



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

**IMPIEGO DI DATI LiDAR PER LA
CREAZIONE DI MAPPE TEMATICHE A
SUPPORTO DEL TECNICO FORESTALE**
Uno studio condotto in Val di Rabbi (Trentino).

Relatore
Prof.ssa Cristiana Colpi
Correlatore
Dott. Antonio Floris

Laureando
Andrea Penasa
Matricola n. 614905

ANNO ACCADEMICO 2011 - 2012

Indice

Riassunto	5
Abstract.....	5
1. Introduzione e obiettivi.....	7
2. La metodologia LiDAR nel telerilevamento	9
2.1. Componenti strumentali del sistema a scansione laser da aereo	11
2.2. Principi di misura della distanza con il sistema a scansione laser da aereo	11
2.3. Il calcolo delle coordinate tridimensionali del punto colpito	12
2.4. Sequenza di produzione dei dati	13
2.5. Impieghi principali del sistema a scansione laser da aereo	15
3. Applicazioni dell' Airborne Laser Scanner (ALS) in ambito forestale.....	16
3.1. Laser scanner impiegato per studi idrogeologici	16
3.2. Laser scanner applicato alla viabilità forestale e alle utilizzazioni	16
3.3. Laser scanner applicato alla prevenzione di incendi boschivi	18
3.4. Il LiDAR come ausilio alla fotointerpretazione.	18
3.5. Laser scanner impiegato per applicazioni assestamentali e inventariali	20
3.5.1. Approcci <i>area-based</i> e <i>single tree-based</i>	21
3.5.2. Il LiDAR nella stima quantitativa delle variabili dendrometriche	22
3.5.3. Il LiDAR nella caratterizzazione morfologico-strutturale dei soprasuoli forestali	23
4. Materiali e metodi.....	25
4.1. Area di studio.....	25
4.2. Materiali.....	28
4.3. Rilevamenti LiDAR.....	28
4.4. Rilevamenti al suolo	29
4.5. Elaborazioni dati LiDAR.....	30
5. Risultati e discussione	36
5.1. Carta dei “vuoti”	37
5.2. Carta del grado di copertura delle chiome	40
5.3. Carte tematiche per l'individuazione delle strutture.....	42
5.3.1. Individuazione degli apici arborei.....	46
6. Conclusioni.....	50
Bibliografia.....	53
Ringraziamenti.....	57
Allegati	59

Riassunto

In questa tesi vengono illustrate modalità ed esiti di una sperimentazione avente l'obiettivo di elaborare i dati LiDAR per la realizzazione di carte tematiche e l'estrazione di informazioni utili al tecnico pianificatore nella descrizione strutturale dei soprassuoli forestali. Lo scenario di studio è rappresentato da quattro particelle forestali presenti in Val di Rabbi (Trentino), caratterizzate prevalentemente da boschi di conifere. I dati LiDAR utilizzati, forniti dal Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento, provengono da un volo invernale, non espressamente realizzato per scopi forestali. Le procedure proposte, che applicano al Modello Digitale delle Chiome (CHM) operatori focali di MapAlgebra, hanno portato alla creazione dei seguenti layer: carta dei "vuoti", carta del grado di copertura e due tipologie di carta dell'altezza media; è stata sperimentata un'ulteriore procedura per l'individuazione dei singoli apici arborei, che utilizza la funzione *Sink* presente in alcuni software GIS commerciali. L'attendibilità dei risultati conseguiti è stata validata confrontando i dati ottenuti con alcuni rilievi al suolo, eseguiti in 39 punti di campionamento distribuiti casualmente nelle quattro particelle: i risultati più soddisfacenti si sono ottenuti per la carta dei vuoti nella copertura, per quella delle altezze medie e nell'individuazione degli apici arborei.

Gli esiti di questo studio hanno evidenziato il contributo che il LiDAR può fornire alla pianificazione forestale, dimostrandosi una tecnica valida a supporto delle decisioni del tecnico forestale per la classificazione dei compartimenti forestali nell'ambito delle attività di gestione e per la redazione di piani di assestamento.

Abstract: *Using Airborne Laser Scanning to create thematic maps to support forest managers: a study in Val di Rabbi (Trento Province, Italy).*

The purpose of this thesis is to describe methods and results of an experiment which aimed at the processing LiDAR data in order to create thematic maps and to obtain useful informations for forest managers in the structural description of forest stands. The area of study is represented by four forest compartments in Val di Rabbi (Trento Province, Italy), mostly characterized by coniferous forests. The LiDAR data, provided by the Forest and Fauna Service of the "Provincia Autonoma" of Trento, have been acquired during a winter flight not specifically designed for forestry purposes. The proposed procedures, that apply focal operators of MapAlgebra to Canopy Height Model (CHM), led to the creation of the following layers: a map of canopy gaps, a map of coverage level and two maps representing

different average heights. An additional procedure has been tested for the identification of single tree heights: it uses the *Sink* function included in some commercial GIS software. The reliability of the results has been proven comparing the output with some ground surveys carried out in 39 sample plots randomly chosen in the four forest compartments. The most indicative results are shown in the map that identifies the canopy gaps, in the map representing average heights and in the one identifying tree heights.

The results of this study have highlighted the contribution that LiDAR can provide to forest planning, proving to be a valid decision support to forest managers for forest compartments' classification, for management activities and for the preparation of forest inventory.

1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI

Negli ultimi anni il panorama dei sistemi di telerilevamento si è notevolmente arricchito con l'introduzione del Laser Scanning¹, tecnologia in grado di acquisire informazioni geometriche e morfometriche tridimensionali su grandi estensioni territoriali con elevata precisione metrica.

Inizialmente la tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotrasportata è stata utilizzata per la raccolta di dati e per l'elaborazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM), garantendo un significativo miglioramento nel dettaglio dell'analisi topografica delle superfici terrestri, soprattutto in aree di difficile accesso o dove i metodi tradizionali non erano molto soddisfacenti (Gingo Alves, 2010). Più recentemente invece, la tecnologia LiDAR sta rappresentando un valido strumento utilizzabile in molte altre applicazioni, quali la pianificazione urbanistica e del territorio in generale, la realizzazione di reti di telecomunicazione e trasmissione di energia, la pianificazione delle infrastrutture, la valutazione del rischio di alluvione ed altre ancora.

In particolare, il sensore laser scanner ha trovato largo uso nelle applicazioni forestali. La stesura di inventari forestali e di piani di assestamento del bosco richiede informazioni dettagliate sulle caratteristiche dei popolamenti, come altezza, specie, volume e condizioni ecologiche ed ecosistemiche. Alcune di queste variabili conoscitive sono fondamentali, sia perché sono indicative delle proprietà e dello stato evolutivo del bosco, sia perché permettono di programmare le più opportune strategie di gestione selvicolturale delle aree forestali (Barilotti, 2009). La redazione di un piano di assestamento forestale, però, prevede operazioni di campagna rilevanti e dispendiose in termini di tempi/operatore (es. cavallettamento totale) (Scrini, 1989), dovute anche al fatto che la foresta è un ambiente in cui spesso non è facile muoversi, rendendo poco agevoli le misure da effettuare e richiedendo molto tempo ed energie per la sua perlustrazione di dettaglio.

Il laser scanner da aeromobile, data la sua grande potenzialità in termini di facilità di trasporto, elevata precisione e alta velocità di acquisizione di dati, offre nuove possibilità applicative di indagine in campo forestale, in quanto permette di analizzare direttamente i soprassuoli forestali nella loro struttura tridimensionale e volumetrica, agevolando l'attività di pianificazione forestale in termini di efficienza ed accuratezza.

Inoltre, grazie alla tridimensionalità dell'informazione, numerose ricerche hanno sviluppato una serie di algoritmi e procedure opportunamente interconnesse con le quali identificare in

¹ In questo contesto, i termini Laser Scanning e LiDAR verranno usati come sinonimi.

modo speditivo importanti parametri biometrici e morfometrici su vaste aree boscate, ottimizzando le risorse economiche disponibili.

Molti studi recenti si sono orientati soprattutto su metodi e tecniche per stimare con dati LiDAR alcune variabili quantitative, come volume legnoso e biomassa, a livello di singoli alberi o di collettivi arborei. Meno esplorati sembrano invece gli impieghi del Laser Scanning aereo (ALS) per la descrizione tematica della struttura dei popolamenti forestali, nei suoi aspetti di distribuzione verticale e orizzontale e di copertura delle chiome (Floris et al., 2009).

Nella prospettiva del quadro appena delineato, l'obiettivo di questa tesi prevede appunto l'utilizzo di riprese LiDAR invernali a media risoluzione, non espressamente realizzate per scopi forestali, per l'elaborazione di carte tematiche e l'estrazione di informazioni utili al tecnico pianificatore nella descrizione e nella classificazione strutturale dei soprassuoli forestali. I tematismi prodotti attraverso procedure automatiche in ambiente GIS, sono stati confrontati con alcuni rilievi al suolo, utilizzati come "verità a terra", al fine di verificare l'attendibilità dei *layer* ottenuti dai dati LiDAR.

2. LA METODOLOGIA LIDAR NEL TELERILEVAMENTO

Il LiDAR è un sistema di telerilevamento ambientale basato sull'uso del LASER (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) (Burtch, 2002; Gomasasca, 2004).

Questa tecnologia, chiamata anche *Laser Scanning*, è costituita da sensori ottici attivi, composti di trasmettitori e ricevitori di impulsi laser, che permettono di determinare le coordinate tridimensionali di punti sparsi per mezzo della misura della distanza tra il sensore e un punto colpito dal fascio luminoso (Lo Brutto, 2005).

Il laser scanner non produce immagini ma misure di tipo puntuale che permettono di caratterizzare la posizione, la forma e l'altezza di oggetti reali di diverso tipo. Il prodotto principale di una ripresa LiDAR, quindi, è il profilo tridimensionale delle superfici colpite (Barilotti, 2010; Floris e Clementel, 2011).

Essendo costituito da sensori attivi, il LiDAR non ha bisogno di una sorgente esterna di energia. Questo vantaggio permette al sistema di poter operare in qualsiasi condizione di luminosità, anche di notte, e di non risentire delle ombre. È determinante, però, l'occlusione dovuta alla presenza di altri oggetti posti tra il sensore e l'oggetto in questione, quali nubi e aerosol (Gomasasca, 2004).

La radiazione elettromagnetica emessa è un fascio luminoso molto concentrato, collimato da un sistema di lenti e specchi, con lunghezza d'onda che si colloca nell'intervallo dell'infrarosso vicino (0,8-1,6 μm) con alcune eccezioni nel visibile (0,52 μm) (Gomasasca, 2004; Lo Brutto, 2005). L'impronta a terra dei raggi laser (*footprint*) ha una dimensione compresa in un diametro tra 20 cm ad alcuni metri. Si distinguono, perciò, sensori con *small footprint* (0,2-2 m) o *large footprint* (> 2 m) (Figura 2.1). L'estensione dell'impronta a terra risulta determinante per sfruttare alcune caratteristiche dei sistemi LiDAR, tra cui la possibilità di individuare oggetti molto sottili e piccoli particolari (es. cavi sospesi) e la capacità di sfruttare i piccoli varchi nella vegetazione per raggiungere il suolo. La dimensione dell'impronta al suolo è, inoltre, alla base del fenomeno di generazione degli echi multipli: quando un raggio laser incontra un ostacolo, come la chioma di un albero, una parte del segnale viene riflessa dall'ostacolo mentre un'altra parte rimanente (non intercettata) prosegue il suo tragitto fino all'ostacolo successivo.

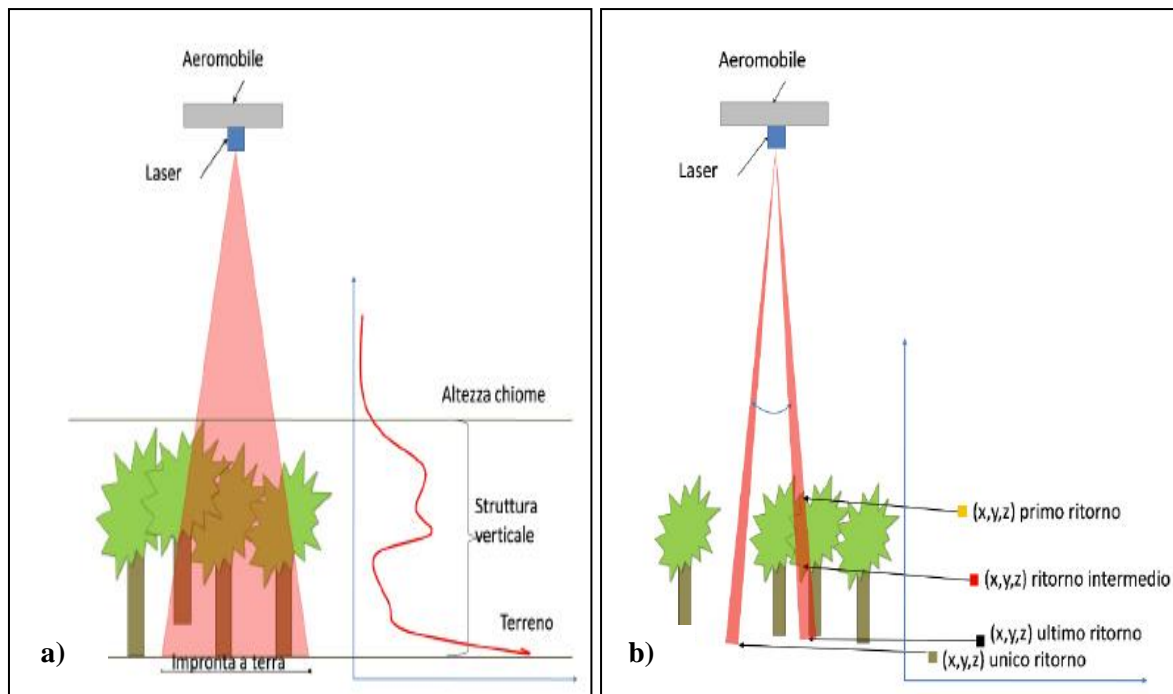


Figura 2.1: Rappresentazione schematica dell'impronta a terra del raggio laser, con a) *large footprint*, b) *small footprint*. Nel primo caso vengono registrati un maggiore numero di echi, nel secondo invece le misure sono più accurate e coprono un'area minore (da: Pirotti, 2009).

Le riflessioni multiple di uno stesso raggio arrivano al ricevitore in tempi differenti e possono essere quindi discriminate. Si hanno così un primo eco (*first pulse*) e un certo numero di echi successivi, fino all'ultimo (*last pulse*) (Lo Brutto, 2005). Esistono sensori capaci di memorizzare 4-5 (in alcuni casi fino a 20) riflessioni multiple diverse. È necessario poter registrare almeno la prima riflessione e l'ultima, in modo da poter ricostruire, mediante opportune elaborazioni, i modelli digitali spiegati in seguito.

Alcuni sensori ALS recenti possono registrare le riflessioni non attraverso un numero di impulsi discreti, ma in continuo, dando origine a modelli della forma degli oggetti colpiti cosiddetti *full-waveform* (Pirotti, 2009; Pirotti, 2012).

Secondo il tipo di rilievo da eseguire, questi dispositivi di telerilevamento possono essere installati a terra (TLS – *Terrestrial Laser Scanner*) oppure montati su mezzi aviotrasportati, quali aerei, elicotteri o satelliti (ALS – *Airborne Laser Scanner* o *Aerial Laser Scanner*). I due sistemi applicano lo stesso principio teorico, ma le loro caratteristiche tecniche, le procedure di acquisizione, gli obiettivi delle scansioni e gli approcci per la post-elaborazione dei dati acquisiti sono differenti (Lo Brutto, 2005; Pirotti, 2009).

In questa tesi sarà trattato nello specifico il laser scanner da aeromobile, tecnica di telerilevamento utilizzata in questo studio. Per approfondimenti inerenti al laser scanner terrestre, si rimanda a Rinaudo, 2003 (in Crosilla, 2003).

2.1. Componenti strumentali del sistema a scansione laser da aereo.

Il sistema a scansione laser da aereo (ALS) è costituito dai seguenti strumenti:

- un distanziometro (o telemetro) laser, composto di un emettitore di impulsi luminosi e di un ricevitore che registra i segnali di risposta degli oggetti colpiti;
- un ricevitore GPS (*Global Positioning System*) cinematico, che permette di determinare le coordinate del trasmettitore durante la fase di volo;
- un ricevitore GPS master fisso a terra su un punto di coordinate note, utile per il posizionamento relativo (correzione differenziale);
- un sensore inerziale IMU (*Inertial Measuring Unit*), sistema elettronico composto di tre accelerometri e tre giroscopi, utili per determinare l'orientamento e l'assetto del velivolo durante la fase di volo;
- apparati di servizio per l'alimentazione, il controllo dei sensori e la registrazione dei dati (Gomasasca, 2004; Barilotti, 2009; Barilotti, 2010).

Esistono altri elementi aggiuntivi installati durante il campionamento, quali:

- fotocamera metrica per l'acquisizione d'immagini digitali;
- sensori multi/iperspettrali, che registrano l'ampiezza del segnale di ritorno, che dipende dal materiale che ha riflesso il raggio (Casella, 2003).

2.2. Principi di misura della distanza con il sistema a scansione laser da aereo.

Il telemetro misura la distanza tra il punto di trasmissione (*A*) e il punto intercettato dal laser (*B*) basandosi sul tempo di volo (TOF – *Time Of Flight*), ovvero il tempo intercorso tra l'emissione e la ricezione del ritorno (Pirotti, 2009). La funzione che collega la distanza L_{AB} con il tempo di volo Δt è la seguente:

$$L_{AB} = (\Delta t/2) \cdot c$$

dove c rappresenta la velocità di propagazione del segnale luminoso ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s).

Il tempo è misurato in modo discreto, cioè come somma di una quantità intera di brevissimi intervalli di durata pari a $\delta t = 1/f$, dove f è la frequenza del generatore d'impulsi laser di cui è

costituito il telemetro. Questo implica che anche la distanza sia misurata in modo discreto, come somma di una quantità intera di brevissime distanze elementari (Casella, 2003).

I sistemi LiDAR, inoltre, sono progettati in modo che sia rispettata la *condizione di non ambiguità*: prima che il raggio (i+1)-esimo sia emesso, è necessario che tutti gli echi del raggio i-esimo siano tornati al sensore (Casella, 2003). Affinché sia rispettata tale condizione, il tempo di andata e ritorno (t) deve essere minore del periodo di emissione ($T = 1/f$) del generatore laser. Da ciò si ricava che la quota relativa di volo (h), cioè la distanza sensore-bersaglio, deve essere sempre minore della velocità della luce nel vuoto (c) divisa due volte la frequenza (f) (Lo Brutto, 2005). Esiste perciò un vincolo che lega la frequenza massima di trasmissione (e quindi la densità al suolo, espressa in punti/m²) e l'altezza massima di volo. Per questo motivo le frequenze massime reali attualmente raggiungibili sono attorno ai 200.000 impulsi al secondo, con altezza di volo di circa 1000 m. La tendenza è di aumentare progressivamente l'altezza di volo per ampliare l'area rilevata, sfruttando i miglioramenti nella tecnologia dei sensori che utilizzano frequenze sempre più elevate, mantenendo costante (o persino aumentando) la densità di punti al suolo.

2.3. Il calcolo delle coordinate tridimensionali del punto colpito.

Misurata la distanza per mezzo del distanziometro, il laser scanner determina le coordinate del punto colpito grazie all'uso integrato del GPS e dell'IMU (Figura 2.2).

Il GPS è in grado di determinare autonomamente le coordinate del sensore con una certa frequenza. La modalità GPS più usata è quella differenziale, che fornisce la posizione dell'aeromobile rispetto a un ricevitore GPS master a terra, posto su un punto di coordinate note (Burtch, 2002; Casella, 2003).

L'IMU consente di calcolare in ogni istante l'assetto del velivolo in tutti i suoi gradi di libertà, mediante gli accelerometri e i giroscopi di cui è costituito. I primi misurano le accelerazioni lineari istantanee lungo tre assi di riferimento, i secondi misurano le accelerazioni angolari riferite agli stessi tre assi.

Il sensore integrato GPS/IMU assieme al telemetro sono sincronizzati mediante un apparato elettronico, che provvede anche a ricevere e a memorizzare i dati acquisiti. Il sistema è quindi in grado di calcolare l'orientamento della retta normale uscente dal velivolo, nonché l'angolo formato dal raggio i-esimo con essa.

Sono noti pertanto tutti gli elementi per calcolare le coordinate del punto B intercettato dal laser: le coordinate del trasmettitore A , la distanza tra A e B e l'angolo d'inclinazione dell'impulso luminoso.

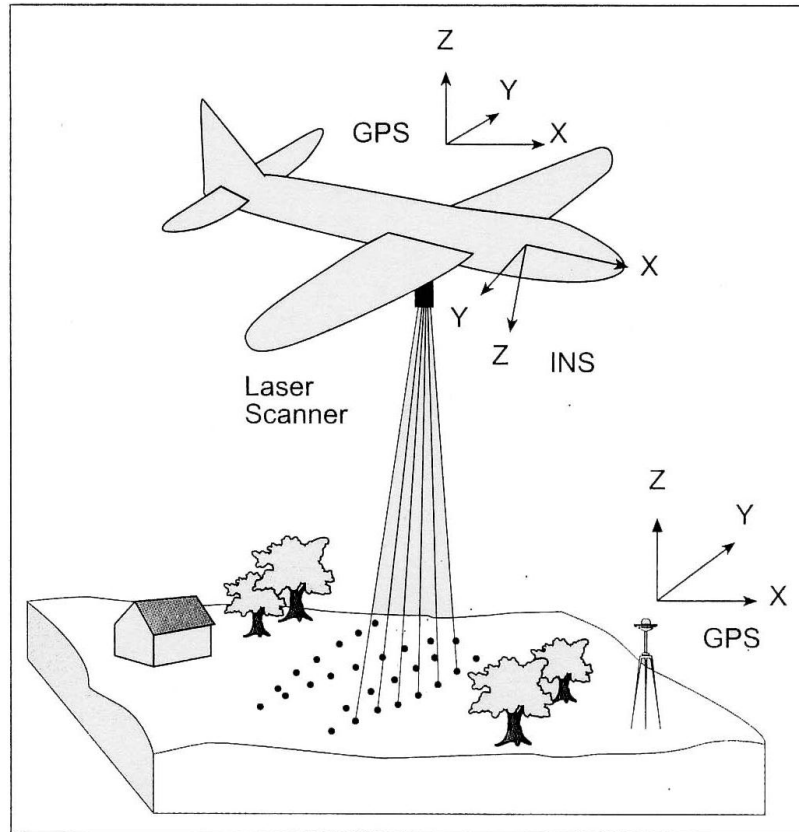


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del sistema di posizionamento e orientamento del sensore laser (da: Gomasca, 2004).

2.4. Sequenza di produzione dei dati.

Le operazioni utili alla produzione di dati con la scansione laser si suddividono in diverse fasi. Una volta installati i sensori sull'aeromobile, è necessaria la loro calibrazione. I tre dispositivi, GPS, IMU e telemetro, si basano su sistemi di riferimento indipendenti l'uno dall'altro e possono avere tempi di acquisizione differenti (Burtch, 2002). La calibrazione è fatta al fine di sincronizzare gli strumenti e di ricondurre le misure eseguite dagli stessi ad un unico sistema di riferimento. Per fare questo, vengono dapprima eseguite misure accurate degli scostamenti fisici dei tre strumenti, seguite da un volo di taratura su un poligono di coordinate note. Viene fatto, infine, l'allineamento degli strumenti, una fase in cui i sensori sono accesi con l'aeromobile fermo al suolo. Quest'ultimo passaggio permette di determinare la posizione e l'assetto iniziale della strumentazione. Si tratta di una serie di fasi molto

delicata la cui non corretta esecuzione provoca la presenza di errori sistematici nei dati finali (Conforti Andreoni et al., 2003).

La fase successiva consiste nell'acquisizione dei dati di un territorio mediante un volo eseguito per strisciate parallele e/o perpendicolari. La sovrapposizione tra strisciate è di circa il 30% (Barilotti, 2010). Questa è necessaria per l'allineamento successivo delle scansioni effettuate, che consiste nella minimizzazione delle discrepanze tra punti comuni a più strisciate (Crosilla et al., 2004a; Crosilla et al., 2004b).

Si procede con il calcolo delle coordinate tridimensionali di tutti i punti colpiti. Per prima cosa vengono accoppiati i dati GPS e inerziali, in modo da ricostruire la posizione e l'assetto del sensore in tutti gli istanti in cui il sistema ha eseguito una misura. In seguito si associano all'orientamento esterno del sensore (espresso in funzione del tempo), grazie ad opportune interpolazioni, le misure di distanza effettuate dal telemetro. Si ottiene un seminato di punti sparsi, detti *raw-data*. Le coordinate di questi punti sono riferite al datum WGS-84 e le quote sono ellissoidiche. Di conseguenza, può essere eseguita una modifica di datum altimetrico e planimetrico dei punti ottenuti secondo il sistema di riferimento desiderato.

Questi dati grezzi possono essere trasformati in una struttura specifica. Si passa spesso dal seminato sparso di punti a un grigliato regolare (matrice *raster*), ovvero si schematizzano, mediante interpolazione, i dati puntuali in una superficie regolare costituita da celle quadrate, le cui altezze vengono determinate a partire dall'informazione altimetrica dei punti sparsi (Casella, 2003). La matrice raster ottenuta è in sostanza un Modello Digitale della Superficie (DSM - *Digital Surface Model*), una rappresentazione virtuale tridimensionale di tutta la superficie intercettata per prima dall'impulso laser (*first pulse*). Questa include qualsiasi elemento, come edifici, manufatti, chiome ed anche terreno senza copertura (Pirotti, 2009). Questi elementi del DSM spesso vengono suddivisi in classi di appartenenza, mediante il processo di classificazione.

Un'ulteriore elaborazione applicabile al seminato di punti sparsi è il filtraggio. Questa consiste nell'eliminazione semi-automatica dei punti non appartenenti alla superficie del terreno (Crosilla et al., 2004b). In questo modo viene prodotto il DTM (*Digital Terrain Model*), un grigliato regolare contenente i soli punti appartenenti al suolo nudo, senza vegetazione, edifici o altri ostacoli (Cecchinato, 2012). Per generare il DTM, sono privilegiati generalmente i *last pulses* delle scansioni effettuate.

Un altro prodotto ottenibile è il DCM (*Digital Canopy Model*) o CHM (*Canopy Height Model*), prodotto per differenza algebrica locale tra DSM e DTM (Figura 2.3). Il CHM è la rappresentazione della superficie occupata solamente dalla vegetazione (sono esclusi gli

edifici e gli altri manufatti). Questa superficie raster normalizzata sul piano fornisce in pratica, per ogni singolo pixel, il valore di altezza sul terreno della porzione di copertura forestale ad esso relativa. Questo strato è peraltro quello di maggior interesse in ambito forestale, come si vedrà in seguito.

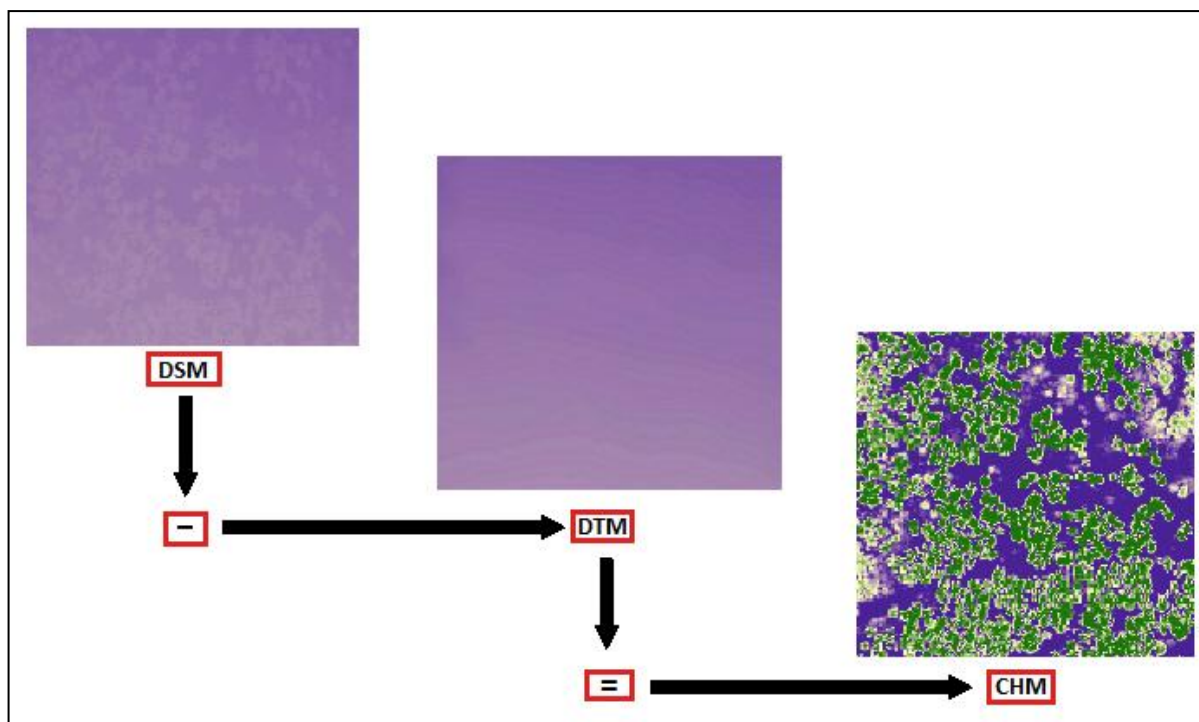


Figura 2.3: Esempio di sottrazione del Modello Digitale del Terreno (DTM) al Modello Digitale di Superficie (DSM) per ottenere il Modello Digitale delle Chiome (CHM).

2.5. Impieghi principali del sistema a scansione laser da aereo.

Il laser scanner aereo offre misure topografiche tridimensionali accurate e ad alta risoluzione geometrica e altimetrica. Queste sono utili per la creazione di modelli digitali del terreno e di superficie (DTM e DSM) ed altri elaborati derivabili da quest'ultimi, come il CHM (cfr. par. 2.4). Il LiDAR, inoltre, acquisisce dati su ampie superfici di territorio e in tempi molto più rapidi rispetto ai sistemi tradizionali (Burtch, 2002; Gomarasca, 2004).

Questi vantaggi rendono la tecnologia LiDAR molto versatile e utilizzabile in numerose applicazioni. I principali settori applicativi del laser scanner aereo sono la cartografia topografica, la pianificazione territoriale (soprattutto in ambito urbanistico, catastale ed architettonico), la progettazione ingegneristica, consentendo l'individuazione e la pianificazione di infrastrutture viarie (ferrovie, strade, sentieri, ecc.) e di linee tecnologiche (elettrodotti, linee di telecomunicazioni, ecc.), l'idrogeologia, la pianificazione e la gestione forestale (Floris e Clementel, 2011).

3. APPLICAZIONI DELL’AIRBORNE LASER SCANNER (ALS) IN AMBITO FORESTALE

Le applicazioni delle tecniche ALS di potenziale interesse nel settore forestale riguardano:

- lo studio idrogeologico del territorio;
- la pianificazione della viabilità forestale e delle utilizzazioni;
- la prevenzione degli incendi;
- l’ausilio alla fotointerpretazione;
- le applicazioni assestamentali e inventariali.

3.1. Laser scanner impiegato per studi idrogeologici.

Nei bacini montani, le caratteristiche topografiche dei versanti esercitano una forte influenza sui processi idrologici e geomorfologici legati alla formazione dei deflussi ed all’erosione. La tecnologia LiDAR ha consentito, grazie alla creazione di DTM molto accurati e ad alta risoluzione geometrica, il significativo miglioramento nel dettaglio e nella qualità dell’analisi topografica delle superfici terrestri, fondamentale ai fini dell’analisi di questi processi fisici (Tarolli, 2009).

I principali studi di carattere idrogeologico eseguiti attraverso i dati da laser scanner aereo riguardano il riconoscimento delle diverse tipologie morfologiche, sia dei versanti che degli alvei torrentizi e fluviali, l’estrazione di parametri del terreno (pendenza, curvatura, esposizione, ecc.), l’identificazione del reticolo idrografico, l’individuazione di aree interessate da movimenti franosi e la modellizzazione degli alvei, delle zone inondabili e delle aree di espansione.

Aspetto non secondario, in caso di eventi importanti determinanti particolari pericoli (es. frane), con la tecnologia Laser Scanning si può intervenire anche con il fenomeno in atto oppure subito dopo il suo accadimento, cosa che con altre tecniche sarebbe quasi impossibile (cfr. l’evento franoso verificatosi in Trentino, in località Costalta-Campolongo nella zona dell’altopiano di Piné, il 10 agosto 2010, con il rilievo LiDAR eseguito pochissimi giorni dopo).

3.2. Laser scanner applicato alla viabilità forestale e alle utilizzazioni.

Le recenti innovazioni nell’acquisizione di dati relativi alla morfologia del terreno e delle caratteristiche dei soprassuoli per mezzo di laser scanner stanno offrendo un supporto sempre

più valido ai tecnici e professionisti forestali nella progettazione di strade forestali e nella pianificazione delle utilizzazioni (Grigolato, 2009; Grigolato, 2010; Pirotti et al., 2010).

L'integrazione delle informazioni ad alta risoluzione relative al DTM con quelle del CHM può essere utilizzata per diversi scopi, quali l'identificazione, anche sotto copertura, della viabilità (White et al., 2010 in Pirotti et al., 2010) (Figura 3.1), la valutazione dell'accessibilità del bosco e del grado di servizio della viabilità, l'estrazione di elementi infrastrutturali di interesse per la viabilità forestale (come i piazzali di deposito) e la progettazione di nuovi tracciati con relativa stima dei volumi di terra da movimentare e dei costi di progettazione e di manutenzione (Aruga et al., 2005 in Gingo Alves, 2010).

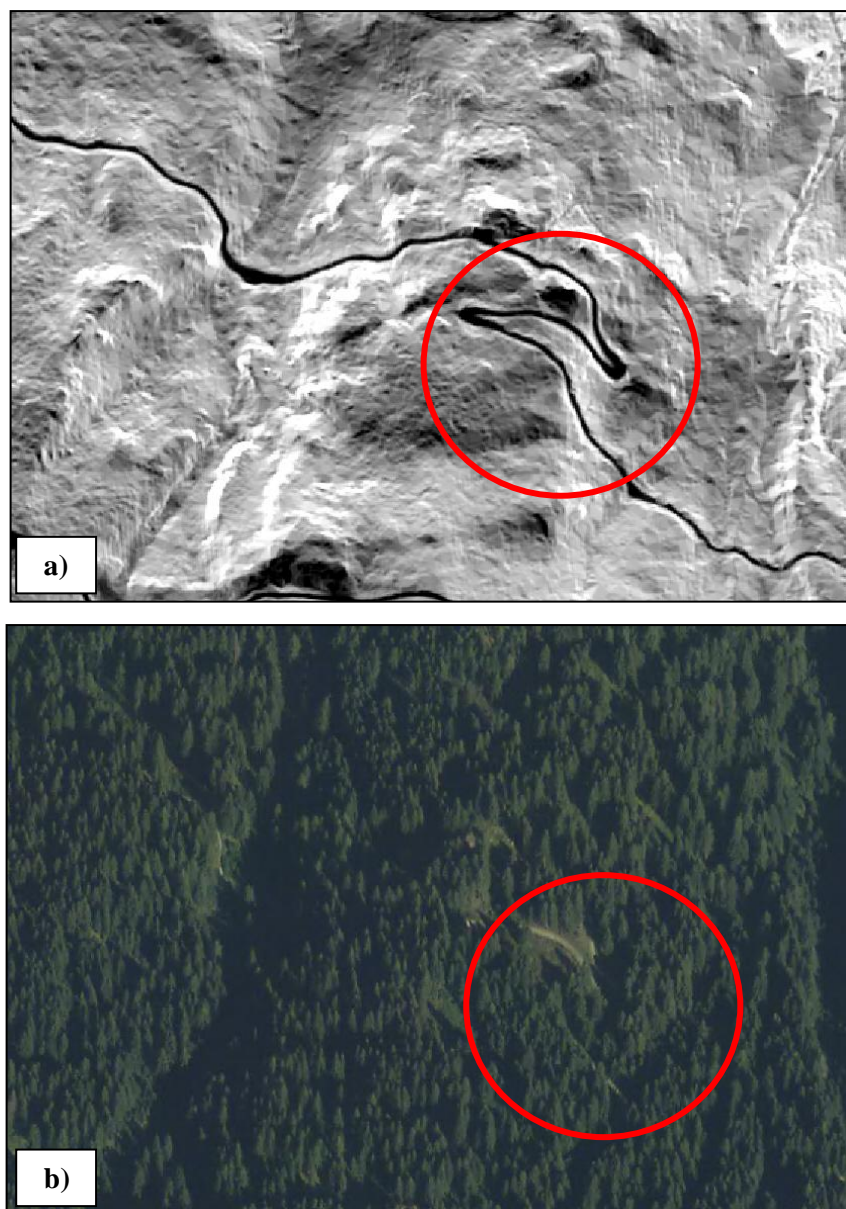


Figura 3.1: Esempio di carta delle pendenze (a) estratta da un DTM ad alta risoluzione (1 m) ottenuto da LiDAR. Per mezzo di questa carta si può individuare con molta nettezza il tracciato di una strada forestale (colore nero), difficilmente riconoscibile su ortofoto (b).

Ulteriori impieghi dei modelli digitali ottenuti dal LiDAR possono riguardare la determinazione del profilo del terreno per la valutazione delle possibili linee di esbosco con gru a cavo. È possibile, infatti, determinare i corridoi e i profili delle gru a cavo, nonché evidenziare gli alberi adatti, per altezza e diametro, ad essere impiegati come supporti (Schiess, 2005 in Grigolato, 2009).

3.3. Laser scanner applicato alla prevenzione di incendi boschivi.

La valutazione della quantità di materiale combustibile è un'attività importante nel monitoraggio e soprattutto nella pianificazione delle diverse attività connesse agli incendi, come i programmi di prevenzione, controllo e lotta al fuoco in foresta (Lingua e Marzano, 2009). La tecnologia LiDAR può essere efficacemente impiegata per l'estrazione di parametri relativi ai combustibili presenti in bosco, tra cui l'altezza e l'altezza d'inserzione della chioma degli alberi, il profilo dello strato più alto della copertura arborea, la densità degli alberi e il carico di potenziale combustibile (sia del sottobosco che della chioma) (Riaño et al., 2003 in Gingo Alves, 2010). L'estrazione di questi dati permette diverse applicazioni, quali: la mappatura della struttura e la quantificazione di materiali combustibili, la caratterizzazione e mappatura della severità di un incendio (individuando le aree con maggiore priorità d'intervento), la determinazione e la modellizzazione del comportamento del fuoco. Grazie al DTM e al CHM, inoltre, è possibile localizzare i corsi d'acqua (Bowen & Waltermire, 2002 in Gingo Alves, 2010) e le radure presenti nelle foreste, a supporto delle attività di pianificazione e di lotta agli incendi boschivi.

3.4. Il LiDAR come ausilio alla fotointerpretazione.

La fotointerpretazione è una pratica tuttora piuttosto diffusa in campo forestale, utile nel monitoraggio e nella gestione delle risorse forestali. Questa tecnica consiste nella lettura soggettiva di foto aeree o immagini telerilevate che consente di individuare e classificare i popolamenti boschivi. Tuttavia la variabilità degli ambienti forestali, anche su estensioni relativamente piccole, nonché la loro tendenza a formare *pattern* di una certa complessità, rende problematica la classificazione automatica su immagini (Floris et al., 2009).

L'impiego più immediato e diretto del CHM è di notevole ausilio alla fotointerpretazione soggettiva sintetica. Questo elaborato LiDAR, discretizzato in un ragionevole numero di classi rappresentate da altrettanti colori o toni di grigio, fornisce al fotointerprete informazioni sulla terza dimensione, cioè l'altezza delle chiome, sia in termini visivi che di dato numerico. Queste permettono di attuare valutazioni più dettagliate e oggettive di sintesi su classe

cronologica (stadio di sviluppo), densità, distribuzione locale dello strato arboreo e struttura dei popolamenti.

Un grande vantaggio pratico del LiDAR, come detto in precedenza, è l'indifferenza alle zone d'ombra, problema che spesso affligge le immagini rilevate da sensori ottici, rendendo difficile e poco precisa la identificazione delle piccole aperture (*gaps*) presenti nella copertura forestale (Bottalico et al., 2009). Il laser scanner, attraverso procedure automatiche, permette di ridurre notevolmente le situazioni d'interpretazione incerta o impossibile (Figura 3.2).

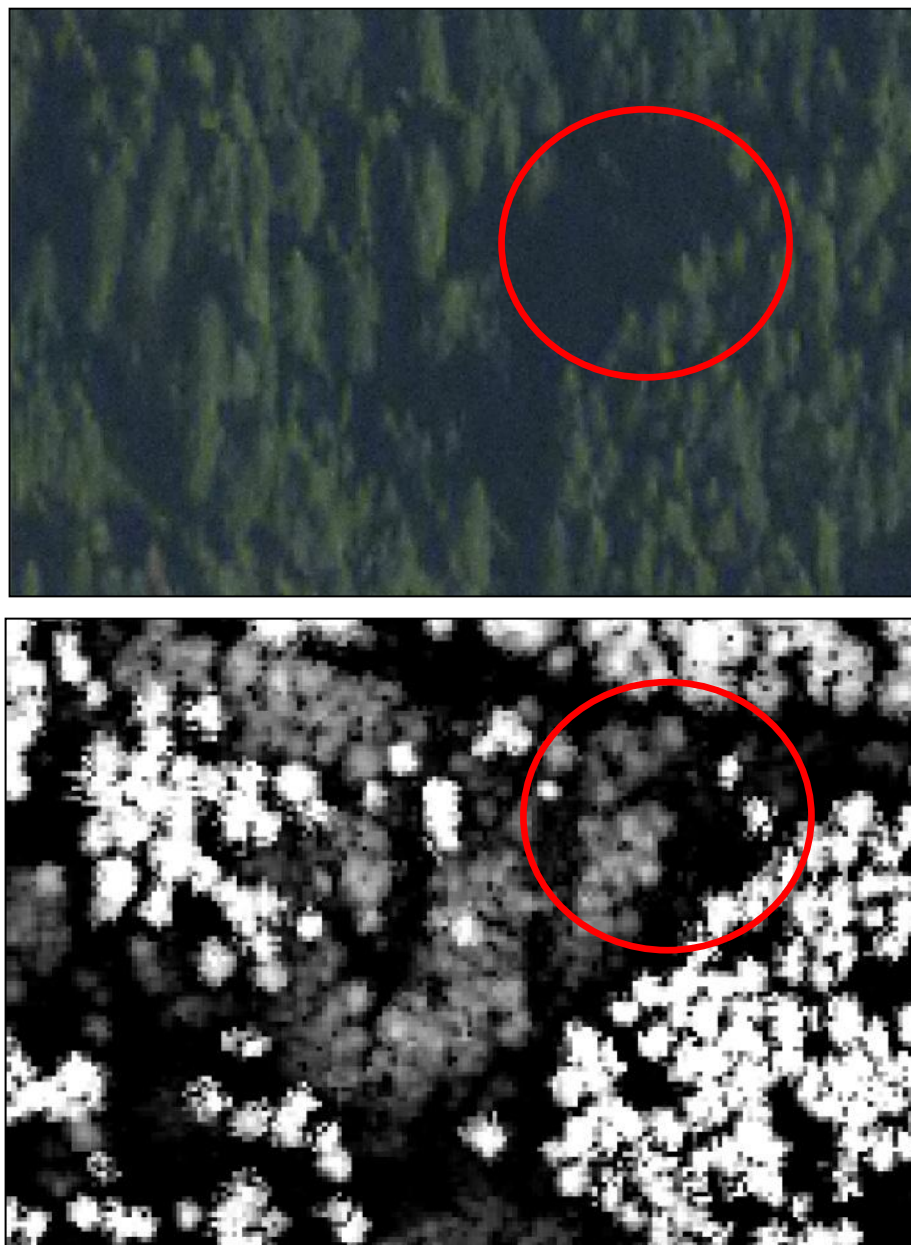


Figura 3.2: Nelle zone dell'ortofoto digitale che risultano in ombra (sopra), il LiDAR (sotto) è molto utile per fornire indicazioni sulla presenza di alberi. E' possibile apprezzare le differenze tra bosco giovane (grigio scuro) e adulto (grigio chiaro) anche nelle zone in ombra.

3.5. Laser scanner impiegato per applicazioni assestamentali e inventariali.

La tecnologia Laser Scanning da aeromobile ha registrato negli ultimi anni un'elevata potenzialità nella descrizione quali-quantitativa dei popolamenti forestali. I principali obiettivi degli studi basati su tecniche LiDAR relativi alla pianificazione forestale e alle applicazioni inventariali riguardano in particolare:

- la stima quantitativa di volumi e biomasse arboree e la loro spazializzazione;
- la caratterizzazione morfologico-strutturale dei soprassuoli forestali.

L'esecuzione di inventari forestali e la stesura di piani di assestamento richiedono, infatti, informazioni dettagliate sulle caratteristiche morfometriche e biometriche dei popolamenti. L'estrazione di variabili forestali da dati LiDAR può essere fatta secondo due diversi tipi di approccio: a livello di singolo albero oppure di aree campione.

Prima di entrare nello specifico dei diversi approcci adottabili e dei possibili impieghi del laser scanner aereo in ambito assestamentale, è opportuno fare una distinzione dei dati LiDAR disponibili per il settore forestale. Si possono avere, infatti, dati impiegati ai fini forestali, rilevati mediante voli con scopi non specifici, e dati per applicazioni sperimentali di ricerca (Corona et al., 2011).

Nel primo caso, si tratta di dati di tipo *discrete return*, limitati in genere a primo e ultimo eco, provenienti da riprese effettuate per la realizzazione di DTM ad alta precisione o di misure topografiche da utilizzare a scopi urbanistici, catastali, idrogeologici, ecc. con una media densità di punti. Clementel et al. (2012), hanno definito tali dati *low-cost*. Queste scansioni vengono effettuate solitamente nei periodi invernali per minimizzare il “disturbo” della vegetazione, poiché l'interesse è raggiungere un elevato tasso di penetrazione attraverso le chiome in modo da avere un elevato numero di impulsi che arrivano alla superficie del terreno. Nei boschi di caducifoglie questo tasso può essere aumentato effettuando la scansione nel periodo invernale, dal momento che in inverno soltanto la parte legnosa della chioma origina significativi echi di ritorno. Nel caso di boschi di sempreverdi, invece, tale aspetto non determina grandi differenze nella ricostruzione della componente ipsometrica. Clementel et al. (2010) hanno analizzato le correlazioni tra CHM ottenuti da dati di rilevamenti estivi e invernali in boschi di abete rosso alpini, evidenziando ottime concordanze funzionali, peraltro in un contesto di sistematica sottostima di 4-5 m del CHM invernale; hanno segnalato, invece, sottostime consistenti in presenza di larice.

Dal punto di vista forestale, il periodo più indicato per l'effettuazione delle riprese su aree boscate è invece, per questi motivi, quello estivo. In genere, infatti, i dati per le applicazioni

sperimentali di ricerca vengono rilevati nel periodo citato mediante progetti dedicati di scansione su scenari limitati con idonei parametri di ripresa. Si tratta per lo più di rilievi ad alta densità di punti per metro quadrato che permettono di ottenere modelli digitali ad alta risoluzione. In diversi studi, questi dati vengono utilizzati allo stato grezzo (*raw data*) che, grazie alla presenza in alcuni casi di ritorni intermedi, permette di migliorare il profilo tridimensionale complessivo delle superfici colpite e di individuare oggetti sottoposti a quelli più alti (ad esempio, la vegetazione più bassa).

Una certa tendenza alla sottostima delle altezze reali è d'altra parte inevitabile anche con voli estivi, poiché l'impulso emesso dal telemetro laser tende a penetrare all'interno delle chiome prima che possa essere registrato un apprezzabile segnale di ritorno e inoltre l'interpolazione dei punti su celle regolari per la creazione di modelli digitali comporta un inevitabile smussamento della quota dei cimali (Corona et al., 2011).

3.5.1. Approcci *area-based* e *single tree-based*.

Nell'analisi dei dati LiDAR in ambito assestamentale e inventariale si distinguono due tecniche di estrazione di parametri quali-quantitativi, dette rispettivamente *single tree-based* e *area-based*.

Nell'approccio *single tree-based* rientrano i metodi basati sulla preliminare individuazione e ricostruzione dal dato ALS dei singoli soggetti arborei effettivamente discriminabili in un determinato scenario boschivo, con stima dei caratteri dendrometrici individuali e successiva ricostruzione dei dati riferiti ai collettivi arborei per sommatoria di valori individuali. Il livello di successo dei metodi *single tree-based* dipende molto dalla risoluzione dei dati LiDAR, che deve essere molto elevata (almeno di 3-4 punti/m²). Questo metodo però mostra dei limiti in popolamenti caratterizzati da elevate densità e da marcata compenetrazione delle chiome, con difficile discriminazione dei piani arborei sottostanti quello dominante (Floris et al., 2010).

Nell'approccio *area-based*, invece, rientrano le applicazioni basate sulla misura di variabili al suolo e dei corrispondenti parametri LiDAR nell'ambito di aree campione (*plot*) di dimensioni variabili. In queste applicazioni si considerano, quindi, essenzialmente grandezze dendrometriche collettive per unità di superficie, cioè riferite, sia nel caso dei dati al suolo che di quelli ALS, a collettivi arborei presenti su aree di determinate dimensioni. I metodi *area-based* sono più diffusi dei precedenti e permettono di conseguire risultati interessanti anche con densità della ripresa LiDAR non particolarmente elevate. Inoltre sono più adattabili a situazioni diversificate in forma e grado di compenetrazione delle chiome (Floris et al., 2010).

3.5.2. Il LiDAR nella stima quantitativa delle variabili dendrometriche.

Attualmente, la metodologia più comunemente utilizzata nella maggior parte degli inventari forestali, per il rilievo di attributi d'interesse forestale, si basa sul campionamento e su tecniche di stima statistica dei parametri di interesse. Le attività di rilievo in campo necessitano di una grande quantità di lavoro che spesso può richiedere molto tempo e costi elevati (Gingo Alves, 2010).

La tecnologia LiDAR ha dimostrato di essere di grande aiuto nella stima delle variabili forestali, soprattutto in aree di grandi dimensioni e in particolare nelle zone di difficile accesso. Tuttavia, l'uso di dati derivanti da scansione laser nella maggior parte dei casi non sostituisce completamente le attività in campo, dal momento che i dati elaborati per le stime sono comunque basati su dati rilevati e calibrazioni in campo nelle diverse aree oggetto di studio.

La stima quantitativa di variabili forestali mediante dati LiDAR è probabilmente l'utilizzo che desta attualmente il maggior interesse della comunità della ricerca forestale, volta in particolare allo sviluppo di modelli che sfruttano le correlazioni tra variabili biometriche di interesse assestamentale rilevate su aree di calibrazione al suolo e parametri quantitativi desumibili dall'elaborazione dell'informazione LiDAR contestuale. In pratica, si tratta di utilizzare valori ipsometrici ottenuti dai ritorni ALS, quali altezze delle chiome o apici arborei, in tutte le possibili sfumature ed elaborazioni per ottenere relazioni statisticamente valide con le principali grandezze dendrometriche di collettivi o di individui arborei, come diametro, area basimetrica, volume e biomassa legnosa.

La modellizzazione robusta di questi parametri quantitativi potrebbe consentire di ottenere dati affidabili e periodicamente aggiornabili sulla consistenza e sulla produttività legnosa dei boschi, risparmiando risorse economiche importanti negli onerosi rilievi al suolo (Floris et al., 2010; Corona et al. 2011). Questa possibilità di visualizzare in continuo la variabilità assoluta e/o relativa delle masse unitarie a livello sub particellare, nonché la loro spazializzazione (Figura 3.3), risulta essere un aspetto rilevante e innovativo ai fini della pianificazione (piano dei tagli, localizzazione degli interventi selvicolturali e delle operazioni di esbosco) e non conseguibile con le procedure inventariali attualmente in uso.

Per alcuni esempi di studio con approccio *area-based* per la stima su base ALS delle masse assestamentali, si rimanda alle ricerche condotte da Hollaus et al. (2007), Floris et al. (2010) e Magnussen et al. (2010).

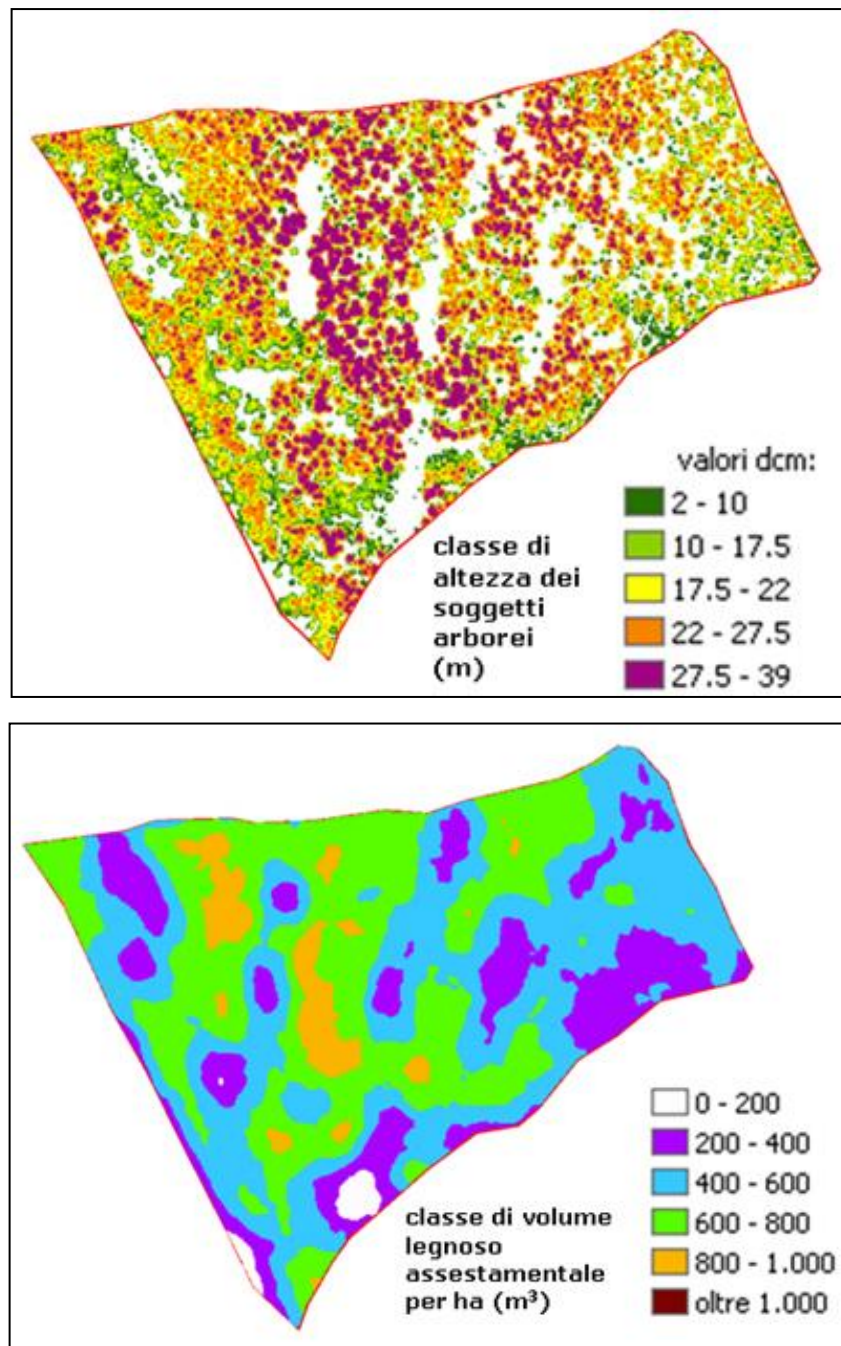


Figura 3.3: Esempio di CHM con relativa spazializzazione delle masse legnose assestamentali per ettaro (da: Floris e Clementel, 2011).

3.5.3. Il LIDAR nella caratterizzazione morfologico-strutturale dei soprassuoli forestali.

Oggigiorno la pianificazione forestale non guarda più soltanto alla stima della biomassa a fini produttivi, ma è sempre più orientata alla valutazione della struttura dei popolamenti forestali, alla definizione degli habitat presenti e alla gestione della biodiversità in senso lato. I dati da laser scanner aereo (ALS) vengono sempre più spesso proposti per la descrizione della struttura dei popolamenti forestali nei suoi aspetti della distribuzione verticale e orizzontale e

di copertura delle chiome. Grazie alla tridimensionalità dell'informazione fornita dal laser scanner aereo e allo sviluppo di algoritmi e procedure opportunamente interconnesse con le quali elaborare i dati grezzi di questo sistema, si possono ricavare una serie di prodotti normalmente ottenuti con costose campagne di rilievo a terra.

Nell'ambito degli approcci *area-based*, i dati ALS vengono utilizzati per il calcolo di parametri finalizzati alla caratterizzazione strutturale e alla classificazione tematica dei popolamenti. Sono, ad esempio, determinabili: l'indice di penetrazione delle chiome (LPI - *Laser Penetration Index*), che indica la capacità del raggio laser di raggiungere il terreno in aree boscate (Barilotti et al., 2005b), l'indice di area fogliare (LAI - *Leaf Area Index*) (Riaño et al., 2004) e la percentuale di copertura del soprassuolo, la presenza di *gaps* nella copertura forestale (vuoti, radure, superfici sottoposte ad utilizzazione, ecc.) (Bottalico et al., 2009) e l'altezza media dello strato arboreo, con conseguente caratterizzazione della struttura verticale.

Nell'ambito degli approcci *single tree-based*, vengono invece sviluppati metodi per l'estrazione automatizzata dai dati LiDAR riferiti ai singoli alberi. Un esempio di algoritmo, proposto da Barilotti et al. (2005a), è denominato *Top Hat*, che permette di estrarre gli elementi apicali del soprassuolo. Grazie a queste procedure è possibile determinare la numerosità e la posizione degli alberi presenti in bosco, nonché la densità arborea del popolamento e l'altezza dei singoli individui arborei.

Altri metodi, inoltre, permettono individuare automaticamente la forma delle chiome, risalendo ad altri parametri descrittivi delle stesse (area, altezza d'inserzione, volume).

L'insieme di queste variabili è un buon indicatore delle proprietà e dello stadio evolutivo del bosco. Esse consentono di valutare la qualità e la struttura degli habitat forestali, in quanto è possibile ottenere indici di diversità verticale delle chiome che possono essere trattati come parametri di qualità dell'habitat (Sitzia, 2009). È possibile, inoltre, arricchire le informazioni strutturali con quelle di composizione, specialmente se il sensore è integrato ad un ricevitore di immagini multi-spettrali.

4. MATERIALI E METODI

La ricerca è stata approntata basandosi in parte su dati informatici rilevati da un volo LiDAR e in parte su dati rilevati appositamente a terra. Questo capitolo riporta una sintetica descrizione dell'area di studio e la metodologia di lavoro adottata durante le fasi di rilevamento dei dati e le seguenti fasi di elaborazione, che hanno portato alla realizzazione di alcune carte tematiche ritenute utili ai fini della pianificazione e della gestione forestale.

4.1. Area di studio.

Lo scenario di studio di questa tesi consiste in alcuni popolamenti forestali in Val di Rabbi, valle alpina laterale alla Val di Sole, nel Trentino nord-occidentale (Figura 4.1).

Sono state prese come riferimento quattro particelle forestali, appartenenti a tre diversi piani economici. La scelta di queste particelle non è stata del tutto casuale, ma effettuata cercando di avere un panorama rappresentativo in termini di struttura, grado di copertura e composizione specifica. Le particelle di riferimento sono: la numero 9 e 28 del Piano di assestamento della Consortela Piazzola (codice piano n.184), la numero 1 del Piano di assestamento della Consortela Monte Plan (codice piano n.293) e la numero 1 del Piano di assestamento della Consortela Fratte (codice piano n.294) (Figura 4.2).

La particella 184/28 si estende per circa 8,1 ettari sulle pendici sud del Monte Sas Forà (2808 m), ad una quota compresa tra i 1760 e 1930 m s.l.m., racchiusa tra le Malghe Artisè e Cespedè.

La foresta è composta prevalentemente da abete rosso (82,6%) con larice (17,4%), caratterizzati da un portamento discreto. La struttura è pressoché varia, con la presenza di nuclei maturi coetanei attorniati da altri adulti che si intersecano movimentando strutturalmente la composizione. La rinnovazione naturale è buona, diffusa ed affermata.

I trattamenti passati hanno riguardato interventi fortemente selettivi impostati a gruppi e a buche. Le prescrizioni operative dell'ultimo Piano di assestamento prevedono tagli per gruppi prevalentemente scelti con criterio fitosanitario.



Figura 4.1: Inquadramento geografico della Val di Rabbi (Trentino nord-occidentale).

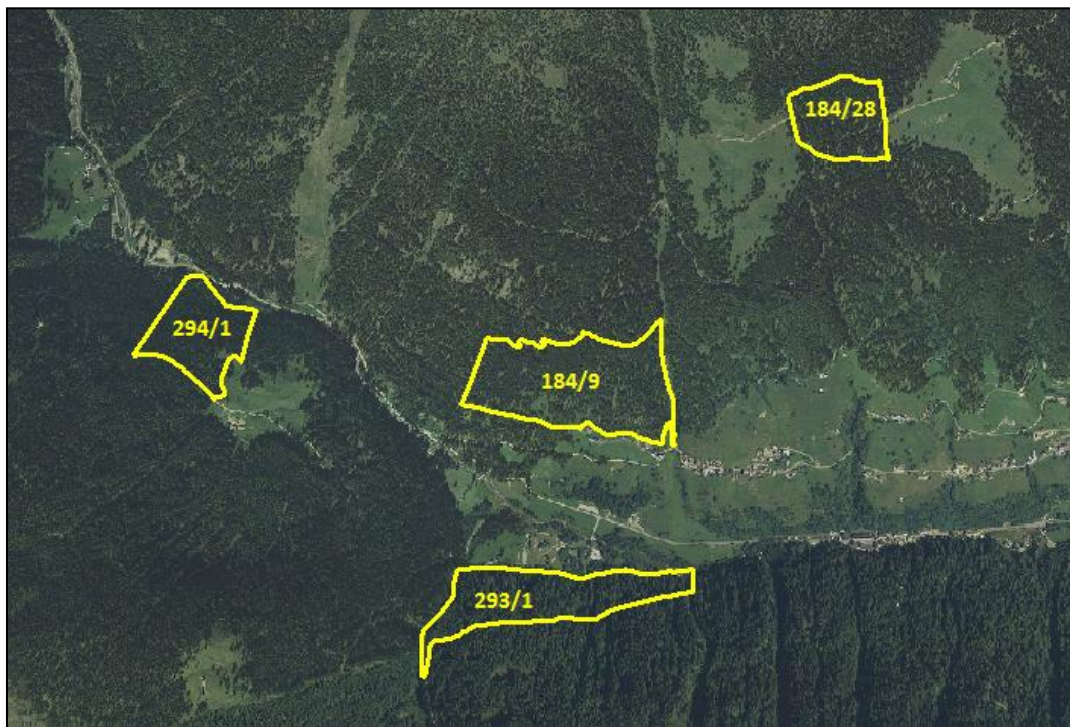


Figura 4.2: Ortofoto di una porzione della Val di Rabbi, con evidenziate le quattro particelle oggetto di studio.

La particella 184/9, anch'essa esposta a sud, si estende per circa 20,3 ettari ad una quota compresa tra i 1350 e 1590 m s.l.m., al di sopra della frazione Somrabbì. Il soprassuolo è composto prevalentemente da larice (68,5%) con abete rosso (31,4%).

Nella parte più orientale il larice predomina, formando un lariceto quasi puro, a contatto con la fustaia della parte a ovest, costituita invece da un popolamento misto con prevalenza di abete rosso. La struttura è varia. Il larice, allo stadio maturo e stramaturò (180-200 anni),

presenta un buon portamento e prevale nel piano dominante, mentre l'abete rosso, allo stadio di perticaia, si insedia nelle zone più evolute in successione al larice. Si possono notare, inoltre, alcune chiarie, conseguenza dell'azione del pascolo. La rinnovazione naturale, sia per il larice che per l'abete rosso, è buona ed in espansione, variamente distribuita da densa a rada.

I trattamenti passati hanno riguardato prelievi per pedali del larice. Le prescrizioni operative dell'ultimo Piano di assestamento prevedono ancora tagli di singole piante di larice nella parte est, mentre tagli a gruppi modesti ad ovest. Sono previsti, inoltre, diradamenti selettivi a gruppi da applicare all'abete rosso.

La particella 293/1 è estesa su 13,8 ettari di superficie posti tra i 1240 e i 1425 m s.l.m., con esposizione nord. Essa è caratterizzata da un bosco misto di abete rosso (85,5%) e larice (13,8%), con abete bianco sporadico (0,6%). Il soprassuolo è caratterizzato da una fertilità particolarmente elevata e stature che in qualche caso possono raggiungere i 47 metri. Le strutture sono nettamente distinte in diverse aree: nella parte alta è presente uno stadio di spessina-perticaia (60-70 anni); nella fascia basale invece si nota una struttura multiplana, conseguenza delle modalità di prelievo passate; la parte centrale è strutturalmente uniforme, matura (con età maggiore di 150 anni), di ottimo portamento e produttiva. La rinnovazione è buona e affermata, generalmente marginale e nelle aperture.

I trattamenti prevedono diradamenti nelle aree a perticaia e tagli a scelta di singole piante, o di qualche gruppo, appoggiandosi alla rinnovazione esistente, in modo da ampliare gli interventi precedenti.

La particella 294/1 ha un'estensione di 9,1 ettari, posti tra i 1340 e i 1530 m s.l.m., con esposizione nord. Il bosco presente è misto di abete rosso (60,6%), abete bianco (30,9%) e larice (8,5%). Il soprassuolo è tendenzialmente giovane, ma con individui maturi di ottimo portamento. La struttura è articolata e variabile da zona a zona. La zona superiore è costituita da un nucleo di spessina-perticaia nella parte a est, è poi presente un gruppo centrale adulto-maturo (larice 150 anni, abete rosso 130 anni) e una superficie con struttura multiplana a contatto del pascolo. Nella zona inferiore si nota un gruppo adulto (100-120 anni) con soggetti sottoposti. La rinnovazione naturale è abbondante e ben sviluppata.

I trattamenti prevedono tagli a gruppi con sgombero sulla rinnovazione, oppure qualche buca marginale o di nuova realizzazione. Sono inoltre prescritti sfolli e diradamenti a gruppi nelle aree a fustaia giovane.

4.2. Materiali.

In ambiente informatico è stato utilizzato prevalentemente il software commerciale ESRI “ArcGIS® 10”. Questo applicativo GIS è stato impiegato per tutte le procedure di elaborazione e analisi dei dati relativi alla stratificazione, alla semina dei punti di campionamento nelle quattro particelle prese in esame e, soprattutto, per le elaborazioni sui *layer* raster ottenuti dai dati LiDAR.

Altro software adottato in questa tesi è il programma “Microsoft Office Excel® 2007” della famiglia Microsoft Office. Questo è stato usato come ambiente di archiviazione dei dati rilevati nelle aree di saggio al suolo e di elaborazione numerica e statistica trasversale alle analisi eseguite nello studio.

In questa sperimentazione, gli strumenti usati per i rilevamenti al suolo sono stati:

- ricevitore GARMIN GPSMAP 76CSx;
- ipsometro LTI TruPulse 360/360B o, in alternativa, Haglöf Vertex III con Transponder T3;
- cavalletto dendrometrico;
- cordella metrica;
- fotocamera digitale Pentax Optio A10;
- estratti dell'ortofoto provinciale del 2006;
- strumenti, attrezzi e materiali accessori.

4.3. Rilevamenti LiDAR.

I dati di partenza provengono da una ripresa LiDAR effettuata nella stagione invernale 2006-2007 su gran parte del territorio provinciale del Trentino. Queste scansioni, commissionate dalla Protezione Civile – Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, sono state realizzate in periodo invernale allo scopo di produrre DTM ad alta risoluzione e accuratezza, riducendo l'interferenza dello strato arboreo. Il sensore utilizzato è un sistema Optech ALTM (*Airborne Laser Terrain Mapper*) 3033 installato su aeromobile che, registrando due ritorni per impulso (*first e last pulse*), misura le coordinate x, y, z (in WGS84) dei punti colpiti dai segnali emessi dal telemetro laser. Il capitolato di fornitura prevedeva due risoluzioni diverse per le aree di fondovalle e per quelle di montagna: nelle prime una densità media di circa 1,3 punti/m², nelle seconde circa 0,5 punti/m². Anche la precisione altimetrica prevista è diversa: 20 cm nelle aree di fondovalle, 30 cm nel resto del territorio (entrambe a 1 σ). I metadati relativi alla presa LiDAR sono riportati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1: metadati della presa LIDAR nell'area studio di Rabbi.

Sensore	Optech ALTM 3033
Velivolo	PATENAVIA P68
Altezza di volo	1500-1800 m a.g.l.
Frequenza impulsi	33 kHz
Densità di punti	1,3 p/m ²
Precisione altimetrica	20-30 cm (1 σ) (variabile tra zone di fondovalle e altre)
Numero echi	2 (<i>first e last</i>)
Epoca di volo	Inverno 2006-2007

La forte prevalenza di formazioni di conifere (che mantengono la chioma in periodo invernale) ha reso il dato LiDAR ben utilizzabile per le specifiche finalità della sperimentazione.

4.4. Rilevamenti al suolo.

Durante il mese di luglio 2012, nell'ambito di questa tesi, sono state effettuate delle ricognizioni al suolo con raccolta di dati dendrometrici, in un congruo numero di punti di campionamento, per disporre di "verità a terra" con le quali confrontare e validare le corrispondenti classificazioni prodotte con i dati LiDAR. Sembra opportuno segnalare che la differenza di sei anni tra il volo LiDAR (2006) e i rilievi al suolo (2012) può comportare la presenza di alcune discrepanze nel confronto tra i dati, legate in particolar modo agli incrementi in altezza e in volume, a sopraggiunti disturbi naturali (quali schianti da vento) e ad utilizzazioni avvenute in questo periodo.

Con il software ArcGIS, mediante il *tool Data Management\Feature Class\Create Random Points*, sono stati lanciati casualmente 52 punti di campionamento nelle quattro particelle (13 per ognuna). Di questi, 39 punti sono stati scelti per i rilievi al suolo, i rimanenti sono stati scartati per diversi motivi, tra cui la presenza di una tagliata compiuta negli ultimi sei anni, la vicinanza ad una strada o ad un confine di particella, la presenza di affioramenti rocciosi, ecc.: si trattava quindi di aree poco rappresentative o apportatrici di possibili errori nel confronto tra dati LiDAR e verità a terra. La localizzazione dei punti in base alle coordinate nominali del centro è stata compiuta tramite navigazione assistita da GPS di tipo escursionistico. Le coordinate del centro di ciascuna area di saggio, planimetriche nel sistema di riferimento cartografico UTM su Datum WGS84, sono state rilevate in modalità stazionaria con media di almeno 50 posizioni *stand-alone*, senza successiva correzione differenziale. Con tali parametri l'incertezza di posizionamento può essere stimata in circa 6 metri RMSE.

In ciascun punto di campionamento sono state rilevate diverse informazioni. Per prima cosa, si assegnava al punto la classificazione di “bosco” o “vuoto” a seconda che esso si trovasse sotto copertura o in corrispondenza di qualche chiara. Nelle aree classificate “bosco” si procedeva alla stima a vista della percentuale di copertura delle chiome, secondo le classi indicate dal protocollo per i rilievi dell’Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC) (Floris et al., 2004). In seguito si indicava il tipo strutturale (o classe cronologica) del bosco, secondo le seguenti classi: novelleto-spessina, perticaia, fustaia giovane, fustaia adulta, fustaia matura-stramatura, biplano e multiplano.

Successivamente si stimava a vista, misurando 2-3 altezze di alberi per calibrare le stime, l’altezza massima e l’altezza media (intesa come valore medio di altezza dello stadio cronologico presente, e non come, secondo la teoria della dendrometria classica, l’altezza dell’albero di diametro medio) degli alberi presenti in un intorno di circa 15-20 m di raggio. Per ogni punto sono stati inoltre misurati diametro ed altezza dendrometrica di due individui arborei per poter poi realizzare una curva ipsometrica di particella.

In ogni punto sono state scattate alcune foto rappresentative del soprassuolo e sono state annotate informazioni quali la tessitura orizzontale (uniforme, per gruppi, ecc.), la presenza di rinnovazione, ecc.

Su un sottoinsieme di quattro punti (un punto per ogni particella) è stato eseguito inoltre un conteggio degli alberi in un intorno circolare di raggio 20 m.

4.5. Elaborazioni dati LiDAR.

Prima di passare alla descrizione delle elaborazioni, si sottolinea che la pre-elaborazione della “nube” di punti georeferenziati (*raw data*) non viene trattata in questa parte del lavoro, poiché sia il DTM che il DSM, relativi alla Val di Rabbi, sono stati forniti direttamente dalla Provincia di Trento, in formato raster con risoluzione di un metro. Per questi due modelli, gestibili in ambiente GIS, è stato preso come riferimento il sistema cartografico UTM su Datum WGS84, in modo tale che potessero essere spazialmente sovrapponibili.

Per prima cosa, è stata eseguita una sottrazione locale algebrica (pixel a pixel) del DTM dal DSM mediante l’opzione *Raster Calculator* di *Spatial Analyst*. Si ottiene così un CHM provvisorio, il quale è dotato di alcuni valori negativi, dovuti ad errori di misurazione legati in genere a punti di elevata pendenza del versante, e di alcuni valori troppo elevati per specie come l’abete rosso o il larice, tipici dell’area di studio (es. >50 m). Di conseguenza, vengono eliminati i valori inferiori a 0 e superiori a 50 metri mediante le funzioni *Greater Than Equal*

e *Less Than*, presenti nelle funzioni logiche matematiche del software. Si otterranno due maschere binarie: “great_0” in cui i pixel con valori inferiori a 0 avranno valore binario “0”, mentre quelli maggiori o uguali a 0 avranno valore binario “1”; “less_50” in cui i pixel con valori maggiori o uguali a 50 avranno valore binario “0”, mentre quelli inferiori a 50 avranno valore binario “1”. Per ottenere il CHM definitivo, occorre moltiplicare le due matrici binarie “great_0” e “less_50” per il CHM provvisorio su *Raster Calculator*.

Dal CHM, è possibile estrarre informazioni e produrre *layer* monotematici descrittivi dei soprassuoli presi in esame, attraverso operatori focali di ArcMap (matrici “di esplorazione” o “a scorrimento”) e funzioni normalmente presenti in quasi tutti gli applicativi GIS.

Il primo di questi è il *layer* “vuoti”, una carta tematica che individua le zone con copertura forestale assente o in fase di ricostituzione (*gaps*), gli spazi vuoti e i “corridoi” che si creano nel tessuto delle chiome a causa di variazioni locali di densità.

Per prima cosa, a tutti i pixel aventi valori di altezza maggiore o uguale a 2 metri è stato assegnato valore 1, producendo una maschera binaria (nominata “great_2”, con 0 = pixel “vuoto” e 1 = pixel “albero”). Questo taglio a 2 metri è stato fatto sia per eliminare le formazioni arbustive o la rinnovazione arborea non ancora affermata, considerate come copertura poco significativa, sia perché spesso i dati, essendo di media risoluzione, sotto tale soglia sono poco attendibili.

Con la funzione *Focal Statistics* dal menù a tendina *Spatial Analyst*, si applica al *layer* “great_2” una matrice a scorrimento quadrata di dimensioni 7x7 m per ottenere il *grid* transitorio nominato “sum_7”, dato dalla somma dei valori dei singoli pixel 1x1. Il *grid* così ottenuto viene riclassificato, assegnando valore 1 (= bosco) se la somma è maggiore o uguale al 20% dei pixel, cioè pari a 10 (10 corrisponde al 20% di 50 m², circa pari alla dimensione della matrice di esplorazione 7x7), mentre valore 0 (= vuoto) se la somma è inferiore al 20%. Successivamente, mediante la funzione *From Raster to Polygon* dal menù a tendina *Conversion Tools*, si converte il *layer* raster ottenuto in formato vettoriale (*shapefile*), in modo da rappresentare dei poligoni delimitanti le aree “bosco” e “vuoto”. Mediante le funzioni di *Editing*, sono stati calcolati per ogni poligono l’area, il perimetro e il rapporto area/perimetro^2 , in modo da poter distinguere i vuoti di forma tendente al cerchio dai “corridoi” presenti nella copertura arborea.

Questa procedura, però, tende a classificare gli alberi isolati come bosco e le piccole discontinuità della copertura arborea come area non boscata. Di conseguenza, sono stati filtrati i poligoni “bosco” di dimensioni inferiori a 100 m², aggregando tali elementi ai

poligoni di vuoto adiacenti con la funzione *Dissolve* nel menù a tendina *Data Management*. Successivamente, sono stati filtrati i poligoni “vuoto” di dimensioni inferiori a 300 m², considerati come possibili azzeramenti locali di copertura compatibili con la presenza di bosco (eventualmente rado) piuttosto che veri e propri “vuoti”, aggregando tali elementi ai poligoni di bosco adiacenti.

Il secondo *layer* realizzato è denominato “carta del grado di copertura delle chiome”, una carta tematica che permette di definire la variazione del grado di copertura dello strato arboreo all’interno del popolamento.

Questo tematismo, anch’esso elaborato tramite matrici a scorrimento e operatori focali, viene prodotto partendo dalla maschera binaria “great_2” utilizzata per la carta dei vuoti. A esso si applica una matrice a scorrimento quadrata di dimensioni 15x15 m per ottenere il *grid* transitorio nominato “sum_15”, dato dalla somma dei pixel “bosco” presenti all’interno della matrice di esplorazione. In altre parole, al pixel centrale viene assegnato il valore del rapporto tra il numero di pixel “bosco” e il numero totale di pixel presenti nella matrice di esplorazione. Il *grid* così ottenuto viene successivamente trasformato (mediante la funzione *Reclassify*) in classi di copertura per una migliore leggibilità della carta. La classificazione adottata, che riprende quella di solito utilizzata nei piani di assestamento in Trentino, viene espressa dai seguenti valori:

- “1”: copertura inferiore al 10% (in pratica “non bosco”);
- “2”: copertura compresa tra 10-20% (bosco rado);
- “3”: copertura scarsa (20-50%)
- “4”: copertura media (50-80%);
- “5”: copertura elevata (oltre 80%).

Il terzo *layer* realizzato è denominato “carta dell’altezza media”. Come già segnalato, questa non corrisponde all’altezza media rigorosamente intesa in termini dendrometrici, che è l’altezza sulla curva ipsometrica dell’albero di area basimetrica media. Questa carta tematica in realtà non rappresenta neppure la media delle altezze degli alberi, in quanto l’algoritmo adottato per questo tematismo, che sfrutta anch’esso le matrici di esplorazione, assegna al pixel centrale di riferimento il valore mediato su un intorno di dimensione data. Di conseguenza, questo *layer* rappresenta piuttosto la media del “manto” arboreo, in quanto vengono mediati più punti appartenenti alle chiome degli alberi; quindi si colloca su valori sistematicamente più bassi delle altezze effettive degli alberi. Tuttavia, questo uso del CHM

permette di individuare strutture verticali caratteristiche dei popolamenti boscati che, in buona misura, ne interpretano lo stadio di sviluppo, a sua volta legato allo stadio cronologico.

L'elaborazione di questa carta prevede innanzitutto l'utilizzo di un CHM riclassificato, con i valori di altezza inferiori a 2 metri trasformati in "NoData". Questo passaggio viene fatto per evitare che i valori sotto i 2 m influiscano sulla determinazione dell'altezza media degli alberi. A questo raster si applica una matrice di scorrimento quadrata di dimensioni 15x15 m per ottenere il *layer* "hmean_15", dato dalla media dei valori dei singoli pixel 1x1.

Distribuendo in classi opportune i valori di questo tematismo, è possibile costruire una classificazione strutturale parallela a quella cronologica.

Sono state inoltre sperimentate due ulteriori procedure originali per l'elaborazione di carte tematiche utili sia alla stratificazione dei popolamenti che all'estrazione di particolari parametri ipsometrici (altezza media, altezza dominante, statura).

La prima di queste prevede la sottrazione del *layer* "hmean_15" dal CHM. In questo modo si azzerano tutti i valori inferiori alla media. È stata poi creata una maschera binaria, assegnando valore "NoData" a tutti i pixel aventi valori di altezza minori o uguali a zero e valore "1" ai pixel superiori a zero. Il *layer* ottenuto è stato moltiplicato per il CHM, ottenendo un altro *layer*, denominato "hmean_15B" (definibile anche come "carta della media delle chiome più alte della media"; in questa tesi, per abbreviare, si adotterà il termine "procedura B"), che quindi contiene come valori significativi solo i pixel appartenenti alle chiome di altezza superiore alla media ottenuta con matrici di scorrimento. Questa procedura permette di ridurre il peso dei punti più bassi delle chiome rispetto agli apici, il quale tende ad essere molto influente sulla media per gli stadi di bosco più maturi, dove la densità tende ad essere minore.

La seconda procedura ha lo scopo di individuare gli apici di alcuni individui arborei, prevalentemente appartenenti al piano dominante. Tra i diversi algoritmi utilizzati per estrarre gli apici di singoli alberi, ve ne sono alcuni che sfruttano le analogie esistenti fra la forma degli apici arborei (rovesciati) e alcune caratteristiche morfologiche dei bacini idrografici; spesso viene usata la funzionalità GIS *morphological watershed segmentation* (Goerndt et al., 2010). In questo studio si è invece deciso di applicare la funzionalità *Sink*, ipotizzando che le singole chiome arboree possano essere considerate come aree di drenaggio interno ("pozzi") individuabili nei DTM. L'algoritmo *Sink* presente nel *tool Hydrology* di ArcMap, identifica gli affossamenti ("pozzi") o le aree di drenaggio interno presenti nel raster di input. Un "sink"

è una cella o un insieme di celle spazialmente collegate la cui direzione di flusso è indefinita, ovvero non può essere assegnato uno degli otto valori validi in un raster di direzione del flusso (*Flow Direction*). Questo può verificarsi quando tutte le celle confinanti sono superiori alla cella di elaborazione.

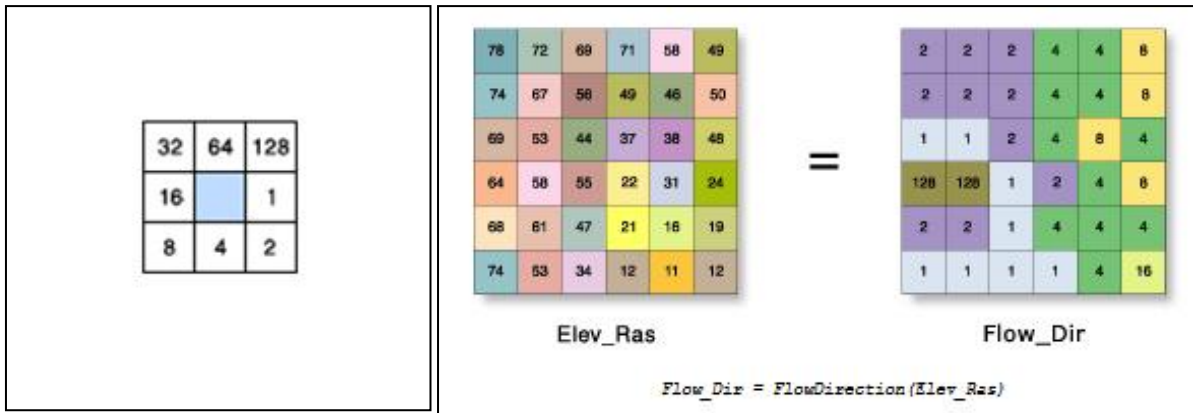


Figura 4.3: esempio di determinazione della direzione del flusso da ogni cella del raster tramite l'opzione *Flow Direction*. L'uscita di tale funzione è un numero intero raster cui valori variano da 1 a 255. Gli otto valori per ciascuna direzione dal centro sono riportati nel riquadro a sinistra. Per esempio, se la direzione di caduta più ripida è a sinistra della cella di elaborazione corrente, la sua direzione di flusso viene codificata come 16.

Per prima cosa, sono stati invertiti i valori del CHM, moltiplicando il raster per -1. In questo modo i valori più alti, corrispondenti agli apici delle chiome, diventano i più bassi, come se fossero in fondo a delle buche o a dei “pozzi”. Il “CHM negativo” ottenuto viene sottoposto al *toll Hydrology\Flow Direction*: è un passaggio preparatorio per poter successivamente determinare i sink. In seguito, al *layer* prodotto viene applicato l'algoritmo *Sink*. Molto spesso questa procedura individua due pixel contigui che sono reciprocamente sink. Il valore che viene assegnato al sink non ha alcun significato, ma è solo un progressivo che individua il numero di sink, quindi in prima approssimazione il numero di chiome arboree individuate. Il *layer* “Sink” viene in seguito trasformato in una maschera binaria, da moltiplicare con il “CHM positivo”, con valore “1” per tutti i pixel maggiori o uguali a 1, mentre quelli inferiori si assegna valore “NoData”. Viene effettuata una *Zonal Statistics* chiedendo la statistica “MAXIMUM” del *layer* CHM e usando il *layer* “Sink” come zonale: in questo modo i pixel contigui appartenenti a una stessa zona, vale a dire a uno stesso apice, avranno identico valore (quello massimo) di altezza.

L'unico difetto di questa procedura è che spazialmente si avranno apici rappresentati non da un solo pixel, ma da grappoli di 2-3 pixel. Per risolvere questa imperfezione, viene innanzitutto convertito il raster in formato vettoriale prima mediante il *tool Conversion*

Tools\From Raster to Points e poi tramite il *tool Extraction\Extract Value to Points*, per assegnare ad ogni punto dello shapefile il corrispettivo valore di altezza dell'apice. Attorno ai punti ottenuti, viene creato un *Buffer* circolare di dimensione 0,8 m dal menù *Geoprocessing*, selezionando il *flag* "GRID CODE" (corrispondente al valore dell'altezza) nella voce "DISSOLVE", in modo da unire in poligoni i grappoli di 2-3 punti contigui appartenenti ad uno stesso apice. La fase successiva prevede di convertire i poligoni da "multipart" a "single part", nel menù *Data Management*. Infine, per migliorare la rappresentazione degli apici, vengono estratti i baricentri dei poligoni mediante il *tool Data Management\Feature to Point* (Figura 4.4).

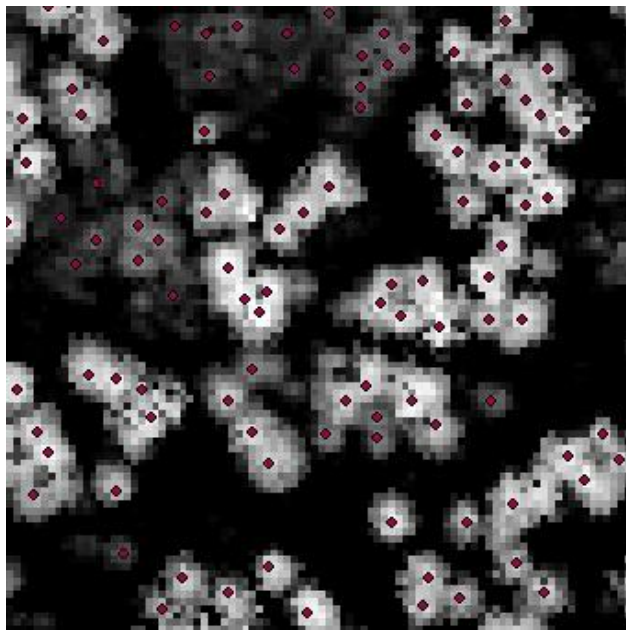


Figura 4.4: estratto di CHM con evidenziati (in rosso) i singoli apici arborei estratti dalla procedura appena descritta.

Conclusa la parte delle elaborazioni inerenti allo sviluppo di carte tematiche e all'individuazione degli apici arborei, la fase successiva ha previsto la creazione di uno shapefile rappresentante le coordinate dei 39 punti di campionamento a terra (vedi Allegati). Da questi vengono estratti, mediante la funzione *Extract Value to Points*, i valori dei layer prodotti. In questo modo è possibile eseguire un confronto tra le informazioni derivate dal LiDAR e le "verità a terra" rilevate al suolo, argomento trattato nel successivo capitolo.

5. RISULTATI E DISCUSSIONE

In questo capitolo verranno trattate singolarmente le carte prodotte. L'accuratezza dei risultati ottenuti è stata controllata di volta in volta con modalità diverse a seconda della variabile considerata.

In Tabella 5.1 sono riportati i dati a terra (denominati con l'acronimo "ADS", ovvero Area Di Saggio) e i dati da laser scanner aereo (denominati con l'acronimo "LiDAR").

Tabella 5.1: tabella riassuntiva dei dati rilevati al suolo (ADS) e i dati estratti dal LiDAR, utilizzati in questo studio. Nella colonna "vuoti", si assegna valore "1" alle aree classificate "bosco" e valore "0" alle aree classificate "vuoto". Nella colonna "classi di copertura", la classe "1" corrisponde ad aree con copertura inferiore al 10%, "2" copertura compresa tra 10-20%, "3" copertura compresa tra 20-50%, "4" copertura compresa tra 50-80% e "5" copertura superiore al 80%. Le altezze (medie e massime) sono riportate in metri.

ID	VUOTI		CLASSE COPERTURA		ALTEZZA MEDIA				ALTEZZA MAX	
	ADS	LiDAR	ADS	LiDAR	ADS (m)	LiDAR (m)	LiDAR B (m)	APICI LiDAR (m)	ADS (m)	LiDAR (m)
a01	0	1	1	3	26	12,37	17,20	22,80	28	26,86
a03	1	1	5	4	20	10,62	14,17	18,57	25	22,19
a04	1	1	4	4	25	10,90	16,47	20,25	28	24,78
a05	1	1	3	4	26	13,23	18,32	23,03	30	26,20
a06	1	1	4	5	20	14,35	19,84	20,17	30	26,35
a07	1	1	5	5	25	16,72	21,42	24,50	28	27,92
a09	1	1	5	5	15	10,76	13,16	15,39	22	19,86
a10	1	1	5	5	21	15,53	19,63	22,17	26	26,29
a12	1	1	5	4	15	12,13	17,89	17,25	25	27,78
a13	0	1	1	3	18	15,94	22,14	17,22	26	26,35
b14	1	1	5	5	22	12,31	16,17	20,21	32	38,90
b15	0	0	1	3	20	7,87	12,81	23,49	32	30,68
b16	1	1	4	5	22	11,06	16,17	19,78	34	29,63
b17	1	1	5	5	16	9,97	12,81	14,91	24	18,07
b21	1	1	5	5	20	14,40	17,60	21,09	26	26,03
b22	1	1	4	4	22	12,79	19,46	22,30	30	29,02
b23	1	1	4	3	21	7,46	13,11	17,74	35	27,77
b24	1	1	5	5	21	12,44	15,44	19,33	24	21,78
b25	1	1	4	5	22	12,95	17,49	19,81	27	24,52
b26	1	1	4	5	22	14,09	18,50	22,59	31	31,98
c27	1	1	4	4	32	16,05	23,71	31,74	40	38,86
c28	1	1	4	3	35	17,67	29,59	34,95	42	41,09
c29	1	1	4	3	35	21,28	29,05	32,18	40	39,31
c30	1	1	5	4	10	11,41	20,89	20,55	35	36,85
c31	1	1	5	5	13	9,09	16,62	22,04	25	32,10
c32	1	1	4	4	35	15,16	27,80	30,59	40	38,88
c35	1	1	4	3	34	25,24	33,33	37,99	40	40,56
c36	1	1	4	4	37	24,31	31,79	38,59	42	45,96

ID	VUOTI		CLASSE COPERTURA		ALTEZZA MEDIA				ALTEZZA MAX	
	ADS	LiDAR	ADS	LiDAR	ADS (m)	LiDAR (m)	LiDAR B (m)	APICI LiDAR (m)	ADS (m)	LiDAR (m)
c38	0	0	1	3	32	15,36	22,62	29,79	38	32,34
c39	1	1	4	5	33	23,16	28,44	31,66	40	37,14
d40	1	1	4	5	28	21,47	27,71	31,38	33	36,82
d44	1	1	5	5	18	17,62	21,78	23,96	30	28,24
d45	1	1	4	5	27	15,83	23,09	28,48	32	33,31
d46	1	1	5	5	29	22,49	27,87	32,13	37	38,79
d48	1	1	4	5	27	17,45	22,29	26,03	31	31,51
d49	1	1	5	4	25	11,85	17,95	22,99	32	33,31
d50	1	1	5	5	21	14,91	19,10	22,60	32	26,73
d51	1	1	5	5	28	22,53	26,71	30,56	35	35,19
d52	0	1	1	3	30	19,90	26,36	32,28	34	39,63

5.1. Carta dei “vuoti”.

Dalle analisi tese a verificare il livello di congruenza tra la classificazione fornita dai dati ALS e quella corrispondente alle valutazioni al suolo, è stata riscontrata un’ottima corrispondenza tra la carta tematica elaborata automaticamente e le verità a terra.

È stata realizzata una matrice di confusione, al fine di verificare il grado di precisione della classificazione LiDAR rispetto a quella al suolo. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 5.2: matrice di confusione relativa alla carta dei “vuoti”. Valore “1” corrisponde alle aree classificate “bosco” e valore “0” corrisponde alle aree classificate “vuoto”.

BOSCO - VUOTI		ADS		SUM
		0	1	
LiDAR	0	2	0	2
	1	3	34	37
SUM		5	34	39

Su 37 casi classificati “bosco” dal LiDAR, 34 sono stati riscontrati a terra come tali, i restanti 3 invece sono risultati inquadrabili come “vuoti”. Non si sono riscontrati invece errori nella classificazione “vuoto” da parte del LiDAR. Ne deriva che l’accuratezza complessiva del LiDAR è stata del 92,31%.

La presenza dei tre falsi positivi può essere dovuta ad alcuni motivi. Per prima cosa la scelta di una matrice di 7x7 m comporta una dilatazione, seppur minima, dell’area classificata bosco, all’incirca di 1,4 m dai bordi delle chiome: di conseguenza alcune piccole radure o

chiarie nella copertura arborea non hanno raggiunto la soglia minima di area necessaria a definire un vuoto, stabilita pari a 300 m^2 (Figura 5.1).

Altra causa d'errore, generalizzabile a tutti i casi, può essere legata a errori di posizionamento GPS che in alcuni casi possono portare a discrepanze significative tra la posizione dell'area di saggio al suolo e quella della finestra di analisi LiDAR (Figura 5.2).

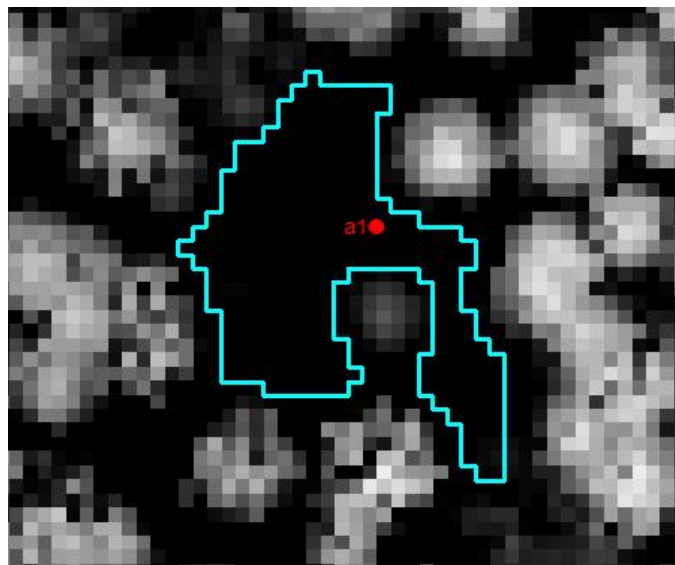


Figura 5.1: esempio di erronea classificazione. La lieve dilatazione dell'area bosco in seguito all'applicazione della matrice di scorrimento $7 \times 7 \text{ m}$ ha comportato una riduzione dell'area classificata a terra come "vuoto", arrivando ad un valore di 293 m^2 , inferiore alla soglia prestabilita: di conseguenza, il LiDAR ha classificato il punto di campionamento come "bosco".

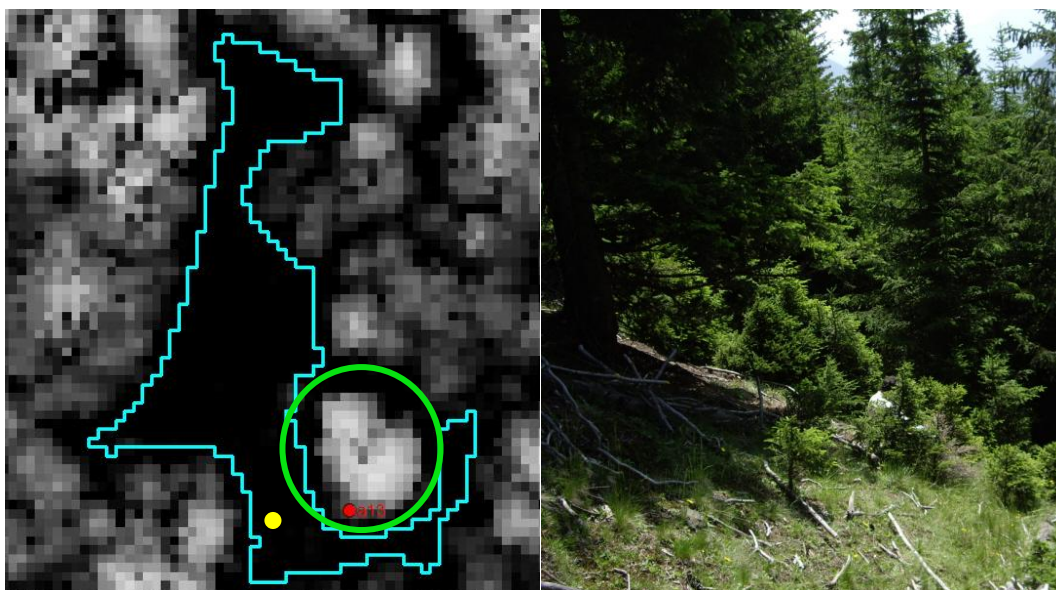


Figura 5.2: esempio di errato posizionamento GPS. Il punto giallo corrisponde al punto effettivo di campionamento, al di fuori della copertura dell'abete rosso (evidenziato in verde sul CHM e fotografato dall'esatto punto di campionamento), mentre il punto rosso corrisponde alle coordinate rilevate dal ricevitore.

L'identificazione e la misura della dimensione dei *gaps* è un aspetto di rilevante importanza nelle indagini forestali di carattere ecologico, selvicolturale e gestionale. Analizzando il rapporto Area/Perimetro², è possibile eseguire valutazioni sui singoli spazi vuoti presenti nella copertura (Figura 5.3). In particolare, è possibile individuare:

- corridoi presenti nel tessuto delle chiome a causa di variazioni locali di densità;
- spazi vuoti dovuti alla caduta di singole piante o di gruppi di alberi per cause di natura biotica (es. schianti da vento);
- aree soggette ad utilizzazioni passate;
- possibili aree di rinnovazione o novelleti.

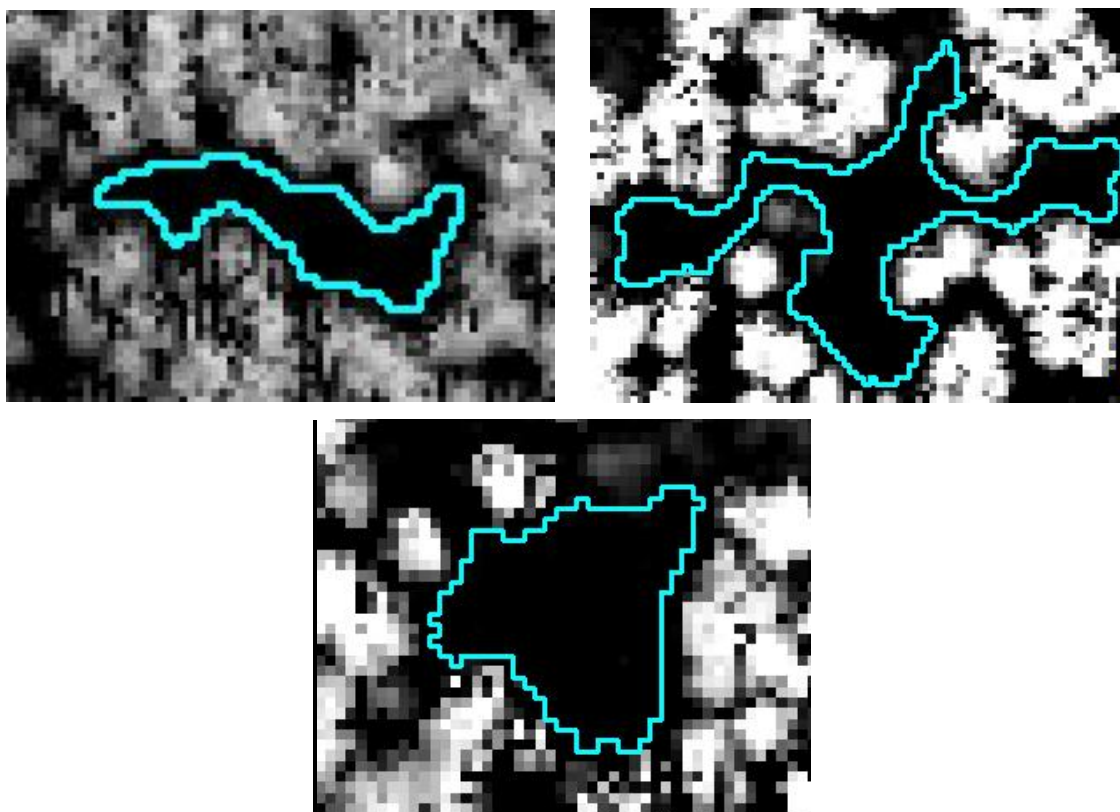


Figura 5.3: esempi di aree non boscate. Le due immagini riportate sopra, corrispondono ad alcuni corridoi nella copertura forestale, mentre l'immagine in basso rappresenta un vuoto con rapporto Area/Perimetro² maggiore rispetto ai primi due.

Grazie alla disponibilità di una carta dei “vuoti”, l'assestatore ha la possibilità di escludere automaticamente a priori i vuoti dalla scelta di punti di campionamento in cui verrà svolto l'inventario della variabili dendrometriche quantitative, riducendo le perdite di tempo per raggiungere questi siti privi di dati significativi. Inoltre, la misura dell'estensione dei vuoti permette di sottrarre tali aree alle superfici a cui il tecnico forestale attribuisce le stime dendrometriche effettuate (es. area basimetrica), in quanto non apportatori di contributo

provvisoria rilevante. In questo modo, con il contenimento delle variabilità campionarie, si aumenta l'efficienza campionaria (Corona et al., 2011).

5.2. Carta del grado di copertura delle chiome.

Per quanto riguarda il *layer* "carta del grado di copertura", il confronto fra la carta elaborata automaticamente e l'analoga classificazione operata tramite sopralluoghi sul terreno ha mostrato una discreta corrispondenza. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 5.3: riepilogo delle classificazioni messe a confronto relative alle classi di copertura ("matrice di confusione"). Valore "1" corrisponde ad aree con copertura inferiore al 10%, "2" copertura compresa tra 10-20%, "3" copertura compresa tra 20-50%, "4" copertura compresa tra 50-80% e "5" copertura superiore al 80%.

CLASSI DI COPERTURA		ADS				
		1	2	3	4	5
LiDAR	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	3	5	0	0	4	0
	4	0	0	1	5	4
	5	0	0	0	8	12

È stato elaborato, inoltre, un grafico a bolle per facilitare l'interpretazione dei dati (Figura 5.4).

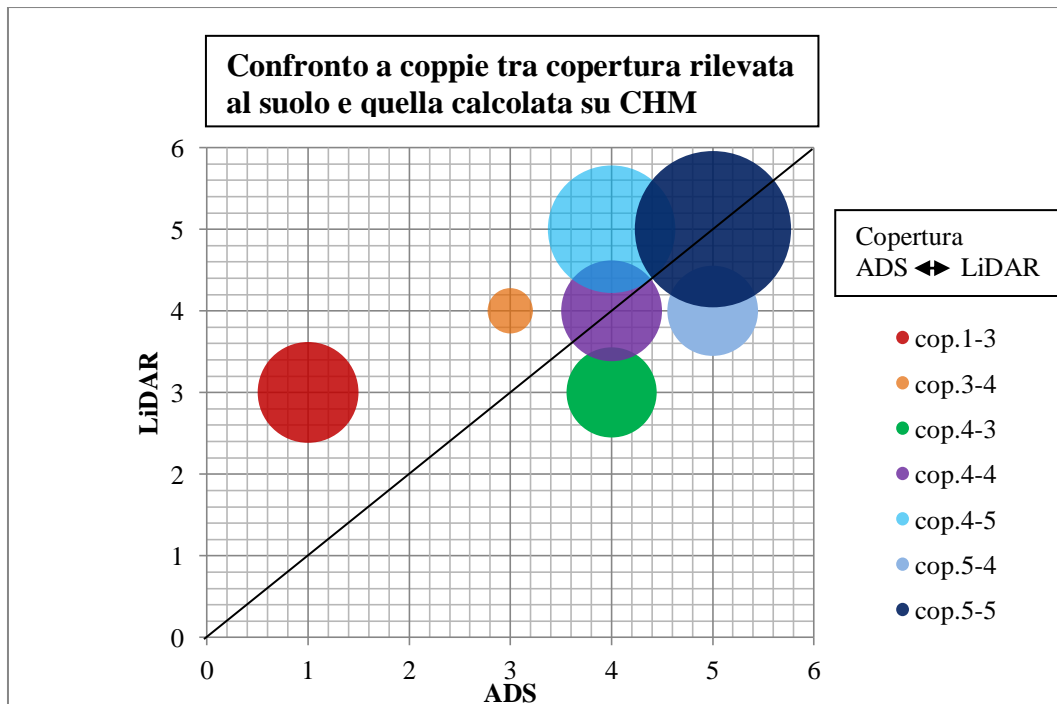


Figura 5.4: confronto a coppie delle classificazioni operate. La dimensione di ogni bolla corrisponde alla frequenza della coppia. La diagonale nera rappresenta l'asse delle classificazioni corrette.

Come primo aspetto, si può affermare che in assoluto la classe “5” (copertura elevata) è la più numerosa, a prescindere dal fatto che sia stata rilevata al suolo o dal LiDAR.

Dalle analisi dei dati, 17 casi su 39 hanno avuto una buona corrispondenza tra rilievi a terra e LiDAR, riscontrata soprattutto nelle classi più elevate.

Soprattutto per le categorie “copertura media” e “copertura elevata”, si è verificata la presenza di scostamenti di una classe nelle classificazioni assegnate dal LiDAR e dai rilievi a terra. Questi scarti possono essere considerati di lieve entità e sono riconducibili ad esempio a errori di stima a vista della copertura delle chiome, a errori di posizionamento GPS (cfr. par. 5.1), al taglio al CHM prescelto (in questo caso era pari a 2 m) e degli intervalli adottati per le classi di copertura.

Per quanto riguarda le classi inferiori, sono stati constatati cinque casi di errore di maggior entità, cioè con scostamenti di due classi tra le due classificazioni messe a confronto. In particolare, le classi con copertura delle chiome inferiore al 10% sono state assorbite dalla classe “bassa copertura”. Questi errori sono riconducibili al principio di funzionamento dell’algoritmo applicato per la realizzazione di tale carta tematica, con modalità confrontabili con quelle già segnalate per la carta dei “vuoti”. La scelta di una matrice di 15x15 m, infatti, comporta una dilatazione delle aree con copertura arborea maggiore del 20%. Di conseguenza alcune zone considerate prive di copertura, quali margini di bosco o piccole chiarie nella copertura arborea, tendono ad essere incluse nelle aree boscate (Figura 5.5). L’applicazione di matrici di scorrimento di dimensioni inferiori, ad esempio 7x7 m, permette di ridurre il problema della diluizione della copertura delle chiome nelle aree non boscate. Tuttavia, la scelta di tali matrici comporta la presenza di risultati più frastagliati e “rumorosi”, poiché tende a valorizzare maggiormente la copertura di un singolo albero, piuttosto che quella di un gruppo di piante.

Analizzando le discrepanze complessive tra le classificazione effettuate, è stato riscontrato uno scarto medio pari a -0,28. Questo valore negativo indica una lieve sottostima generale della percentuale di copertura rilevata al suolo rispetto a quella elaborata automaticamente dal LiDAR.

Per quanto riguarda la media degli scarti in valore assoluto, invece, è risultato un valore pari a 0,69: questo significa che mediamente si verifica uno scostamento di meno di una classe tra i due metodi messi a confronto; ciò avviene soprattutto per le classi inferiori, risultate affette da un maggior errore.

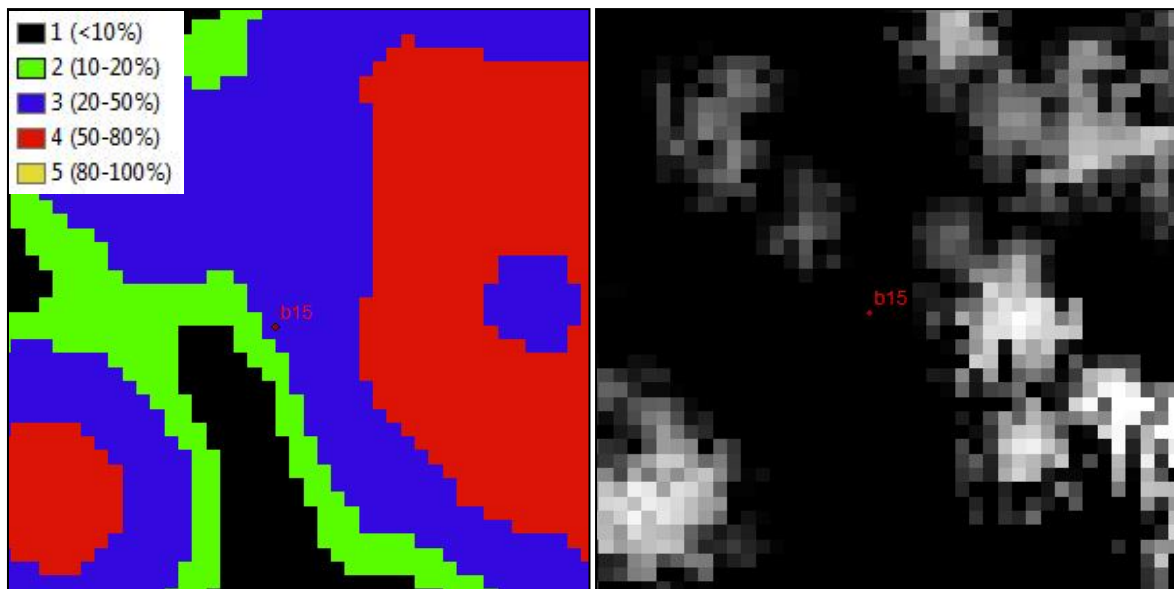


Figura 5.5: esempio di classificazione erronea. Il punto "b15", classificato "vuoto" nella carta dei vuoti, nella carta delle coperture viene classificato con copertura bassa (pari a 22%).

Si può affermare che, nelle condizioni testate, il LiDAR considera alla stessa stregua tutti i punti intercettati aventi un'altezza appena superiore ai 2 metri (soglia del taglio), mentre spesso l'operatore in campo tende ad attribuire scarsa copertura ad alberi molto bassi.

L'elaborazione della carta esaminata in questo paragrafo permette comunque di fornire un buon supporto nella classificazione tematica dei popolamenti forestali, sia perché permette di orientare il tecnico pianificatore all'individuazione di zone a bassa copertura e con potenziale rinnovazione, sia perché tale *layer* può essere utilizzato come ausilio ad altre carte elaborate automaticamente. Ad esempio, associando la carta della copertura a quella dell'altezza media (come si vedrà di seguito) è possibile ottenere ulteriori informazioni per il riconoscimento delle strutture dei popolamenti forestali.

5.3. Carte tematiche per l'individuazione delle strutture.

L'impiego del CHM per individuare le strutture verticali caratteristiche dei popolamenti boscati, riconducibili in buona parte al loro stadio di sviluppo, ha portato a buoni risultati. Tuttavia, le due procedure adottate per la realizzazione delle carte tematiche trattate in questo paragrafo hanno condotto ad esiti differenti. In merito, sono stati realizzati dei grafici a dispersione, al fine di confrontare i valori di altezza media stimate al suolo e quelli estratti dai *layer* elaborati.

Nel caso del primo metodo adottato, che ha permesso la realizzazione del *layer* “hmean_15”, la relazione tra l’altezza media estratta dal CHM e la corrispettiva altezza media stimata a terra è riportata in Figura 5.6:

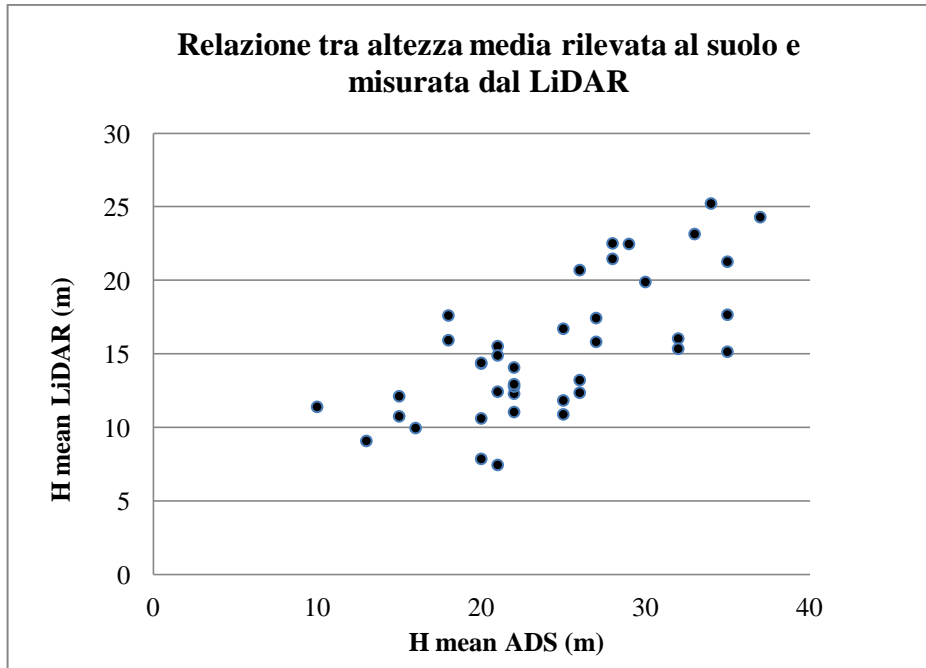


Figura 5.6: relazione tra altezza media rilevata al suolo e la corrispondente altezza media calcolata da dati LiDAR.

Come prima analisi dei dati, si nota la presenza di valori di altezza media rilevati dal LiDAR sistematicamente più bassi rispetto a quelli a terra. Complessivamente la media degli scarti tra i valori di altezza media al suolo e quelli elaborati in ambiente GIS risulta essere pari a 9,16 m.

Nello specifico, si nota che i popolamenti di stadio cronologico superiore (es. adulto o maturo), tendenti a densità di fusti inferiore, presentano maggiori discrepanze nelle stime messe a confronto (Figura 5.7). Questi aspetti sono riconducibili, come già segnalato precedentemente, al principio di funzionamento dell’algoritmo applicato al CHM. Attraverso le matrici di scorrimento, infatti, viene assegnato al pixel centrale di riferimento il valore mediato di più punti appartenenti alle chiome degli alberi: di conseguenza, il peso dei punti più bassi delle chiome rispetto agli apici tende ad essere molto influente sulla media degli strati arborei più maturi del popolamento, dove la densità è minore.

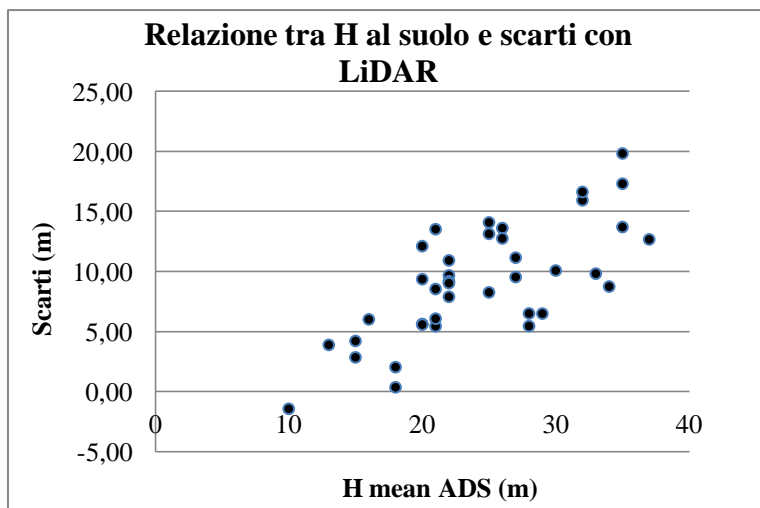


Figura 5.7: relazione tra altezze medie rilevate al suolo e i corrispettivi scarti tra altezza media rilevata a terra e altezza media calcolata da lati LiDAR.

Nel grafico è possibile notare come gli scarti tra le due classificazioni messe a confronto tendono ad essere maggiori per gli stati cronologici superiori.

Per quanto riguarda la procedura applicata al CHM che ha permesso la realizzazione del *layer* "hmean_15B" (carta della "media delle altezze sopra la media") (cfr. par. 4.5), i risultati ottenuti sono riportati in Figura 5.8:

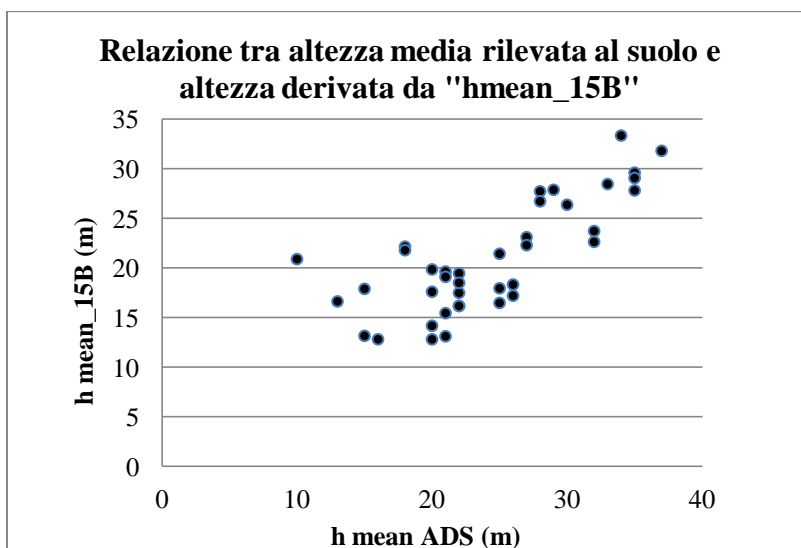


Figura 5.8: relazione tra altezza media rilevata al suolo e la corrispondente altezza media calcolata da dati LiDAR mediante la procedura "B".

In questo caso, i valori di altezza media calcolati dai dati LiDAR si avvicinano maggiormente a quelli rilevati a terra. Si riscontra, infatti, una media degli scarti tra i valori al suolo e quelli

estratti dal CHM pari a 3,37 m, mentre la media degli scarti in termini assoluti è pari a 4,67 m.

In particolare, questa elaborazione ha permesso di ridurre in buona parte il peso dei punti delle chiome rispetto agli apici, specialmente nelle aree di stadio cronologico più avanzato.

A riprova di quanto detto, alla carta tematica appena descritta è stata associata la carta della copertura delle chiome: in questo modo è possibile verificare la relazione tra la copertura e la densità dei fusti a partire dal rapporto “copertura/altezza media” che, ragionevolmente, si è supposto proporzionale al numero di individui arborei (*layer* “densità”). Mettendo a confronto i due *layer* dell’altezza media ottenuti attraverso le due procedure sopra descritte, accostati al *layer* “densità” (Figura 5.9), si nota come le maggiori differenze tra le due carte tematiche elaborate si riscontrano in effetti proprio nelle aree a minore densità di individui arborei.

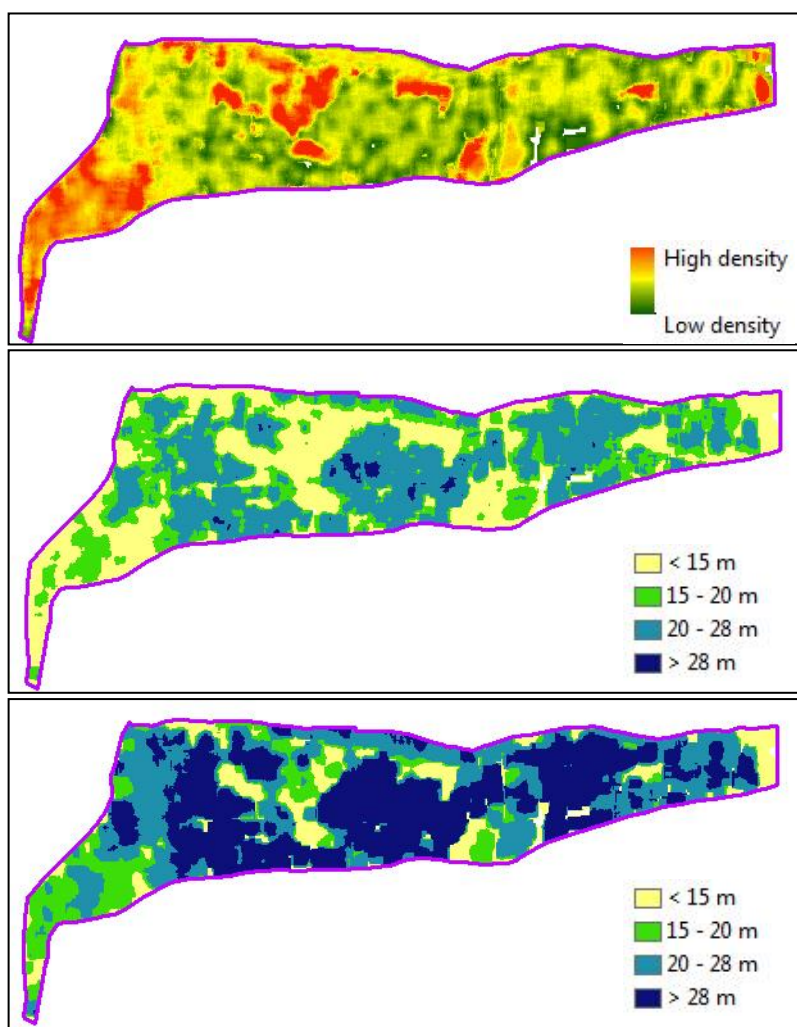


Figura 5.9: esempio di tre *layer* della particella 293/1: a) carta della "densità" (data dal rapporto copertura/altezza media), b) carta dell'altezza media, c) carta dell'altezza media determinata con la procedura "B". Si nota che nelle aree a minore densità di alberi c'è una maggior discrepanza tra le due procedure messe a confronto.

Tuttavia, per entrambi i metodi applicati le relazioni tra l'altezza media calcolata e l'altezza media rilevata al suolo sono pressoché lineari: mettendo a confronto i valori elaborati con le due procedure, si nota che esiste comunque una buona correlazione tra i procedimenti (Figura 5.10).

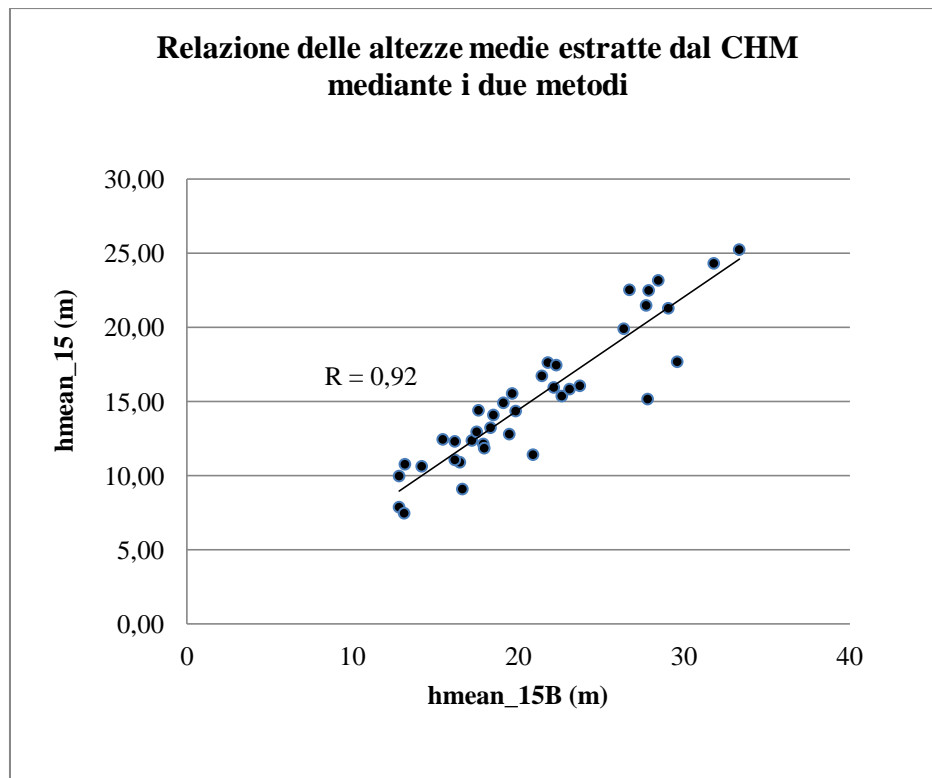


Figura 5.10: confronto tra le due procedure adottate per la realizzazione della carta dell'altezza media (Hmean_15B in ascissa e Hmean_15 in ordinata). La retta nera corrisponde alla linea di interpolazione.

Si può concludere affermando che i due metodi applicati al CHM producono carte tematiche che forniscono indicazione sulle strutture verticali caratteristiche dei popolamenti boscati. Distribuendo in classi opportune i valori di queste carte, infatti, è possibile costruire una classificazione strutturale parallela a quella cronologica e a quella dello stadio di sviluppo. La scelta degli intervalli delle classi, però, comporta una forzatura nella classificazione, poiché nella realtà il passaggio da uno stadio cronologico ad un altro avviene in modo graduale, non in maniera drastica; tuttavia, cambiando gli intervalli dei *layer* GIS prodotti è possibile identificare le aree in cui si verifica un passaggio da una classe cronologica ad un'altra.

5.3.1. Individuazione degli apici arborei.

Il tool *Hydrology\Sink* ha permesso di rilevare i valori di altezza di alcuni individui arborei. Questi dati sono stati successivamente utilizzati per individuare l'altezza media e massima

degli apici arborei presenti in un intorno di 15 m dai diversi punti di campionamento. Questi parametri sono stati relazionati alle corrispettive altezze medie e massime rilevate al suolo.

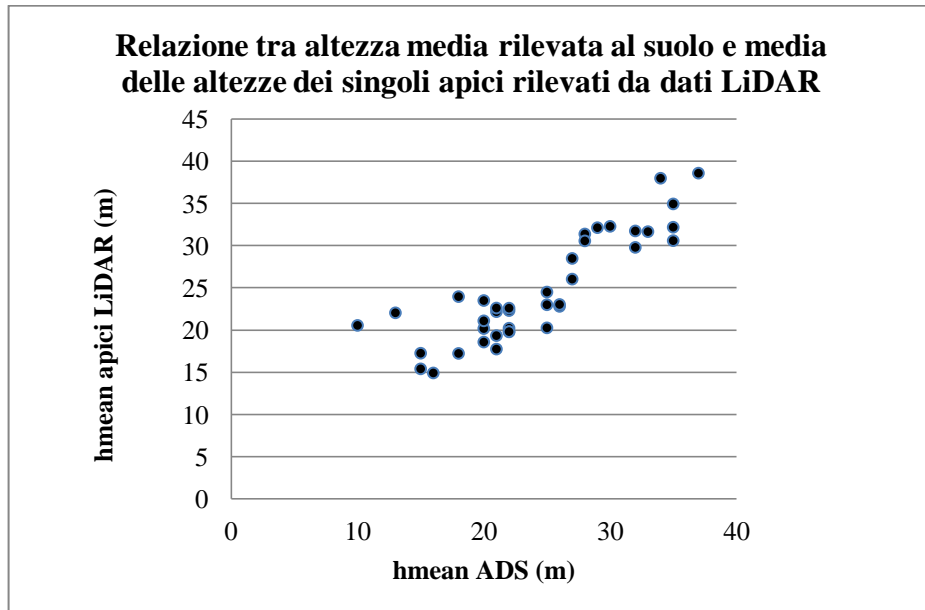


Figura 5.11: relazione tra altezza media rilevata al suolo e altezza media degli apici estratti dai dati LiDAR.

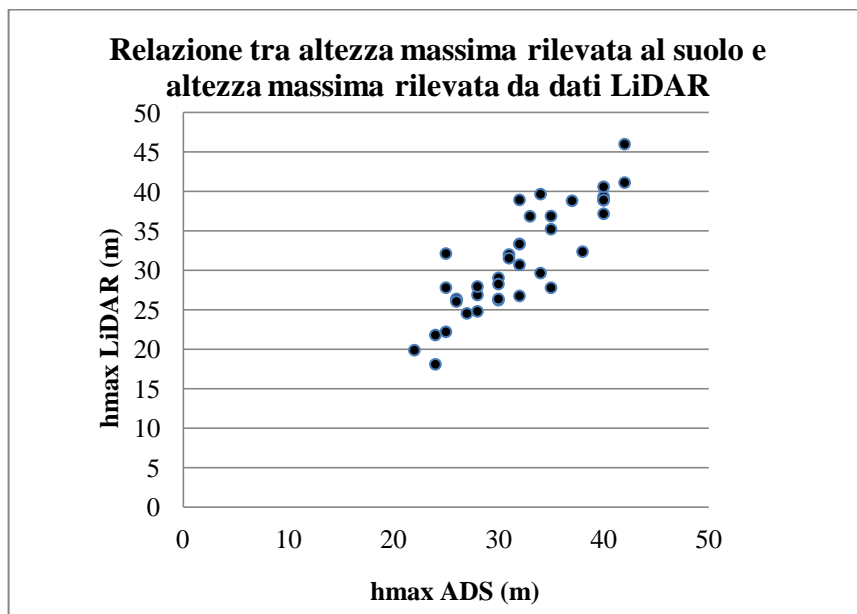


Figura 5.12: relazione tra altezza massima rilevata al suolo e altezza massima misurata dal LiDAR.

Rispetto ai confronti precedenti tra l'altezza media degli "apici LiDAR" e quella rilevata al suolo si riscontra una relazione più stretta (Figura 5.11). La media degli scarti, infatti, risulta essere pari a -0,39 m: ciò significa che sul totale le discrepanze con i rilievi a terra si compensano a vicenda. La media degli scarti in termini assoluti risulta essere pari a 2,43 m.

Per quanto riguarda le altezze massime (Figura 5.12), i valori rilevati a terra coincidono quasi perfettamente con quelli misurati dal LiDAR. Si evidenzia infatti uno scarto medio pari 0,55 m, praticamente entro l'incertezza delle misure stesse, mentre la media degli scarti in termini assoluti risulta pari a 2,57 m.

Per quanto concerne gli scarti in termini assoluti, sia nel caso dell'altezza media sia in quello dell'altezza massima, questi possono essere dovuti ad alcuni motivi. Si ricorda innanzitutto che la data del volo precede di sei anni i rilievi al suolo: sono dunque da attendersi le differenze dovute agli incrementi longitudinali verificatisi nel frattempo, che dovrebbero essere, tuttavia, di valore positivo. Altre motivazioni possono spiegare anche i casi di differenze negative. Sicuramente va messa in conto una dose di imprecisione nell'effettuazione dei rilievi a terra, a causa della non sempre buona visibilità degli apici arborei, spesso ostacolata dalle piante vicine. Con i rilievi a terra, inoltre, si sono assegnati valori interi alle altezze medie e massime nei punti di campionamento, il che può comportare scarti con i valori rilevati dal LiDAR, espressi invece in termini decimali.

Altro aspetto da considerare è la qualità della ripresa LiDAR. Infatti, gli studi condotti sugli approcci *single tree-based* presenti in letteratura richiedono in genere risoluzioni dei dati più elevate (es. 20 punti/m²). In questo studio, la media densità di punti pari a 1,3 punti/m² fa sì che il LiDAR in alcuni casi non riesca a prendere la cima esatta degli alberi (Figura 5.13): di conseguenza, si tende ad estrarre un numero inferiore di alberi.

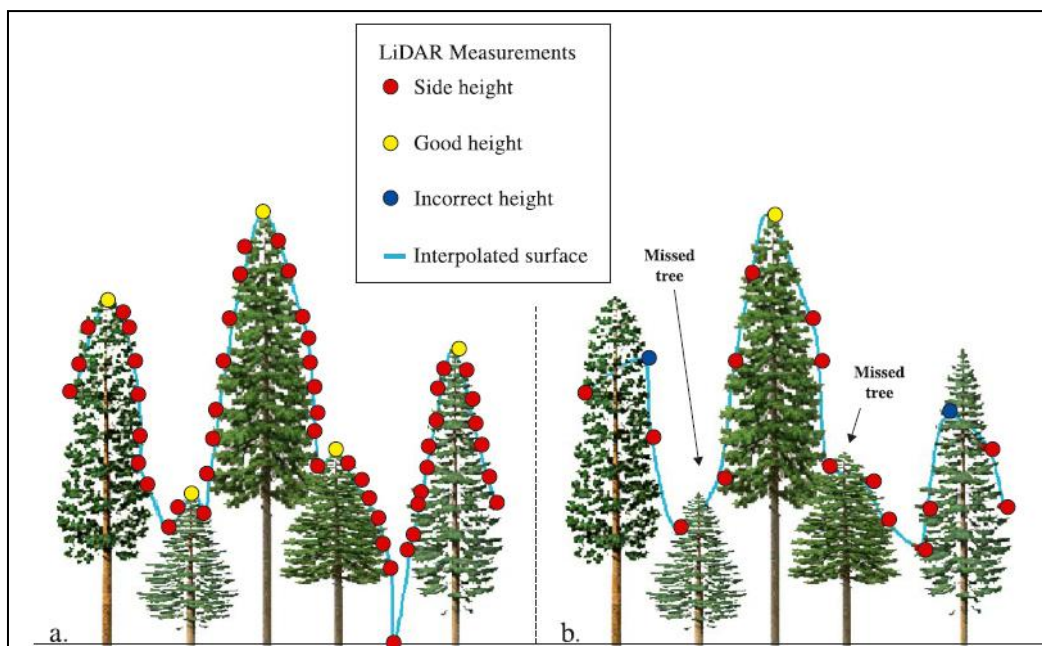


Figura 5.13: a) ripresa LiDAR ad alta risoluzione, b) ripresa LiDAR a medio-bassa risoluzione. Si nota come una minor densità di punti al metro quadro induca problemi nell'identificazione dei corretti apici arborei (da. Zimble et al., 2003).

In particolare vengono individuati gli apici appartenenti al piano dominante, mentre alberi con chiome compenstrate o individui del piano dominato non vengono spesso rilevati.

A riprova di quanto detto, si riportata in Tabella 5.4 il confronto tra il numero di alberi rilevato a terra e il numero di alberi rilevato da LiDAR nei quattro punti in cui sono stati conteggiati a terra gli alberi presenti in un raggio di 20 m.

Tabella 2.4: confronto tra numero di alberi misurato al suolo e numero di alberi individuati dal LiDAR, entrambi in un raggio di 20 m attorno a quattro punti di campionamento, uno per particella.

ID	N° ALBERI ADS	N° ALBERI LiDAR
a5	32 (di cui 5 dominate)	27
b23	27 (di cui 2 dominati)	35
c39	32 (di cui 7 dominate)	26
d40	52 (di cui 20 dominate)	27

La funzione *Sink* ha permesso di individuare buona parte degli apici appartenenti al piano dominante. Nel caso del punto “b23”, però, è stata riscontrata al contrario una sovrastima del numero di alberi rispetto a quelli rilevati a terra. Questo fatto è sicuramente riconducibile, tenuto conto che si trattava di un volo invernale, alla presenza di larici nell’area di riferimento i quali presentano in assenza di aghi un maggior tasso di penetrazione del raggio laser nelle chiome: questo può comportare l’individuazione di “falsi apici” in corrispondenza dei rami.

L’applicazione di questo algoritmo non ha del resto lo scopo di estrarre tutti gli individui arborei presenti, in modo da risalire alla densità di popolamento, ma di migliorare le stime campionarie di altezza effettuate con i rilievi al suolo, spesso onerosi o difficili da compiere, specialmente quando la visibilità degli apici arborei è limitata.

Il contributo di questo algoritmo permetterebbe ulteriormente di estrarre alcuni parametri descrittivi del popolamento. Ad esempio, risalendo alla statura o all’altezza dominante dei soprassuoli forestali si potrebbero ottenere informazioni utili relative alla fertilità stagionale. In questa tesi, per motivi di spazio e tempo, non si è pervenuto ad un esito risolutivo.

6. CONCLUSIONI

In questa sperimentazione è stato confermato il contributo che i dati LiDAR possono fornire alla pianificazione forestale, proponendo soluzioni che, seppur non ancora ottimali, potranno essere applicate durante la redazione di Piani di Assestamento. Le elaborazioni condotte in ambiente GIS, che non hanno fatto ricorso quindi a software particolarmente specializzati, hanno consentito di estrarre informazioni e di ottenere diversi prodotti cartografici di dettaglio, attraverso i quali il tecnico pianificatore potrà impostare la realizzazione ex-novo o la revisione di piani di gestione forestali e pianificare gli interventi selvicolturali più opportuni.

In particolare, il laser scanning si è dimostrato una tecnica valida per la realizzazione della carta dei vuoti, rilevando efficacemente le diverse aperture presenti nella copertura arborea e dimostrandosi un supporto migliore rispetto agli strumenti tradizionali del telerilevamento.

Le procedure per la realizzazione della carta della copertura arborea, invece, pur portando a risultati abbastanza soddisfacenti, hanno prodotto errori non trascurabili nella classificazione delle aree a bassa densità.

Per quanto riguarda le altezze, la maggior parte delle altezze medie ottenute con l'uso di dati LiDAR ha mostrato una buona correlazione con i rilievi effettuati sul campo, con risultati migliori ricorrendo alla procedura che individua "la media delle chiome più alte della media". L'estrazione degli apici arborei ha portato a buoni risultati, soprattutto nello strato superiore, in quanto gli individui presenti negli strati inferiori sono sovrapposti da altri alberi nel piano dominante. Tuttavia, dall'analisi delle altezze non è possibile ricavare l'errore esatto delle stime ottenute con i dati LiDAR, per il semplice fatto che in generale le altezze ricavate in campo, sia per stima a vista sia per misura con l'uso dell'ipsometro, sono soggette a loro volta a errori difficili da quantificare.

Il lavoro non aveva peraltro la pretesa di portare a delle conclusioni certe ed evidenti, ma intendeva esplorare le possibili applicazioni assestamentali dei dati LiDAR tramite procedure operative alla portata dei professionisti forestali. Per avere una conferma scientificamente robusta di questi esiti occorrerebbe adottare rigorosi criteri statistici sia nella scelta del campione di dati che nell'analisi dei risultati.

Per quanto riguarda l'eventuale realizzazione di quello che sarebbe forse l'elaborato più importante della classificazione automatica, la Carta delle Strutture, la seguente considerazione può essere fatta al riguardo: la classificazione realizzata manualmente dai rilevatori con i sopralluoghi al suolo non è solo di tipo strutturale, ma chiama fortemente in

causa il criterio della composizione in specie (arboree) per il quale il LiDAR non fornisce (al momento) informazioni discriminanti. Al riguardo occorrerà probabilmente integrare i dati LiDAR con dati multispettrali ad alta risoluzione (non disponibili per questa tesi) che permettano di riconoscere le specie arboree principali o i gruppi di specie.

L'adozione di dati LiDAR non deve essere intesa a sostituire il fondamentale ruolo dell'analisi esperta del professionista, poiché esistono molte situazioni articolate e di transizione difficilmente modellizzabili con l'applicazione di indici di derivazione algebrica tramite GIS. I sopralluoghi e rilevamenti sul terreno, infatti, forniscono informazioni e "punti di vista" difficilmente surrogabili con questo sistema di telerilevamento. L'impiego del LiDAR, piuttosto, va visto nel senso della costruzione di un sistema di supporto alle decisioni, creando delle sinergie per migliorare la percezione e l'analisi dell'ambiente da pianificare.

Infine, le tecnologie utilizzate nei sistemi LiDAR si stanno evolvendo in maniera molto rapida: negli ultimi anni, infatti, si è registrato un continuo progresso, ed è previsto che in futuro tale sviluppo tenderà ad aumentare. Il settore forestale può beneficiare dell'evoluzione dei sensori LiDAR, in quanto si determina una maggiore capacità di raccolta dei dati, influenzata dalla quota di volo (ad altitudine maggiore la strisciata copre una maggiore superficie), fattore molto importante, perché influisce direttamente sul costo di acquisizione dei dati, riducendolo e favorendo un mercato più accessibile. Per tali motivi, però, è necessario un parallelo procedere delle attività sperimentali allo scopo di stare al passo con le innovazioni tecnologiche.

7. BIBLIOGRAFIA

- ARUGA K., SESSIONS J. e AKAY A. E., 2005 – *Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes*. In Gingo Alves M.V., 2010. Applicazioni LiDAR per la stima di parametri inventariali. Docente guida Marchetti M., Dottorato di Ricerca in "Ambiente e Territorio" (XXIII Ciclo), Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi del Molise: 1-27.
- BARILOTTI A., 2009 – *Estrazione di parametri forestali da dati laser scanning in alcune aree delle foreste regionali del Cansiglio, di Caltea e di Fusine*. Forestry and Environmental Mapping Solutions, Regione Autonoma Friuli Venezia-Giulia, Direzione centrale risorse agricole, naturale e forestali. Servizio gestione forestale e antincendio boschivo. Udine, 6 agosto 2009, 49 pp.
- BARILOTTI A., 2010 – *La tecnologia LiDAR per il settore forestale*. Seminario ARSIA, Palazzo dei Congressi, Firenze, 15 novembre 2010 (<http://www.rivistasherwood.it>).
- BARILOTTI A., TURCO S. e CIAMPALINI R., 2005a – *Misurazione automatica di singoli alberi attraverso analisi morfologiche su dati laser scanning*. Atti della 9^a Conferenza annuale ASITA, Catania: 243-248.
- BARILOTTI A., TURCO S., NAPOLITANO R. e BRESSANC E., 2005b – *La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali*. Proceedings of 15th Meeting of the Italian Society of Ecology, 12-14 September 2005, Torino, 6 pp.
- BOTTALICO F., MONTAGHI A. e TRAVAGLINI D., 2009 – *Identificazione dei gaps nella copertura forestale con dati LiDAR*. Atti della 13^a Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009: 507-512.
- BOWEN Z. H. e WALTERMIRE R. G., 2002 – *Evaluation of light detection and ranging (LiDAR) for measuring river corridor topography*. In Gingo Alves M.V., 2010. Applicazioni LiDAR per la stima di parametri inventariali. Docente guida Marchetti M., Dottorato di Ricerca in "Ambiente e Territorio" (XXIII Ciclo), Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi del Molise: 1-27.
- BURTCR R., 2002 – *Lidar principles and applications*. Paper presented at the 2002 IMAGIN Conference, Traverse City, MI, 13 pp.
- CASELLA V., 2003 – *Introduzione al Laser Scanning Aereo*. In Crosilla F. e Galetto R., 2003. La tecnica del Laser Scanning. Teoria ed applicazioni. CISM, Collana di Geodesia e Cartografia: 1-37.
- CECCHINATO A., 2012 – *Trattamento ed elaborazione dei dati LiDAR: dai punti grezzi ai modelli digitali*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 181: 30-32.
- CLEMENTEL F., COLLE G., FARRUGGIA C., FLORIS A., SCRINZI G. e TORRESAN C., 2010 – *Stima operativa di parametri dendrometrici forestali con riprese LiDAR invernali a bassa risoluzione*. Atti della 14^a Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010: 625-630.
- CLEMENTEL F., COLLE G., FARRUGGIA C., FLORIS A., SCRINZI G. e TORRESAN C., 2012 – *Estimating forest timber volume by means of "low-cost" LiDAR data*. Italian Journal of Remote Sensing 44 (1): 125-140.
- CONFORTI ANDREONI D., MASSARI G. e POTLECA M., 2003 – *Generazione di modelli digitali del terreno dalla combinazione di dati lidar da piattaforma aerea e terrestri*. ASITA Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni territoriale e

Ambientali - Verona, Italy, 6 pp.

- CORONA P., MARCHETTI M., SCRINZI G., TORRESAN C., 2011 – *Stato dell'arte delle applicazioni laser scanning aereo a supporto della gestione delle risorse forestali in Italia*. Atti della 15^a Conferenza Nazionale ASITA, Reggio di Colorno, 15-18 novembre 2011: 721-732.
- CROSILLA F., BEINAT A. e VISINTINI D., 2004 a – *Il laser scan: principi di funzionamento ed elaborazione dei dati*. Università di Udine, Laboratorio di Geomatica p/o CIRMONT (Amaro, UD) (<http://www.provincia.udine.it>).
- CROSILLA F., VISINTINI D., PREARO G. e FICO B., 2004 b – *Esperienze di filtraggio, classificazione, segmentazione e modellizzazione di dati laser aerei*. Convegno Nazionale SIFET "Attuali metodologie per il rilevamento a grande scala e il monitoraggio", Chia Laguna, Cagliari, 22-24 settembre 2004 (<http://www.geomatica.uniud.it>).
- FLORIS A. e CLEMENTEL F., 2011 – *Esperienze di ricerca per l'impiego operativo del LiDAR aereo in Assestamento forestale*. VII Corso intensivo di alta formazione per Dottorandi di Ricerca del Settore forestale-ambientale, CSALP - Pieve Tesino (TN), 11 aprile - 16 aprile 2011.
- FLORIS A., CLEMENTEL F., FARRUGGIA C. e SCRINZI G., 2009 – *Il LiDAR nella stratificazione tematica dei soprassuoli forestali: applicazioni in Trentino*. Atti della 13^a Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009: 1063-1070.
- FLORIS A., CLEMENTEL F., FARRUGGIA C. e SCRINZI G., 2010 – *Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 42 (3): 15-32.
- FLORIS A., GASPARINI P., SCRINZI G., TABACCHI G. e TOSI V., 2004 - *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio: Manuale di campagna per i rilievi di seconda fase con istruzioni per l'uso dell'applicativo IFOR2*. Documento preparato dall'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura per il Ministero per le Politiche Agricole e Forestali, 182 pp.
- GINGO ALVES M. V., 2010 – *Applicazioni LiDAR per la stima di parametri inventariali*. Docente guida Marchetti M., Dottorato di Ricerca in "Ambiente e Territorio" (XXIII Ciclo), Dipartimento di Scienze e tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi del Molise: 1-27.
- GOERNDT M. E., MONLEON V. J. e TEMESGEN H., 2010 – *Relating Forest Attributes with Area- and Tree-Based Light Detection and Ranging Metrics for Western Oregon*. Western Journal of Applied Forestry, 25 (3): 105-111.
- GOMARASCA M. A., 2004 – *Elementi di geomatica*. Associazione Italiana di Telerilevamento, Milano, 618 pp.
- GRIGOLATO S., 2009 – *Pianificazione delle utilizzazioni forestali: potenzialità dei Modelli Digitali del Terreno ad alta risoluzione*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 156: 35-39.
- GRIGOLATO S., 2010 – *La tecnologia LiDAR per il settore forestale*. Seminario ARSIA, Palazzo dei Congressi, Firenze, 16 novembre 2010 (<http://www.rivistasherwood.it>).
- HOLLAUS M., WAGNER W., MAIER B. e SCHADAUER K., 2007 – *Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment*. Sensors, 7: 1559-1577.
- LINGUA E. e MARZANO R., 2012. *LiDAR e incendi boschivi: applicazioni, potenzialità e prospettive*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 181: 18-20.
- LO BRUTTO M., 2005 – *I sistemi Laser Scanning aerei*. Geomatica e modellizzazione

digitale del terreno, Master Universitario di II livello in "Sistemi Informativi Territoriali", Università degli Studi di Palermo (<http://www.idra.unipa.it/>).

- MAGNUSSEN S., NÆSSET E. e GOBACKEN T., 2010 – *Reliability of LiDAR derived predictors of forest inventory attributes: A case study with Norway spruce*. Remote Sensing of Environment, 114: 700–712.
- PIROTTI F., 2009 – *La tecnologia lidar per applicazioni forestali*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 156: 7-15.
- PIROTTI F., 2012 – *Sviluppi della tecnologia laser scanner*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 181: 11-15.
- PIROTTI F., GRIGOLATO S., LINGUA E., SITZIA T. e TAROLLI P., 2010 – *Applicazioni laser scanner per l'ambito forestale*. Atti della 14^a Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010: 1485-1490.
- RIAÑO D., MEIER E., ALLGÖWER B., CHUVIECO E. e USTIN S. L., 2003 – *Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling*. In Gingo Alves M.V., 2010. Applicazioni LiDAR per la stima di parametri inventariali. Docente guida Marchetti M., Dottorato di Ricerca in "Ambiente e Territorio" (XXIII Ciclo), Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi del Molise: 1-27.
- RIAÑO D., VALLADARES F., CONDÉS S. e CHUVIECO E., 2004 – *Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forest*. Agricultural and Forest Meteorology, 124: 269-275.
- RINAUDO F., 2003 – *La tecnica laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche*. In Crosilla F. Galetto R., 2003 – La tecnica del Laser Scanning. Teoria ed applicazioni. CISM, Collana di Geodesia e Cartografia: 133-155.
- SCHIESS P., 2005 – *The application of spatially explicit digital elevation and canopy surface data for harvest planning: moving from coarse digital elevation models and stand averages to detailed ground and canopy surface model in the design of forest transportation system*. In Grigolato S., 2009. Pianificazione delle utilizzazioni forestali: potenzialità dei Modelli Digitali del Terreno ad alta risoluzione. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 156: 35-39.
- SCRINZI G., 1989 – *Precisione degli inventari assestamentali per cavallettamento totale: un'analisi di trent'anni di esperienza applicativa in Trentino*. Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e l'Alpicoltura vol. XI: 143-186.
- SITZIA T., 2009 – *Analisi degli habitat forestali: utilizzo del Modello Digitale delle Chiome (DCM)*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 156: 31-34.
- TAROLLI P., 2009 – *Identificazione della rete idrografica: importanza dell'informazione topografica di dettaglio in ambiente alpino*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 156: 43-47.
- WHITE R.A., DIETTERICK B.C., MASTIN T. e STROHMAN R., 2010 – *Forest Roads Mapped Using LiDAR in Steep Forested Terrain*. In Pirotti F., Grigolato S., Lingua E., Sitzia T. e Tarolli P., 2010. Applicazioni laser scanner per l'ambito forestale. Atti della 14^a Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010: 1485-1490.
- ZIMBLE D.A., EVANS D.L., CARLSON G.C., PARKER, R.C., GRADO S.C., GERARD P.D., 2003 - *Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR*. Remote Sensing of Environment, 87: 171–182.

Ringraziamenti

Se sono arrivato fino a questo punto il merito non è esclusivamente mio ma anche di tutti coloro che mi circondano e che hanno collaborato con me, ognuno a suo modo, al raggiungimento di questo traguardo. Trovo giusto dunque ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato fino a questo momento.

Il primo pensiero va, ovviamente, ai miei genitori Patti e Teo e mia sorella Veronica, senza i quali certamente non sarei la persona che sono. Un infinito grazie non solo per avermi permesso di intraprendere questo percorso ma soprattutto per esserci sempre stati, per avermi sostenuto in ogni circostanza sopportando i miei repentini cambi di umore e per avermi aiutato a crescere non solo attraverso i vostri consigli ma anche attraverso le vostre critiche.

Per quanto riguarda la stesura di questa tesi non è facile citare e ringraziare, in poche righe, tutte le persone che ne hanno contribuito allo sviluppo. La mia gratitudine va a tutto il personale e alla dirigenza del CRA di Villazzano di Trento per la cordialità con cui sono stato accolto in azienda per il tirocinio, per il supporto tecnico ricevuto e per avermi fornito testi, dati e consigli indispensabili per l'elaborazione del mio studio. In particolare voglio rivolgere un ringraziamento speciale al dott. Floris, al dott. Clementel e al dott. Scrinzi, che, nonostante i mille impegni, hanno sempre trovato il tempo per ascoltarmi, consigliarmi e indirizzarmi nel mio lavoro di tesi e per avermi fornito insegnamenti preziosi per il mio futuro professionale.

Ringrazio inoltre la dott.ssa Colpi, relatrice di questa tesi, per avermi seguito in questo lavoro con professionalità e tanta, tanta pazienza.

E grazie a zio Luciano che mi ha assistito direttamente in questo lavoro affiancandomi nella raccolta dei dati, un aiuto veramente insostituibile.

Infine, ma non per questo meno importanti, voglio ringraziare gli amici che hanno condiviso con me questo percorso sia formativo che di vita.

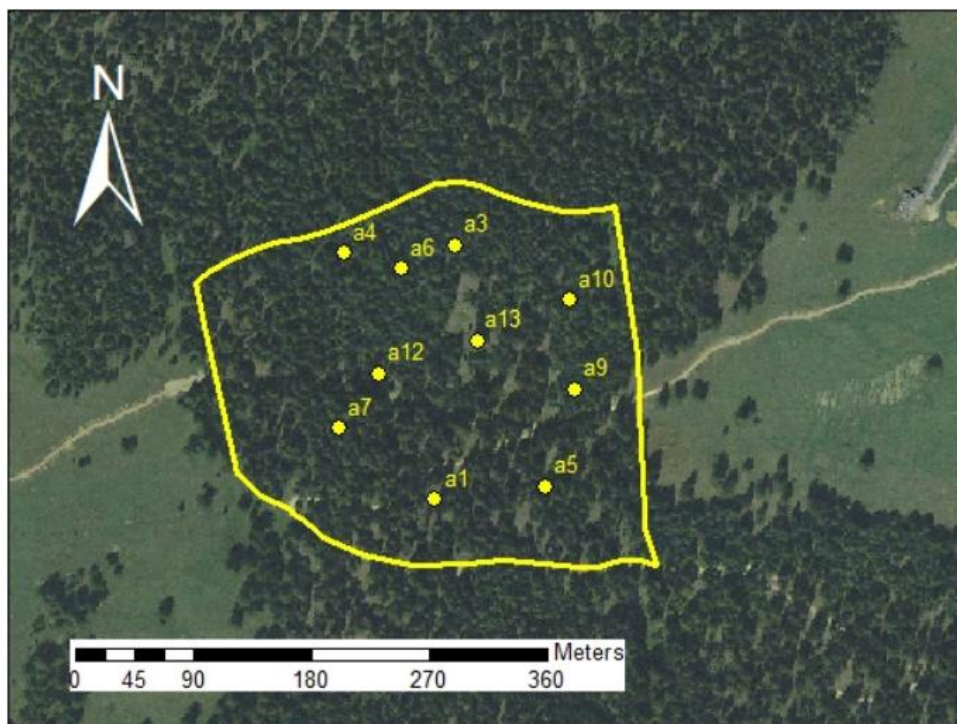
Grazie ai miei coinquilini Damiano, Emanuele, Stefano, Cristian, Gianluca e Valentino per avermi sopportato in questi tre anni di convivenza, per aver condiviso con me lunghi viaggi insieme e per avermi regalato indimenticabili momenti di follia.

Grazie ai miei compagni di studi Marco, Stefano, Mauro, Fabrizio, Alessandro, Martina, Jenny, Paola, Francesca, Anna e Deborah per essermi stati vicini sia nei momenti difficili, sia nei momenti felici: sono stati per me più veri amici che semplici compagni.

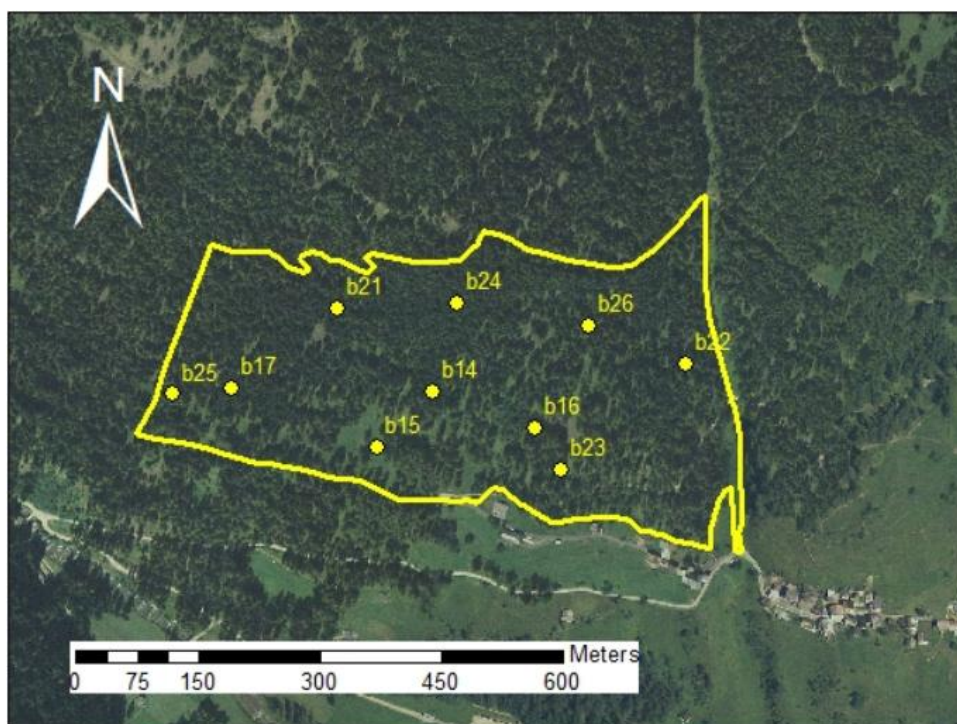
Senza tutti voi non sarebbe stato lo stesso, GRAZIE!

Allegati

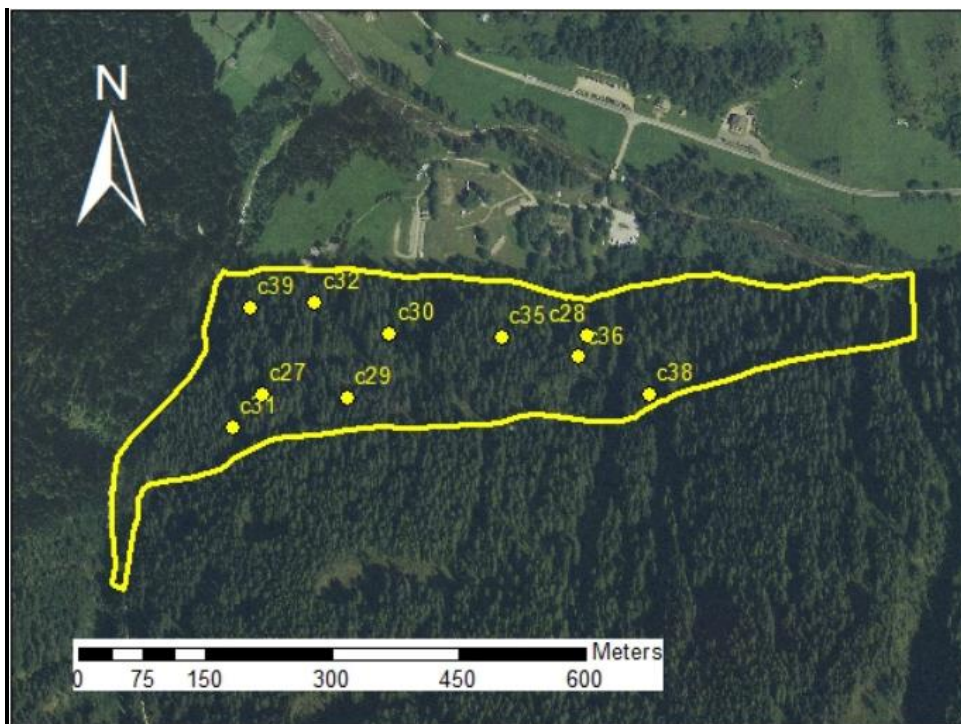
1. Ortofoto digitale con i limiti particellari e punti di campionamento.



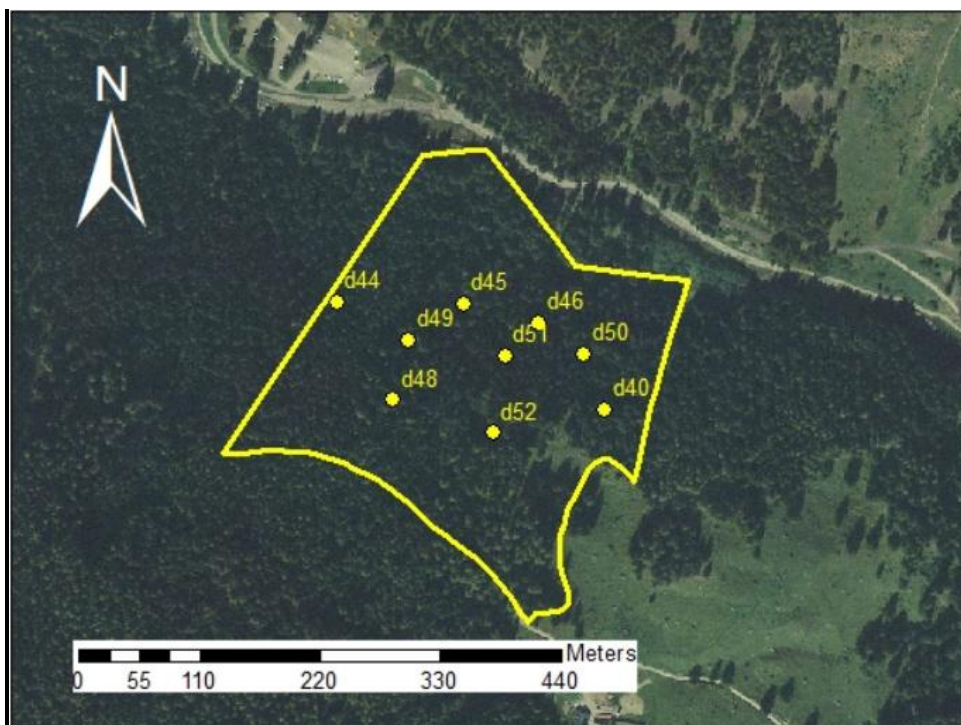
Allegato 1.1: posizione aree di saggio (punti gialli) nella particella numero 184/28.



Allegato 1.2: posizione aree di saggio (punti gialli) nella particella numero 184/9.

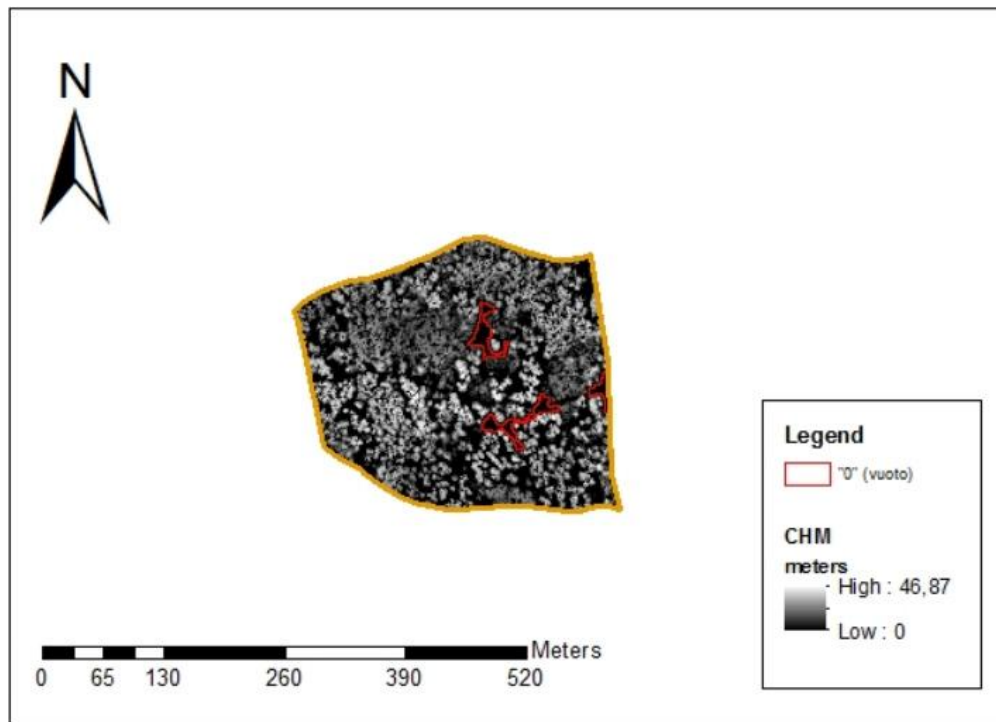


Allegato 1.3: posizione aree di saggio (punti gialli) nella particella numero 293/1.

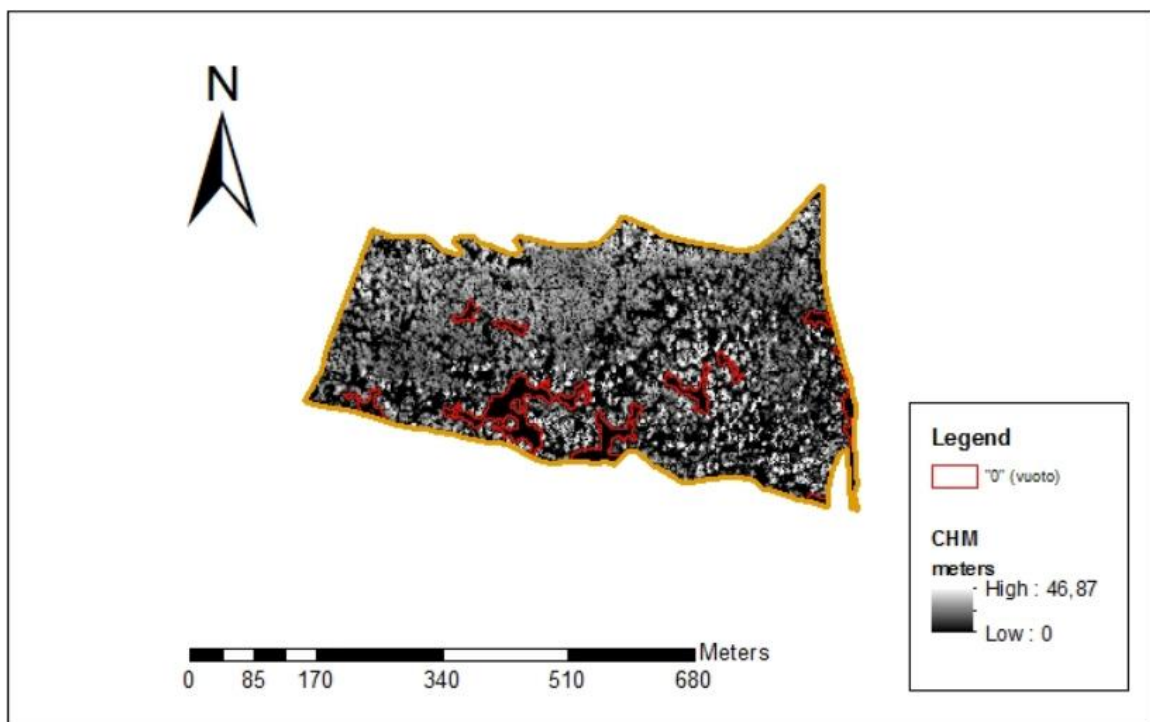


Allegato 1.4: posizione aree di saggio (punti gialli) nella particella numero 294/1.

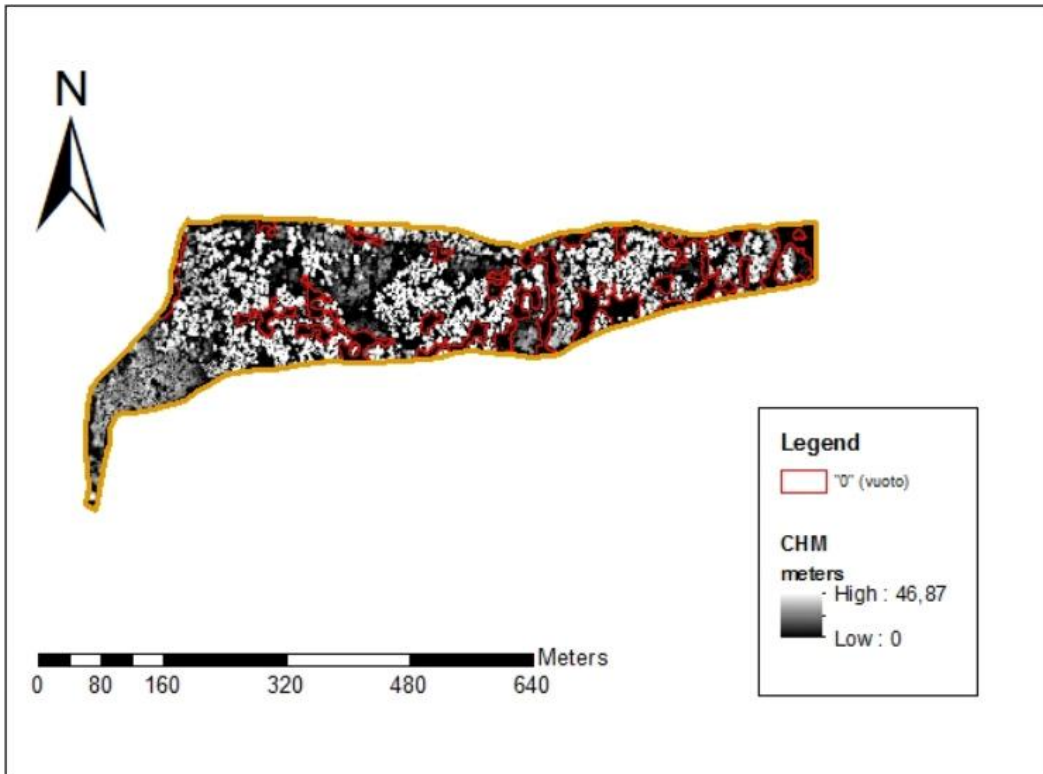
2. Carta dei “vuoti”.



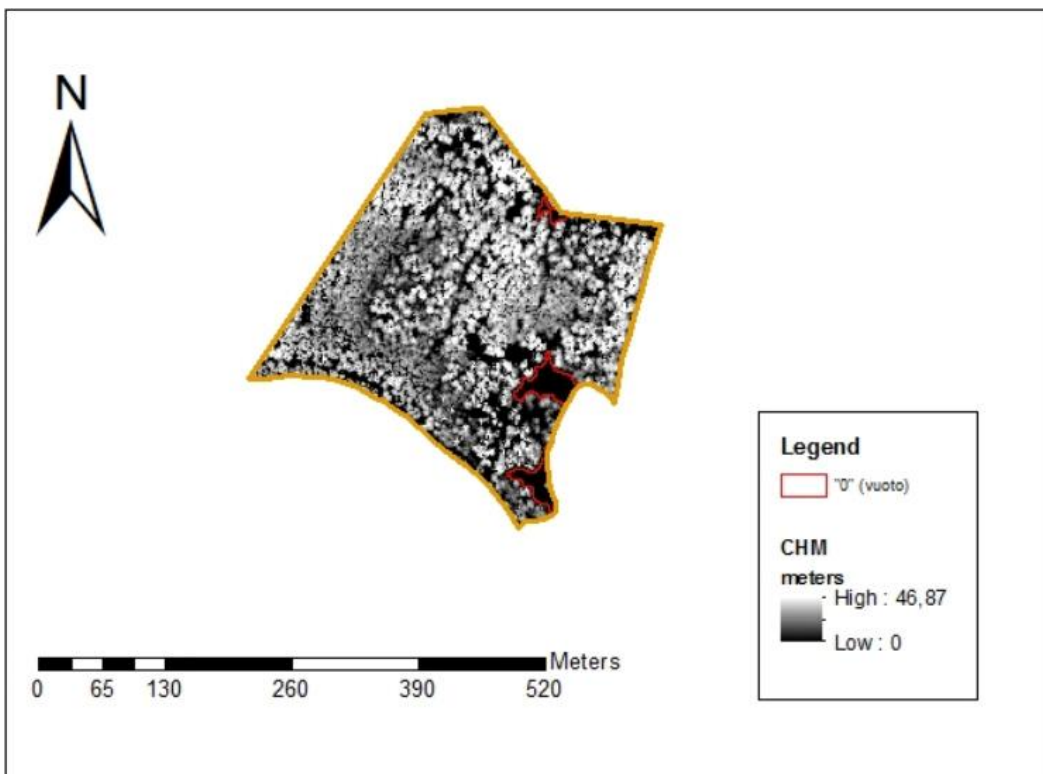
Allegato 2.1: carta dei “vuoti” della particella numero 184/28. I vuoti presenti nel CHM sono delimitati in rosso.



Allegato 2.2: carta dei “vuoti” della particella numero 184/9. I vuoti presenti nel CHM sono delimitati in rosso.

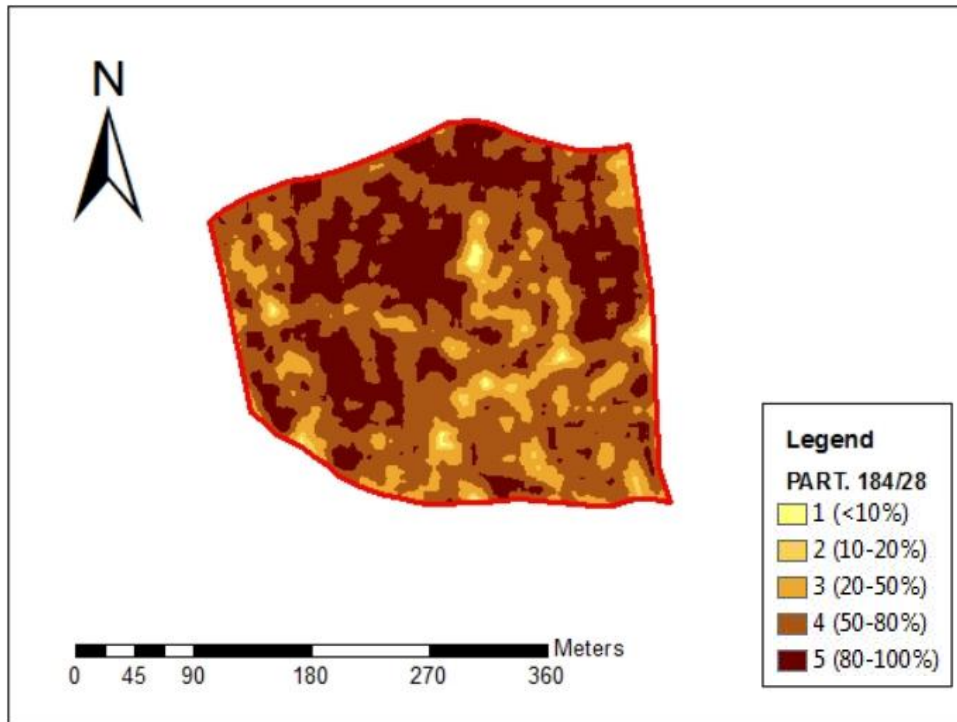


Allegato 2.3: carta dei “vuoti” della particella numero 293/1. I vuoti presenti nel CHM sono delimitati in rosso.

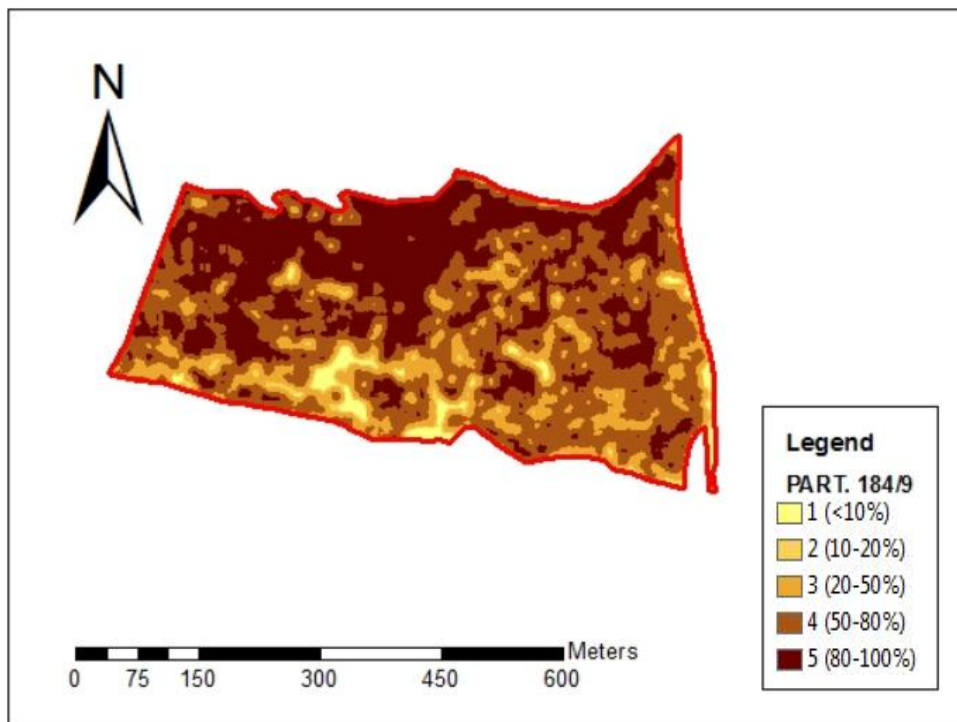


Allegato 2.4: carta dei “vuoti” della particella numero 294/1. I vuoti presenti nel CHM sono delimitati in rosso.

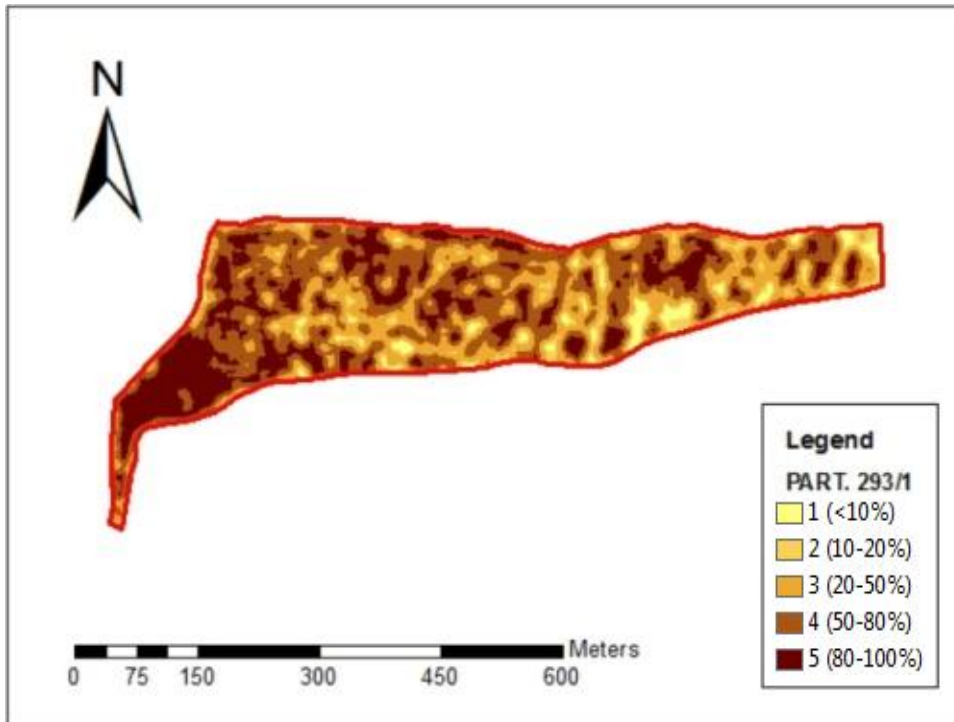
3. Carta del grado di copertura delle chiome.



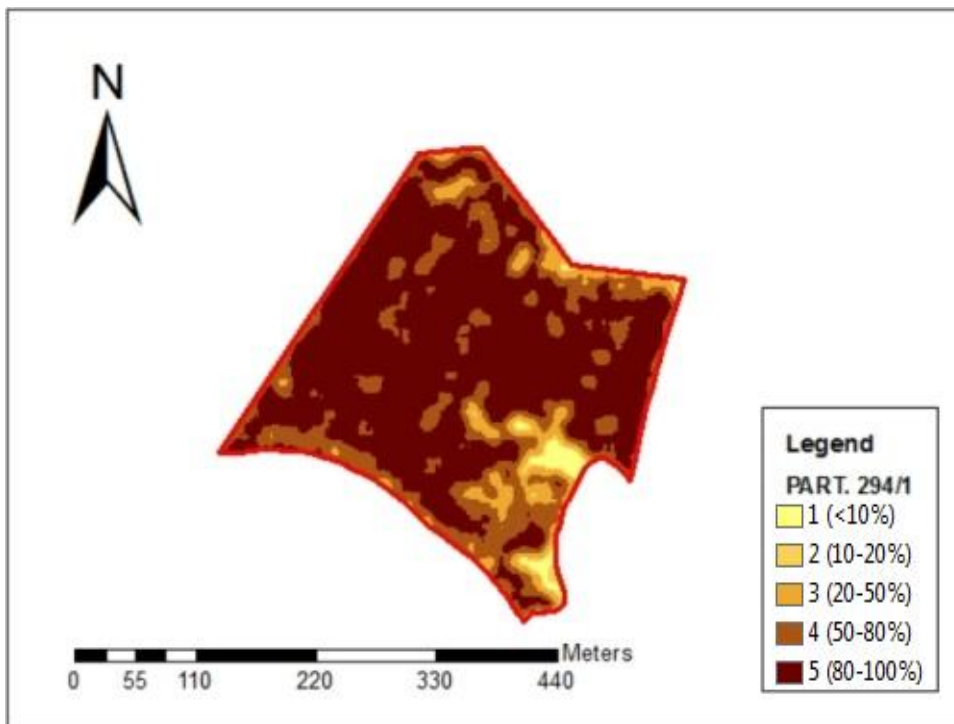
Allegato 3.1: carta del grado di copertura delle chiome della particella numero 184/28. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di copertura (in percentuale).



Allegato 3.2: carta del grado di copertura delle chiome della particella numero 184/9. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di copertura (in percentuale).

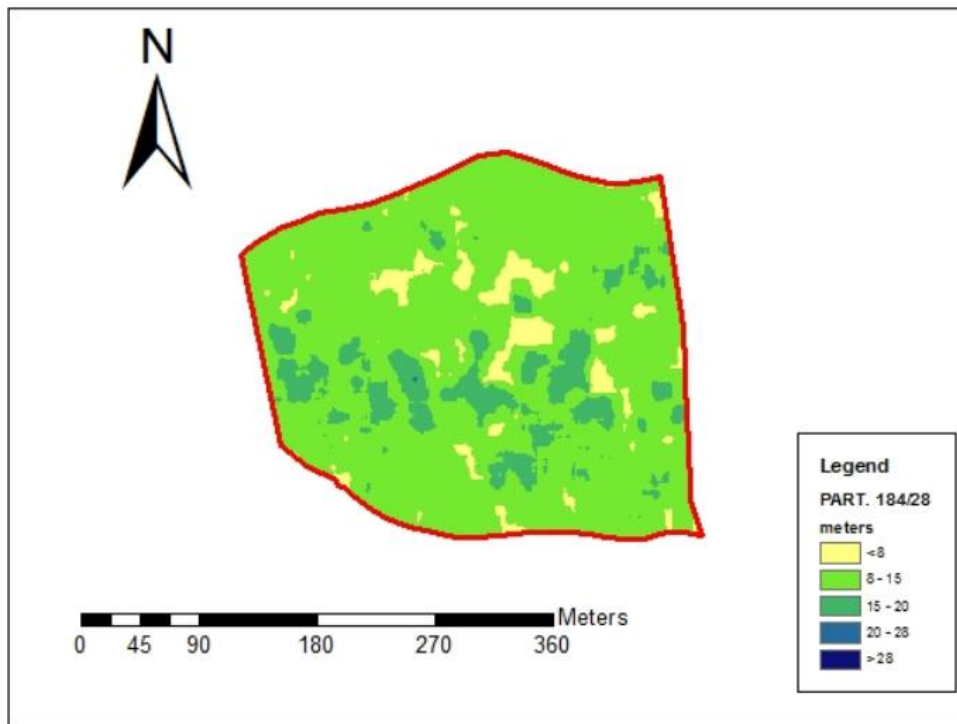


Allegato 3.3: carta del grado di copertura delle chiome della particella numero 293/1. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di copertura (in percentuale).

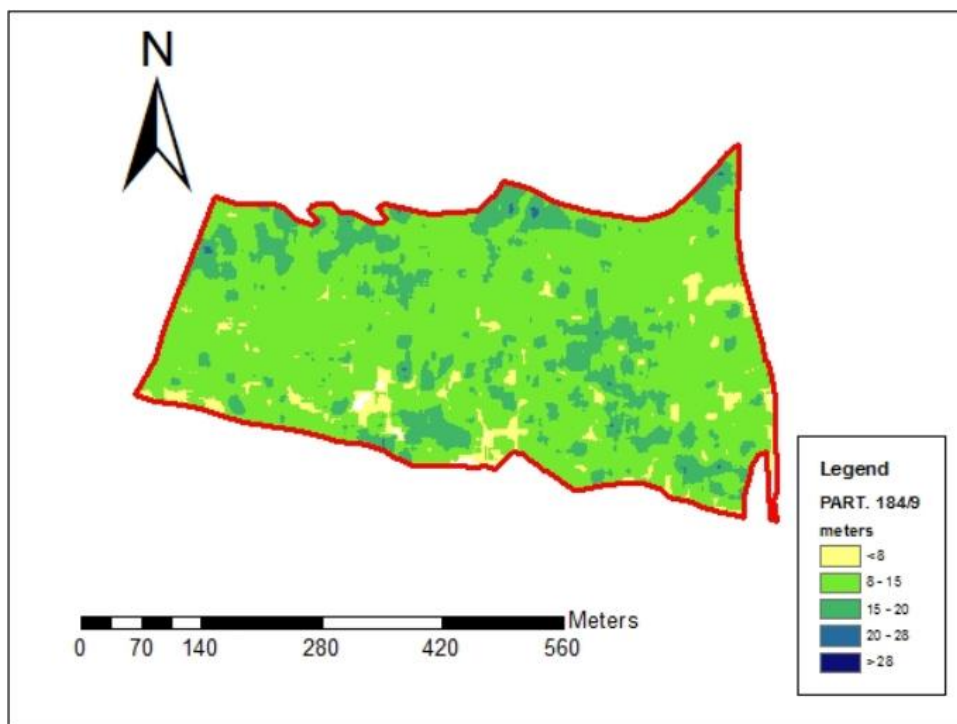


Allegato 3.4: carta del grado di copertura delle chiome della particella numero 294/1. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di copertura (in percentuale).

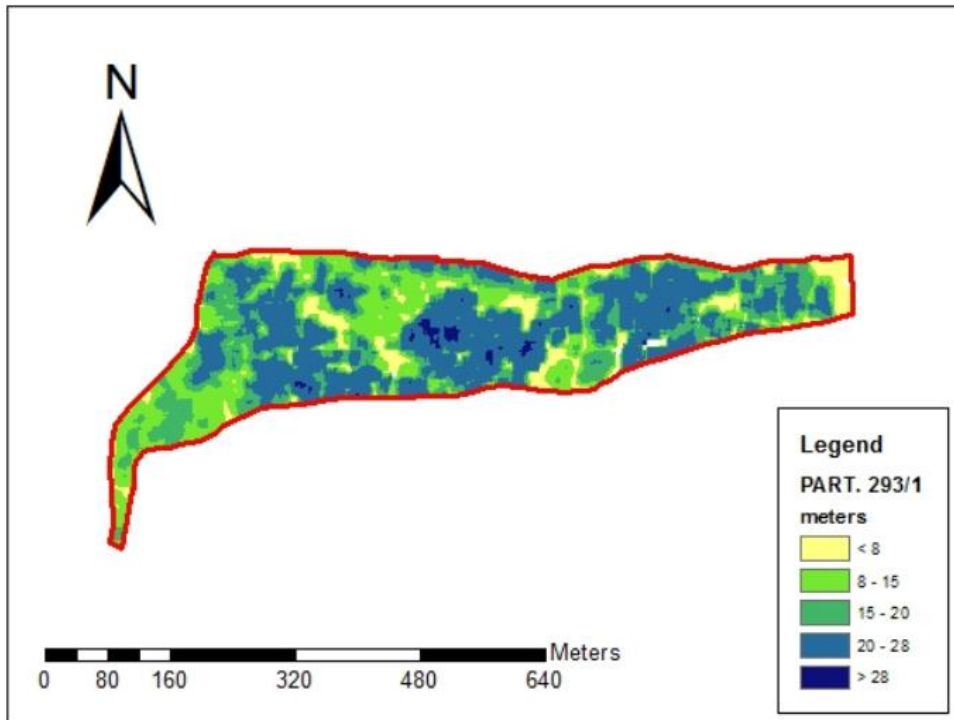
4. Carta dell'altezza media.



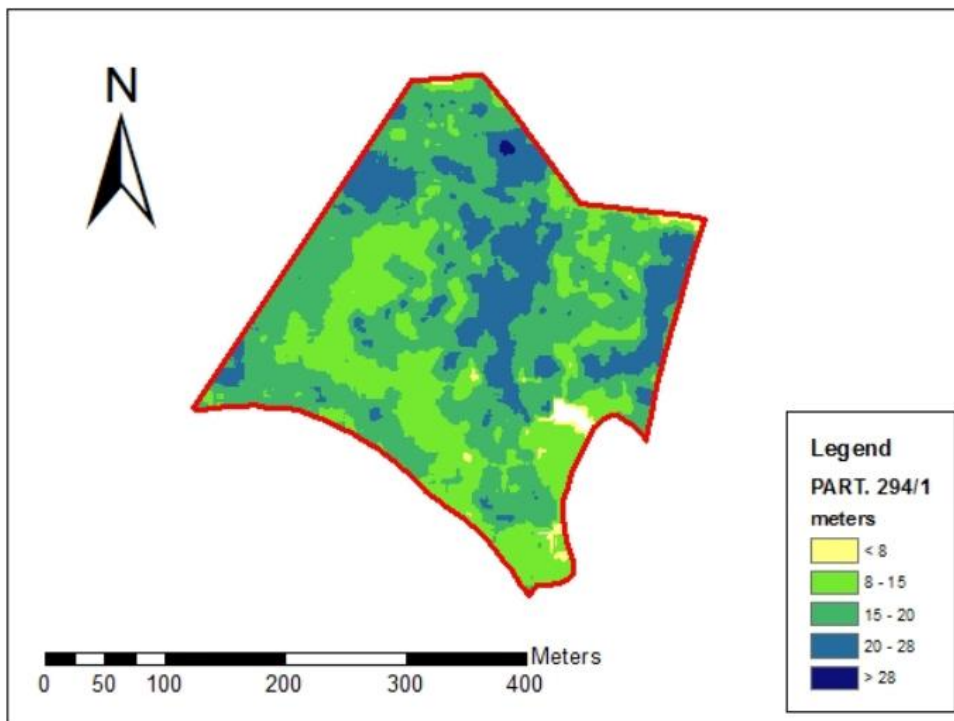
Allegato 4.1: carta dell'altezza media della particella numero 184/28. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).



Allegato 4.2: carta dell'altezza media della particella numero 184/9. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).

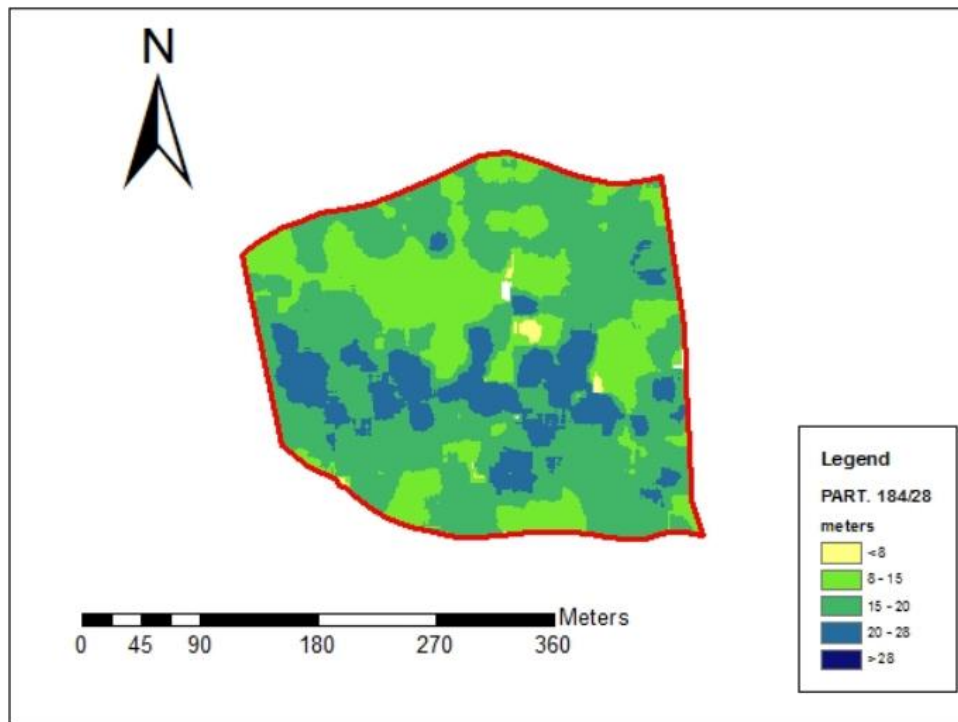


Allegato 4.3: carta dell'altezza media della particella numero 293/1. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).

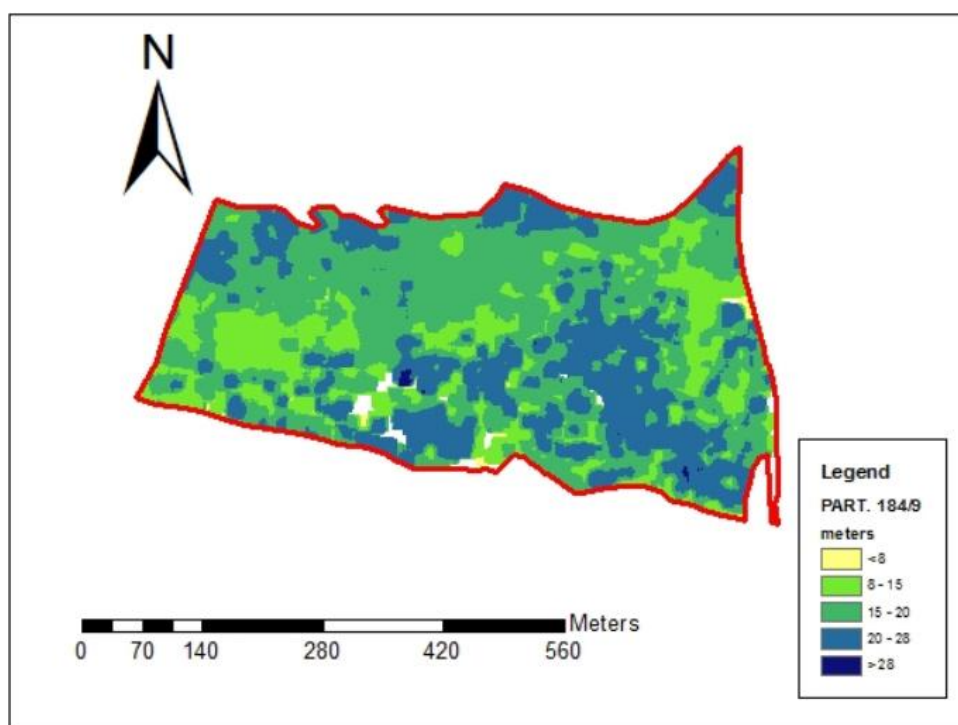


Allegato 4.4: carta dell'altezza media della particella numero 294/1. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).

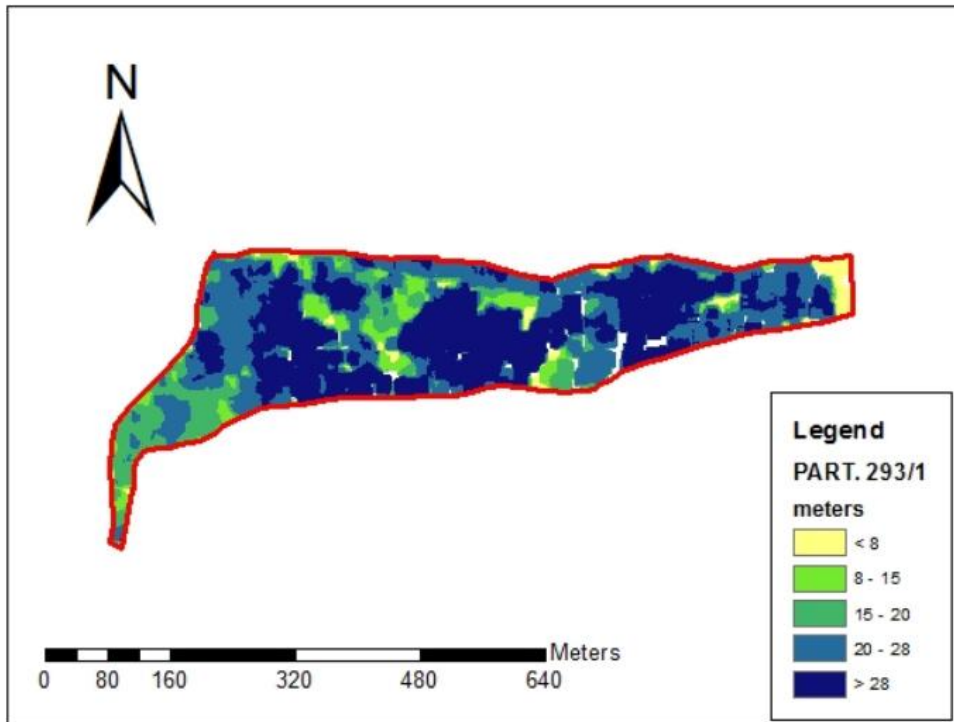
5. Carta della "media delle altezze sopra la media".



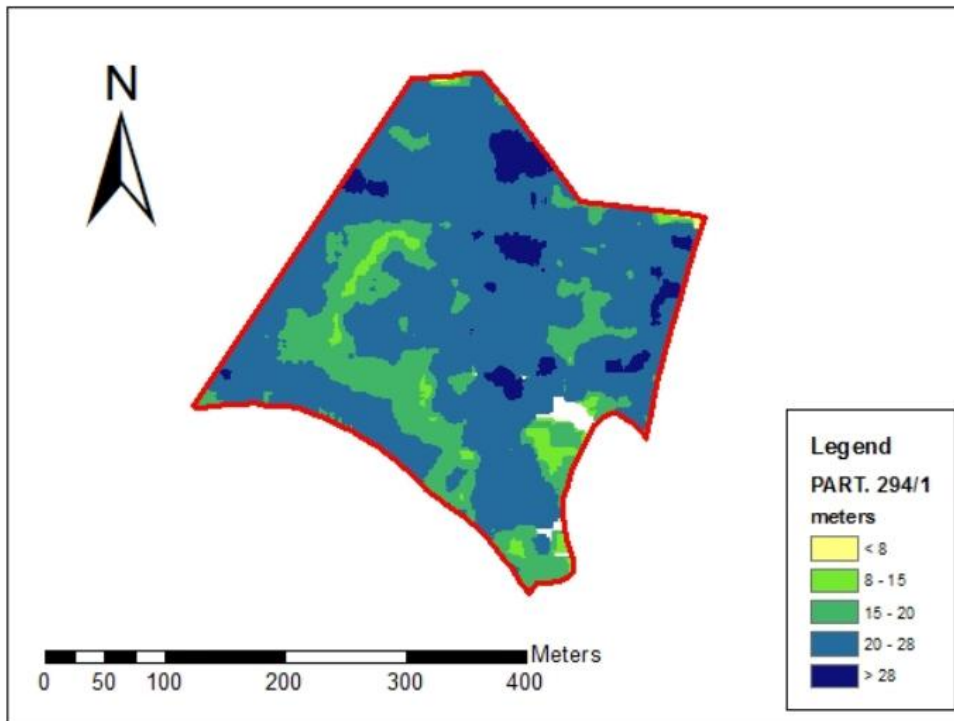
Allegato 5.1: carta della "media delle altezze sopra la media" (procedura B) della particella numero 184/28. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).



Allegato 5.2: carta della "media delle altezze sopra la media" (procedura B) della particella numero 184/9. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).



Allegato 5.3: carta della "media delle altezze sopra la media" (procedura B) della particella numero 293/1. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).



Allegato 5.4: carta della "media delle altezze sopra la media" (procedura B) della particella numero 294/1. In legenda sono riportati gli intervalli delle classi di altezza media (in metri).