

Laser scanner terrestre a supporto della valutazione di stabilità delle alberature in ambito urbano

Giuseppe Colangelo ^(a), Angela Losurdo ^(b), Annibale Guariglia ^(b), Donato Lucia ^(b), Biagio Lacovara ^(b), Federico Capriuoli ^(c), Giovanni Sanesi ^(a)

^(a) Università degli Studi di Bari Aldo Moro –Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali, Via Amendola 165/a, 70126 Bari, tel, 0805443023

^(b) Geocart S.p.A. Viale del Basento 120, 85100, Potenza

^(c) Digital Lighthouse S.r.l. Viale del Basento 120, 85100, Potenza

Riassunto

La stima dei parametri biometrici in ambito forestale pone alcune problematiche inerenti, tra l'altro, l'accuratezza e i tempi di acquisizione che è possibile però risolvere attraverso l'impiego di tecniche innovative di acquisizione e processamento dei dati.

Nell'articolo vengono discussi i risultati di un'applicazione integrata di strumenti per la stima e la misurazione dei parametri necessari alla caratterizzazione e descrizione strutturale di un filare arboreo in ambito urbano.

Lo studio è finalizzato all'individuazione e sperimentazione di una metodologia di indagine che, mediante l'impiego di tecnologie di *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), di stima della biomassa e di descrizione del profilo di resistenza del legno, consenta un supporto alle operazioni di valutazione della stabilità meccanica e del rischio derivante dalla presenza degli alberi in ambiente urbano.

I risultati, oltre che mostrare l'efficacia dell'integrazione tra tecniche di acquisizione e metodi di stima, forniscono uno strumento di valutazione delle condizioni delle risorse forestali che risulta essenziale per la pianificazione e gestione degli interventi in ambito urbano.

Abstract

The estimation of biometric parameters of forest resources faces problems related to accuracy and speed that could be solved using innovative data collection and data processing techniques.

In this article we discuss results of an integrated application of tools for the assessment and measurement of parameters needed for the characterization and structural description of a double tree line located in urban settings.

The study aims at identifying and testing an investigation methodology that, through different phases related to the use of laser scanning technologies, allows to estimate biomass and to describe the resistance of the wood profile. Moreover, it permits to characterize the interactions between trees and site conditions providing a support for the assessment of the mechanical stability and the risk coming from the presence of trees in the urban environment.

The results not only show the effectiveness of the integration between Terrestrial Laser Scanning (TLS) techniques and estimation methods, but also provide a support system to evaluate health conditions of forest resources which is essential for planning and management in urban and peri-urban forests.

Introduzione

Vi è un crescente riconoscimento del ruolo che gli alberi possono avere nel migliorare la qualità della vita urbana e nel fornire ciò che le più recenti ricerche definiscono “servizi ecosistemici” (SE), ovvero una serie di servizi tangibili e non che riguardano la dimensione sociale, economica ed ambientale del contesto urbano (MA, 2005). Nell'ultimo decennio queste tre dimensioni sono diventate un tema prioritario nelle attività di pianificazione e gestione avviate a tutti i livelli per promuovere la tutela del patrimonio arboreo delle città quale risorsa fondamentale per la sostenibilità della vita urbana.

Al di là del valore prettamente estetico gli alberi assolvono a molteplici funzioni quali: miglioramento delle condizioni microclimatiche, filtraggio e captazione di polveri e sostanze inquinanti, mitigazione del rumore, effetto sui tempi di corrivazione delle piogge, aumento del valore economico delle infrastrutture urbane, fruizione di spazi con valore paesaggistico ed ambientale (Haase et al., 2014).

Non sono sempre perfettamente note, invece, le dinamiche legate agli effetti positivi, ma soprattutto negativi che l'ambiente urbano esercita sullo stato di salute degli alberi. Generalmente gli alberi in città invecchiano più velocemente e manifestano con maggiore evidenza gli effetti derivanti dalla coabitazione con infrastrutture, edifici e attività antropiche che ne condizionano lo sviluppo e l'integrità strutturale e fitosanitaria. Una convivenza che sempre più spesso si manifesta nella sua importanza nei casi caduta accidentale di alberi a scapito della sicurezza e incolumità di cittadini e infrastrutture.

Quest'ultimo aspetto determina la necessità di acquisire un quadro di conoscenze di maggiore dettaglio sul patrimonio arboreo. Spesso è necessario raccogliere dati sui singoli alberi: questo pone la necessità di sviluppare metodi accurati, economici e veloci sia per la misurazione delle dimensioni degli alberi che per la caratterizzazione del rischio dovuto alla loro presenza.

In ambito urbano, tuttavia, non sono praticabili (per manodopera, tempi e costi) i tradizionali metodi diretti di misurazione che prevedono un campionamento distruttivo di alcuni esemplari per la ricostruzione dei modelli di stima. Per questa ragione si fa riferimento a metodi indiretti basati su equazioni allometriche o a strumenti di rilievo in grado di restituire con elevata accuratezza i parametri biometrici necessari.

Le equazioni allometriche, pur avendo il vantaggio di essere generalmente applicabili a specie e forme di alberi simili, presentano la limitazione di essere maggiormente valide nel contesto forestale e difficilmente possono essere applicate all'ambiente urbano (Semenzato et al., 2011; Vonderach C. et al., 2012). Inoltre, a causa dei diversi ruoli che gli alberi svolgono nelle aree urbane sono soggetti a diverse pratiche di potatura che hanno un forte impatto sulla struttura dell'albero e quindi sull'efficacia estimativa dell'equazione allometrica (Lefsky e McHale 2008). Solo alcuni studi dell'ultimo quinquennio hanno effettuato analisi specifiche sul volume del singolo albero e della biomassa asportata con le operazioni di manutenzione (Sajdak & Velázquez-Martí, 2012; Sajdak & Velázquez-Martí, 2014; Sajdak et al, 2014, Velázquez-Martí et al., 2013).

L'applicazione del TLS ha dimostrato quanto questo strumento possa essere alternativo ed economico rispetto a quanto già descritto, specie se associato a tecnologia LiDAR. Holopainen et al. (2013) hanno confrontato l'efficacia ed accuratezza delle tecniche di acquisizione laser da piattaforma aerea, terrestre fissa e mobile. I risultati mostrano come il TLS sia affidabile per le indagini di dettaglio su piccole aree e possa rappresentare una valida opportunità per la costruzione della verità in campo in tutti gli ambiti inventariali di precisione.

Materiale e metodi

Area di studio

Lo studio è stato condotto in un parco urbano del comune di Carpignano Salentino (Lecce) su 22 esemplari di *Pinus pinea* L. presenti in un doppio filare arboreo. L'analisi è stata effettuata a supporto di uno studio teso a determinare quantitativamente e qualitativamente le condizioni generali di pericolosità degli alberi e la loro propensione al cedimento strutturale. A tal fine è stata effettuata un'ispezione dettagliata di ogni albero e delle condizioni stazionali in cui vegeta osservando distintamente apparato radicale, colletto, tronco, rami e chioma.

Rilievo e metodi di analisi

La Società Italiana di Arboricoltura (SIA) ha codificato un metodo standard per il monitoraggio delle alberature e per la valutazione di stabilità denominato *Visual Tree Assessment* (VTA). Tale metodo consente di diagnosticare lo stato di salute dell'albero e, conseguentemente, il rischio

statico sulla base del riconoscimento di sintomi esterni caratteristici dovuti ad eventuali traumi. L'analisi visuale rappresenta la prima fase di accertamento: viene effettuata una verifica visiva della struttura dell'albero, della sua vitalità e dello stato fitosanitario per l'individuazione di eventuali anomalie esterne. La ricognizione su tutte le parti dell'albero rileva la presenza dei cambiamenti nell'accrescimento in risposta ai fattori fattore di trauma. Il significato di tali elementi può avere valenza differente a seconda della specie e delle dimensioni della pianta, per cui non esiste un metodo univoco o universalmente valido che garantisca certezza della valutazione di stabilità. Nella sua seconda fase la VTA prevede verifiche diagnostiche più approfondite, basate su misurazioni strumentali ottenute con attrezzature specifiche per la valutazione dei tessuti legnosi interni. Le tecniche sono finalizzate a descrivere la resistenza interna delle parti dell'albero, ad individuare presenza e diffusione delle anomalie strutturali interne che possono pregiudicare la resistenza meccanica. Nella terza fase viene fatta una valutazione del rischio che è la risultante di elementi quali la propensione al cedimento e i fattori di contatto e di danno.

Per tutte le fasi appena descritte il rilievo dei parametri biometrici assume un ruolo cardine. Elementi quali le dimensioni dell'albero e delle sue parti, l'inclinazione del fusto, la presenza di patologie sono elementi basilari per una corretta valutazione del rischio di cedimento dell'albero. Ne consegue la necessità di un rilievo di dettaglio per il quale i metodi di rilievo tradizionali richiederebbero tempi e lavoro di acquisizione notevoli e comporterebbero approssimazioni di stima non sempre accettabili. Si pensi, ad esempio, alla stima del volume e delle componenti della chioma che rappresentano uno dei maggiori fattori di sollecitazione meccanica a carico del fusto e dell'apparato radicale.

Per ovviare alle limitazioni operative appena descritte è stato eseguito un rilievo delle alberature utilizzando il TLS. Questa metodologia trova più ampia applicazione in ambito ingegneristico e consente l'acquisizione rapida di informazioni per un'ampia varietà di oggetti che sono restituiti sotto forma di nuvole di punti tridimensionali.

Il TLS si basa sull'emissione-ricezione di un raggio laser deflesso da uno specchio rotante montato su un supporto rotante. Lo strumento registra la posizione angolare dello specchio deflettente e l'intensità del raggio laser riflesso. Ciò consente di misurare la distanza che intercorre tra strumento e oggetto scansionato di rappresentare ciascun punto riflettente con specifiche coordinate 3D e uno specifico valore di riflettanza. Alla strumentazione laser è associata una macchina fotografica che riprende la scena nei suoi colori reali.

Per il rilievo TLS del sito di indagine sono state realizzate 21 scansioni utilizzando un CAM2 Focus^{3D} Faro x330 caratterizzato da notevole maneggevolezza (peso totale circa 5 kg) ed estrema accuratezza (Fig.1). Le scansioni sono state eseguite assicurando l'intervisibilità tra 2 punti di acquisizione laser successivi (la distanza media tra i punti è stata di circa 10 metri). Il rilievo è stato supportato dall'utilizzo di appositi target e di sfere altamente riflettenti a diametro noto per la corretta sovrapposizione dei dati acquisiti. Le scansioni sono state tra loro registrate dal software di elaborazione. L'errore di allineamento delle scansioni, calcolato come scarto quadratico medio si attesta su valori pari a 1,3 mm.

Per garantire notevole densità di dati sugli alberi in esame la singola scansione è stata impostata con una maglia regolare di 1 punto ogni 3 mm. Al dato geometrico è associato un dato RGB per ogni punto misurato.



Figura 1. Rilievo dell'alberatura con impiego di un Laser Scanner terrestre.

Le nuvole di punti generate dal TLS necessitano di un articolato percorso di post-processamento che operazione consiste nell'allineamento delle scansioni in un unico spazio per cui la nuvola di punti finale restituisce un'immagine unica (Fig.2).

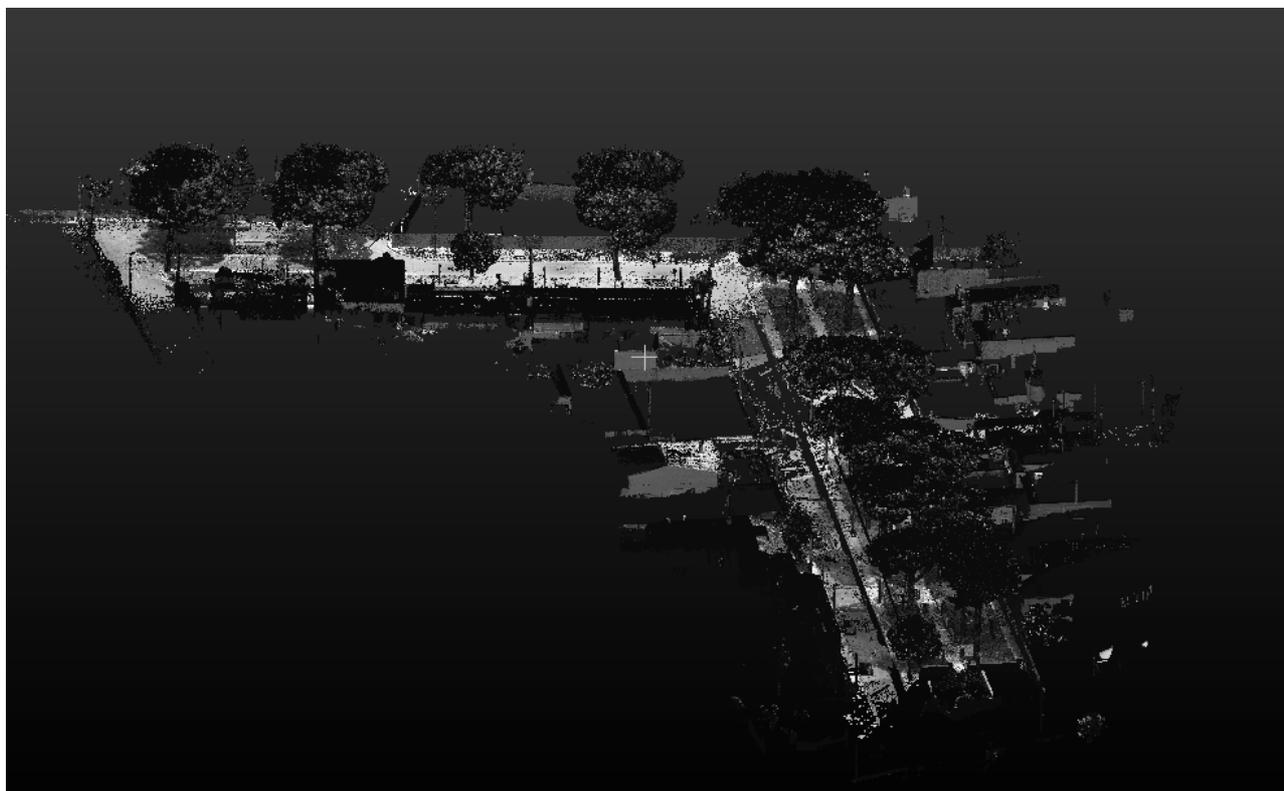


Figura 2. Visione d'insieme delle scansioni realizzate.

Il dato acquisito è stato sottoposto ad una serie di fasi di processamento:

- Co-registrazione delle scansioni e controllo dell'errore;
- Selezione manuale delle aree di non interesse;
- Filtraggio della riflettività ed eliminazione dei punti sotto soglia (circa 5% di riflettività).
- Calcolo delle normali per ogni singolo punto attraverso creazione di intorno al punto e calcolo del piano interpolante;
- Filtraggio di riduzione del rumore, eliminazione dei punti doppi;
- Eliminazione punti isolati;

La nuvola totale a densità controllata è stata poi esportata per il trattamento con CloudCompare, un software di processamento attraverso il quale si è proceduto alla selezione di ogni singolo elemento oggetto di analisi. Dalle scansioni allineate sono stati estrapolati i singoli alberi per effettuare tutte le operazioni di misura necessarie ai fini dell'analisi strutturale (Fig.3). Questo accorgimento consente di effettuare una misurazione diretta, piuttosto che una stima, dei parametri biometrici più importanti (altezza totale e di inserzione della chioma, diametri ad altezze note, area di insidenza della chioma e dimensioni dei rami, inclinazioni del fusto). Nella pratica tradizionale i parametri appena descritti vengono stimati a distanza. La precisione della stima oculare e strumentale è sicuramente affetta dalle dimensioni dell'albero e da vicoli operativi imposti dalla distanza tra operatore e oggetto della stima. Tale aspetto permane nonostante sia sempre più ampia disponibilità di strumentazione che aumenta sensibilmente il livello di precisione.

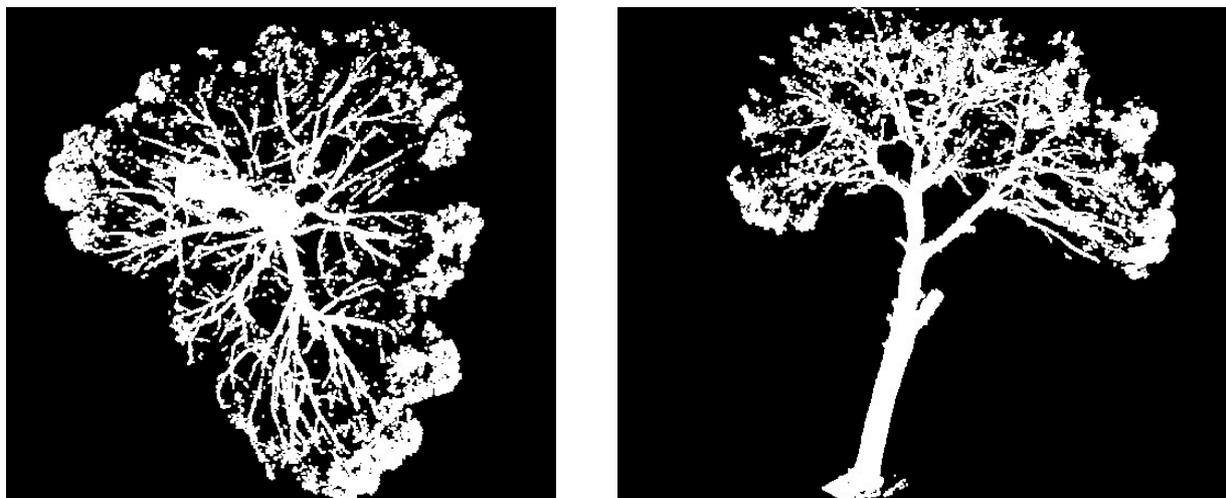


Figura 3. Visione dall'alto e frontale di albero estratto dalla nuvola di punti totale

Le scansioni sono state ulteriormente processate al fine di separare il fusto dalla chioma. Generalmente la linea di separazione è individuata immediatamente al di sotto del punto di inserimento delle ramificazioni principali che costituiscono la chioma esistente. Le nuvole di punti così ripartite sono state elaborate con apposito software di stima del volume (CompuTree). Questo software opera sull'immagine laser raggruppando i punti in cluster di dimensioni note. Tutti i cluster vengono ulteriormente raggruppati in base alla loro distanza minima e ad una serie di regole matematiche. Ne risulta una serie di Log, ovvero di strutture tridimensionali più grandi che vengono trasformate in cilindri di raggio e lunghezza note. La stima del volume, quindi, è il risultato della somma dei singoli volumi dei cilindri in cui è stato scomposto l'oggetto della stima. I volumi così stimati concorrono a determinare quali siano le forze agenti sul fusto nella successiva fase di analisi biomeccanica.

Analisi Biomeccanica

Il maggiore livello di dettaglio dei parametri acquisiti consente di applicare una procedura di valutazione delle condizioni di stabilità basando l'analisi sulla possibile interazione tra la struttura arborea e i carichi permanenti (fusto, chioma) e variabili (neve, vento). In questa fase la chioma assume un ruolo principale nella comprensione dei fenomeni che agiscono sul fusto (che funge da asse portante) e che possono portare al cedimento della struttura arborea.

Per l'altimetria del luogo d'indagine si può ritenere molto rilevante l'interazione con il vento, mentre risulta meno significativa l'incidenza dei fenomeni nevosi.

La conformazione della chioma degli alberi nel caso di indagine è quella tipica di alberi che hanno raggiunto l'età adulta. Nella parte più alta ha forma tabulare e densità maggiore: il vento scorre senza riuscire a penetrare e il movimento indotto dalla sua presenza fa sì che i ciuffi distali si muovono ortogonalmente alla direzione del vento e, piegandosi, subiscono oscillazione modesta.

Nella porzione inferiore la chioma è più rada e ci sono rami isolati. Per l'azione del vento i rami si muovono verso il basso e lateralmente subendo sollecitazioni e torsioni maggiori. Tale aspetto, associato al fenomeno di autopotatura che caratterizza questa pianta può determinare più frequentemente il distacco dei rami bassi. La chioma rada consente, inoltre, l'ingresso del vento e la creazione di piccoli vortici.

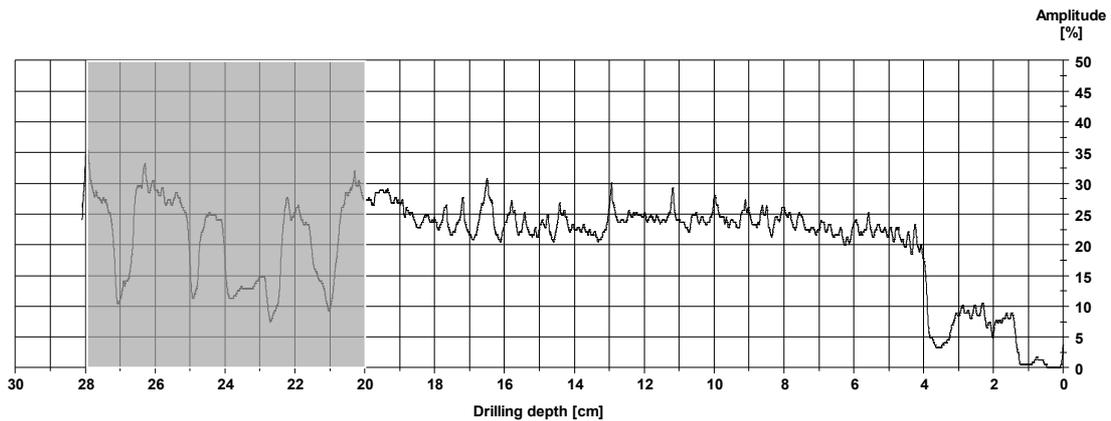
Ai fini dell'analisi biomeccanica tutte le piante sono state schematizzate come un'asta incastrata ad una estremità avente una sezione trasversale circolare. Sono stati considerati come carichi permanenti il peso proprio dell'albero (composto da tronco, rami e foglie), mentre i carichi variabili presi in considerazione sono l'azione del vento e l'azione della neve. Il peso proprio dell'albero è stato calcolato considerando una densità media di $0,90 \text{ t/m}^3$ moltiplicata per il volume delle parti dell'albero. I carichi distribuiti sono in kN/m le forze concentrate in kN e i momenti in kNm . Applicando al caso di indagine i principi della scienza delle costruzioni è stata verificata la resistenza a presso-flessione. Le tensioni agenti sulla sezione, dovute alle sollecitazioni predominanti considerate, non devono essere superiori alle tensioni ammissibili dal materiale legnoso in questione (valore pari a 11 MPa sia a trazione che a compressione, come definito dalla norma DIN 1052).

Analisi diagnostica strumentale.

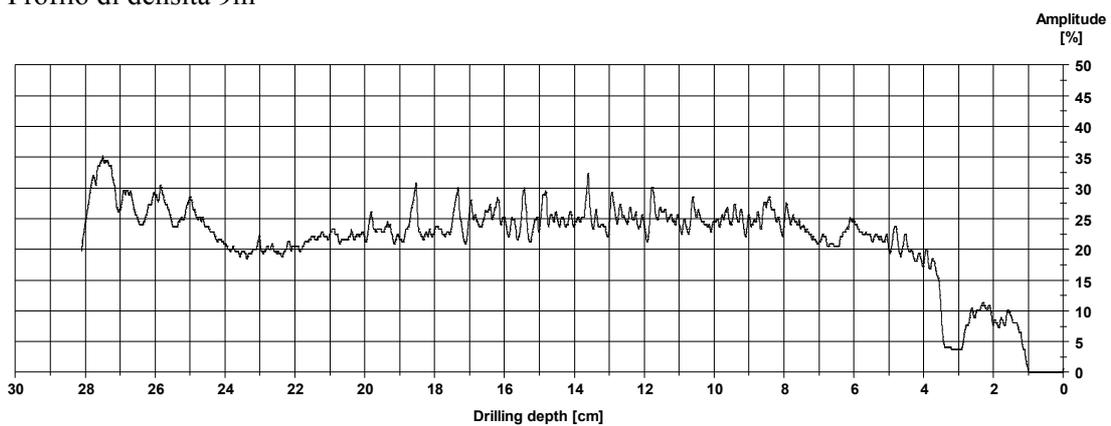
A completamento del quadro di conoscenze è stata eseguita un'indagine strumentale della resistenza dei tessuti legnosi interni. I risultati forniscono un ulteriore elemento per la valutazione di stabilità. L'accertamento strumentale di aree di debolezza meccanica, infatti, aggiunge un elemento di valutazione a quanto risulta dall'analisi biomeccanica. La compresenza di criticità dell'analisi e della resistenza dei tessuti determina fattori di rischio maggiori.

Per l'indagine è stato utilizzato un Resistograph IML 300. Questo strumento consiste in un trapano dinamometrico, ovvero un ago metallico sottile che viene inserito gradualmente nel legno e ne misura la resistenza alla perforazione. La regolazione elettronica del motore garantisce all'ago una velocità costante che viene stabilita a priori in funzione delle specifiche caratteristiche di densità del legno da esaminare. Lo strumento produce un profilo di densità che consente di misurare le variazioni di densità e di rappresentare indirettamente la presenza, la posizione l'entità e lo stadio di eventuali carie interne. Il legno decomposto o in via di decomposizione viene evidenziato dai profili di densità che rilevano decadimento come riduzione della resistenza meccanica alla perforazione.

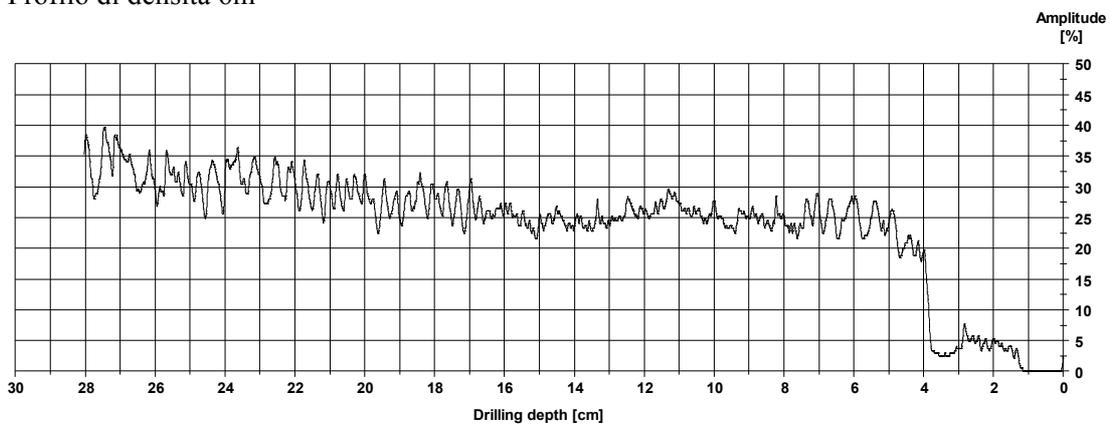
Nell'indagine sono stati eseguiti 4 campionamenti per pianta (Fig.4) acquisendo dati riguardanti l'apparato radicale (0 m) e il fusto (3m, 6m e 9m). Per il rilievo in quota è stata utilizzata una piattaforma elevatrice.



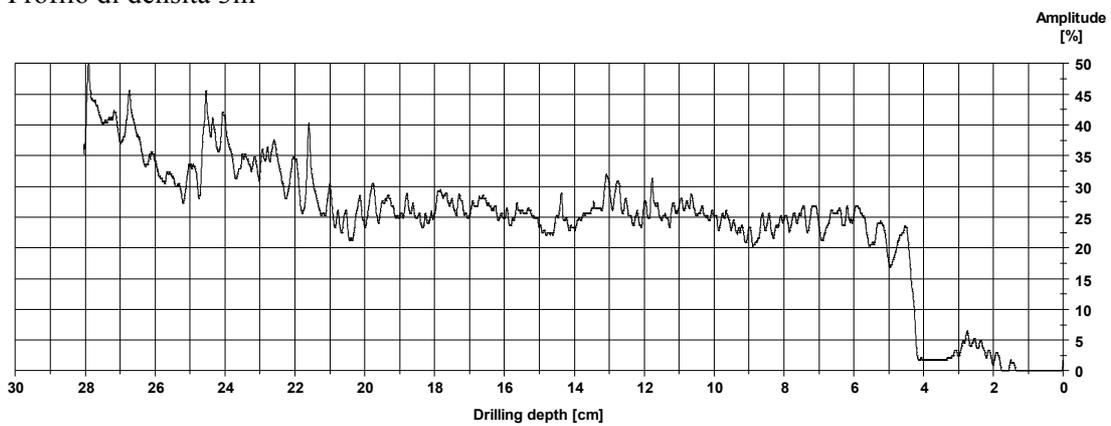
Profilo di densità 9m



Profilo di densità 6m



Profilo di densità 3m



Profilo di densità 0m

Figura 4. Esempio di profili di densità alle diverse altezze analizzate

Risultati

Le scelte metodologiche hanno svincolato la valutazione da possibili errori di stima. Come già detto in precedenza le metodiche standard di rilievo avrebbero consentito, al più, una stima a distanza di molti dei parametri che, invece, sono stati misurati direttamente o in post processamento.

Lo studio si è posto l'obiettivo di costruire un quadro di conoscenze di elevato dettaglio per esprimere valutazione oggettiva sul rischio derivante dalla presenza degli alberi nel contesto urbano di indagine.

L'analisi delle singole piante, supportata dall'applicazione di strumenti e metodi innovativi nell'ambito forestale, ha consentito di rappresentare con accuratezza gli aspetti che sono alla base di una corretta valutazione della stabilità meccanica.

L'analisi diagnostica ha messo in evidenza come gli interventi di manutenzione effettuati nel passato hanno seriamente compromesso lo stato fitosanitario dell'alberatura e ne hanno ridotto le aspettative di vita e il fattore di sicurezza biomeccanica. Tuttavia c'è da considerare che le anomalie della densità del legno, quando presenti, sono localizzate nelle zone centrali del fusto. Ciò determina la presenza di una sezione più esterna del tronco con spessore di 20-30 cm che è comunque in grado di supportare le sollecitazioni meccaniche a cui è sottoposto il fusto. Molti studi, infatti, hanno messo in evidenza come nel caso specifico del Pino la sola analisi diagnostica sia insufficiente a valutare con adeguata certezza il grado di rischio associato alla presenza dell'albero.

La stima dei volumi riferiti alle parti dell'albero (fusto, rami, foglie) è stata supportata dai software citati in precedenza. Si tratta di software open source che consentono di ottimizzare ed abbreviare i tempi di processamento e di stima dei parametri. Ciò comporta una forte riduzione dei costi di elaborazione e l'oggettivizzazione delle operazioni di stima. Inoltre, si dispone di un dato operativo che consente di ampliare l'indagine attraverso l'analisi Biomeccanica e lo studio delle forze di trazione e compressione a carico del fusto. Dall'analisi Biomeccanica, infatti, risulta che 5 esemplari presentano un valore critico di sollecitazione meccanica per il quale è necessario effettuare interventi di manutenzione e, nei casi più gravi, di abbattimento.

Conclusioni

Lo studio ha preso in esame alcuni approcci metodologici innovativi per risolvere aspetti analitici caratterizzati da un più alto livello di incertezza:

- La misurazione dei parametri biometrici è supportata da specifici rilievi con strumentazione laser e software di processamento dei dati che ne consentono la misurazione diretta;
- È stata realizzata l'analisi biomeccanica della parte epigea degli alberi mutuando dagli ambiti di ricerca ingegneristica metodologie di calcolo e di stima del rischio di rottura;
- L'analisi strumentale è stata effettuata su tutte le parti dell'albero e supportata dall'analisi visuale in quota;
- La valutazione del rischio è stata articolata in maniera da distinguere quale sia il rischio derivante dalle singole parti dell'albero.

L'uso del TLS ha consentito molteplici vantaggi legati ai tempi ridotti di acquisizione, ma anche all'affidabilità ed accuratezza del rilievo a vantaggio delle fasi di post-processamento. Indubbiamente la nuvola di punti acquisita consente operazioni di misurazione e di stima impensabili se effettuate sulla base dei rilievi tradizionali.

Una migliore conoscenza delle forze agenti nelle dinamiche di stabilità dell'albero consente di ovviare ad alcune delle limitazioni operative legate alle caratteristiche della specie analizzata. Il Pino, in molti casi, non mostra sintomi evidenti della degenerazione del tessuto legnoso tali da motivare un sostanziale aumento del rischio di cedimento strutturale. In tal senso l'analisi biomeccanica, pur se applicata ad un ambito inusuale quale quello delle alberature, fornisce un valido supporto alla valutazione e il rischio derivante dalla conformazione e struttura dell'albero.

L'approccio impiegato nello studio dimostra come il TLS sia uno strumento accurato, oggettivo e rapido per l'acquisizione di dati in campo di grande precisione adatto alla misura diretta dei parametri biometrici degli alberi.

Il quadro di conoscenze che ne derivano rappresentano un supporto molto valido per la pianificazione, gestione e manutenzione delle risorse forestali nelle aree urbane e periurbane.

Infine, la metodologia mette a disposizione un quadro conoscitivo molto dettagliato che diventa essenziale nell'ottica della valutazione di servizi ecosistemici quali lo stoccaggio del carbonio, il computo di biomassa ritraibile dalle operazioni di manutenzione (potature, abbattimenti) e il relativo reimpiego quale fonte energetica alternativa, il grado di copertura delle chiome e gli effetti di mitigazione del fenomeno delle isole di calore. Attraverso una corretta quantificazione di detti servizi è possibile attuare politiche più dettagliate per una migliore della qualità della vita urbana e dei cittadini.

Riferimenti bibliografici

Haase D., Larondelle N., Andersson E., Artmann M., Borgström S., Breuste J., Elmqvist T. 2014. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation *Ambio*, 43 (4) pp. 413–433

Holopainen M., Kankare V., Vastaranta M., Liang X., Lin Y., Vaaja M., Yu X., Hyypä J., Hyypä H., Kaartinen H., Kukko A., Tanhuanpää T., Alho P., 2013. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – a case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forest and Urban Greening*, 12, pp. 546–553

Lefsky, M. and Mchale, M., 2008, Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2.

MA - Millennium Ecosystem Assessment - 2005. *Ecosystems and human well-being: the assessment series* (4 vol + Summary), Island Press, Washington DC.

Sajdak M., Velázquez-Martí B., 2012. Estimation of pruned biomass from dendrometric parameters on urban forests: case study of *Sophora japonica*. *Renewable Energy* 47:188-193.

Sajdak M., Velázquez-Martí B., López-Cortés I., Fernández-Sarría A., Estornell J., 2014. Prediction models for estimating pruned biomass obtained from *Platanus hispanica* Münchh. used for material surveys in urban forests. *Renewable Energy* 66:178-184.

Sajdak M., Velázquez-Martía B., 2014. Quantitative and qualitative characteristics of biomass derived from pruning *Phoenix canariensis* hort. ex Chabaud. and *Phoenix dactilifera* L. *Renewable energy* 71:545-552

Semenzato, P., Cattaneo, D., Dainese, M., 2011. Growth prediction for five tree species in an Italian urban forest. *Urban Forestry and Urban Greening* 10 (3), 169–176.

Velázquez-Martí B., Sajdak M., Lopez-Cortes I., 2013. Available residual biomass obtained from pruning *Morus alba* L. trees cultivated in urban forest. *Renewable Energy* 60:27-33.

Vonderach C., Vögtle T., Adler P., Norra S., 2012. Terrestrial laser scanning for estimating urban tree volume and carbon content. *International Journal of Remote Sensing* 33, 6652-6667.