

Numero Speciale: Progetto ALForLab (PON03PE\_00024\_1 - PON R&C- PAC 2007-2013)

“Laboratorio Pubblico-privato per l'applicazione di tecnologie innovative ad elevata sostenibilità ambientale nella filiera foresta-legno-energia”

Guest Editors: Alessandro Paletto (CREA, Trento), Giorgio Matteucci & Mauro Maesano (CNR-ISAFOM)

## Individuazione e correzione di *outlier* nei dati *raster* LiDAR provenienti dal Geoportale Nazionale e produzione di un CHM idoneo alla stima delle provvigioni legnose della Calabria

Antonio Floris\*<sup>(1)</sup>, Andrea Penasa<sup>(1)</sup>, Tamara Michelini<sup>(1)</sup>, Nicola Puletti<sup>(1-2)</sup>

(1) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria - Unità di ricerca per il monitoraggio e la pianificazione forestale (CREA MPF), p.za Nicolini 6, I-38123 Trento (Italy); (2) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria - Centro di ricerca per la selvicoltura (CREA SEL), v.le Santa Margherita 80, I-52100 Arezzo (Italy) - \*Corresponding Author: Antonio Floris ([antonio.floris@crea.gov.it](mailto:antonio.floris@crea.gov.it)).

**Abstract:** Detection and correction of LiDAR raster data from the Italian national remote sensing programme and production of a suitable CHM to forest volume estimation in Calabria (southern Italy). The ALForLab project, a Public-Private Laboratory which is part of the Cluster MEA (Materials Energy Environment) addressed to the Calabria Region (southern Italy), has gained great benefit by using LiDAR data acquired in the frame of a national remote sensing programme of the Ministry of the Environment and Protection of Land and Sea. This kind of LiDAR data, distributed in raster format and publicly available for research and non-profit purposes, have proved to be a suitable tool to support forest management. Their usage, however, has required the recognition and correction of non-forest elements included in the Digital Surface Model (DSM), like electric powerlines, wind turbines, sub-vertical rocks and viaducts. Such outliers, if remaining into the Canopy height Model (CHM), can generate potential errors in application of LiDAR-based prediction models. This paper proposes some semi-automatic pre-processing procedures, directly applicable on raster data, in order to obtain a CHM without non-forest elements. The methods described here have been developed in open-source environment (R and QGIS). The correction procedures carried out were tested in three municipalities having forest area between 1700 and 5400 ha, and characterized by different types of outliers. The performances of the methods were evaluated by comparing the estimated forest volume obtained before and after their application. Although low total volume changes were observed on the entire study areas (about 0.5%, corresponding to 1500 to 7200 m<sup>3</sup>), more significant effects, tens to hundreds cubic meters per hectare of overestimation, can occur in stands or forest compartments with a high presence of outliers. In conclusion, the proposed methods have proved to be suitable to achieve a reliable CHM for forest applications.

**Keywords:** Outlier, Timber Volume, Normalized DSM, Canopy Height Model

Received: Dec 22, 2016; Accepted: Apr 10, 2017; Published online: -

**Citation:** Floris A, Penasa A, Michelini T, Puletti N, 2017. Individuazione e correzione di *outlier* nei dati *raster* LiDAR provenienti dal Geoportale Nazionale e produzione di un CHM idoneo alla stima delle provvigioni legnose della Calabria. Forest@ 14: 188-201 [online 2017-05-15] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor2328-014>

### Introduzione

La tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) rappresenta un comprovato strumento di supporto alla pianificazione forestale, in particolare per la sti-

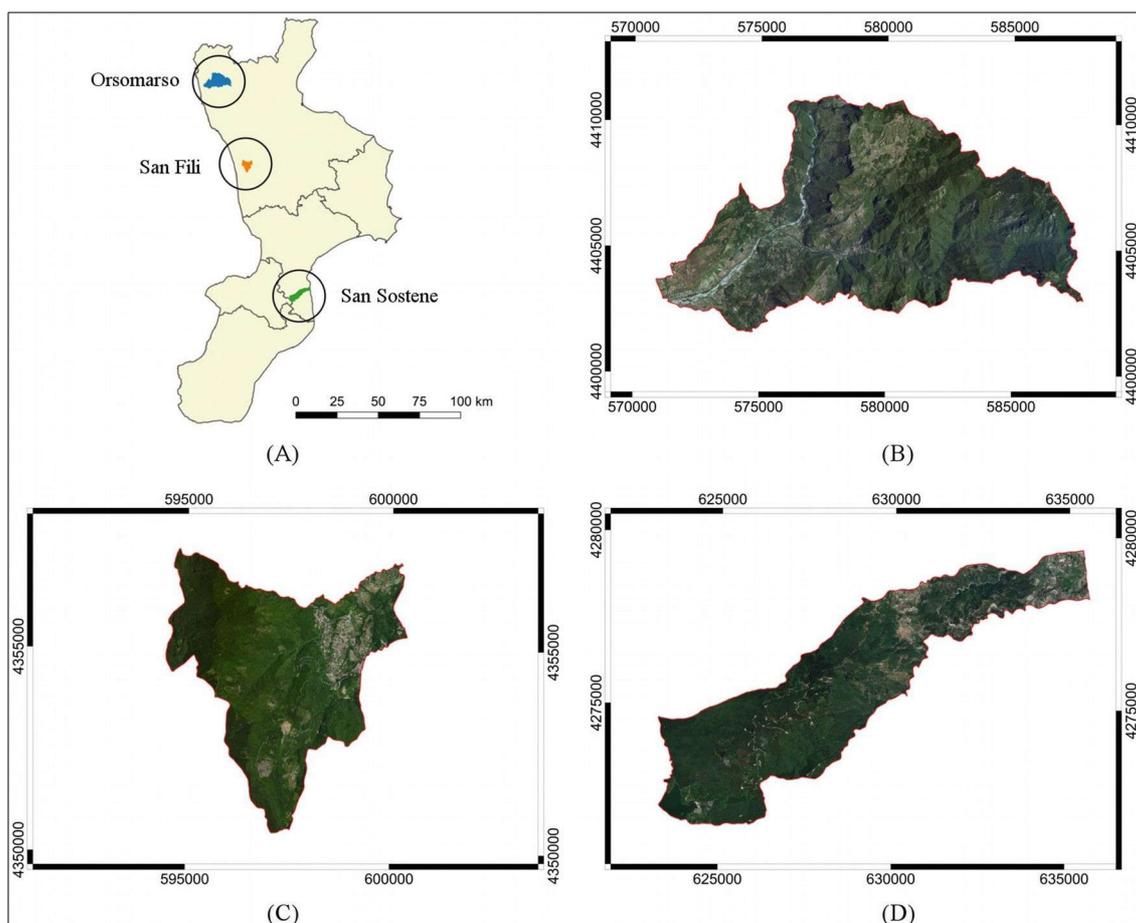
ma di variabili dendrometriche dei popolamenti boschivi. Il LiDAR da aeromobile (*Airborne Laser Scanner*, ALS), in particolare, permette di ricostruire con alta precisione il profilo tridimensionale del terreno

e della copertura forestale su aree estese (Li 2013), con tempi e costi ragionevoli (Matkan et al. 2014), aumentando l'efficienza delle operazioni di inventariazione forestale (Watt et al. 2014). Numerosi studi (ad esempio, Naesset 1997, 2002, Naesset & Bjerknes 2001, Lim et al. 2003, Tonolli et al. 2010, Scrinzi et al. 2015) hanno dimostrato il potenziale offerto da questi prodotti telerilevati nella creazione di modelli predittivi inventariali basati su relazioni tra metriche estratte dai dati LiDAR e i volumi a terra, consentendo di estendere la stima in aree non campionate (Moser et al. 2016). Il dato grezzo iniziale di una campagna di acquisizione LiDAR è costituito da una nuvola di punti (*raw data*) rappresentanti le coordinate tridimensionali di tutti i ritorni registrati per ogni singolo impulso laser lanciato dal sensore (Liu 2008, Edson & Wing 2015). Successive fasi di processamento consentono di ottenere i due prodotti *raster* basilari di un rilievo ALS: il modello digitale del terreno (DTM) e il modello digitale della superficie (DSM – Smith et al. 2004, Borgogno Mondino et al. 2016).

La sottrazione dal DSM del corrispettivo DTM restituisce il modello digitale di superficie normalizzato (nDSM – Shan & Toth 2008). Esso rappresenta i valori di altezza relativa di tutti gli elementi presenti rispetto alla superficie terrestre, sia naturali che artificiali, compreso lo strato arboreo (Eysn et al. 2012). Il DSM normalizzato può contenere errori dovuti a problemi che affliggono sia il DTM che il DSM. L'operazione algebrica di sottrazione, in alcuni casi, conduce a valori negativi del nDSM che sono chiaramente errati in quanto il DSM dovrebbe essere localmente sempre maggiore o uguale del corrispettivo DTM (Borgogno Mondino et al. 2016). Ciò indica che la superficie "reale" del terreno è inferiore a quella rappresentata dal DTM interpolato. Queste discrepanze possono essere dovute ad errori in fase di generazione del DTM a seguito delle operazioni di filtraggio e di interpolazione dei *raw data*. Un elevato numero di punti di un rilievo LiDAR che arrivano al suolo consente la produzione di un DTM di buona qualità. Tuttavia, ostacoli quali la vegetazione o elementi antropici riducono o impediscono al raggio laser di raggiungere il terreno. Questo comporta un *pattern* non uniforme di punti "suolo", con lacune localizzate in presenza di strutture antropiche e di situazioni di elevata densità del soprassuolo arboreo. Ad esempio, Hansen & Gobakken (2015) hanno osservato come la percentuale degli impulsi che raggiungono il terreno per effetto della presenza di copertura arborea si riduca in funzione della struttura

del soprassuolo e dello stato vegetativo. In fase di classificazione, inoltre, alcuni punti grezzi in prossimità del suolo vengono categorizzati erroneamente: punti riconosciuti come terreno sono di fatto vegetazione (ad esempio la base del fusto di un soggetto arboreo) o viceversa (Lim et al. 2003, Reutebuch et al. 2003, Hodgson & Bresnahan 2004, Aguilar & Mills 2008, Liu 2008). Tali fattori possono condurre ad una non corretta interpolazione del DTM finale, comportando scostamenti dal reale andamento altimetrico.

L'impiego del nDSM per scopi forestali richiede inoltre la generazione di un modello composto dal solo strato arboreo, definito modello digitale delle chiome (*Canopy Height Model*, CHM). Tale generazione può avvenire a seguito di procedure di filtraggio applicate direttamente ai *raw data*, al fine di separare gli elementi antropici dalla componente forestale, che necessitano spesso di *software* (ad esempio Terrascan<sup>®</sup>, Terrasolid Ltd., Finlandia) e competenze tecniche specifiche non sempre alla portata degli utilizzatori forestali. Cavi e tralici degli elettrodotti, ad esempio, sono registrati come primi ritorni dell'impulso LiDAR, costituendo un'opportunità in alcuni settori come ad esempio il monitoraggio e la manutenzione delle infrastrutture elettriche (Matikainen et al. 2016). Ai fini dell'impiego in ambito forestale, però, tali elementi costituiscono fonte di errore. In letteratura sono state proposte numerose metodologie automatiche per la distinzione (Axelsson 1999, Clode & Rottensteiner 2005, Kim & Sohn 2013, Zhu & Hyypä 2014, Guo et al. 2015) e la ricostruzione degli elettrodotti (Melzer & Briese 2004, Jwa & Sohn 2012, Guo et al. 2016). Tuttavia, queste tecniche si basano sull'analisi delle forme a partire da una nuvola di punti a elevata densità. Gli utenti forestali, nella maggior parte dei casi, si trovano a lavorare con dati "pronti all'uso", forniti in formato *raster* dai soggetti istituzionali (Scrinzi et al. 2013, Borgogno Mondino et al. 2016). Laddove le campagne di rilievo LiDAR sono effettuate allo scopo specifico di ricostruire nel dettaglio la morfologia del terreno, inoltre, il DSM rappresenta un prodotto per lo più secondario derivante dall'interpolazione di tutti i primi ritorni e non classificato sulla base dei diversi elementi presenti. Per tale ragione, esso è spesso fornito senza un preliminare controllo e una distinzione tra la diversa natura degli elementi che lo costituiscono (Schenk & Csathó 2007). La successiva estrazione del CHM, perciò, può presentare un'eterogeneità di componenti antropiche ed altri contenuti anomali di diversa natura (*outlier*), causa di potenziali alterazioni nelle stime dei modelli predittivi basati sui soli valori di



**Fig. 1** - Inquadramento generale delle tre aree di studio: (A) suddivisione in province della regione Calabria con indicate le aree di studio; (B) comune di Orsomarso (CS); (C) comune di San Fili (CS); (D) comune di San Sostene (CZ).

altezza della componente forestale.

In accordo con le problematiche esposte, l'obiettivo del presente contributo è di produrre un CHM composto esclusivamente dalla componente forestale dal quale poter estrarre le metriche da impiegare quali variabili esplicative per la generazione di mappe dei volumi. A tale scopo, sono state sviluppate e sottoposte a test alcune procedure semi-automatiche di trattamento applicabili direttamente a prodotti ALS già rasterizzati. Il presente contributo illustra alcuni casi di studio nei quali la presenza di *outlier* all'interno di aree boscate può condurre ad errori nella stima delle provvigioni legnose.

## Materiali e metodi

### Area di studio

La ricerca è stata condotta in tre comuni della Calabria (Fig. 1A), scelti per la diversa tipologia di *outlier* presenti all'interno delle aree forestali. Le analisi si

sono focalizzate esclusivamente sulle porzioni di territorio boscato, individuate sulla base della classificazione di uso del suolo di CORINE Land Cover del 2012 (CLC-2012 - European Environment Agency 2016).

La prima area di studio è il comune di Orsomarso (Cosenza), situato nel parco Nazionale del Pollino sulle pendici dell'omonima Catena montuosa dell'Orsomarso (Fig. 1B). Il territorio è impervio e caratterizzato da alte pareti sub-verticali. La superficie occupata dal bosco è pari al 61% dell'intera area comunale.

La seconda area di studio è il comune di San Fili (Cosenza) nel quale il bosco occupa l'83% dell'ambito amministrativo (Fig. 1C). Quest'area è attraversata dalla strada statale SS 107, la quale, per la peculiare morfologia del territorio, presenta numerosi viadotti stradali, e da linee elettriche che sovrastano le profonde vallate.

La terza area è il comune di San Sostene (Catanza-

**Tab. 1** - Superfici comunali e boscate nei tre comuni in cui è stato svolto lo studio.

Comune	Superficie comunale (ha)	Superficie boscata (ha)
Orsomarso	8964.69	5427.30
San Fili	2076.54	1721.10
San Sostene	3218.38	2400.47

ro), situato nella parte centro-orientale delle Serre calabresi, il cui territorio è occupato da foreste per il 75% (Fig. 1D). Nel 2006 la Regione ha approvato la realizzazione di un parco eolico nel comune per la produzione di energia rinnovabile. Lungo la catena montuosa, tra i 900 e i 1200 m s.l.m., sono state installate 43 turbine, 42 delle quali ricadono in popolamenti forestali.

Le superfici totali e boscate dei tre comuni oggetto dello studio sono riportate in Tab. 1.

#### Dati LiDAR da aeromobile

I dati LiDAR delle aree di studio sono stati forniti dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM). Nell’ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento (PST) promosso dal MATTM, la regione Calabria è stata coperta da un rilievo LiDAR per oltre il 90% della sua superficie. I dettagli delle caratteristiche del rilievo LiDAR sono riportati in Tab. 2. La produzione del DTM e del DSM è stata eseguita a cura del MATTM e delle ditte esecutrici delle acquisizioni LiDAR, impiegando il software DASHMap® (Optech Incorporated, Canada) per la prima elaborazione dei dati grezzi registrati dal laser scanner e la loro conversione in formato .las,

**Tab. 2** - Caratteristiche del rilievo LiDAR che ha portato alla produzione dei DTM e DSM impiegati in questo studio.

Caratteristica	Valore
Laser scanner	ALTM System Optech
Angolo di scansione	25°
Quota relativa di volo dal suolo	1500-1800 m
Frequenza dell’impulso	100 kHz
Densità dei punti	1.5 punti m <sup>-2</sup>
Impronta al suolo	25-30 cm
Accuratezza altimetrica	15-30 cm (1 σ)
Numero di ritorni	4
Epoca di volo	aprile 2011

e il software Terrascan per la classificazione del primo e dell’ultimo eco con l’algoritmo di Axelsson (1999), nonché per la rasterizzazione dei dati. I DTM e DSM oggetto dello studio sono stati forniti in formato raster suddivisi in tile (riquadri). Il sistema di riferimento impiegato è il WGS84 non proiettato (coordinate geografiche) ed ogni tile ha un’estensione di 0°.01 di latitudine per 0°.01 di longitudine alla risoluzione spaziale (dimensione del pixel) di 0°.00001.

#### Elaborazioni dei dati LiDAR: riproiezione cartografica e ricampionamento dei dati raster

L’impiego dei dati LiDAR per lo studio della struttura dei popolamenti forestali e per la stima di alcuni parametri quantitativi si basa sull’estrazione di alcune metriche. Ciò implica l’esigenza di proiettare i raster dal datum nativo geografico (WGS84) in un sistema di riferimento cartografico metrico. Il sistema standard adottato in Italia e utilizzato nel presente lavoro è l’ETRF2000-UTM.

Le procedure di riproiezione sono state automatizzate all’interno del software statistico open-source R (R Core Team 2016), il quale permette di eseguire analisi spaziali superiori a quelle tipiche dei software GIS. Alcuni pacchetti di R (ad esempio raster, rgdal), inoltre, integrano la libreria PROJ4 impiegata per la proiezione e trasformazione dei raster tra sistemi di riferimento diversi. La libreria PROJ4 è stata redatta nel 2005 dall’European Petroleum Survey Group (EPSG – IAOGP 2016) ed è quella più diffusa e comunemente implementata all’interno dei software GIS di maggiore distribuzione (ad es., QGIS e GRASS).

La riproiezione dei tile geografici restituisce un raster cartografico con una risoluzione spaziale superiore a 1 m (dimensione del pixel circa 0.998 m). Per migliorare l’interpretabilità del dato, complicata dalla risoluzione decimale, si è resa necessaria la ricampionatura a 1 m delle celle. L’approccio seguito è stato quello di eliminare la parte decimale della massima estensione di ciascun tile, senza eseguire alcun arrotondamento, e di imporre la risoluzione dei pixel a 1 m. Ciò allo scopo di assicurare la continuità dei tile sull’intera area di studio, senza produrre sovrapposizioni tra di essi. In fase di unione di più tile vengono però generati alcuni pixel per i quali il dato è mancante (“no-data”). Il problema è stato risolto attribuendo a tali celle la media dei valori dei pixel limitrofi all’interno di una finestra di 5 × 5 pixel e centrata sulla cella “no-data”.

#### Produzione del CHM

Eseguito la differenza tra DSM e DTM è stato co-

struito il nDSM. Per le ragioni esposte in introduzione, si sono rese necessarie sia la correzione degli errori geometrici persistenti dopo la mera sottrazione fra i due modelli, sia l'eliminazione degli elementi non forestali comunque presenti all'interno delle aree boscate secondo CLC-2012, quali ad esempio edifici rurali, linee elettriche, pale eoliche, viadotti. In primo luogo, al nDSM è stato assegnato valore pari a 0 m a tutti i *pixel* aventi valori negativi (Thiel & Schmullius 2016). Successivamente, allo scopo di rimuovere le incertezze nel calcolo del CHM prodotte dalla presenza del sottobosco e di altri elementi al suolo, come ad esempio massi, e di escludere dall'analisi la rinnovazione forestale – poiché parte non contribuente ai volumi assestamentali censiti al suolo (Floris et al. 2010), è stato assegnato un valore di 0 m anche alle celle con altezza inferiore a 2 m (Nilsson 1996, Naesset 1997, Hollaus et al. 2009).

#### *Individuazione dei potenziali errori locali*

L'identificazione degli *outlier* presenti all'interno dei popolamenti forestali delle aree di studio è avvenuta, laddove possibile, reperendo dati in formato vettoriale, quali ad esempio viabilità stradale, insediamenti rurali, reti infrastrutturali, disponibili nelle sezioni *open-data* del Geoportale della Regione Calabria (Regione Calabria 2007) e del Geoportale Nazionale (MATTM/PST-A 2015). Poiché molti elementi non risultavano comunque presenti negli strati informativi menzionati, è stato necessario operare una fotointerpretazione su ortofoto digitali in ambiente QGIS 2.18 (QGIS Development Team 2016). In ausilio a queste, sono stati impiegati il DTM e il nDSM, sia per facilitare il riconoscimento di oggetti non forestali con opportune elaborazioni del dato LiDAR, sia per il grande vantaggio del *laser scanning* di annullare le zone in ombra che spesso affliggono le immagini rilevate da sensori ottici (Jackson et al. 2000, Kenderes et al. 2008).

Al fine di agevolare il riconoscimento di possibili oggetti non arborei di altezza localmente superiore a quella del manto delle chiome, riducendo al contempo le aree da esaminare, l'analisi è stata concentrata sulle porzioni di nDSM con valori di altezza almeno pari a 30 metri, suddividendole in classi di altezza di 5 m per migliorarne la "leggibilità". Gli eventuali alberi di statura superiore alla soglia stabilita sono stati individuati grazie all'identificazione incrociata della conformazione dell'oggetto sul nDSM e sull'immagine digitale corrispondente.

Ponti e viadotti sono stati estratti incrociando i dati vettoriali della viabilità stradale esistente con le linee

di impluvio, identificate in modo automatico per mezzo dei comuni *tool* di geomorfologia presenti in QGIS.

La presenza di linee elettriche d'alta tensione è stata verificata in modo semi-automatico a partire dal nDSM. È stato applicato un algoritmo focale di esplorazione per ottenere, per ciascuna cella del nDSM, il valore mediano dei *pixel* presenti in un intorno pari a quello di una matrice di esplorazione di dimensione  $11 \times 11$  m. Il prodotto *raster* ottenuto, denominato CHMmedian, è stato successivamente sottratto al nDSM originale individuando i *pixel* del nDSM con elevata differenza di valori rispetto alla mediana. Questa è una caratteristica tipica di elementi quali le linee elettriche, contraddistinte da quote molto superiori rispetto al terreno sottostante, ma anche di aree di margine del bosco, caratterizzate da alti valori di altezza delle chiome e valori di aree di suolo nudo limitrofe pari a zero metri. Per distinguere queste ultime dagli elettrodotti è stata osservata la linearità degli elementi distintivi delle linee elettriche.

Il riconoscimento degli edifici e di altri fabbricati rurali è stato condotto con l'ausilio di dati vettoriali attinenti agli insediamenti rurali reperibili sul Geoportale della Regione Calabria. Questi ultimi non sempre evidenziano tutte le strutture presenti, oppure possono essere affetti da errori di georeferenziazione. Per tali motivi, sono state corrette le geometrie dei poligoni presenti ed integrati i manufatti mancanti nello *shapefile* attraverso una scrupolosa fase di fotointerpretazione delle ortofoto digitali e del corrispondente nDSM.

L'individuazione di pareti sub-verticali all'interno di aree boscate è stata eseguita estraendo automaticamente dal DTM la mappa della pendenza espressa in gradi sessagesimali e riclassificata considerando i soli valori superiori a  $70^\circ$ . A questo *raster* è stato associato il nDSM, individuando in corrispondenza delle aree fortemente acclivi i valori di altezza delle chiome aberranti rispetto al popolamento forestale circostante.

#### *Rimozione semi-automatica dei potenziali errori locali*

Gli *outlier*, identificati secondo le procedure descritte nel paragrafo precedente, sono stati perimetrati in QGIS. I poligoni ottenuti sono stati impiegati successivamente al fine di rimuovere gli errori locali dal nDSM. Le procedure di rimozione sono state automatizzate in ambiente R ed il risultato è il *raster* del modello digitale delle chiome (CHM).

Agli elementi artificiali posti direttamente al suolo, quali edifici o altri manufatti, sono stati assegnati valori di nDSM pari a zero, corrispondenti alla totale assenza di vegetazione forestale.

Ai viadotti stradali è stato assegnato il valore “no-data”. Questa scelta è dovuta all’impossibilità di stabilire la presenza o meno di copertura forestale sotto all’infrastruttura. È opportuno precisare che, nelle elaborazioni successive, un valore pari a zero del CHM contribuisce di volta in volta alla metrica considerata (media, mediana, ecc.), mentre un valore “no-data” rimane totalmente escluso dall’analisi.

Per quanto concerne le linee elettriche, è stata adottata una procedura *ad hoc* per gestire accuratamente la loro rimozione e tenere nel dovuto conto la possibile presenza di vegetazione al di sotto di esse. È stata selezionata un’area di analisi corrispondente alla fascia di rispetto delle linee elettriche variabile da 12 m a 24 m, a seconda della configurazione dell’elettrodotta. Sul *raster* nDSM sono stati applicati algoritmi focali di esplorazione per ottenere, a livello di ciascun *pixel* nDSM, la mediana dei valori presenti per un intorno pari a quello della dimensione della matrice di esplorazione (CHMmedian), stabilita in 11 × 11 m. In seguito, i valori del nDSM superiori alla mediana, corrispondenti ai *pixel* “linea elettrica”, sono stati sostituiti con i rispettivi valori della mediana, mentre i valori al di sotto della mediana sono rimasti immutati.

Nelle aree dove la presenza di pareti sub-verticali ha dato luogo a valori aberranti del nDSM rispetto al loro intorno, ovvero in corrispondenza di valori di pendenza del terreno superiori a 70°, questi sono stati sostituiti assegnando un valore corrispondente alla mediana calcolata sulle celle limitrofe, calcolata con matrice di esplorazione di 25 × 25 m.

### Produzione delle mappe del volume

L’effetto della presenza degli *outlier* nel CHM è stato esaminato confrontando i volumi medi all’ettaro e totali ottenuti applicando i modelli predittivi proposti da Scrinzi et al. (2017) prima e dopo il processo di rimozione. Si tratta di nove modelli distinti per altrettante tipologie forestali proprie dell’ambiente boschivo calabrese che stimano il volume legnoso medio a ettaro sulla base del valore medio del CHM calcolato impiegando una matrice di esplorazione di 25 × 25 m (*Hmean*). Gli stessi Autori riportano anche i coefficienti di trasformazione per la stima delle fitomasse corrispondenti ai volumi stimati.

In questo studio, la scelta del modello da applicare è avvenuta sulla base della carta di uso del suolo

CLC-2012 IV livello che ha consentito l’individuazione della tipologia forestale.

L’analisi degli esiti delle pre-elaborazioni è stata eseguita all’interno di ciascun poligono contenente l’elemento *outlier*, considerando un buffer esterno con raggio pari a 17.7 m. Tale valore, corrispondente alla metà della diagonale della matrice di esplorazione impiegata per l’estrazione della metrica *Hmean* su 25 × 25 m, permette di condurre il confronto sull’intera area direttamente influenzata dai *pixel outlier*.

### Risultati e discussione

Di seguito sono analizzati singolarmente i risultati ottenuti dall’applicazione dei modelli di stima del volume pre- e post-rimozione degli *outlier* nelle tre aree di studio.

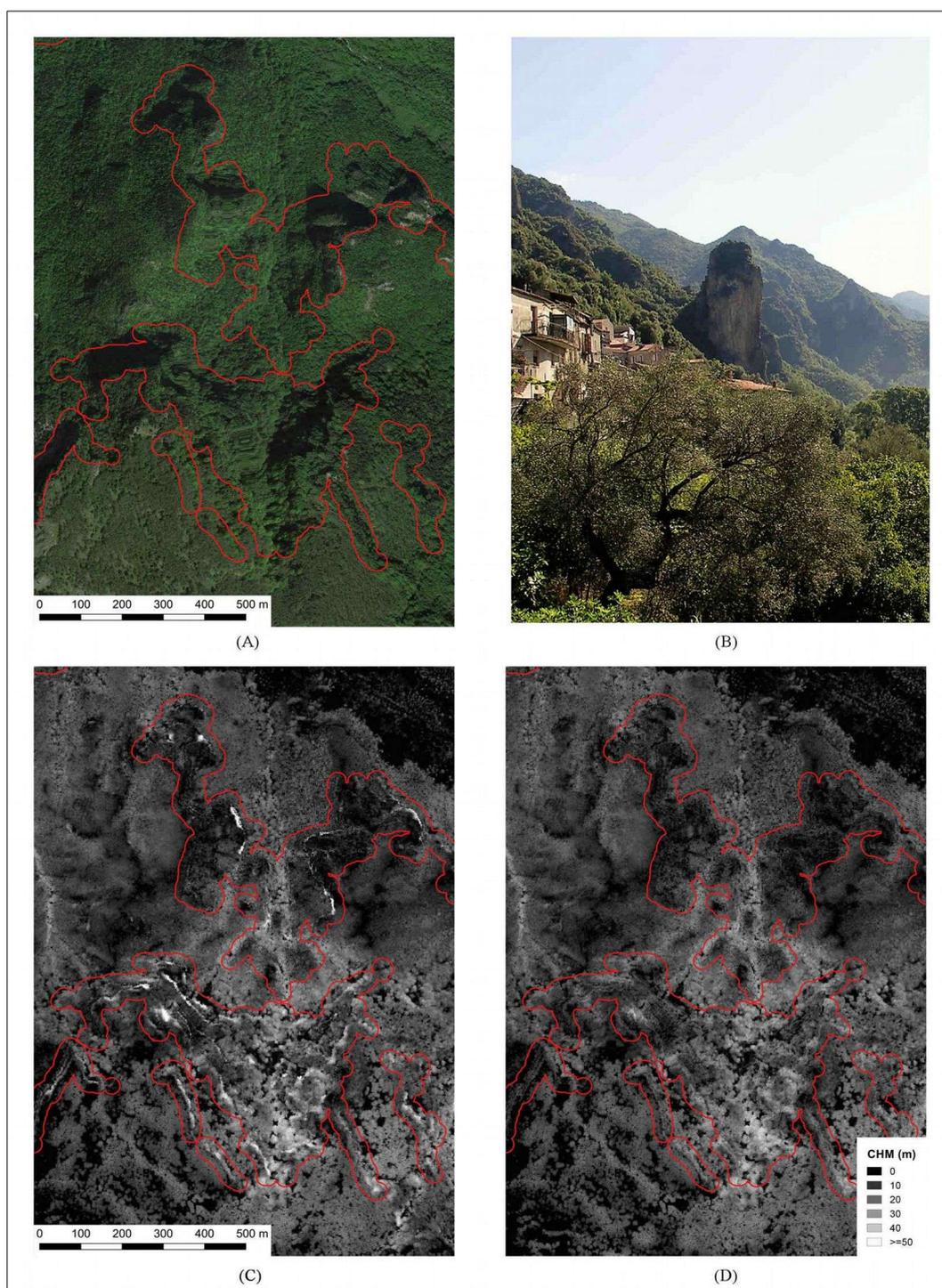
#### Comune di Orsomarso (CS)

Nel comune di Orsomarso, la presenza di pareti sub-verticali (Fig. 2A, Fig. 2B) ha originato altezze anomale localizzate nel nDSM, distinguibili in Fig. 2C come forme lineari “a catena” in corrispondenza del ciglio del salto di roccia. L’altezza massima di queste morfologie sul nDSM raggiunge picchi di 120 m e in media si attesta su valori superiori a 30 m. Quando la topografia del terreno è complessa, infatti, come in corrispondenza di crinali e scarpate, si assiste a rilevanti differenze tra altezze reali delle chiome e l’altezza LiDAR. Questo è dovuto all’effetto combinato della pendenza del terreno (Borgogno Mondino et al. 2016) e dell’espansione della chioma (Duan et al. 2015). All’impulso laser intercettante la parte più esterna della chioma, infatti, l’ultimo ritorno non corrisponde alla base reale del fusto, ma alla proiezione verticale sul terreno (Breidenbach et al. 2008 – Fig. 3). Tale distorsione del CHM può ridurre significativamente l’accuratezza nell’estrazione di parametri dendrometrici (Vega et al. 2014).

Tale errore è stato osservato e corretto in corrispondenza di valori di pendenza del terreno superiori a 70°. La superficie interessata dalla presenza di questi *outlier* è di 119.39 ha. La correzione è avvenuta sostituendo le altezze aberranti con la mediana dei valori circostanti. In Fig. 2D è possibile osservare il risultato della sostituzione. Altri tipi di *outlier*, tra cui linee elettriche e manufatti rurali, occupano una superficie di 14.11 ha (Tab. 3).

L’impiego del nDSM nell’applicazione dei modelli di stima (Fig. S1, Materiale supplementare) ha generato un volume totale di 1 168 721 m<sup>3</sup>, mentre l’uso del CHM ha condotto ad un volume totale di

**Fig. 2** - Area di studio del comune di Orsomarso (CS): (A) dettaglio delle pareti sub-verticali dall'ortofoto digitale; (B) panoramica delle pendici montuose che sovrastano il centro abitato di Orsomarso (Fonte: Google map); (C) estratto del nDSM; (D) estratto del CHM.



**Tab. 3** - Sintesi dei risultati della stima dei volumi applicati su nDSM e CHM per il comune di Orsomarso (CS). I valori di volume totale ( $V_{TOT}$ ), volume medio a ettaro ( $V$ ) e la differenza di volume totale ( $\Delta V_{TOT}$ ) sono relativi all'area di analisi, comprensiva (per i soli *outlier*) dei *buffer*.

Contesto	Area (ha)	Area analisi (ha)	nDSM		CHM		$\Delta V_{TOT}$ ( $m^3$ )
			$V_{TOT}$ ( $m^3$ )	$V$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	$V_{TOT}$ ( $m^3$ )	$V$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	
Bosco	5427.30	5427.30	1168721	215	1161506	214	7215
Pareti sub-verticali	119.39	631.25	131463	208	124587	197	6876
Altri <i>outlier</i>	14.11	40.98	1747	43	1408	34	339

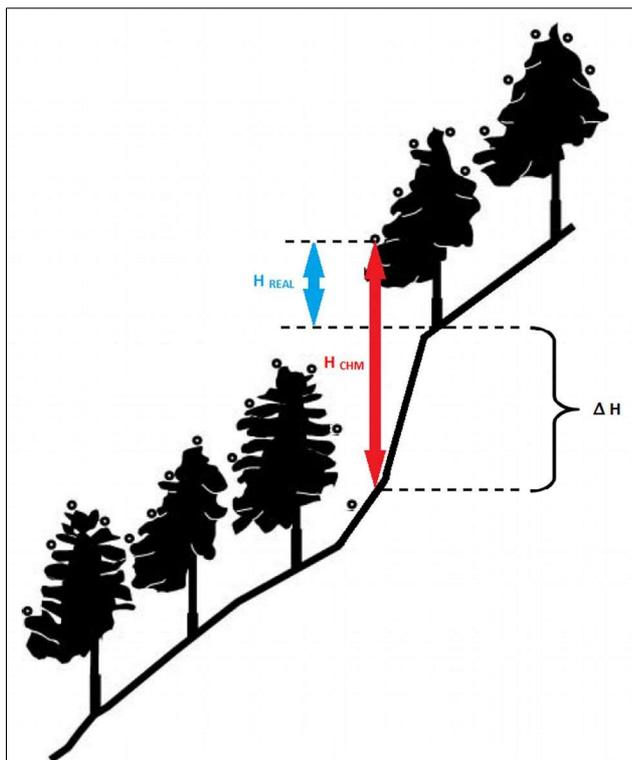


Fig. 3 - Influenza della pendenza sul CHM (modificata da Breidenbach et al. 2008).

1 161 506 m<sup>3</sup>. La differenza di 7215 m<sup>3</sup> è imputabile per il 95% (6876 m<sup>3</sup>) all'errore generato sul nDSM dalla presenza di salti di roccia all'interno di aree boscate. Tale riduzione, se valutata in termini percentuali sull'intera area forestale comunale, è pari a solo lo 0.6%. Tuttavia, poiché i salti di roccia tendono a concentrarsi in aree ristrette con precise caratteristiche morfologiche, le stime di volume possono essere localmente distorte in misura significativa con ricadute economiche non trascurabili nel contesto di un piano di assestamento. Nel caso in studio la citata differenza di volume si concentra all'interno di una superficie di soli 120 ha, quindi con un valore medio di sovrastima di circa 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

L'uso della mediana come valore da assegnare a queste morfologie meriterebbe ulteriori indagini, poiché essa è condizionata dai valori di altezza non solo delle chiome presenti in prossimità del ciglio, ma anche delle chiome sottostanti il salto di roccia. Queste ultime sono caratterizzate da altezze che scaturiscono da condizioni stazionarie che possono essere anche molto diverse. Ad ogni modo, la completa eliminazione di tali aree non sarebbe stata una soluzione concettualmente corretta, sia per l'ampia superficie occupata da queste morfologie sia per tener conto della presenza di vegetazione arborea sui cigli.

### Comune di San Fili (CS)

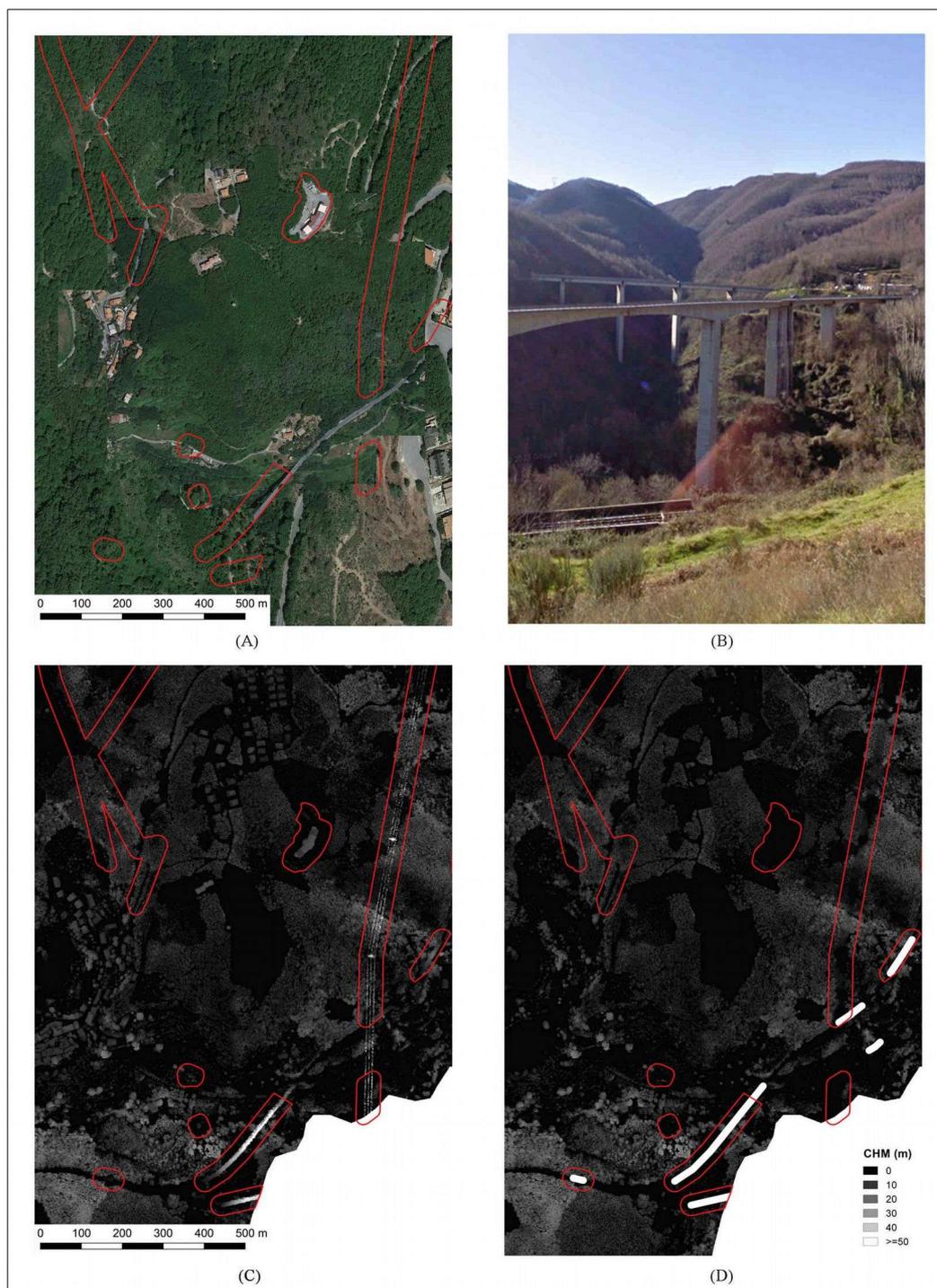
L'area forestale del comune di San Fili (CS) è caratterizzata da un'eterogeneità di elementi di natura antropica ben distinguibili nel nDSM (Fig. 4A, Fig. 4B). In particolare, sono stati identificati 15 viadotti, occupanti una superficie totale di 2.74 ha, circa 8 km lineari di elettrodotti che, con la relativa fascia di pertinenza, occupano una superficie complessiva di 11.68 ha, e altri elementi di urbanizzazione che interessano una superficie di 2.79 ha.

A monte delle procedure di correzione è stato stimato un volume complessivo di 283 986 m<sup>3</sup>. La rimozione conduce ad una riduzione di volume di 1513 m<sup>3</sup>, da attribuire per il 49% ai viadotti, per il 41% alle linee elettriche ed il restante 10% ad altri outlier (Tab. 4). In Fig. S2 (Materiale supplementare) è possibile apprezzare l'effetto della presenza degli outlier nella produzione della mappa del volume.

I viadotti stradali sono presenti nel DSM poiché nella generazione del DTM corrispondono ad oggetti tridimensionali, definiti "no-ground" (Arefi et al. 2011). Di conseguenza, si originano sul nDSM altezze ingiustificate che raggiungono valori anche molto elevati poiché la differenza di quota tra DSM e DTM aumenta al crescere della profondità degli impluvi sottostanti. Nel caso in esame, sono state osservate altezze massime che in media si attestano attorno ai 30 m, con punte fino a 60 m. Per la natura dell'infrastruttura, impermeabile al raggio laser, nella nuvola dei punti questi sono riconosciuti come ultimi ritorni. Durante le fasi di interpolazione e di filtraggio per la produzione del DTM, i viadotti non sono classificati come suolo, ma sono correttamente mantenuti all'interno del DSM. A differenza degli altri oggetti posti al suolo (come ad esempio edifici), però, i viadotti e i ponti mascherano il terreno sottostante e impediscono il riconoscimento degli elementi esistenti sotto di essi. Ciò rende impossibile verificare e quantificare la presenza della copertura forestale esistente. Per questo motivo è stato scelto di attribuire ai pixel "viadotto" il valore "no-data".

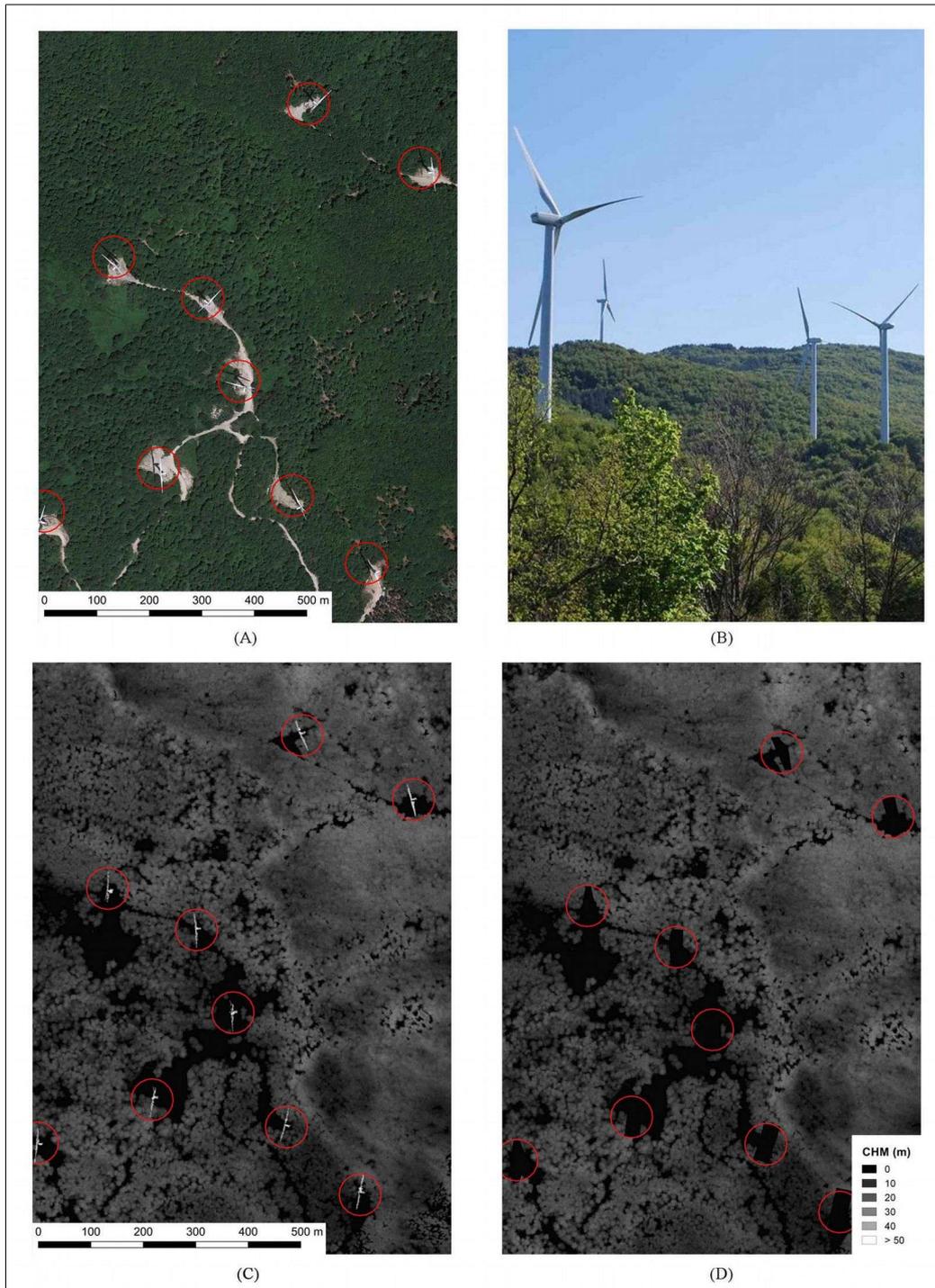
Nel comune di San Fili, le altezze massime medie delle linee elettriche osservate sul nDSM sono di circa 40 m con valori che raggiungono i 117 m in corrispondenza dell'attraversamento di profonde vallate. Il metodo sviluppato in questo lavoro ha consentito di individuare correttamente la quasi totalità dei pixel appartenenti alle linee elettriche operando direttamente sui dati raster. In Fig. 4D si apprezza come la procedura semi-automatica di correzione permetta di preservare i valori di altezza della copertura forestale sottostante, sostituendo i pixel "linea elettrica",

**Fig. 4** - Area di studio del comune di San Fili (CS): (A) dettaglio delle linee elettriche e dei viadotti dall'ortofoto digitale; (B) prospettiva dei viadotti passanti sulla Strada Statale SS 107 a sud del centro di San Fili (Fonte: Google Map®); (C) estratto dell'nDSM; (D) estratto del CHM (in bianco valori no-data).



**Tab. 4** - Sintesi dei risultati della stima dei volumi applicati su nDSM e CHM per il comune di San Fili (CS). I valori di volume totale ( $V_{TOT}$ ), volume medio a ettaro ( $V$ ) e la differenza di volume totale ( $\Delta V_{TOT}$ ) sono relativi all'area di analisi, comprensiva (per i soli outlier) dei buffer.

Contesto	Area (ha)	Area analisi (ha)	nDSM		CHM		$\Delta V_{TOT}$ ( $m^3$ )
			$V_{TOT}$ ( $m^3$ )	$V$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	$V_{TOT}$ ( $m^3$ )	$V$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	
Bosco	1721.10	1721.10	283986	165	282473	164	1513
Viadotti	2.74	11.02	1442	138	702	67	740
Linee elettriche	11.68	39.11	2763	79	2141	61	622
Altri outlier	2.79	17.78	512	35	361	25	151



**Fig. 5** - Area di studio del comune di San Sostene (CZ): (A) dettaglio delle pale eoliche dall'ortofoto digitale; (B) vista sul parco eolico realizzato nella parte occidentale del comune (Fonte: Google Map®); (C) estratto dell'nDSM; (D) estratto del CHM.

**Tab. 5** - Sintesi dei risultati della stima dei volumi applicati su nDSM e CHM per il comune di San Sostene (CZ). I valori di volume totale ( $V_{TOT}$ ), volume medio a ettaro ( $V$ ) e la differenza di volume totale ( $\Delta V_{TOT}$ ) sono relativi all'area di analisi, comprensiva (per i soli outlier) dei buffer.

Contesto	Area (ha)	Area analisi (ha)	nDSM		CHM		$\Delta V_{TOT}$ ( $m^3$ )
			$V_{TOT}$ ( $m^3$ )	$V$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	$V_{TOT}$ ( $m^3$ )	$V$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	
Bosco	2400.47	2400.47	644344	268	641715	267	2629
Pale eoliche	7.78	25.56	5766	226	3738	146	2028
Altri outlier	20.71	46.25	2838	61	2237	48	601

sotto ai quali può esserci vegetazione arborea, con i valori mediani dell'intorno. Tuttavia, la procedura porta alla sostituzione anche di *pixel* appartenenti alle sommità apicali della chioma poste a quote superiori alla mediana dello strato limitrofo. Ciò nonostante, la scelta di assegnare i valori mediani ai *pixel* superiori alla soglia locale, definita dalla metrica CHMmedian, non comporta perdite di volume eccessive anche in caso di errata sostituzione degli apici. Pertanto, pur introducendo occasionalmente valori sottostimati, il metodo è da preferire alla totale eliminazione dell'intera linea (assegnando al CHM valori pari a 0 m), operazione più impattante sull'attendibilità delle stime.

La tecnica, infatti, riduce il volume complessivo sull'area di competenza delle linee elettriche (circa 12 ha) da 2763 m<sup>3</sup> a 2141 m<sup>3</sup>, conservando circa 429 m<sup>3</sup> che altrimenti verrebbero "persi" ponendo tali *pixel* del CHM a 0 m di altezza (in quest'ultimo caso il volume stimato sarebbe di 1712 m<sup>3</sup>). La scelta di mantenere i valori del CHM originale per i *pixel* con valori inferiori alla soglia locale di CHMmedian evita l'aumento o l'introduzione di altezze del CHM in aree prive di copertura o negli spazi tra chiome adiacenti presenti sotto la linea elettrica. In questo modo si evitano errori di sovrastima.

#### Comune di San Sostene (CZ)

Nel contesto del comune di San Sostene (CZ - Fig. 5) sono state identificate 42 pale eoliche occupanti una superficie totale di 7.78 ha e altri tipi di *outlier*, per lo più manufatti rurali, che interessano una superficie di circa 20.71 ha (Tab. 5). La Fig. 3A mostra un estratto dell'ortofoto nella quale ben si distinguono questi elementi artificiali.

L'applicazione dei modelli di stima sulla metrica estratta dal nDSM (Fig. S3A, Materiale supplementare) ha prodotto, sull'intera area, un volume totale di 644 344 m<sup>3</sup>. La rimozione degli *outlier* (Fig. S3B) ha portato ad una riduzione di volume pari a 2629 m<sup>3</sup>, di cui il 77% è imputabile agli elevati valori del nDSM in corrispondenza delle pale eoliche.

Sul nDSM (Fig. 3D) le pale eoliche presentano un'altezza di circa 75 m, raggiungendo punte massime di 100 m a seguito della posizione relativa delle eliche al momento dell'acquisizione del dato ALS. A seguito della numerosità e delle elevate dimensioni delle strutture, esse contribuiscono ad un aumento localizzato significativo della metrica Hmean, che si traduce in una stima di volume legnoso non realmente esistente. Ogni pala, con superficie di circa 1850 m<sup>2</sup>, infatti, avrebbe comportato in media un au-

mento di volume stimato di circa 48 m<sup>3</sup>. Da qui, come per gli edifici, la scelta necessaria di individuare e rimuovere dal nDSM queste strutture poste al suolo attribuendo altezze pari a 0 m.

#### Conclusioni

In questo studio è stato presentato il potenziale effetto distorsivo sulla stima quantitativa delle provvigioni legnose connesso alla presenza di elementi non arborei all'interno di dati LiDAR in formato *raster*, nonché l'importanza della loro individuazione ed estrazione. L'ampia diffusione dei prodotti LiDAR "pronti all'uso", infatti, pone come prerogativa la necessaria conoscenza del contenuto informativo da parte degli utenti. In Italia, il PST ha permesso di avere un'ampia copertura sul territorio nazionale dei modelli digitali del terreno e della superficie, consentendo ad un gran numero di utenti di usufruire dei dati in formato *raster* del MATTM. Nello specifico, l'estrazione di parametri dendrometrici richiede la preliminare proiezione dei *raster* in un sistema metrico (i dati vengono forniti in coordinate geografiche) e, sul nDSM derivato, la messa in atto di una serie di procedure al fine di rimuovere gli *outlier* in esso presenti e pervenire ad un CHM più attendibile. Semplici metodologie di pre-trattamento dei *raster*, come quelle sviluppate in questo studio, si sono dimostrate idonee sia nel supportare l'individuazione sia nel correggere valori aberranti presenti nel nDSM, con riflessi positivi sulle stime di provvigione legnosa. Alcuni esempi delle procedure che sono state automatizzate in ambiente *open-source* ("Affioramenti.R", "MosaicRaster.R", "ReprojectRes1m.R") vengono allegate al presente studio (Box S1 - Materiale supplementare).

Sebbene su ampi scenari le differenze di volume stimato pre- e post-correzione del nDSM possano apparire di poco conto (solitamente inferiori all'1%), in zone ristrette ad alta densità di *outlier* tali differenze possono diventare significative, ancor più perché si tratterebbe sempre di sovrastime e non di incertezze simmetricamente distribuite.

Analisi future sono necessarie allo scopo di validare l'affidabilità di ricostruzione del dato reale di tali procedure con verità a terra, nonché di giungere ad un maggior livello di automatizzazione delle tecniche di individuazione ed estrazione degli *outlier*.

#### Ringraziamenti

Il presente studio è stato realizzato nell'ambito del Progetto "ALForLab" (PON03PE\_00024\_1) cofinanziato dal Programma Operativo Nazionale Ricerca e

Competitività (PON R&C) 2007-2013, attraverso il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) e risorse nazionali (Fondo di Rotazione (FDR) - Piano di Azione e Coesione (PAC) MIUR).

Gli autori sono particolarmente grati al Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, per aver messo a disposizione dello studio i dati LiDAR rilevati nell' ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale.

## Bibliografia

- Aguilar FJ, Mills JP (2008). Accuracy assessment of LiDAR-derived digital elevation models. *The Photogrammetric Record* 23 (122): 148-169. - doi: [10.1111/j.1477-9730.2008.00476.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00476.x)
- Arefi H, d' Angelo P, Mayer H, Reinartz P (2011). Iterative approach for efficient digital terrain model production from CARTOSAT-1 stereo images. *Journal of Applied Remote Sensing* 5 (1): 53527-1-53527-19. - doi: [10.1117/1.3595265](https://doi.org/10.1117/1.3595265)
- Axelsson P (1999). Processing of laser scanner data-algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3): 138-147. - doi: [10.1016/S0924-2716\(99\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00008-8)
- Borgogno Mondino E, Fissore V, Lessio A, Motta R (2016). Are the new gridded DSM/DTMs of the Piemonte Region (Italy) proper for forestry? A fast and simple approach for a posteriori metric assessment. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9: 901-909. - doi: [10.3832/ifer1992-009](https://doi.org/10.3832/ifer1992-009)
- Breidenbach J, Koch B, Kändler G, Kleusberg A (2008). Quantifying the influence of slope, aspect, crown shape and stem density on the estimation of tree height at plot level using LiDAR and InSAR data. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1511-1536. - doi: [10.1080/01431160701736364](https://doi.org/10.1080/01431160701736364)
- Clode S, Rottensteiner F (2005). Classification of trees and powerlines from medium resolution airborne laser scanner data in urban environments. In: *Proceedings of the "APRS Workshop on Digital Image Computing (WDIC 2005)"*. Brisbane (Australia) 21 Feb 2005, pp. 191-196.
- Duan Z, Zhao D, Zeng Y, Zhao Y, Wu B, Zhu J (2015). Assessing and correcting topographic effects on forest canopy height retrieval using airborne LiDAR data. *Sensors* 15 (6): 12133-12155. - doi: [10.3390/s150612133](https://doi.org/10.3390/s150612133)
- Edson C, Wing MG (2015). LiDAR elevation and DEM errors in forested settings. *Modern Applied Science* 9 (2): 139-157. - doi: [10.5539/mas.v9n2p139](https://doi.org/10.5539/mas.v9n2p139)
- European Environment Agency (2016). *Corine Land Cover (CLC) 2012, version 18.5.1*. Copernicus land services, Web site. [online] URL: <http://land.copernicus.eu/pan-europe/an/corine-land-cover/clc-2012>
- Eysn L, Hollaus M, Schadauer K, Pfeifer N (2012). Forest delineation based on airborne LIDAR data. *Remote Sensing* 4 (12): 762-783. - doi: [10.3390/rs4030762](https://doi.org/10.3390/rs4030762)
- Floris A, Clementel F, Farruggia C, 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. - doi: [10.5721/ItJRS20104232](https://doi.org/10.5721/ItJRS20104232)
- Guo B, Huang X, Zhang F, Sohn G (2015). Classification of airborne laser scanning data using JointBoost. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 100: 71-83. - doi: [10.1016/j.isprsjprs.2014.04.015](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.015)
- Guo B, Li Q, Huang X, Wang C (2016). An improved method for power-line reconstruction from point cloud data. *Remote Sensing* 8 (1): 36. - doi: [10.3390/rs8010036](https://doi.org/10.3390/rs8010036)
- Hansen EH, Gobakken T (2015). Effects of pulse density on digital terrain models and canopy metrics using airborne laser scanning in a tropical rainforest. *Remote Sensing* 7 (7): 8453-8468. - doi: [10.3390/rs70708453](https://doi.org/10.3390/rs70708453)
- Hodgson ME, Bresnahan P (2004). Accuracy of airborne LiDAR-derived elevation: Empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (3): 331-339. - doi: [10.14358/PERS.70.3.331](https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.331)
- Hollaus M, Dorigo W, Wagner W, Schadauer K, Höfle B, Maier B (2009). Operational wide-area stem volume estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data. *International Journal of Remote Sensing* 30 (19): 5159-5175. - doi: [10.1080/01431160903022894](https://doi.org/10.1080/01431160903022894)
- IAOGP (2016). *European Petroleum Survey Group (EPSG). International Association of Oil and Gas Producers, dataset*. [online] URL: <http://www.epsg.org/EPSGDataset/DownloadDataset.aspx>
- Jackson RG, Foody GM, Quine CP (2000). Characterising windthrown gaps from fine spatial resolution remotely sensed data. *Forest Ecology and Management* 135 (1-3): 253-260. - doi: [10.1016/s0378-1127\(00\)00284-x](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00284-x)
- Jwa Y, Sohn G (2012). A piecewise catenary curve model growing for 3D power line reconstruction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 78 (12): 1227-1240. - doi: [10.14358/PERS.78.11.1227](https://doi.org/10.14358/PERS.78.11.1227)
- Kenderes K, Mihok B, Standovar T (2008). Thirty years of gap dynamics in a Central European beech forest reserve. *Forestry* 81 (1): 111-123. - doi: [10.1093/forestry/cpn001](https://doi.org/10.1093/forestry/cpn001)
- Kim HB, Sohn G (2013). Point-based classification of power line corridor scene using random forests. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 79 (9): 821-833. - doi: [10.14358/PERS.79.9.821](https://doi.org/10.14358/PERS.79.9.821)
- Li Y (2013). Filtering airborne LiDAR data by an improved morphological method based on multi-gradient analysis. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W 1*: 191-194. - doi: [10.5194/isprsarchives-XL-1-W1-191-2013](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W1-191-2013)
- Lim K, Treitz P, Baldwin K, Morrison I, Green J (2003). LiDAR remote sensing of biophysical properties of tolerant

- northern hardwood forests. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29 (5): 658-678. - doi: [10.5589/m03-025](https://doi.org/10.5589/m03-025)
- Liu X (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography* 32 (1): 31-49. - doi: [10.1177/0309133308089496](https://doi.org/10.1177/0309133308089496)
- Matikainen L, Lehtomäki M, Ahokas E, Hyypä J, Karjalainen M, Jaakkola A, Kukko A, Heinonen T (2016). Remote sensing methods for power line corridor surveys. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 119: 10-31. - doi: [10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011)
- Matkan AA, Hajeb M, Mirbagheri B, Sadeghian S, Ahmadi M (2014). Spatial analysis for outlier removal from LiDAR data. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-2/W 3: 187-190. - doi: [10.5194/isprsarchives-XL-2-W3-187-2014](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W3-187-2014)
- MATTM/PST-A (2015). Sito ufficiale del Geoportale nazionale. Website. [online] URL: <http://www.pcn.minambiente.it/GN/progetti/piano-straordinario-di-telerilevamento/>
- Melzer T, Briese C (2004). Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds. In: Proceedings of the "XVIII Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition". Hagenberg (Austria) June 2004, pp. 47-54.
- Moser P, Vibrans AC, McRoberts RE, Gobakken T, Chirici G, Mura M, Marchetti M (2016). Methods for variable selection in LiDAR-assisted forest inventories. *Forestry*. - doi: [10.1093/forestry/cpw041](https://doi.org/10.1093/forestry/cpw041)
- Naesset E (1997). Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61 (2): 246-253. - doi: [10.1016/s0034-4257\(97\)00041-2](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(97)00041-2)
- Naesset E (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80 (1): 88-99. - doi: [10.1016/s0034-4257\(01\)00290-5](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00290-5)
- Naesset E, Bjercknes K-O (2001). Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 78 (3): 328-340. - doi: [10.1016/s0034-4257\(01\)00228-0](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00228-0)
- Nilsson M (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. *Remote Sensing of Environment* 56 (1): 1-7. - doi: [10.1016/0034-4257\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00224-3)
- QGIS Development Team (2016). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. [online] URL: <http://www.qgis.org/>
- R Core Team (2016). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [online] URL: <http://www.R-project.org/>
- Regione Calabria (2007). Geoportale della Regione Calabria. Dipartimento Urbanistica e Governo del Territorio - Centro Cartografico Regionale, web site. [online] URL: <http://pr5sit.regione.calabria.it/web/pr5sit/sezione-open-data/>
- Reutebuch SE, McGaughey RJ, Andersen HE, Carson WW (2003). Accuracy of a high-resolution LiDAR terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29 (5): 527-535. - doi: [10.5589/m03-022](https://doi.org/10.5589/m03-022)
- Schenk T, Csathó B (2007). Fusing imagery and 3D point clouds for reconstructing visible surfaces of urban scenes. In: "Urban Remote Sensing Joint Event". Paris (France) 11-13 Apr 2007, pp. 1-7. - doi: [10.1109/URS.2007.371861](https://doi.org/10.1109/URS.2007.371861)
- Scrinzi G, Clementel F, Colle G, Corona P, Floris A, Maistrelli A, Chirici G, Mura M, Oradini A, Bertani R, Barbati A, Quatrini A, Marchetti M (2013). Impiego di dati lidar di pubblica disponibilità per il monitoraggio forestale a grande e piccola scala: il progetto ITALID. In: Atti del IX Congresso Nazionale SISEF "Multifunzionalità degli Ecosistemi Forestali Montani: Sfide e Opportunità per la Ricerca e lo Sviluppo". Bolzano (Italy) 16-19 Set 2013, pp. 31.
- Scrinzi G, Clementel F, Floris A (2015). Angle count sampling reliability as ground truth for area-based LiDAR applications in forest inventories. *Canadian Journal of Forest Research* 45 (4): 506-514. - doi: [10.1139/cjfr-2014-0408](https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0408)
- Scrinzi G, Floris A, Clementel F, Bernardini V, Chianucci F, Greco S, Michelini T, Penasa A, Puletti N, Rizzo M, Turco R, Corona P (2017). Modelli di stima del volume e delle fitomasse del soprassuolo arboreo delle principali formazioni forestali della Calabria mediante dati LiDAR. *Forest@ 14*: 175-187. - doi: [10.3832/efor2399-014](https://doi.org/10.3832/efor2399-014)
- Shan J, Toth K (2008). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, UK, pp. 343.
- Smith SL, Holland DA, Longley PA (2004). The importance of understanding error in LiDAR digital elevation models. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35: 996-1001.
- Thiel C, Schullius C (2016). Derivation of Forest Parameters from Stereographic UAV Data - A Comparison with Airborne LiDAR Data. In: Proceedings of the "Living Planet Symposium 2016". Prague (Czech Republic) 9-13 May 2016.
- Tonolli S, Dalponte M, Vescovo L, Rodeghiero M, Bruzzone L, Gianelle D (2010). Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research* 130 (4): 569-577. - doi: [10.1007/s10342-010-0445-5](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0445-5)
- Vega C, Hamrouni A, El Mokhtari S, Morel J, Bock J, Renaud J-P, Bouvier M, Burrieu S (2014). PTrees: a point-based approach to forest tree extraction from LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and*

Geoinformation 33: 98-108. - doi: [10.1016/j.jag.2014.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.001)  
Watt MS, Meredith A, Watt P, Gunn A (2014). The influence of LiDAR pulse density on the precision of inventory metrics in young unthinned Douglas-fir stands during initial and subsequent LiDAR acquisitions. *New Zealand Journal of Forestry Science* 44 (1): 18. - doi: [10.1186/s40490-014-0018-3](https://doi.org/10.1186/s40490-014-0018-3)  
Zhu L, Hyyppä J (2014). Fully-automated power line extraction from airborne laser scanning point clouds in forest areas. *Remote Sensing* 6 (11): 11267-11282. - doi: [10.3390/rs61111267](https://doi.org/10.3390/rs61111267)

## Materiale Supplementare

**Fig. S1** - Estratto della mappa del volume stimato per il comune di Orsomarso: (A) impiegando il nD-

SM non corretto e (B) impiegando il CHM corretto.

**Fig. S2** - Estratto della mappa del volume stimato per il comune di San Fili: (A) impiegando il nDSM non corretto e (B) impiegando il CHM corretto.

**Fig. S3** - Estratto della mappa del volume stimato per il comune di San Sostene: (A) impiegando il nDSM non corretto e (B) impiegando il CHM corretto.

**Box S1** - Esempi di procedure automatizzate in ambiente *open-source* R ("Affioramenti.R", "MosaicRaster.R", "ReprojectRes1m.R").

**Link:** [Floris\\_2328@suppl001.pdf](#)