

Tavole di cubatura e laser scanner terrestre: l'innovazione tecnologica al servizio della dendrometria

Nicola Puletti ⁽¹⁾,
Matteo Guasti ⁽¹⁾,
Simone Innocenti ⁽¹⁾,
Roberto Scotti ⁽²⁾

Volume tables and terrestrial laser scanning: a technology innovation supporting forest mensuration

Ecologically and economically sustainable planning of forest resources requires tools capable of providing estimates with adequate accuracy on volume, biomass and woody increments. Interest in these attributes has increased since the United Nations Framework Convention on Climate Change has been given a further boost by the birth of the carbon credit market in the early 2000s. However, the data collection necessary to formulate allometric models for estimating wood volume is challenging, both due to the considerable amount of data required and because the necessary destructive measurements are very laborious. Furthermore, given the great structural, managerial and environmental diversity that characterizes the Italian forests, the sample size for the development of allometric models must necessarily be large. Over the years, all these aspects have led to a progressive abandonment of measurements in the forests for the production of volume tables. Recent applications of the terrestrial laser scanner (TLS) for collecting dimensional information on trees have demonstrated their effectiveness. In this study we present the work carried out in the autumn/winter 2022-2023 for the creation of new volume tables for the black pine forests in Vallombrosa (FI - Central Italy), based on data collected with a TLS. The study involved the same pine forests studied in 1969 for the production of volume tables in Vallombrosa. After showing the methods and analysis needed to obtain the volume tables, the paper discusses the results in comparison with those produced in 1969.

Keywords: Allometric Equations, Precision Forestry, Digitization, Forest Mensuration, Forest Management, Forest Planning

Introduzione

La stima del volume legnoso presente in un dato tratto di foresta rappresenta l'operazione caratterizzante della dendrometria. La procedura di stima che, fino ad ora, risulta ottimizzare il compromesso tra costo del rilievo ed accuratezza del risultato si basa su funzioni allometriche, o funzioni di volume, tipicamente presentate in forma tabellare dette "tavole di cubatura". La forma tabellare, oltre a semplificare i calcoli è importante in quanto definisce il dominio di applicabilità dello strumento. Questi strumenti presentano la stima del volume medio di un fusto in funzione del diametro a petto d'uomo (convenzionalmente 1.3 m da terra).

Da circa 50 anni, se non in rari casi opportunamente registrati secondo i principi FAIR (*Findability, Accessibility, In-*

teroperability, and Reuse), non si realizzano più tavole di cubatura in Italia. La raccolta delle tavole pubblicata dall'allora Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura di Trento (Castellani 1982) ha rappresentato la fine di un periodo. I lavori successivi sono stati sporadici e di portata limitata, sia molto locale, sia molto generica, come ad esempio le tavole prodotte per gli ultimi inventari nazionali italiani (Castellani et al. 1984, Tabacchi et al. 2011, Puletti et al. 2022).

I motivi di tali carenze sono di varia natura. Anzitutto esistono ostacoli logistici connessi alle attività da realizzare in bosco, sia per la fase di selezione del campione di alberi modello, sia per il lavoro di abbattimento, sezionamento e misura. Altri ostacoli sono di natura burocratico-amministrativa: l'iter da seguire per le pratiche di abbattimento degli alberi modello è costellato di gravose richieste e dichiarazioni. L'insieme di questi impedimenti è probabilmente considerato troppo oneroso in termini di tempo e di costi, rispetto ai potenziali benefici che lo sviluppo di tavole specifiche può portare al lavoro professionale.

Le tavole di cubatura realizzate nell'ambito degli ultimi inventari forestali nazionali, nonostante siano basate su poche osservazioni opportunamente distribuite sul territorio nazionale, rappresentano oggi un importante riferimento per professionisti e ricercatori del settore, poiché relativamente facili da utilizzare. Ciononostante, presentano alcuni problemi in termini di applicabilità locale: i 1314 individui impiegati per la modellizzazione coprono infatti l'estensione nazionale per solo 44 specie o gruppi di specie. Confrontando ad esempio il numero di alberi mo-

□ (1) CREA Centro di ricerca foreste e legno, v.le Santa Margherita 80, I-52100 Arezzo (Italy); (2) NuoroForestrySchool, Dipartimento di Agraria, Università di Sassari, v. Colombo 1, I-08100 Nuoro (Italy)

@ Simone Innocenti (simone.innocenti@crea.gov.it)

Ricevuto: 9 Giugno 2023 - Accettato: 5 Luglio 2023

Citazione: Puletti N, Guasti M, Innocenti S, Scotti R (2023). Tavole di cubatura e laser scanner terrestre: l'innovazione tecnologica al servizio della dendrometria. *Forest@* 20: 61-66. - doi: [10.3832/efor4401-020](https://doi.org/10.3832/efor4401-020) [online 2023-07-24]

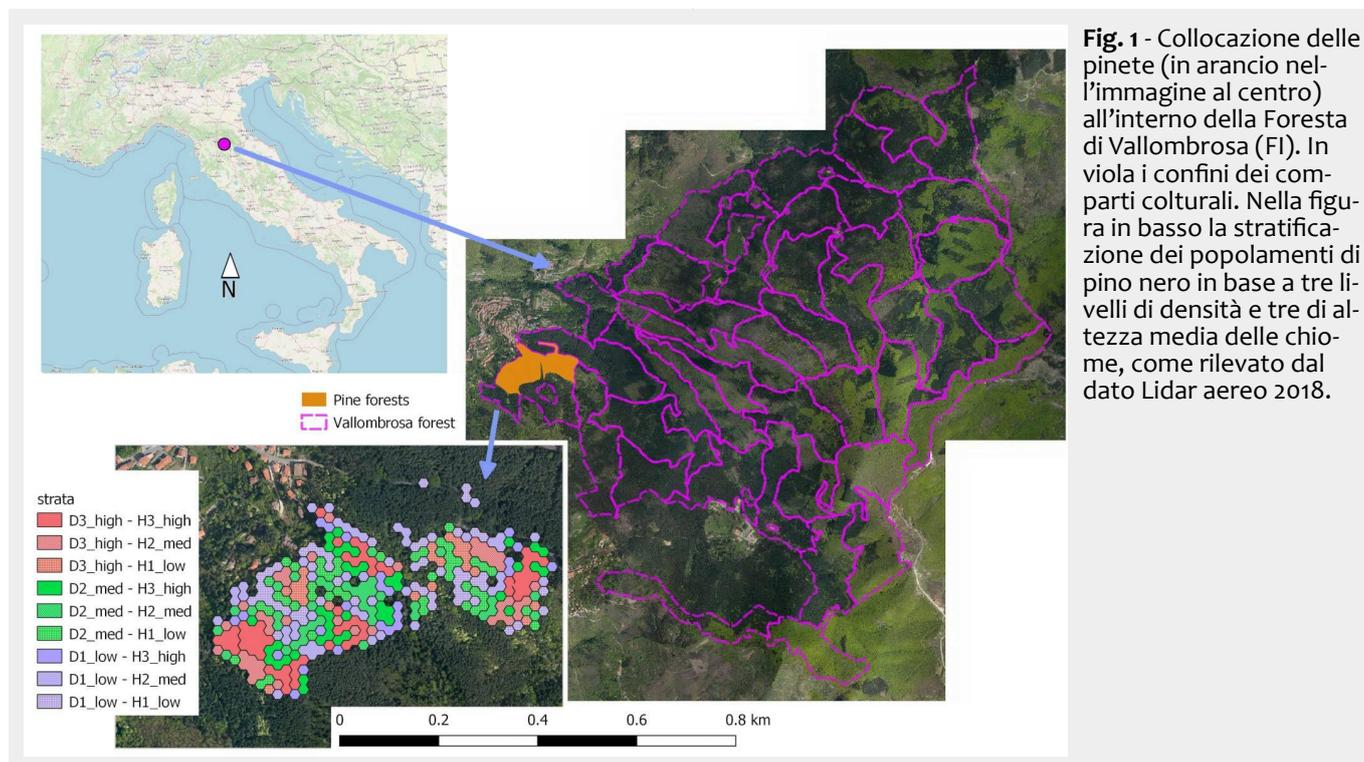


Fig. 1 - Collocazione delle pinete (in arancio nell'immagine al centro) all'interno della Foresta di Vallombrosa (FI). In viola i confini dei comparti culturali. Nella figura in basso la stratificazione dei popolamenti di pino nero in base a tre livelli di densità e tre di altezza media delle chiome, come rilevato dal dato Lidar aereo 2018.

dello utilizzati dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio del 2005 per l'abete rosso (*Picea abies* Karst.) con quello utilizzato dalla tavola cormometrica a doppia entrata dell'abete rosso per le fustaie coetanee dei boschi nel Comune di Rotzo (Vicenza) (vedi Castellani 1982, pag. 79-80), la differenza è di 93 a 823 (Puletti & Innocenti 2023).

A quanto detto si aggiunge un altro problema. Le tavole collezionate da Castellani, ormai 40 anni fa, si riferiscono ad alberi modello estratti da boschi assestati e gestiti. Le condizioni climatiche e gestionali sono oggi molto diverse: le pratiche selvicolturali sono state infatti ridotte al minimo, se non completamente azzerate. Utilizzare oggi quegli strumenti può comportare alterazioni ragguardevoli delle stime (Calders et al. 2022), anche in termini di contabilità dei crediti di carbonio.

Considerata la necessità di tornare a misurare gli alberi in foresta al fine di produrre nuove ed aggiornate tavole di cubatura, sono da individuare metodi e tecniche di misurazione adeguate alle nuove richieste. In questo senso, l'uso del laser scanner terrestre (TLS, *Terrestrial Laser Scanner*) offre un'importante opportunità, quantomeno da valutare con attenzione, per la misurazione di dettaglio del volume del fusto dei singoli alberi (Corona et al. 2023). Il tutto senza la necessità di abbattere alberi (Calders et al. 2015, Chianucci et al. 2020).

Il presente articolo illustra i risultati ottenuti a partire da rilievi TLS relativi a singoli alberi, effettuati nelle pinete di pino nero presenti a Vallombrosa (FI). Gli stessi popolamenti forestali erano stati oggetto di studi per la realizzazione di tavole di cubatura nel 1969 (Bernetti et al. 1969). Pertanto, dopo aver mostrato i metodi di misurazione e di analisi necessari per l'ottenimento delle tavole/funzioni di cubatura a partire da dati TLS, il presente lavoro ne discute i risultati anche in confronto con le tavole prodotte nel 1969.

Materiali e metodi

Descrizione dell'area di studio e definizione del campione

La Riserva Biogenetica di Vallombrosa è ubicata nel ver-

sante nord-ovest del massiccio montuoso del Pratoma-gno, in provincia di Firenze. I versanti sono per lo più a pendenza accentuata, per quanto siano presenti anche zone relativamente pianeggianti. Il substrato è rappresentato da sedimenti della serie del Macigno del Chianti, con suoli ad elevata attività biologica. La foresta di Vallombrosa rientra nella zona fitoclimatica del *Fagetum* di Pavari sopra i 1000 m e in quella del *Castanetum* al di sotto di tale limite, zona quest'ultima delle pinete di nostro interesse (Fig. 1).

Lo studio è stato condotto all'interno delle unità colturali n. 200, 281, 302, 303, 304 relative all'ultimo Piano di Gestione (Ciancio 2009).

(i) Inizialmente utilizzando dati lidar telerilevati da aereo (ALS, *Airborne Laser Scanner*) datati novembre 2015 (Chirici et al. 2016), tramite tecniche di *Individual Tree Detection* (Li et al. 2012) abbiamo individuato la posizione dei singoli alberi di pino e determinato la loro altezza.

(ii) Successivamente, l'area di studio è stata suddivisa in esagoni regolari, di superficie pari a 0.035 ettari, che includevano circa 30 alberi. All'interno di ciascun esagono abbiamo calcolato densità e altezza media degli alberi individuati al punto (i).

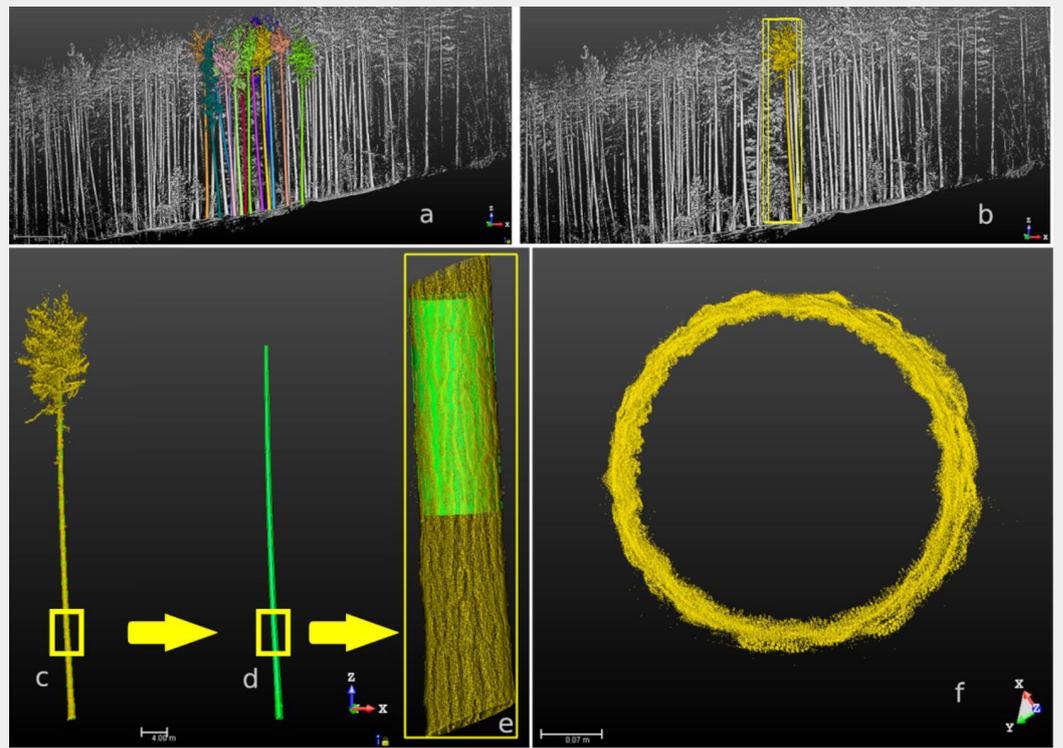
(iii) Osservando la distribuzione dei valori di densità e altezza media presenti in ogni esagono, abbiamo definito 9 strati inventariali suddividendo la popolazione di esagoni in 3 livelli di densità e 3 livelli di altezza (Fig. 1). Un totale di 18 punti di campionamento sono stati localizzati, distribuendoli tra gli strati con numerosità proporzionale a numero di esagoni corrispondenti.

Su ciascun punto di campionamento abbiamo realizzato aree di scansione con approccio *multiscan* (Giannetti et al. 2018, Puletti et al. 2019, Corona et al. 2023). Per tale rilievo è stato utilizzato un Laser Scanner FARO® Focus 3D × 130 (FARO Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA).

Segmentazione del singolo albero

Alla fase di acquisizione in campo, è seguita quella di segmentazione (Fig. 2). Dalla nuvola di punti risultante dalla scansione sul singolo punto di campionamento (Fig. 2a) si è passati all'individuazione manuale dei fusti di inte-

Fig. 2 - Rappresentazione schematica del processo di cubatura partendo da dati Lidar Terrestre. (a) Nuvola di punti risultante dalla scansione su singolo punto di campionamento e individuazione manuale dei fusti di interesse. (b-c) Selezione ed isolamento di uno degli alberi modello. (d-e) *Fitting* del cilindro (altezza di circa un metro) nella nuvola rappresentante il fusto. (f) Visione dall'alto (sezione) del toppe selezionato nel riquadro (e).



resse (Fig. 2b, Fig. 2c). Successivamente, sempre con procedura manuale su software Trimble Real Works, il fusto è stato diviso in toppe di altezza pari a circa 1 m: con una operazione denominata di *mesh-fitting* il software approssima il toppe al cilindro più simile. Tutte le caratteristiche dimensionali del cilindro derivato dal *mesh-fitting* (fondamentalmente un identificativo del toppe, la sua altezza esatta e il suo diametro) sono state esportate ed analizzate per la successiva cubatura. L'operazione inizia a partire dal basso e la segmentazione del singolo albero si interrompe quando il cilindro raggiunge un diametro di poco inferiore ai 10 cm.

Calcolo del volume e studio della funzione

Una volta collezionati tutti i cilindri di tutti gli alberi, secondo le modalità descritte nei paragrafi precedenti, il calcolo del volume del singolo albero è stato ottenuto semplicemente sommando il volume dei cilindri appartenenti a quell'albero.

Avendo misurato dalla nuvola dei punti il diametro a petto d'uomo (*dbh*), l'altezza (*H*) e il volume (*V*) di ciascun albero, è stato possibile studiare le relazioni tra questi attributi. In accordo con il modello di stima proposto da Hellrigl (Bernetti et al. 1969), la funzione scelta per il calcolo del volume ha la forma (eqn. 1):

$$V = \beta_1 + \beta_2 H + \beta_3 dbh^2 + \beta_4 dbh^2 H \quad (1)$$

dove $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ sono i coefficienti della regressione lineare da stimare.

La funzione di volume calibrata utilizzando le stime di volume ottenute dal rilievo TLS è stata valutata osservando i grafici dei residui e tramite gli indici R^2 *adjusted* e RMSE (eqn. 2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

dove n esprime il numero di volumi osservati, y_i e \hat{y}_i rappresentano, rispettivamente, il volume osservato e quello stimato dal modello di regressione.

Risultati

Il campionamento

La campagna di misurazione a terra e la successiva fase di ripulitura delle nuvole di punti e cubatura hanno prodotto un campione composto da 219 alberi modello.

Il rilievo e la lavorazione a video hanno comportato un impegno rispettivamente di 5 giorni per due persone e di 7 giorni per una persona.

La distribuzione di frequenza dei diametri (Fig. 3) ha presentato un marcato allungamento verso i valori alti, discostandosi dalla normalità, come verificato attraverso l'applicazione del test di Shapiro-Wilk. Al contrario lo stesso test non rigetta l'ipotesi di normalità della distribuzione delle altezze (Fig. 4).

Di conseguenza, la relazione diametro altezza, nei fusti campione selezionati, presenta bassa correlazione. Tuttavia, adottando il consueto modello logaritmico l'interpolazione è soddisfacente e presenta pendenza significativamente diversa da zero (p -value < 0.01).

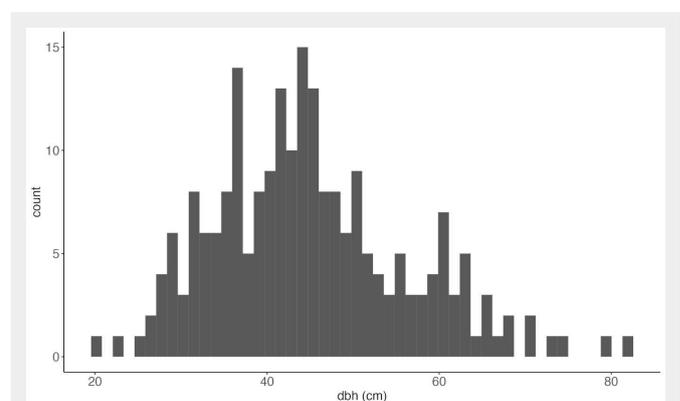


Fig. 3 - Distribuzione diametrica degli alberi modello, derivata da misura TLS.

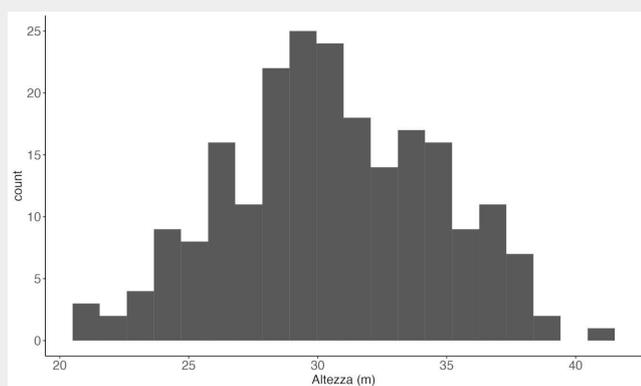


Fig. 4 - Distribuzione delle altezze degli alberi modello, con informazioni ottenute da misure TLS. Statistica del test di Shapiro-Wilk = 0.99337, p-value = 0.4379, ipotesi nulla di normalità non rigettata.

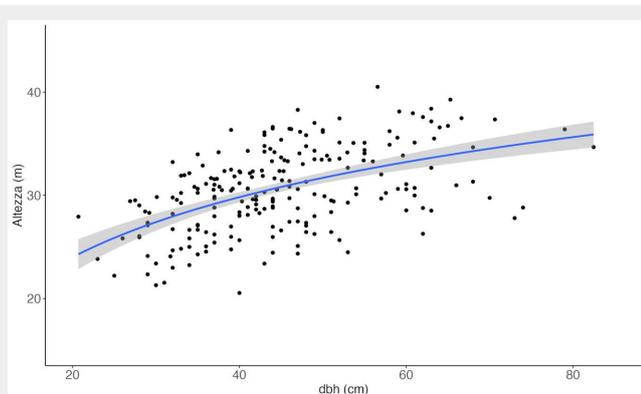


Fig. 5 - Relazione altezza-diametri delle piante misurate con TLS.

La funzione di volume

I valori dei parametri β stimati dal modello regressivo sono riportati in Tab. 1. Per confronto abbiamo affiancato i parametri corrispondenti riportati da Hellrigl (Bernetti et al. 1969). In realtà i parametri esposti nella pubblicazione citata presentano qualche errore; quelli riportati in Tab. 1 sono stati corretti in modo da riprodurre esattamente i valori tabulari della pubblicazione.

Valutazione della funzione di volume

Il modello prodotto è risultato affidabile (R^2 adjusted = 0.97; RMSE = 0.20). I volumi stimati variano da un minimo di 0.35 m³ (per un albero di 20.7 cm di diametro) ad un massimo di 7.65 m³, per un albero di 82.5 cm di diametro.

Tab. 1 - Coefficienti di regressione stimati nel presente lavoro (colonna 2, TLS-2023) e da Hellrigl nel 1969 (colonna 3), corretti (vedi testo). Nella formula TLS-2023 per il calcolo del volume, i valori di diametro e altezza devono essere entrambi inseriti in metri. (***) : p-value <0.001; (ns) : p-value >0.1.

Coefficiente	TLS-2023	Hellrigl-1969
β_1	-0.25024 ^{ns}	0.00035
β_2	0.0062 ^{ns}	0.00161
β_3	3.7631 ^{***}	-1.196417
β_4	0.2051 ^{***}	0.410092

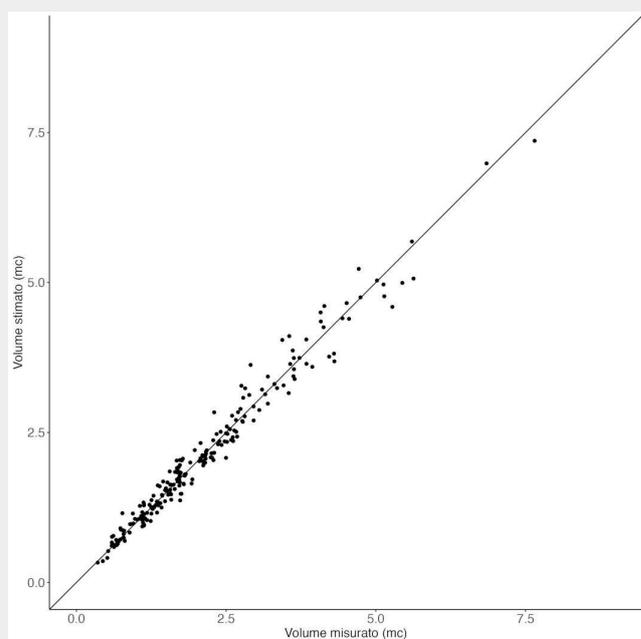


Fig. 6 - Confronto tra i valori stimati utilizzando la funzione di volume sviluppata in questo lavoro (ordinate) contro i valori misurati con TLS (asse ascisse).

Tali risultati sono coerenti con quanto riportato da Hellrigl nei valori minimi. Non si possono confrontare direttamente nei valori massimi perché, al tempo, non erano presenti alberi di grandi dimensioni (Fig. 5, Fig. 6).

Discussione

I risultati ottenuti in questo lavoro permettono di affermare che il TLS garantisce l'ottenimento di misure affidabili di volume. Viene pertanto confermato quanto riportato in studi precedenti condotti in altri popolamenti forestali (ad es., Calders et al. 2015, Olschofsky et al. 2016, He et al. 2018, Chianucci et al. 2020, Puletti et al. 2020, Calders et al. 2022).

Sia il volume che la biomassa legnosa sono tradizionalmente stimati indirettamente utilizzando modelli allometrici basati su predittori come diametro e altezza dell'albero (Chave et al. 2005). Gli attuali approcci TLS riducono l'incertezza correlata all'allometria attraverso stime dirette del volume legnoso da nuvole di punti, che possono essere convertiti in biomassa (AGB, Aboveground Biomass) utilizzando informazioni sul peso specifico del legno come Biomass Expansion Factor e Wood Biomass Density (Pettersson et al. 2012).

Con riferimento alla funzione di volume, l'inclusione dell'altezza non apporta miglioramenti rilevanti nel modello. Questo aspetto potrebbe rappresentare un vantaggio operativo, poiché, spesso l'altezza viene misurata con minore precisione rispetto al diametro, sia con i sistemi tradizionali che con quelli TLS. La complessità del popolamento forestale (densità degli alberi, vegetazione del sottobosco, ecc.), la notevole pendenza del terreno e gli attributi specifici della specie arborea di interesse, influenzano infatti la visibilità delle cime degli alberi, con conseguenze sull'accuratezza della misurazione dell'altezza (Liu et al. 2018).

Inoltre, le tradizionali misurazioni distruttive di alberi modello sono limitate dai costi di realizzazione e, pertanto, caratterizzate da dimensioni campionarie ridotte. Questo aspetto introduce errori che, propagati a livello di popolamento, non offrono un quadro corretto sullo stato delle risorse forestali (Weiskittel et al. 2015). Il TLS può

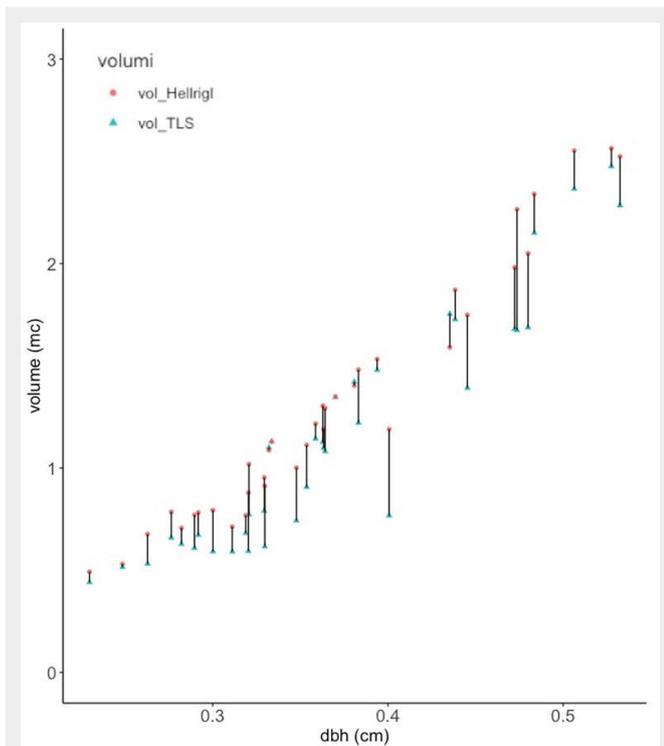


Fig. 7 - Confronto tra i volumi stimati utilizzando la funzione di Hellrigl-1969 e quelli con la funzione sviluppata in questo articolo, rispetto al diametro. Il confronto è stato limitato ai 27 alberi, misurati in questo lavoro, riferibili al dominio della tabella di Hellrigl.

aiutare a superare tali limiti, consentendo potenzialmente di aumentare la dimensione del campione, anche per alberi di grandi dimensioni. In aggiunta, le misurazioni non richiedono la distruzione del fusto, permettendo così un suo dettagliato monitoraggio nel tempo.

Le procedure semi-automatiche di *mesh-fitting* adottate per la definizione del “miglior cilindro” sono un ottimo espediente quando l’obiettivo è la cubatura. Il vantaggio principale è quello di essere molto speditive, permettendo un’operatività elevata anche su porzioni della nuvola dei punti non particolarmente dense o problematiche, come ad esempio nelle parti alte della chioma.

Al contempo, non mancano le limitazioni. Al netto dei costi di acquisto e delle competenze necessarie al suo utilizzo, i principali ostacoli al rilievo con TLS sono due. Da una parte la complessità strutturale dei soprassuoli: la presenza di vegetazione sopra il metro, che sia rinnovazione affermata o un denso strato arbustivo, riducono (o impediscono del tutto) il passaggio del raggio laser agli strati superiori del popolamento di interesse. La densità della vegetazione è un problema anche per la visualizzazione dei target necessari al montaggio dei diversi punti di scansione all’interno dello stesso rilievo. L’impedimento delle foglie può essere ridotto solo in un modo: realizzando rilievi TLS da ottobre ad aprile, quando la vegetazione è a riposo. Tale accorgimento può rimanere rilevante anche per situazioni in cui la specie *target* è una sempreverde e lo strato dominato è caratterizzato da caducifoglie. Dall’altra parte, gli agenti atmosferici: i circuiti elettronici del corpo macchina sono molto sensibili agli estremi termici (in particolare quelli inferiori, p.es., sotto i 6-8 °C), come pure alla presenza di acqua, che sia pioggia o nebbia densa. Il vento è invece un problema nella fase di *post-processing* e di *mesh-fitting* a video. Le parti terminali della chioma, oltre ad essere molto più lontane dallo scanner (e quindi meno dense in termini di *point-cloud*), sono

anche dimensionalmente più piccole e, pertanto, più facili da muovere anche con velocità del vento non elevate.

Il confronto tra i volumi stimati utilizzando questa funzione e quella di Hellrigl, evidenzia (Fig. 7) una sovrastima sistematica adottando oggi uno strumento calibrato nel 1969.

Conclusioni

Presentando le tavole nel 1982, Castellani raccomandava, “soprattutto ai giovani, di continuare l’opera di compilazione di nuove tavole sperimentali per le specie legnose per le quali mancano del tutto idonei elaborati o questi non risultano sufficientemente completi” (Castellani 1982). Dopo più di 40 anni, non possiamo dire che tale raccomandazione sia stata concretamente raccolta dai giovani di allora.

Il sostanziale abbandono della dendrometria e dell’assestamento forestale come tecniche conoscitive di base, ha determinato una graduale perdita di importanti competenze, con un conseguente impoverimento delle attuali capacità di conoscere lo stato delle nostre risorse forestali e pianificarne un uso veramente sostenibile.

L’introduzione massiccia delle tecnologie di precisione nel settore forestale può contribuire, in modo significativo, al rinnovamento dei processi di monitoraggio, gestione e valorizzazione del patrimonio forestale del nostro Paese. In questo studio, in particolare, abbiamo confermato l’efficienza del TLS per la cubatura dei fusti arborei. Rispetto alle tradizionali misurazioni, l’introduzione del TLS contribuisce a ridurre il lavoro in bosco e, consentendo di incrementare sensibilmente il campione di fusti modello realizzabili, a migliorare l’accuratezza della previsione.

Da un punto di vista generale, infine, la natura tridimensionale delle misurazioni TLS consente una migliore integrazione con diversi sensori telerilevati, che possono essere utilizzati in combinazione con TLS. L’integrazione del TLS con dati 3D fotogrammetrici o di scansione laser derivati da piattaforme aeree o droni può migliorare la caratterizzazione della struttura di alberi e dei popolamenti a scala ampia (*upscaling*).

Ovviamente, la diffusione di tali tecnologie richiede un deciso cambio di passo in un settore radicato nella tradizione come quello forestale, insieme ad una adeguata formazione, a cominciare dalle aule universitarie.

Bibliografia

- Bernetti G, Cantiani M, Hellrigl B (1969). Ricerche alsometriche e dendrometriche sulle pinete di pino nero e laricio della Toscana. *L’Italia Forestale e Montana* 26 (1): 10-40. [online] URL: http://gitlab.com/Puletti/taper_eq_pine_vallombrosa/-/blob/main/biblio/DOC111022-11102022081807.pdf
- Calders K, Newnham G, Burt A, Murphy S, Raunonen P, Herold M, Culvenor D (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution* 6 (2): 198-208. - doi: [10.1111/2041-210X.12301](https://doi.org/10.1111/2041-210X.12301)
- Calders K, Verbeeck H, Burt A, Origo N, Nightingale J, Malhi Y, Wilkes P, Raunonen P, Bunce RGH, Disney M (2022). Laser scanning reveals potential underestimation of biomass carbon in temperate forest. *Ecological Solutions and Evidence* 3 (4). - doi: [10.1002/2688-8319.12197](https://doi.org/10.1002/2688-8319.12197)
- Castellani C, Scrinzi G, Tabacchi G, Tosi V (1984). Inventario forestale nazionale italiano Tavole di cubatura a doppia entrata. Ministero dell’Agricoltura e delle Foreste, Istituto Sperimentale per l’Assestamento Forestale e per l’Alpicoltura, Trento. [online] URL: http://www.collegiogeometri.bo.it/public/allegatiNews/1c923229-3632-445a-9151-6cce3414e617_fascicolocompleto.pdf
- Castellani C (1982). Tavole stereometriche ed alsometriche costruite per i boschi italiani. Istituto Sperimentale per l’Asse-

stamento Forestale e per l'Alpicoltura, Trento, vol. I, pp. 5-415, vol. II, pp. 13-121, vol. III, pp. 17-277.

Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, Fölster H (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145 (1): 87-99. - doi: [10.1007/s00442-005-0100-x](https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x)

Chianucci F, Puletti N, Grotti M, Ferrara C, Giorcelli A, Coaloa D, Tattoni C (2020). Nondestructive tree stem and crown volume allometry in hybrid poplar plantations derived from terrestrial laser scanning. *Forest Science* 66 (6): 737-746. - doi: [10.1093/forsci/fxaa021](https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa021)

Chirici G, Bottalico F, Giannetti F, Rossi P, Del Perugia B, Travaglini D, Nocentini S, Marchi E, Foderi C, Fioravanti M, Fattorini L, Guariglia A, Ciancio O, Bottai L, Corona P, Gozzini B (2016). Valutazione dei danni forestali a seguito della tempesta di vento del 5 marzo 2015 in Toscana (Italia). *L'Italia Forestale e Montana* 71 (4). [online] URL: <http://italiaforestalemontana.it/index.php/ifm/article/view/837/819>

Ciancio O (2009). Riserva Naturale Statale Biogenetica di Vallombrosa. Piano di Gestione e Silvomuseo 2006-2025. Corpo forestale dello Stato, UTB Vallombrosa, Reggello, FI. [ISBN 978-88-87553-17-8]

Corona P, Costa C, Barbetti R, Bergante S, Cesaretti L, Chiarabaglio PM, Chirici G (2023). Foreste digitali: innovazioni e opportunità. *Forest@ 20* (2): 52-60. - doi: [10.3832/efor4353-020](https://doi.org/10.3832/efor4353-020)

Giannetti F, Puletti N, Quatrini V, Travaglini D, Bottalico F, Corona P, Chirici G (2018). Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single-tree attributes in Mediterranean forest stands. *European Journal of Remote Sensing* 51 (1): 795-807. - doi: [10.1080/22797254.2018.1482733](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482733)

He H, Zhang C, Zhao X, Fousseni F, Wang J, Dai H (2018). Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China. *PLoS One* 13 (1): e0186226. - doi: [10.1371/journal.pone.0186226](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186226)

Li W, Guo Q, Jakubowski MK, Kelly M (2012). A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 78 (1): 75-84. - doi: [10.14358/PERS.78.1.75](https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.75)

Liu G, Wang J, Dong P, Chen Y, Liu Z (2018). Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests* 9 (7): 398. - doi: [10.3390/f9070398](https://doi.org/10.3390/f9070398)

Olschofsky K, Mues V, Köhl M (2016). Operational assessment of aboveground tree volume and biomass by terrestrial laser scanning. *Computers and Electronics in Agriculture* 127: 699-707. - doi: [10.1016/j.compag.2016.07.030](https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.030)

Petersson H, Holm S, Ståhl G, Alger D, Fridman J, Lehtonen A, Lundström A, Mäkipää R (2012). Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass - A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270: 78-84. - doi: [10.1016/j.foreco.2012.01.004](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.004)

Puletti N, Grotti M, Scotti R (2019). Evaluating the eccentricities of poplar stem profiles with terrestrial laser scanning. *Forests* 10 (3): 239. - doi: [10.3390/f10030239](https://doi.org/10.3390/f10030239)

Puletti N, Grotti M, Ferrara C, Chianucci F (2020). Lidar-based estimates of aboveground biomass through ground, aerial, and satellite observation: a case study in a Mediterranean forest. *Journal of Applied Remote Sensing* 14 (4). - doi: [10.1117/1.JRS.14.044501](https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.044501)

Puletti N, Marra E, Scotti R (2022). ForIT package: le equazioni INFC in ambiente R. Zenodo. - doi: [10.5281/zenodo.5834843](https://doi.org/10.5281/zenodo.5834843)

Puletti N, Innocenti S (2023). Anagrafica delle tavole stereometriche ed alsometriche di Castellani 1982. Data set, Zenodo. - doi: [10.5281/zenodo.8010330](https://doi.org/10.5281/zenodo.8010330)

Tabacchi G, Di Cosmo L, Gasparini P, Morelli S (2011). Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale, Trento.

Weiskittel AR, MacFarlane DW, Radtke PJ, Affleck DLR, Hailemariam T, Woodall CW, Westfall JA, Coulston JW (2015). A call to improve methods for estimating tree biomass for regional and national assessments. *Journal of Forestry* 113 (4): 414-24. - doi: [10.5849/jof.14-091](https://doi.org/10.5849/jof.14-091)

Materiale Supplementare

Tab. S1 - Distribuzione dei diametri campionati e misurati con TLS nella campagna di rilievo 2022-2023, in classi di 5 cm.

Tab. S2 - Tavola di cubatura a doppia entrata per il pino nero di Vallombrosa da dati TLS. Anno di riferimento: 2023.

Fig. S1 - Frequenza degli alberi modello per ogni coppia diametro (classi di 5 cm) e altezza (classi di 2 m).

Link: Puletti_4401@suppl001.pdf