

Tecnologie LiDAR per lo studio e la tutela degli alberi monumentali in Italia

Nicola Puletti ⁽¹⁾,
Pietro Ciccalè ⁽¹⁾,
Matteo Guasti ⁽¹⁾,
Simone Innocenti ⁽¹⁾,
Walter Mattioli ⁽²⁾,
Ilaria Batassa ⁽³⁾

LiDAR technologies for the study and protection of monumental trees in Italy

Monumental trees in Italy represent a natural and cultural heritage of great value, whose conservation is essential. This study highlights the potential of LiDAR (Light Detection and Ranging)-based technologies, such as terrestrial laser scanning (TLS) and drones, for three-dimensional reconstruction of these specimens within virtual environments. Villa del Colle del Cardinale, a monumental complex managed by the National Museums of Perugia - Regional Directorate of National Museums of Umbria under the Ministry of Culture, located in the province of Perugia, was selected as a case study for developing a 3D digital archive of its monumental trees. This archive serves not only as a resource that can be consulted over time - useful for monitoring, scientific dissemination, and cultural promotion - but also as a replicable example at the national level for the protection and conservation of monumental tree heritage.

Keywords: Precision Forestry, Terrestrial Laser Scanner, LiDAR Drone, 3D Modelling, Natural Heritage

Gli alberi monumentali d'Italia

Il primo censimento degli alberi monumentali in Italia, condotto dall'allora Corpo Forestale dello Stato, risale al 1982. Tuttavia, il primo elenco degli alberi monumentali viene approvato con il decreto dipartimentale prot. n. 5450 del 19/12/2017, redatto ai sensi dell'art. 7 della legge del 14/01/2013. Dal 2017 l'elenco viene aggiornato annualmente dagli uffici competenti presso l'attuale Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste (MASAF). L'ultima versione (decreto direttoriale prot. n. 237195 del 27/05/2025) include 4944 esemplari, distribuiti in tutto il territorio nazionale (MASAF 2025).

Secondo la normativa vigente, un albero viene dichiarato monumentale se soddisfa uno o più criteri di monumentalità (MASAF 2014), ossia parametri che ne attestino il valore storico, culturale, paesaggistico o naturalistico, rendendolo un bene collettivo da tutelare e tramandare alle generazioni future. La capacità di questi alberi monumentali di accumulare carbonio resta ancora poco conosciuta. Tuttavia, questo limite conoscitivo è dovuto principalmente all'assenza di strumenti non invasivi, adatti a esemplari di grandi dimensioni e di morfologia complessa, spesso anche in fase avanzata di senescenza o soggetti a fenomeni di decadimento strutturale (Iozzelli 2022, Senette 2023). Tradizionalmente, il monitoraggio forestale ha fatto affidamento su rilievi dendrometrici manuali, foto-

grammetrici o su metodi basati sul telerilevamento satellitare. Questi strumenti, pur essendo consolidati, presentano limiti quando applicati a singoli alberi monumentali, poiché non riescono a catturare con precisione la complessità morfologica né a fornire dati riproducibili ad alta risoluzione. Negli ultimi anni, lo sviluppo delle tecniche di *precision forestry* e in particolare dei sensori *Light Detection and Ranging* (LiDAR) ha ampliato le possibilità di monitoraggio, consentendo di integrare rilievi a diverse scale, dal paesaggio al singolo albero, con elevati livelli di dettaglio (Dassot et al. 2011, Corona et al. 2017, Disney et al. 2018, Terryn et al. 2023, Kurdi et al. 2024). In questo contesto, le tecnologie basate su sensori LiDAR - sia terrestri (*Terrestrial Laser Scanner* - TLS) che montati su droni (*Unmanned Aerial Vehicle Laser Scanner* - ULS) - possono risultare di utile supporto (Xu et al. 2021, Alvites et al. 2022, Gyawali et al. 2022, Puletti et al. 2023, Arrizza et al. 2024, Kim et al. 2024).

Gli alberi monumentali rappresentano individui di eccezionale valore naturalistico e culturale, ma le loro peculiarità - età molto avanzata, dimensioni fuori scala, architetture irregolari e frequenti problemi strutturali legati a processi di decadimento o a eventi meteorologici estremi - rendono complesso il loro monitoraggio con metodologie tradizionali. L'impiego di tecniche di *remote sensing*, in particolare di sensori LiDAR, si è rivelato fondamentale per la loro analisi e salvaguardia. Diversi studi lo dimostrano chiaramente: in Polonia, ad esempio, Wezyk et al. (2015) hanno monitorato i cambiamenti biometrici di una grande quercia con tecniche LiDAR; altri lavori (Balestra et al. 2023, Serreta-Oliván et al. 2023) hanno mostrato come i modelli 3D di alberi monumentali - dalle querce agli olivi - siano fondamentali per la conservazione e la quantificazione di parametri strutturali a livello di singolo albero; più recentemente, Serena et al. (2024) hanno applicato *scanner laser* portatili e *software* dedicati per mappare gli alberi monumentali e valutarne i benefici ecosistemici in contesti urbani. Le tecniche di *laser scanning* permettono di misurare, in modo non invasivo, preciso e ripetibile nel tempo, diversi attributi forestali sia a livello di popola-

□ (1) CREA, Centro di ricerca Foreste e Legno, IT-52100 Arezzo (Italy); (2) CREA, Centro di ricerca Foreste e Legno, IT-00166 Roma (Italy); (3) Musei Nazionali di Perugia - Direzione regionale Musei Nazionali Umbria, Ministero della Cultura (Italy)

@ Pietro Ciccalè (pietro.ciccale@crea.gov.it)

Citazione: Puletti N, Ciccalè P, Guasti M, Innocenti S, Mattioli W, Batassa I (2026). Tecnologie LiDAR per lo studio e la tutela degli alberi monumentali in Italia. *Forest@* 23: 1-5. - doi: [10.3832/efor4947-022](https://doi.org/10.3832/efor4947-022) [online 2026-01-18]

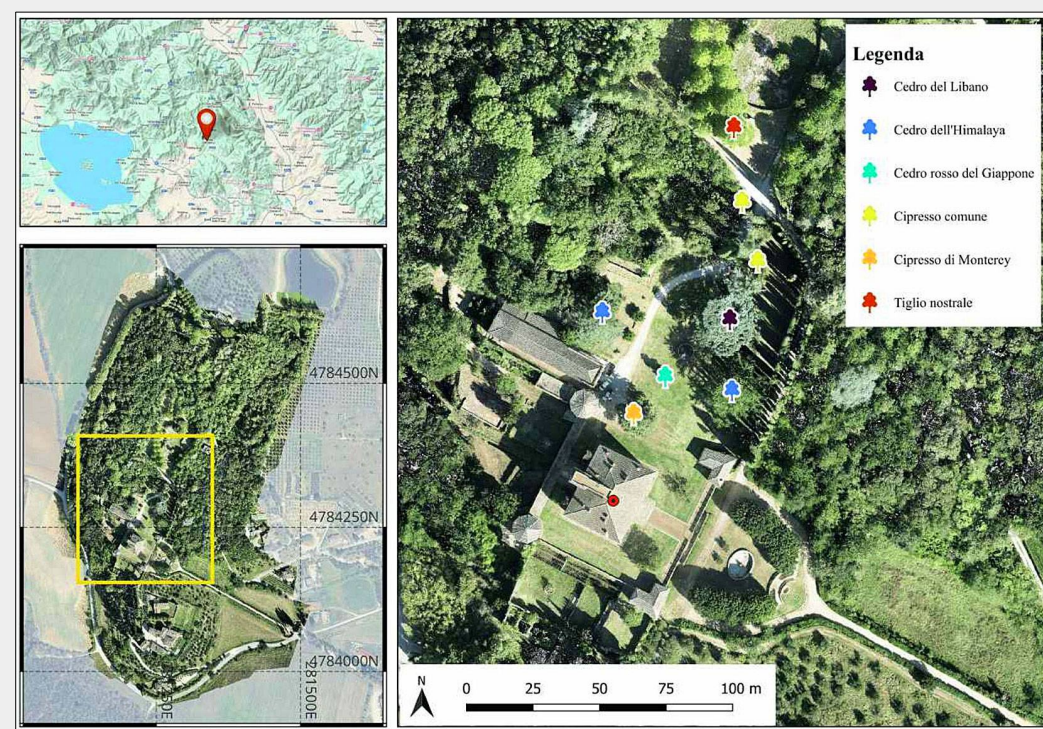


Fig. 1 - Cartografia della Villa del Colle del Cardinale. Collocazione dell'area di interesse (Villa del Colle del Cardinale, prov. di Perugia) tramite ortofoto ottenuta dal sorvolo con drone; a destra, una panoramica dettagliata degli alberi monumentali.

mento sia di singolo albero. Tra questi, il diametro a petto d'uomo (DBH) e l'altezza, fino a stimare volume e biomassa, attraverso accurate tecniche di modellazione 3D dell'intera struttura arborea (Calders et al. 2020, Chianucci et al. 2020, Qin et al. 2021, Stovall et al. 2023).

Alla luce di queste considerazioni, il presente contributo descrive le tecnologie e i metodi impiegati per la generazione di modelli tridimensionali relativi a un gruppo selezionato di alberi monumentali situati all'interno del complesso storico della Villa del Colle del Cardinale, in provincia di Perugia (MiC 2020). La scelta del sito è stata motivata da uno screening preliminare del geodatabase nazionale degli alberi monumentali (MASAF 2025), che ha evidenziato una significativa concentrazione di esemplari di interesse all'interno del parco della Villa. Tale evidenza ha dato avvio a una collaborazione tra il CREA - Centro di Ricerca Foreste e Legno - e il Ministero della Cultura, finalizzata allo sviluppo di un protocollo operativo per il monitoraggio e la conservazione degli alberi monumentali, con l'obiettivo di valorizzare e tutelare questo patrimonio naturale e culturale.

Gli obiettivi specifici includono la misurazione degli attributi dendrometrici principali e la creazione di un archivio digitale tridimensionale degli alberi rilevati. Tale archivio potrebbe in futuro essere esteso su scala nazionale, con il duplice scopo di valorizzare e tutelare questo importante patrimonio naturale e culturale, e di supportare attività di monitoraggio, ricerca scientifica e gestione conservativa in una prospettiva di lungo periodo.

Materiali e metodi

Gli alberi monumentali della Villa del Colle del Cardinale (PG), Umbria

La Villa del Colle del Cardinale, situata a 12 km a nord di Perugia, costruita intorno al 1575 per volontà del cardinale Fulvio della Corgna, è oggi non solo un esempio significativo di architettura rinascimentale, ma anche un luogo di straordinario interesse botanico e forestale. Il complesso naturalistico che circonda la Villa (Fig. 1), trasformato nella seconda metà dell'Ottocento in giardino all'inglese con lago e isole, ha un'estensione di circa 13 ettari e ospita

una ricchissima varietà di specie arboree autoctone e alloctone, alcune delle quali raggiungono dimensioni eccezionali e sono riconosciute come alberi monumentali. Nella collaborazione MiC-CREA sono stati dunque selezionati tutti (9) gli alberi monumentali presenti all'interno del complesso storico: tre individui di cedro dell'Himalaya (*Cedrus deodara*), di cui due raggruppati come insieme omogeneo, un cedro del Libano (*Cedrus libani*), un cedro rosso del Giappone (*Cryptomeria japonica*), un albero singolo e una filiera di cipresso mediterraneo (*Cupressus sempervirens*), un cipresso del Monterey (*Cupressus macrocarpa*), e un tiglio nostrale (*Tilia platyphyllos*).

Caratteristiche strumentazione LiDAR

La scansione 3D terrestre è stata realizzata con un Laser Scanner FARO Focus 3D x 130 (FARO Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA), mentre per il rilievo aereo è stato impiegato un drone DJI Matrice 350 RTK (SZ DJI Technology Co., Ltd.). Il Range Focus3D X 130 è uno scanner laser 3D con portata compresa tra 0.6 e 130 m, precisione di ± 2 mm e velocità fino a 976.000 punti al secondo. Integra una fotocamera a colori da 70 MP, pesa 5.2 kg e utilizza un laser di classe 1. È dotato di sensori GPS, bussola, altimetro e compensatore biassiale. Il DJI Matrice 350 RTK è un drone professionale con autonomia fino a 55 minuti, una portata fino a 20 km e una resistenza IP55. Integrato con il LiDAR Zenmuse (L1), consente l'acquisizione di nuvole di punti ad alta densità, grazie a RTK e a un IMU avanzato. Il sensore include anche una camera RGB da 20 MP per colorare i dati 3D, rendendolo ideale per rilievi topografici, il monitoraggio forestale e le applicazioni ambientali.

Acquisizione, processing e validazione dei dati 3D

La principale differenza tra TLS e ULS riguarda la posizione e le caratteristiche di acquisizione: il TLS opera da terra, garantendo una densità di punti superiore per metro quadro, ma copre aree più limitate e non riesce a catturare la parte superiore delle chiome. Al contrario, l'ULS acquisisce dati dall'alto, sopra la chioma, offrendo una copertura territoriale molto più ampia; tuttavia, la sua capacità di penetrare fino al suolo diminuisce quando la coper-

tura forestale è densa. Le scansioni a terra sono state effettuate posizionando il TLS ai vertici di un triangolo posto intorno ai singoli alberi, mentre le acquisizioni con ULS sono state condotte a un'altezza di 60 m da terra e progettando i singoli voli su un ambiente GIS (Geographic Information System). La ricostruzione tridimensionale degli alberi è stata ottenuta integrando i dati provenienti dalle due fonti - scansione terrestre e rilievo aereo - attraverso un processo di allineamento delle rispettive nuvole di punti (Fig. 2). Questo allineamento è stato effettuato attraverso l'uso del software CloudCompare v. 2.10.3 (CloudCompare 2019) seguendo un procedimento a due fasi: come prima operazione, sono stati selezionati diversi punti di riferimento comuni e ben visibili in entrambe le acquisizioni; successivamente, le scansioni sono state allineate utilizzando l'algoritmo di registrazione automatica ICP (Besl & McKay 1992) disponibile nel software. Dato che quest'ultimo passo avviene automaticamente, sono state condotte varie investigazioni manuali e visive per garantire una registrazione accurata e coerente dei dati. Infine, per la corretta analisi dei dati, sono state eseguite sia la riduzione del rumore (o *denoising*) con lo strumento "Sub-sample" di CloudCompare, sia la normalizzazione mediante il *Digital Terrain Model* (DTM) derivato da ULS.

Per la validazione dei dati LiDAR è stata indagata la relazione tra le variabili dendrometriche estratte dalle singole nuvole di punti e quelle disponibili nell'archivio del MASAF, ossia la circonferenza del fusto e l'altezza. Per calcolare la circonferenza dai modelli 3D è stato estratto manualmente il diametro a petto d'uomo (DBH), specificamente con la creazione di cilindri nella sezione del fusto che va da 1.2 a 1.4 m e la seguente registrazione del diametro. Da questo è stata poi calcolata la circonferenza del fusto. L'altezza è stata misurata prendendo il punto più basso del fusto a contatto con il terreno e quello più alto della chioma. Altri attributi dendrometrici derivabili dalle scansioni LiDAR, assenti nell'archivio del MASAF, comprendono il volume legnoso e la biomassa (vedi Fig. S3, Materiale supplementare).

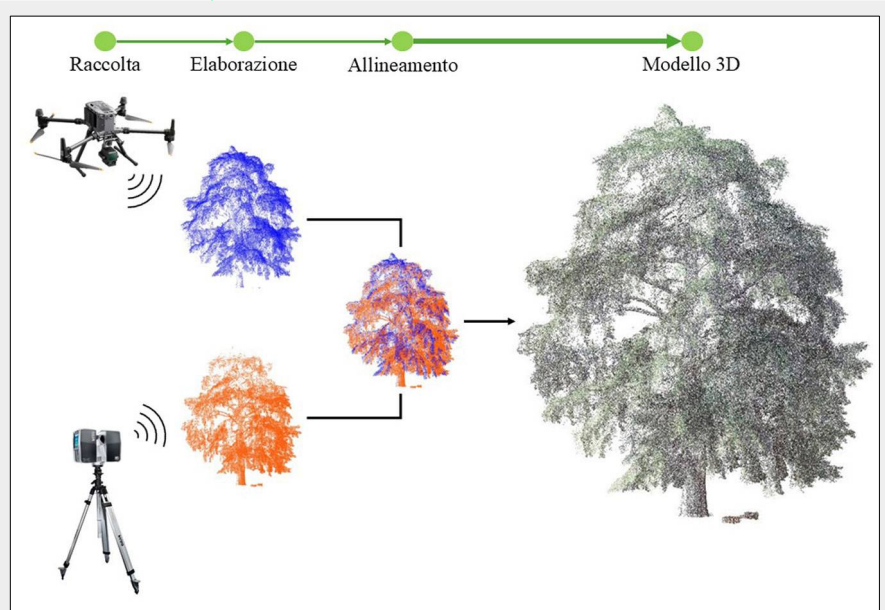


Fig. 2 - Allineamento dei dati LiDAR. Rappresentazione schematica del procedimento utilizzato per ottenere i modelli 3D completi degli alberi attraverso l'allineamento delle nuvole di punti (terrestre in rosso e aerea in blu).

Risultati e discussione

Relazioni tra dati LiDAR e dati inventariali

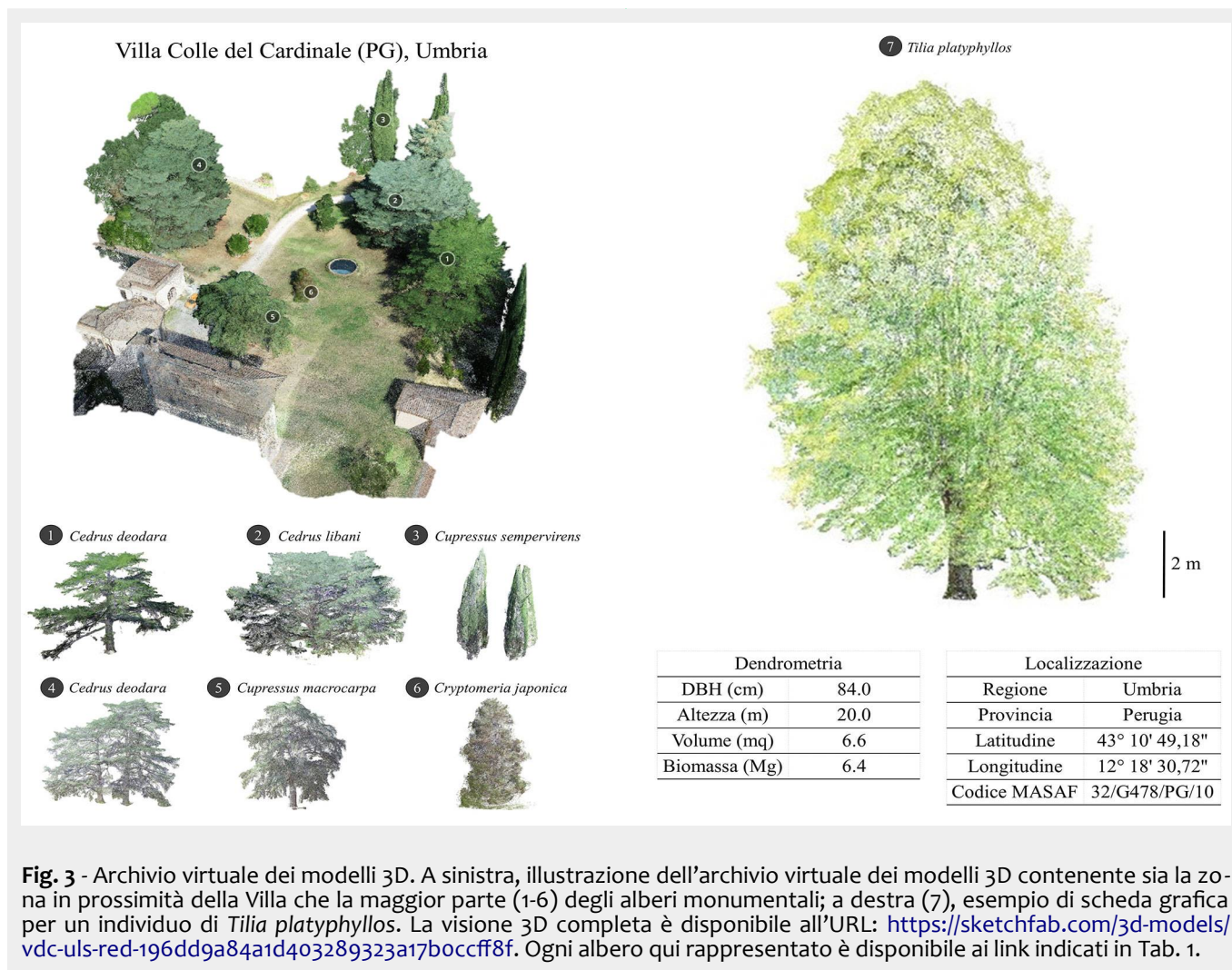
Come mostrato in Tab. 1, la sostanziale coincidenza tra gli attributi dendrometrici (circonferenza e altezza) derivati da scansione LiDAR e quelli riportati nell'inventario del MASAF sottolinea la validità e l'accuratezza della misurazione con LiDAR.

Archivio modelli 3D degli alberi monumentali

Grazie al protocollo di scansione e all'allineamento dei dati LiDAR provenienti da piattaforme terrestri e aeree messo a punto, è stato possibile generare una nuvola di punti relativa al singolo esemplare arboreo. Questo approccio consente di ottenere una rappresentazione tridimensionale accurata e permanente, costituendo un vero e proprio archivio digitale in cui ogni albero monumentale scansionato è associato a una sorta di scheda virtuale (Fig. 3). Dalla nuvola di punti ottenuta è possibile estrarre numerose caratteristiche dendrometriche (vedi Fig. S1, Fig. S2). Il modello tridimensionale, se opportunamente archiviato, potrà essere consultato anche in futuro,

Tab. 1 - Elenco dei nove alberi monumentali presenti nel complesso della Villa del Colle del Cardinale alla data di pubblicazione di questo articolo. Oltre al codice MASAF e il nome scientifico degli alberi, è presente una colonna ("Nome modello 3D*") con il link diretto al modello tridimensionale caricato su Sketchfab®; le ultime due colonne si riferiscono ai valori di circonferenza del fusto (cm) e altezza (m) dei singoli alberi archiviati dal MASAF e rilevati con scansione LiDAR, rispettivamente.

id	Codice MASAF	Nome scientifico	Nome modello 3D*	Circonferenza, cm (MASAF / LiDAR)	Altezza, m (MASAF / LiDAR)
1	22/G478/PG/10	<i>Cedrus libani</i> A. Richard	cedro_libano	510 / 512	17 / 17
2	23/G478/PG/10	<i>Cedrus deodara</i> D. Don	cedro_himalaya_singolo	428 / 420	20 / 21
3	24/G478/PG/10	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw.	cipresso_monterey	361 / 358	19 / 19
4	25/G478/PG/10	<i>Cedrus deodara</i> D. Don	cedro_himalaya_2	317 (media) / 315 (media)	19 (media) / 19 (media)
5	26/G478/PG/10	<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don	cedro_rosso	70 / 65	7 / 7
6	27/G478/PG/10	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	cipressi	178 (media) / 179 (media)	25 (media) / 26 (media)
7	32/G478/PG/10	<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	tiglio	263 / 260	20 / 20



garantendo la conservazione della memoria dell'albero stesso, anche qualora l'individuo dovesse morire o perdere le caratteristiche che ne hanno determinato l'inserimento nell'Elenco. A questo scopo, ciascun modello 3D è stato caricato sulla piattaforma web Sketchfab® (Puletti 2025), che consente la visualizzazione, la condivisione e il download diretto dei modelli tridimensionali tramite browser, senza la necessità di installare software specifici (Tab. 1). L'accesso è semplice e immediato anche per utenti non registrati, garantendo la fruibilità dei contenuti a un pubblico ampio e diversificato.

Conclusioni

L'accuratezza dei dati derivati da sensori LiDAR, oltre ad essere già evidente in letteratura, è stata ulteriormente confermata in questo studio mettendo a confronto le variabili derivate da scansioni LiDAR con i dati inventariali, e perciò si sottolinea l'importanza dell'uso di queste tecnologie ad alta precisione. Inoltre, il protocollo di rilievo e analisi sviluppato in questo lavoro rappresenta un modello operativo standardizzato e replicabile, che può essere dunque applicato ad altre realtà per il monitoraggio e la valorizzazione degli alberi monumentali, contribuendo alla creazione di archivi digitali condivisi e duraturi nel tempo.

Ringraziamenti

Le immagini rilevate e qui pubblicate sono anteriori all'intervento di riqualificazione e restauro del giardino della Villa del Colle del Cardinale, finanziato all'interno del PNRR, Missione 1 - Digitalizzazione, innovazione, competi-

tività e cultura, Componente 3 - Cultura 4.0 (M1C3), Misura 2 "Rigenerazione di piccoli siti culturali, patrimonio culturale, religioso e rurale", Investimento 2.3: "Programmi per valorizzare l'identità dei luoghi: parchi e giardini storici".

Bibliografia

- Alvites C, Marchetti M, Lasserre B, Santopuoli G (2022). LiDAR as a tool for assessing timber assortments: a systematic literature review. *Remote Sensing* 14(18): 4466. - doi: [10.3390/rs14184466](https://doi.org/10.3390/rs14184466)
- Arrizza S, Marras S, Ferrara R, Pellizzaro G (2024). Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: a review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 36: 101364. - doi: [10.1016/j.rsase.2024.101364](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101364)
- Balestra M, Tonelli E, Vitali A, Urbinati C, Frontoni E, Pierdicca R (2023). Geomatic data fusion for 3D tree modeling: the case study of monumental chestnut trees. *Remote Sensing* 15(8): 2197. - doi: [10.3390/rs15082197](https://doi.org/10.3390/rs15082197)
- Besl PJ, McKay ND (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. - doi: [10.1109/34.121791](https://doi.org/10.1109/34.121791)
- Calders K, Adams J, Armston J, Bartholomeus H, Bauwens S, Bentley LP, Chave J, Danson FM, Demol M, Disney M, Gaulton R (2020). Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *Remote Sensing of Environment* 251: 112102. - doi: [10.1016/j.rse.2020.112102](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102)
- 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: 737-746. - doi: [10.1093/forsci/](https://doi.org/10.1093/forsci/)

fxaa021

- CloudCompare (2019). 3D point cloud and mesh processing software. Open-Source Project, Website. [online] URL: <http://www.cloudcompare.org/>
- Corona P, Chianucci F, Quatrini V, Civitaresse V, Clementel F, Costa C, Floris A, Menesatti P, Puletti N, Sperandio G, Verani S, Turco R, Bernardini V, Plutino M, Scrinzi G (2017). Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia. *Forest@* 14: 1-12. - doi: [10.3832/efor2285-014](https://doi.org/10.3832/efor2285-014)
- Dassot M, Constant T, Fournier M (2011). The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science* 68 (5): 959-974. - doi: [10.1007/s13595-011-0102-2](https://doi.org/10.1007/s13595-011-0102-2)
- Disney MI, Boni Vicari M, Burt A, Calders K, Lewis SL, Raunonen P, Wilkes P (2018). Weighing trees with lasers: advances, challenges and opportunities. *Interface Focus* 820170048. - doi: [10.1098/rsfs.2017.0048](https://doi.org/10.1098/rsfs.2017.0048)
- Gyawali A, Aalto M, Peuhkurinen J, Villikka M, Ranta T (2022). Comparison of individual tree height estimated from LiDAR and digital aerial photogrammetry in young forests. *Sustainability* 14 (7): 3720. - doi: [10.3390/su14073720](https://doi.org/10.3390/su14073720)
- lozzelli C (2022). Il Faggione di Luogomano non c'è più: abbattuto dal vento, aveva 200 anni. La Nazione di Prato. [online] URL: <https://www.lanazione.it/prato/cronaca/il-faggione-di-luogomano-abbattuto-dal-vento-lalbero-simbolo-della-vallata-aveva-200-anni-b4b7289e>
- Kim JS, Sung SM, Back KS, Lee YS (2024). Accuracy assessment of advanced laser scanner technologies for forest survey based on three-dimensional point cloud data. *Sustainability* 16 (23): 10636. - doi: [10.3390/su162310636](https://doi.org/10.3390/su162310636)
- Kurdi FT, Lewandowicz E, Shan J, Gharineiat Z (2024). Three-dimensional modeling and visualization of single tree LiDAR point cloud using matrixial form. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 17: 3010-3022. - doi: [10.1109/JSTARS.2024.3349549](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3349549)
- MASAF (2014). Criteri di monumentalità ai sensi del decreto interministeriale del 23 ottobre 2014. [online] URL: <http://www.masaf.gov.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/21243>
- MASAF (2025). Elenco degli alberi monumentali d'Italia ai sensi della Legge n. 10/2013 e del Decreto 23 ottobre 2014. [online] URL: <http://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/11260>
- MiC (2020). Risorsa web del Ministero della Cultura, Villa del Colle del Cardinale. [online] URL: <http://cultura.gov.it/luogo/villa-del-colle-del-cardinale>
- 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)
- Puletti N (2025). Home page. [online] URL: <http://sketchfab.com/forest.geomatics>
- Qin H, Zhou W, Yao Y, Wang W (2021). Estimating aboveground carbon stock at the scale of individual trees in subtropical forests using UAV LiDAR and hyperspectral data. *Remote Sensing* 13: 4969. - doi: [10.3390/rs13244969](https://doi.org/10.3390/rs13244969)

- Senette SMC (2023). Trentino, morto il Zirmo dei Zocchi Alti: l'albero secolare vittima del bostrico. *Corriere del Trentino*. [online] URL: https://corrieredelrentino.corriere.it/notizie/cronaca/23_agosto_13/trentino-morto-il-zirmo-dei-zocchi-alti-lalbero-secolare-vittima-del-bostrico-bda7b50c-b47f-4c3f-a014-b9a7ab1boxlk.shtml
- Serena S, Antonio M, Donato Salvatore LMV, Marco P, Alessio S, Giovanna S (2024). Urban forest values: integrating I-TreeModel and LiDAR Technology for comprehensive assessment of tree values in historic gardens. In: "Embracing the Future for and with Urban Forests and Trees" (Macías A, Menéndez Cantón C, Östberg J, Konijnendijk C, Roig S eds). *International Urban Tree Diversity Conference UTD5*, Madrid, Arbocity. [online] URL: <https://iris.unipa.it/handle/10447/674746>
- Serreta-Oliván A, Sancho-Cohen R, Sánchez-Gimeno AC, Martín-Ramos P, Cuchí-Oterino JA, Casanova-Gascón J (2023). Traditional Olive tree varieties in Alto Aragón (NE Spain): molecular characterization, single-varietal oils, and monumental trees. *Agriculture* 13 (12): 2204. - doi: [10.3390/agriculture13122204](https://doi.org/10.3390/agriculture13122204)
- Stovall AEL, Vorster A, Anderson R, Evangelista P (2023). Developing nondestructive species-specific tree allometry with terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution* 14: 280-290. - doi: [10.1111/2041-210X.14027](https://doi.org/10.1111/2041-210X.14027)
- Terryn L, Calders K, Akerblom M, Bartholomeus H, Disney M, Levick S, Origo N, Raunonen P, Verbeeck H (2023). Analysing individual 3D tree structure using the R package ITSme. *Methods in Ecology and Evolution* 14: 231-241. - doi: [10.1111/2041-210X.14026](https://doi.org/10.1111/2041-210X.14026)
- Wezyk P, Szostak M, Zieba-Kulawik K, Rysiak P, Hawrylo P, Ratajczak M (2015). Preliminary results of the monumental tree monitoring based on terrestrial laser scanning - a case study of the Oak Bartek in Zagnansk. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing* 27: 185-200. - doi: [10.14681/afkit.2015.014](https://doi.org/10.14681/afkit.2015.014)
- Xu D, Wang H, Xu W, Luan Z, Xu X (2021). LiDAR applications to estimate forest biomass at individual tree scale: opportunities, challenges and future perspectives. *Forests* 12 (5): 550. - doi: [10.3390/f12050550](https://doi.org/10.3390/f12050550)

Materiale Supplementare

Fig. S1 - Visualizzazione digitale della Villa Colle del Cardinale, con i numeri degli alberi monumentali indicati nei rispettivi modellini.

Fig. S2 - Popolamento di *Cupressus sempervirens*, gruppo di *Cedrus deodara*, individuo di *Cupressus macrocarpa* e albero monumentale di *Cryptomeria japonica*.

Fig. S3 - Esempio di ricostruzione del volume legnoso dell'albero monumentale di *Cedrus libani* mediante la generazione manuale di cilindri a partire dalla nuvola di punti tridimensionale.

Link: Puletti_4947@suppl001.pdf