicinarsi tra loro a tal punto da risultare unite nei rilievi aerei. Non riuscire a stimare correttamente la dimensione di una chioma rappresenta un problema reale per un metodo che utilizza questa dimensione come passaggio intermedio nella stima del volume estraibile, rischiando di sovrastimare la pianta.

La stima volumetrica delle latifoglie è ancora una delle problematiche maggiori per questi metodi. In questi anni sono stati costruiti modelli allometrici che hanno riportato un'ottima precisione ma applicabili solo a piante isolate (Schindler, Seifert, Sheppard, & Morhart, 2023).

In termini quantitativi, si può parlare della stima totale di volume estraibile ottenuta da entrambi i metodi. Per quanto riguarda la stima del rilievo LiDAR, abbiamo rilevato un ammontare di 94,37 m³ di legna estraibile nella nostra area, che rapportato all'ettaro sono 188,75 m³/ha di legna estraibile. Per il metodo fotogrammetrico è risultato esserci una diminuzione del volume stimato, passando dai 94,37 m³ del rilievo LiDAR ai 73,77 m³ (147,54 m³/ha) secondo il metodo fotogrammetrico. Questa discrepanza del 22% è dovuta, come spiegato in precedenza, al tempo trascorso tra i due rilievi, tempo durante il quale l'area campione ha visto la morte di diversi individui e una utilizzazione da parte del proprietario che giustificano la variazione di stima.

Per quanto riguarda l'ammontare del volume estraibile delle latifoglie, abbiamo ottenuto un volume complessivo di 54,88 m³ per la stima fatta con il metodo della fotogrammetria e un quantitativo di 64,07 m³ per la stima con il metodo LiDAR. Tuttavia, i valori esposti per le latifoglie non hanno alcuna valenza in quanto, come detto più volte in questo capitolo, la stima del volume di legna estraibile dalle latifoglie non ha una precisione tale da poter essere considerata attendibile, a causa dell'imprecisione nella rilevazione della posizione degli individui e dell'impossibilità di stimare la reale ampiezza delle chiome delle piante.

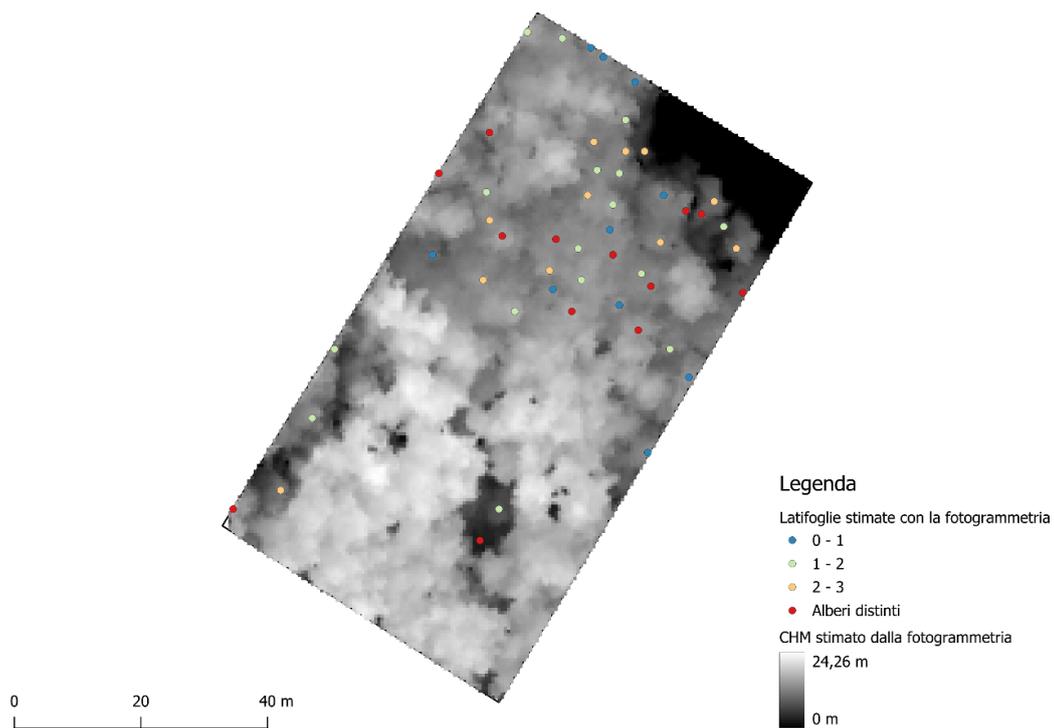


Figura 6.1.1 Visualizzazione delle latifoglie stimate attraverso la fotogrammetria. Le piante sono state classificate in base alla distanza dalle rispettive del rilievo ottenuto dal LiDAR (Immagine creata dall'autore).

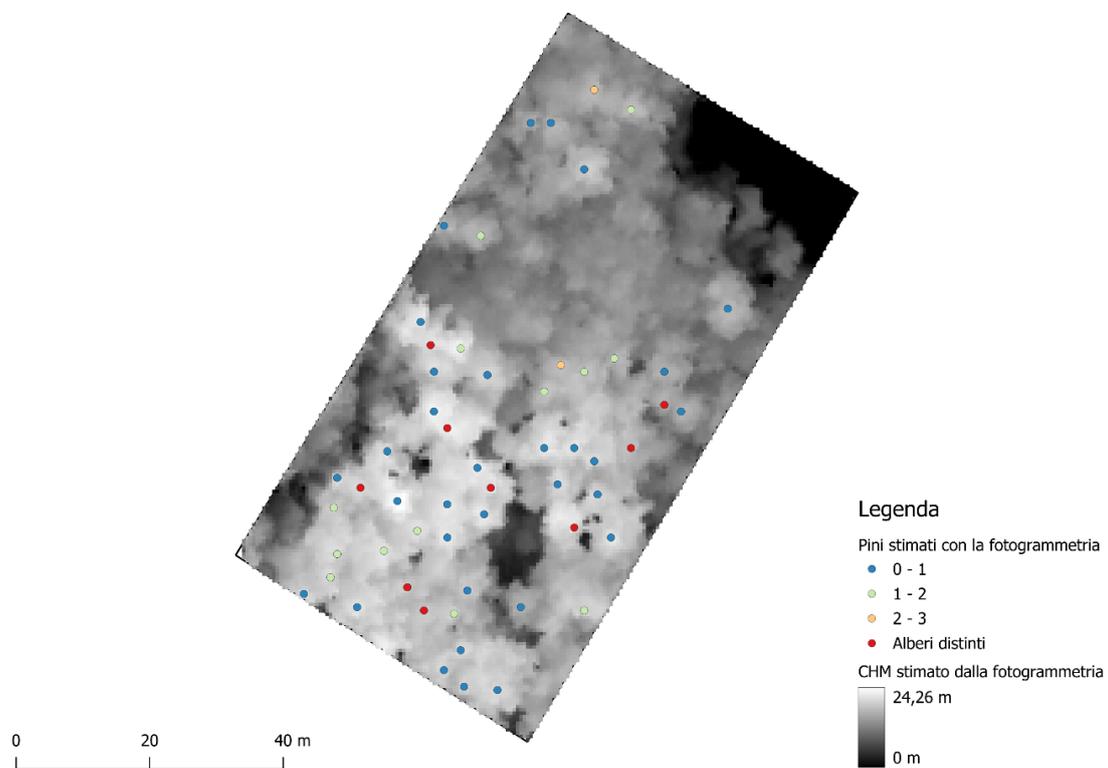


Figura 6.1.2 Visualizzazione dei Pinus nigra stimate attraverso la fotogrammetria. Le piante sono state classificate in base alla distanza dalle rispettive del rilievo ottenuto dal LiDAR (Immagine creata dall'autore).

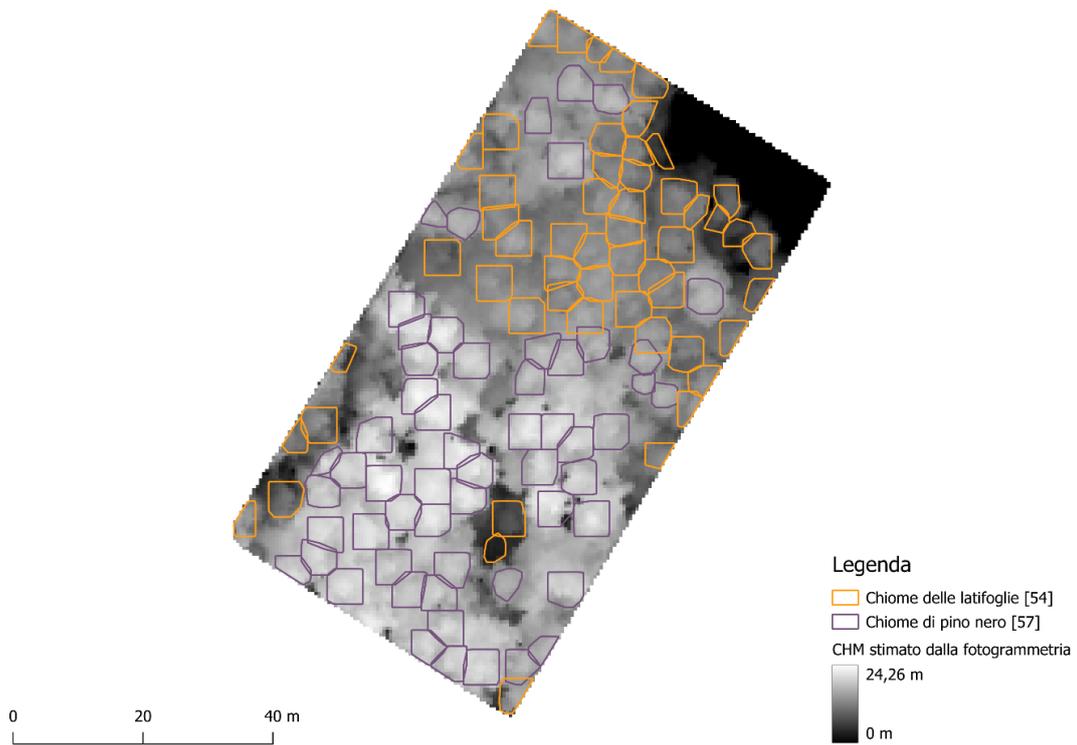


Figura.6.1.3 Visualizzazione delle chiome degli alberi divisi per latifoglie e pino nero attraverso CHM stimato dalla fotogrammetria. Gli alberi stimati sono stati divisi per latifoglie e *Pinus nigra* (Immagine creata dall'autore).

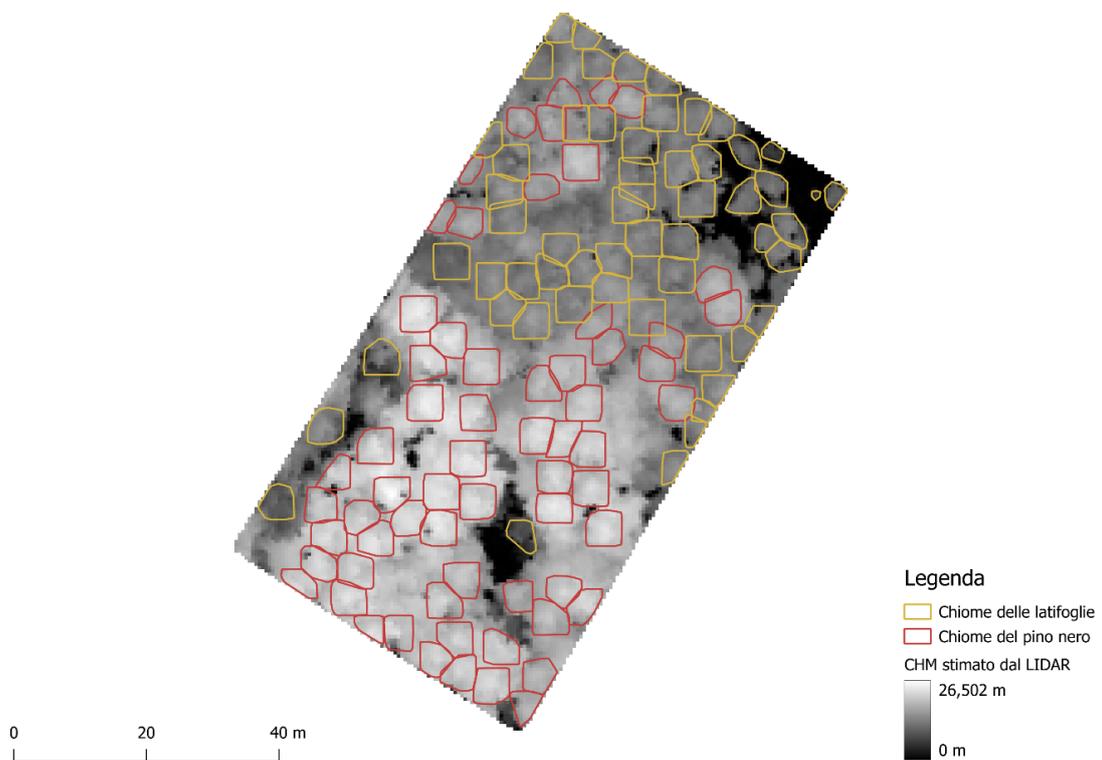


Figura 6.1.4 Visualizzazione delle chiome degli alberi divisi per latifoglie e pino nero attraverso CHM stimato dal LiDAR. Gli alberi stimati sono stati divisi per latifoglie e *Pinus nigra* (Immagine creata dall'autore).

Volumi delle latifoglie stimate con entrambi i metodi di stima

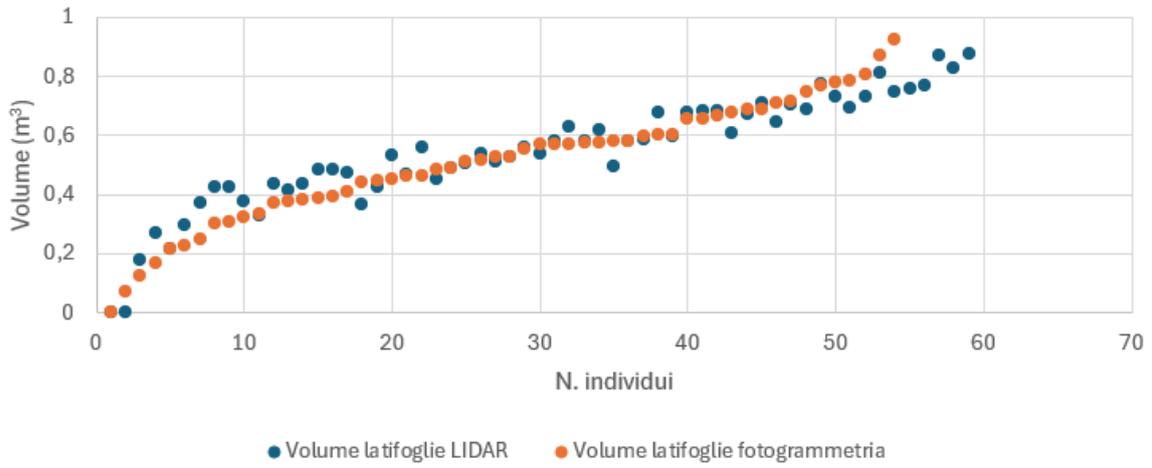


Figura 6.1.5 Confronto della distribuzione dei volumi stimati per le latifoglie con entrambi i metodi di rilievo (Immagine creata dall'autore).

Volumi del *Pinus nigra* stimati con entrambi i metodi di stima

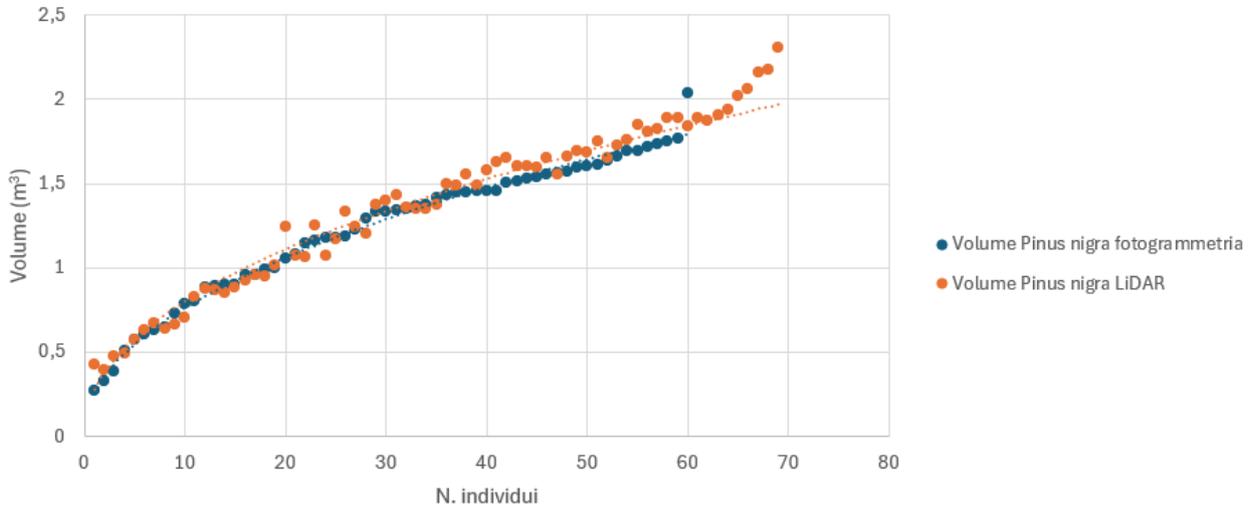


Figura 6.1.6 Confronto della distribuzione dei volumi stimati per il *Pinus nigra* con entrambi i metodi di rilievo (Immagine creata dall'autore).

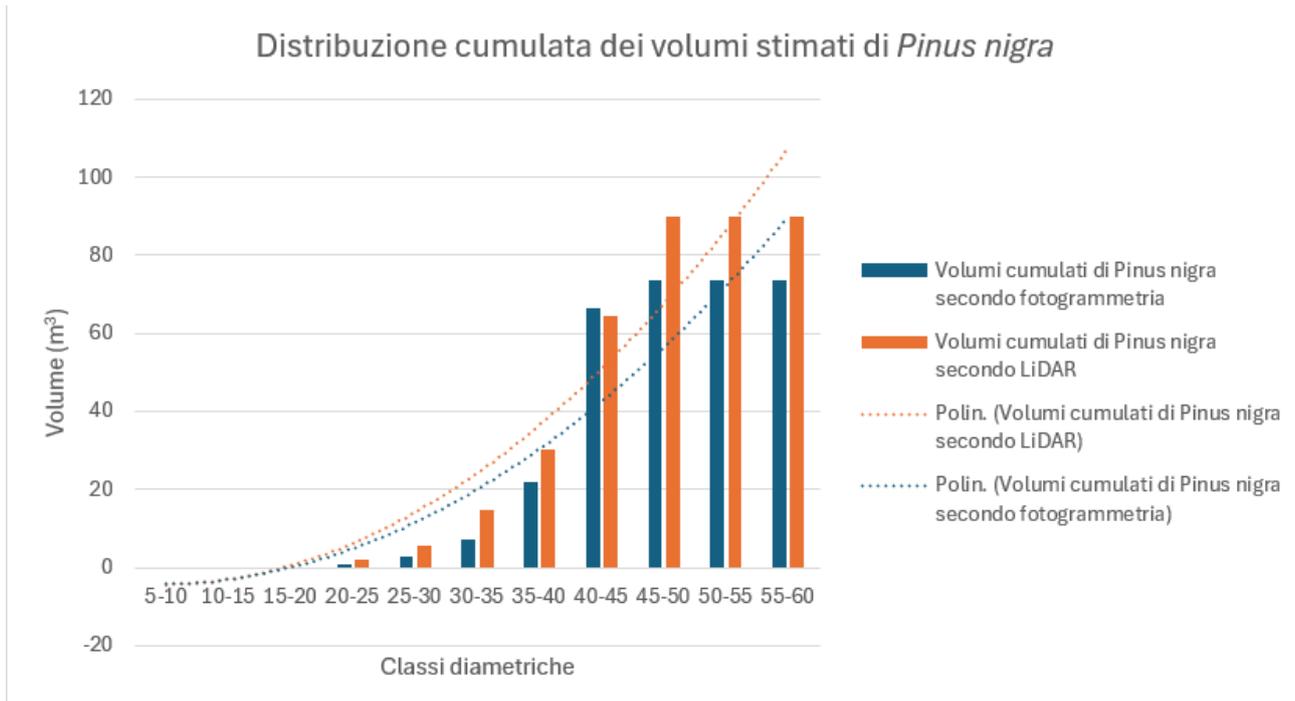


Figura 6.1.7 Confronto dei volumi cumulati stimati per il *Pinus nigra* dai due metodi di rilievo con entrambi i metodi di rilievo (Immagine creata dall'autore).

7. Conclusioni

Come abbiamo evidenziato nel corso di questo studio, la stima di un bosco attraverso voli aerei costituisce uno strumento utile e sempre più diffuso. La metodologia LiDAR, sebbene richieda una strumentazione dispendiosa e complessa, risulta essere estremamente versatile. D'altro canto, la fotogrammetria necessita di una strumentazione più semplice che, come abbiamo potuto osservare, permette comunque una ricostruzione accurata.

Uno dei punti di forza della fotogrammetria è la possibilità di effettuare osservazioni del popolamento direttamente dalle riprese aeree, facilitando così la comprensione dei risultati delle elaborazioni. Inoltre, la ricostruzione 3D rappresenta uno strumento utile, poiché consente di ottenere una rappresentazione del popolamento e di osservare la sua struttura e composizione da diverse angolazioni.

Tuttavia, uno dei principali limiti della fotogrammetria è l'incapacità di restituire una ricostruzione attendibile del profilo del suolo. Tale profilo è un elemento fondamentale per la stima delle altezze delle piante. In assenza di supporto LiDAR, l'unico modo per ottenere questa ricostruzione è avvalersi dei geoportali provinciali, regionali o nazionali. Purtroppo, non tutti gli enti pubblici sono in grado di fornire questi dati o di garantirne una risoluzione sufficientemente alta. Gli algoritmi di ricostruzione offerti dai programmi GIS possono aumentare la risoluzione, ma difficilmente le ricostruzioni raggiungono la precisione desiderata.

Nonostante le difficoltà nel confrontare due rilievi effettuati in momenti diversi, da questo studio emerge che, dal punto di vista qualitativo, se la ricostruzione 3D del bosco viene eseguita accuratamente, la fotogrammetria diventa uno strumento valido la cui precisione risulta paragonabile a quella ottenuta con il LiDAR.

Dal punto di vista quantitativo, non possiamo affermare con certezza di aver ottenuto dati soddisfacenti per la stima del volume. Con ulteriori approfondimenti, la variazione di volume tra i due metodi di rilievo potrebbe risultare una stima dell'utilizzazione del bosco. Ciò potrebbe portare all'impiego della fotogrammetria per controlli rapidi di utilizzazione.

Bibliografia

- Agnoletti, M. (1998). *Segherie e foreste nel Trentino. Dal Medioevo ai giorni nostri*. San Michele all'Adige (Trento): Museo degli usi e costumi della gente trentina.
- Attene, G. B. (2022). *Rilievi topografici da drone e stampa in 3D*. Palermo: GRAFILL S.r.l.
- Baldo, M., & Servizio Foresta e Fauna. (2022, 02 16). *Piano di gestione forestale aziendale dei beni silvo-pastorali (periodo validità 2017-2036)*. Avio: Servizio foreste e fauna.
- Balenović, I., Jazbec, A., Marjanović, H., Paladinić, E., & Vuletić, D. (2015). Modeling Tree Characteristics of Individual Black Pine (*Pinus nigra* Arn.) Trees for Use in Remote Sensing-Based Inventory. *mdpi*, 492-509.
- Bocchini, V. (2021). *Analisi dendroecologica su pino nero (Pinus nigra Arn.) e orniello (Fraxinus ornus L.) nella foresta demaniale delle Cesane (PU)*. Ancona: Università politecnica delle Marche.
- Bolognani, R., & Servizio foreste e fauna. (2014). *Piano di gestione forestale aziendale dei beni silvo-pastorali (periodo validità 2012-2021)*. Ala: Servizio foreste e fauna.
- Corona, P., Marchi, E., Chirici, G., & Marra, E. (2022). *Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia*. Roma: Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA).
- CREA. (2021, Settembre 29). *AMBIENTE: FORESTE PER IL CLIMA - DATI NUOVO INVENTARIO NAZIONALE FORESTALE E DEI SERBATOI DI CARBONIO CARABINIERI - ALL4CLIMATE - MILANO 29-30 SETTEMBRE*. Tratto da CREA - Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria: <https://www.crea.gov.it/-/ambiente-foreste-per-il-clima-dati-nuovo-inventario-nazionale-forestale-e-dei-serbatoi-di-carbonio-carabinieri-all4climate-milano-29-30-settembre#:~:text=L'Inventario%20Nazionale%20delle%20Foreste,a%20livello%20nazionale%20e%20re>
- Cristofolini, F. (1981, 2). Trattamento e conversione in altofusto dei cedui trentini. *Dendronatura. Semestrale dell'associazione Forestale del Trentino*, p. 50-62.
- EASA. (2014, Novembre 6). *Certified Category - Civil Drones*. Tratto da EASA : <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones>
- ENAC. (2024, Maggio 14). *Categoria specifica - Specific Category*. Tratto da Ente Nazionale per l'Aviazione Civile: <https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/droni/categoria-specifica-specific-category#:~:text=La%20Categoria%20Specifica%20%C3%A8%20stata,procedure%20di%20autorizzazione%20pi%C3%B9%20rigorose>.
- Federforeste. (2023, Luglio 25). *Presentazione del volume Foreste D'Italia*. Tratto da Federforeste: <https://www.federforeste.it/news/presentazione-del-volume-foreste-ditalia/>
- Goodchild, M. F., & Kemp, K. K. (1970, June 1). A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, 13(6), p. 377-387.

- Grassi, S., Santarsiero, D., & Sirigu, M. (2019). *Guida rapida alla fotogrammetria 3D con i droni*. Torrazza Piemonte: myGEO Edizioni.
- IBM. (s.d.). *What is LiDAR?* Tratto da IBM: <https://www.ibm.com/topics/lidar>
- Lodovisi, A., & Torresani, S. (1996). *Storia della cartografia*. Bologna: Patron.
- Losito, G. (2016). *Basi di dati fotogrammetriche e cartografiche per la formazione di GIS*. Saarbrücken: Edizioni Accademiche Italiane.
- MathWorks. (2023, settembre 25). *Introduction to Lidar*. Tratto da MathWorks: <https://it.mathworks.com/help/lidar/ug/lidar-processing-overview.html>
- Meschieri, W. (2008, 10 06). Unità T2 - La presa dei fotogrammi.
- Meschieri, W. (2009, 06 30). Unità I2 - Rilievo 3D con i Laser scanner.
- Micieli, M. (2019). *Aerofotogrammetria con i droni*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2012, Novembre). *Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications*. Tratto da Digital Coast: <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/training/lidar-101.html>
- Palmerini, E., Biasiotti, M. A., & Aiello, G. F. (2018). *Diritto dei droni regole, questioni e prassi*. Milano: Giuffrè Francis Lefebvre.
- Podest, Erika. (2021, marzo 16). *Fundamentals of LiDAR and its Applications & Accessing and Analyzing*. 23. Pasadena, California, USA.
- Roussel, J.-R., Auty, D., De Boissieu, F., & Meador, A. S. (2024, Marzo 5). *lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications*. Tratto da The Comprehensive R Archive Network: <https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/lidR.pdf>
- Salvador, I., & Avanzini, M. (2015, 1). I boschi delle Valli del Leno (Trentino meridionale): evoluzione storica del rapporto tra ambiente naturale ed attività antropica. *Dendronatura*, p. 55-72.
- Schindler, Z., Seifert, T., Sheppard, J. P., & Morhart, C. (2023, luglio 21). Allometric models for above-ground biomass, carbon and nutrient content of wild cherry (*Prunus avium* L.) trees in agroforestry systems. *Annals of Forest Science*.
- Scrizzi, G., Galvagni, D., & Marzullo, L. (2010). *I nuovi modelli dendrometrici per la stima delle masse assestamentali in provincia di Trento*. Provincia autonoma di Trento: Servizio Foreste e Fauna.
- Servizio Foreste e Servizio Faunistico. (2022, agosto 01). *STEM Sistema per il Telerilevamento e il Monitoraggio del territorio*. Tratto da Servizio Foreste e Servizio Faunistico: <https://forestefauna.provincia.tn.it/content/download/15825/261061/file/guida%20installazione%20STEM.pdf>
- Stefanelli, A. (1967). *Il pino nero nelle alpi orientali*. Udine: Tipografia arti grafiche friulane.
- Torreggiani, L. (2024). Gestione forestale collaborativa: dalla carnia una proposta per superare abbandono e frammentazione dando nuovo valore ai boschi locali. *Il Dolomiti*.
- Venanzi, R., & Picchio, R. (2021). Precision forest harvesting: Wood extraction planning and validation of GIS models. *European Biomass Conference and Exhibition*, (p. 32-35).

Veneto Agricoltura – Centro forestale di Verona. (2008). *Foresta Demaniale Regionale Valdadige*.
Tratto da Veneto Agricoltura:
<https://www.venetoagricoltura.org/2008/11/uncategorized/foresta-demaniale-regionale-valdadige/>