

# Arboricoltura di precisione: un nuovo approccio alla gestione del rischio caduta alberi basato sulla Geomatica

di De Petris Samuele , Sarvia Filippo , Borgogno-Mondino Enrico

Gli alberi forniscono benefici sociali, economici, visivi ed estetici agli esseri umani (Roy et al., 2012; Stewart et al., 2013). Inoltre, possono assorbire l'inquinamento, migliorare la diversità ecologica e determinare un significativo impatto benefico sul benessere fisico e psicologico dell'uomo (Barrell, 2012). Con il loro valore ornamentale sono in grado di valorizzare considerevolmente un immobile e sono utilizzati per commemorare persone importanti o eventi storici, ispirando sentimenti positivi e migliorando la qualità della vita (Sani, 2008). L'ambiente artificiale, però, sottopone gli alberi a condizioni di stress rilevanti a causa dell'estrema artificializzazione e modificazione del sito di radicazione e delle condizioni spesso particolarmente ostili per la crescita. Come conseguenza delle fonti di stress e delle azioni che vengono svolte intorno a loro, gli alberi presentano difetti strutturali, turbe fisiologiche e/o processi patologici che spesso rappresentano un pericolo per cose e persone. In questo contributo, ci si concentrerà sugli alberi come problema (percepito): gli alberi come oggetto della paura della responsabilità civile e penale (artt. 2043 e 2051 del Codice Civile).

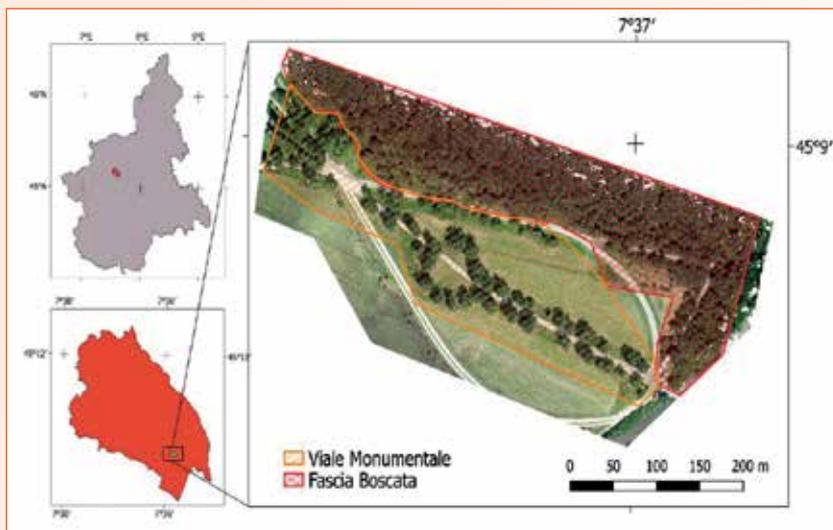


Fig.1 – Localizzazione dell'area studio con estensione di circa 13 ha (Sistema di riferimento: WGS84). In rosso: Parco regionale La Mandria (Piemonte); in verde: entrata principale del parco caratterizzata da un'elevata fruizione.

Vale la pena ricordare che il rischio di essere uccisi o feriti dalla caduta di un albero è estremamente basso (Stewart et al., 2013). Nel Regno Unito circa 3 persone all'anno vengono uccise dagli alberi nelle aree pubbliche (HSE, 2001; National Tree Safety Group et al., 2011) mentre negli Stati Uniti circa 31 persone all'anno (Schmidlin, 2009). Negli ultimi anni, il potenziale degli alberi di causare danni è però aumentato in conseguenza degli effetti del cambiamento climatico, principalmente legati all'incremento di raffiche di vento e alla maggior diffusione delle fitopatologie che rappresentano le principali cause di cedimento degli alberi (Dale et al., 2001; Gill et al., 2007; Holdenrieder et al.,

2004). A Torino nel 2014 sono cadute 43 piante, nel 2015 60, nel 2016 70 e nel 2017 più di 100, comprovando questo trend in crescita. Per questo motivo, già dagli anni 90, si è iniziato a studiare la meccanica dell'albero (Fitostatica) e la sua risposta ad agenti patogeni e atmosferici per cercare di trovare un metodo che riuscisse quanto più possibile a prevenire il cedimento e ridurre al minimo il danno potenziale che questo fenomeno potrebbe causare. La materia che si occupa della gestione del singolo albero si chiama Arboricoltura, questa adotta tecniche profondamente diverse da quelle usate in ambito forestale (Shigo 1994). Nell'ambito dell'arboricoltura, l'arboricoltura ornamentale in particolare, mira al mantenimento delle ca-

ratteristiche estetiche e funzionali degli alberi. In primis vi è la necessità di evitare che l'albero o una sua parte interferisca con le attività umane o peggio ne provochi danni.

Nella gestione dei patrimoni arborei, soprattutto pubblici, le aree verdi estensive costituiscono un settore gestionale di fondamentale importanza poiché, per necessità sia tecniche che economiche, non è possibile seguire lo stesso iter di controllo del verde ornamentale privato dove si trovano poche piante (Smiley, Matheny, and Lilly 2017). Secondo il gruppo "sicuramentelberi" autore delle "Procedure per la gestione del rischio da caduta alberi nelle aree verdi estensive" (AAVV, 2011) che allo stato attuale costituisce il riferimento tecnico in materia, la gestione dei patrimoni arborei in situazioni in cui è presente un uso pubblico del territorio presenta notevoli complessità di tipo tecnico e comporta scelte gestionali importanti relativamente alla tutela della sicurezza dei fruitori. La tendenza è una progressiva deresponsabilizzazione delle amministrazioni nel rapporto con l'ambiente portando a trascurare le dinamiche della natura, non sempre compatibili con l'uso antropico, ed a cercare in accadimenti naturali, talvolta in modo ossessivo, errori e/o negligenze da attribuire ai soggetti gestori. La gestione dei patrimoni arborei è una problematica complessa, che richiede ingenti risorse economiche, umane e conoscenze specialistiche. I soggetti deputati alla gestione dei soprassuoli arborei, in particolare se amministrazioni pubbliche, devono conciliare l'esigenza di garantire la sicurezza del fruitore con quella di tutela della dimensione naturale del patrimonio vegetale. A tale

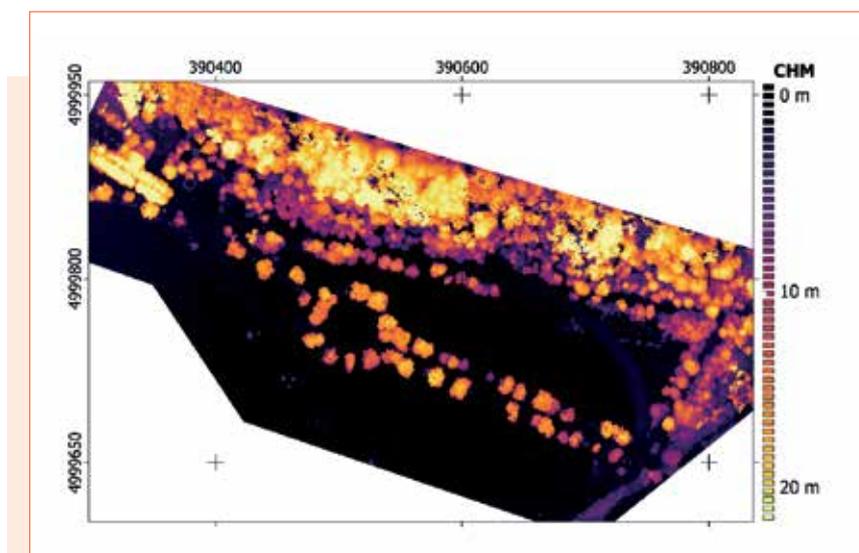


Fig.2 – CHM dell'area studio con GSD =0.1m (Sistema di riferimento: WGS84/UTM 32N).

compromesso si aggiunge la difficoltà, a volte decisamente penalizzante, dell'inadeguatezza delle risorse economiche ed umane disponibili. Nelle aree di interesse naturalistico e paesaggistico, per i motivi sopra citati, le modalità di gestione adottate sino ad ora lasciano ampi spazi di miglioramento e razionalizzazione nella ricerca del giusto equilibrio tra tutela ambientale e conservazione della natura da un lato (che nelle aree protette sono compiti istituzionali) e, dall'altro, sviluppo dell'uso collettivo della risorsa ambientale connesso alla fruizione in sicurezza degli utenti. Alla luce di questi fattori condizionanti appare impossibile una gestione puntuale e di dettaglio delle aree verdi estensive. Tutto questo porta gli amministratori a dover quotidianamente risolvere problemi non solo economico-legali ma anche tecnico-pratici. È opinione degli autori che la conoscenza delle risorse di un territorio, nella fattispecie la loro inventariazione e la loro localizzazione, costituisce la base per una politica tecnicamente fondata e ottimale. Da questo

punto di vista la Geomatica e i dati geografici rivestono un ruolo conoscitivo fondamentale per gli scenari politici di un territorio. Allo stesso modo un corretto e consapevole sviluppo del territorio, sia urbano quanto agricolo o naturale, è esigenza sempre più sentita sia dagli enti pubblici, sia dai comuni cittadini.

Alla luce di queste problematiche si sono diffuse negli ambiti operativi discipline come Agricoltura e la Selvicoltura di precisione che vedono nella Geomatica un valido supporto al rilievo e all'analisi delle risorse agro-forestali (Corona et al. 2017; Borgogno-Mondino et al. 2018). Tecnologie tra loro differenti, quali sistemi GNSS per la localizzazione degli oggetti, telerilevamento aereo e satellitare per monitoraggio continuo delle superfici, vengono integrate con sistemi GIS per acquisire, elaborare e analizzare dati per definire future scelte gestionali e redigere piani d'intervento (Toccolini, 1998). Sebbene in questi ambiti le suddette tecnologie stanno diventando operative e di utilizzo comune, il settore dell'arboricoltura ornamentale sembra

soffrire di un ritardo di queste applicazioni. Il seguente lavoro vuole proporre un nuovo approccio alla gestione dei patrimoni arborei in contesti estensivi come gli ambiti urbani o parchi naturali. Questo approccio viene definito come Arboricoltura di precisione (De Petris S. et al. 2019). Il termine “di precisione” non va qui inteso in senso metrico, poiché è opinione degli autori che nel campo agro-ambientale non vi siano misure o rappresentazioni precise (né tanto meno accurate) dei fenomeni naturali per via della loro aleatorietà. Con il termine “precisione” si intende un approccio a scala variabile, che prevede il rilievo di vaste superfici (e.g. Città o Parchi naturali) per passare ad un’analisi puntuale dei singoli alberi. L’arboricoltura di precisione utilizza tecniche proprie della Geomatica, nella fattispecie il rilievo fotogrammetrico delle superfici osservate apre scenari inediti in gran parte legati alla possibilità di misurare parametri morfometrici e strutturali di gruppi di alberi o di singoli soggetti arborei. Inoltre, l’attuale disponibilità di sensoristica multispettrale a basso costo

e la contemporanea accessibilità gratuita ad archivi di immagini satellitari a medio-alta risoluzione geometrica (e.g. Copernicus Sentinel 2 A/B) consente di ipotizzare scenari di utilizzo integrato in cui l’informazione spettrale, anche a risoluzioni significativamente più basse di quelle che la fotogrammetria consente, determina una più completa conoscenza delle caratteristiche dei soggetti arborei osservati. Segue la trattazione di un caso studio presso il parco regionale naturale La Mandria (Piemonte) in cui è stata applicata l’Arboricoltura di precisione. Nello specifico si è adottata la fotogrammetria digitale da SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) per il rilievo dendrometrico delle chiome presenti in uso congiunto al telerilevamento multispettrale da satellite (Copernicus Sentinel-2) per monitorare lo stato di deperimento degli alberi. L’utilizzo di modelli biomeccanici ha permesso di valutare la stabilità meccanica dei tronchi e creare un sistema di supporto alle decisioni che ha permesso di zonizzare priorità di intervento con l’intento di diminuire e

ottimizzare gli onerosi controlli fitostatici effettuati dall’ente parco.

**Materiali e metodi**

*Area studio*

A questo proposito è stata condotta una sperimentazione presso il parco regionale *La Mandria*, uno dei primi parchi regionali del Piemonte sito nei pressi di Torino e caratterizzato da un’elevata fruizione soprattutto nei weekend e in estate. L’area studio (circa 13 ha) si concentra presso l’entrata principale del parco in cui sono presenti un viale monumentale di farnie secolari e una fascia boscata limitrofa (Fig.1).

*Rilievo da SAPR*

Un rilievo fotogrammetrico è stato effettuato da SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) *DJI Phantom4* equipaggiato con fotocamera RGB da 12.4 megapixel avente le seguenti caratteristiche: lunghezza focale = 8.60 mm; dimensione del pixel fisico = 2.344 μm; dimensioni del sensore CMOS = 13.2 x 8.8 mm. Il volo è stato effettuato con una velocità media di 3.1 m·s<sup>-1</sup> che ha determinato una base di presa di circa 9.6 m da una altezza media relativa di volo di 90 m; i ricoprimenti longitudinale e laterale tra fotogrammi sono stati fissati a 93% e 85%, rispettivamente. La presa ha prodotto 773 fotogrammi con un GSD (Ground Sampling Distance) medio di circa 5 cm. Nove punti di appoggio (materializzati da segnali di dimensioni 0.5 x 0.5 m) sono stati posizionati all’interno e intorno al viale e rilevati con tecnica N-RTK (Network Real-Time-Kinematic) GNSS mediante ricevitore *Leica 1200* (σ<sub>x,y,z</sub>, 0,003 m). Il sorvolo e il rilievo GNSS hanno richiesto

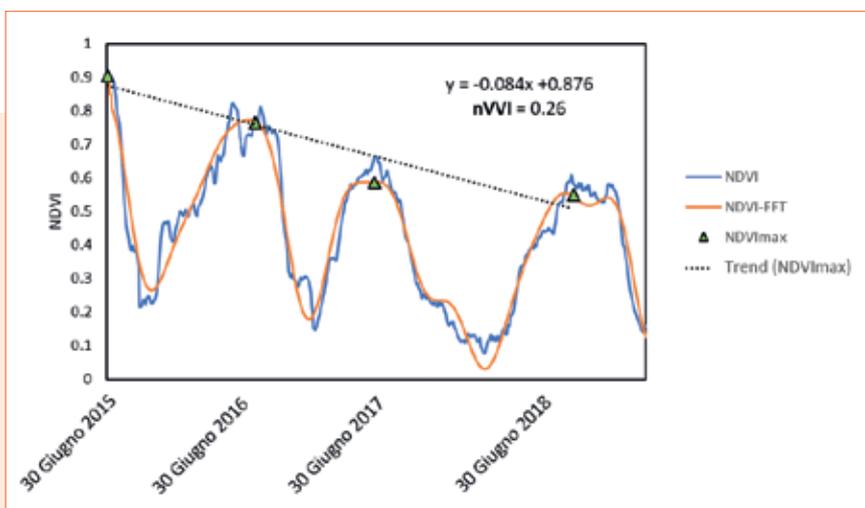


Fig.3 – Profilo temporale NDVI. Blu: dati mascherati per copertura nuvolosa e interpolati; Arancio: serie filtrata con FFT; Verde: valore massimo annuale di NDVI; linea tratteggiata: retta di regressione NDVImax dove il coefficiente angolare opportunamente normalizzato costituisce nNVI.

circa 100 minuti a copertura di un'area di circa 13 ha. L'elaborazione del blocco fotogrammetrico è stata effettuata avvalendosi del software *Agisoft PhotoScan 1.2.4*. A seguito di orientamento è stata poi restituita una nuvola densa di punti (PPC - Photogrammetric Point Cloud), successivamente esportata in formato *.LAS*. Utilizzando le librerie *LAStools* (Isenburg 2012) la PPC è stata filtrata e classificata (suolo - non suolo) e, successivamente regolarizzata per l'ottenimento del corrispondente DSM (Digital Surface Model) avente GSD pari a 0,1 m. Un CHM (Canopy Height Model, Fig.2) è stato calcolato per differenza tra il DSM ottenuto e il DTM (Digital Terrain Model) regionale ottenuto dal Geoportale della Regione Piemonte con accuratezza altimetrica nominale di  $\pm 0,6$  m.

#### *Estrazioni parametri dendrometrici*

Un algoritmo di ricerca dei massimi locali (ML) operante sul CHM ha permesso di individuare l'apice della chioma di ogni albero presente nell'area. Il valore del CHM corrispondente al massimo locale individuato è stato assunto come rappresentativo dell'altezza dell'albero (H) e la sua posizione planimetrica registrata sotto forma di layer vettoriale di tipo puntale (C). L'algoritmo di ML implementato nel pacchetto *Forest Tools* (Plowright 2018) del software R utilizza una finestra di ricerca a dimensione variabile che analizza il CHM adattando le proprie caratteristiche alla geometria della chioma locale. Sulla base dei valori di altezza di chioma ottenuti, si è proceduto alla stima del diametro del fusto (DBH - Diameter at Breast Height) utilizzando modelli re-



Fig.4 – Mappa del fattore di sicurezza statica dei soli alberi che cadendo potrebbero interessare la viabilità. L'area centrale è attualmente interdetta al passaggio (Sistema di riferimento: WGS84 / UTM32N).

gressivi che legano DBH a H (le cosiddette curve Ipsometriche). Questi modelli sono molto utilizzati e di prassi operativa nel campo forestale (La Marca 2017) e utilizzano i valori di altezza (variabile indipendente) per stimare il diametro del tronco (variabile dipendente). Per valutare la stabilità meccanica degli alberi è stato adottato il modello biomeccanico SIA (Static Integrated Assessment) (Lobis et al. 2002), che richiede DBH e H come variabili indipendenti per il calcolo di un fattore di sicurezza statica (SF - Safety Factor). SF rappresenta il rapporto tra il diametro teorico in grado di resistere ad un vento "di progetto" di  $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e il diametro reale dell'albero. SF ha un range di variazione tra 0 e  $+\infty$ . Il modello considera le dimensioni dei fusti e le proprietà meccaniche del legno assumendo quest'ultime come isotrope lungo il fusto. Un albero instabile mostra normalmente un valore di SF inferiore a 150 (Wessolly and Erb 1998). Per ogni albero è stato quindi calcolato il corrispon-

dente valore SF secondo i valori DBH e H.

Il valore di SF = 150 è stato assunto come soglia sotto la quale l'albero mostra potenziali condizioni di bassa stabilità (Sani 2017) suggerendo un più approfondito controllo delle resistenze meccaniche residue.

#### *Dati multispettrali Sentinel-2*

Un totale di 267 immagini multispettrali Sentinel-2 di livello 2A (di seguito denominate S2) sono state ottenute dal provider Copernicus SciHub, considerando un periodo compreso tra il 30 giugno 2015 e il 7 ottobre 2018. I dati di livello 2A vengono forniti ortoproiettati e calibrati in riflettanza al suolo e corredati da maschere della copertura nuvolosa. A partire dalle 267 immagini S2, sono state generate le corrispondenti mappe NDVI (GSD = 10 m) e aggregate a formare una serie multi-temporale NDVI (NTS - NDVI Time Series). Un ulteriore filtraggio, basato su FFT (Fast Fourier Transform) (Testa et al. 2018), è stato infine applicato per ridurre al minimo le

fluttuazioni di NDVI, causate dai rimanenti outlier, e enfatizzare le fluttuazioni periodiche dell'andamento fenologico. In questo studio sono stati considerati 4 anni dal 2015 al 2018. Per ogni anno della serie temporale NDVI è stato calcolato il valore massimo (NDVImax) permettendo di confrontare la vigoria tra anni diversi nell'ipotesi che la massima espressione fenologica sia strettamente correlata allo stato di salute della vegetazione (Bradley et al. 2007). Assumendo NDVImax come proxy dello stato di salute annuale delle piante, il suo trend temporale fornisce informazioni utili per l'interpretazione di fenomeni latenti o cronici di declino del vigore. La linea di tendenza dei valori di NDVImax è stata quindi modellizzata per regressione lineare nel periodo 2015-2018 a livello di singolo pixel. Il coefficiente angolare della retta di regressione è stato assunto come indice di incremento/decremento del vigore (di seguito denominato VVI-Vegetation Vigor Index)

(De Petris S. et al. 2019) (Fig.3) e la corrispondente mappa generata.

A seguito di normalizzazione tra il minimo (- 0.175) e il massimo (+0.175) teorici di VVI, definiti sperimentalmente considerando un periodo di 4 anni, è stato ottenuto un nuovo indice normalizzato (*nVVI*) nel range 0 e 1. Valori di *nVVI* > 0.5 denotano un incremento di vigoria (stato di salute) della vegetazione, mentre valori *nVVI* < 0.5 denotano un decremento di vigoria dovuto a un deperimento della chioma. Molti autori riportano che la stabilità meccanica è influenzata indirettamente dallo stato di salute dell'albero (Shigo 1994; Shigo and Marx 1977), soprattutto quando è compromessa da marciumi del legno o delle radici indotti da patogeni. La capacità di resistere all'agente patogeno dipende principalmente dal vigore della pianta. Partendo da queste considerazioni un albero deperiente è una pianta più suscettibile agli attacchi parassitari e con meno risorse per

resistere ai fenomeni patologici e quindi più incline al cedimento (Schwarze, Engels, and Mattheck 2013). Vale la pena ricordare che uno stress, o un fenomeno patologico, non determinano una diretta propensione al cedimento; un albero malato non è necessariamente instabile meccanicamente, ma mostra caratteristiche che fanno sospettare un rapido sviluppo delle malattie e, quindi, una maggiore propensione generale alla caduta in caso di forti venti. Conseguentemente, si è generata una mappa di *nVVI* per individuare precocemente quelle zone vegetate che mostrino valori critici (< 0.5).

*Dataset di riferimento*

Una campagna di rilievi è stata condotta a terra per ottenere un dataset di riferimento con cui validare le misure desunte dal rilievo fotogrammetrico. Per ogni albero, utilizzando lo strumento Field-map© instrument (Zambarda, Černý, and Vopěnka 2010), sono stati rilevati i seguenti parametri:

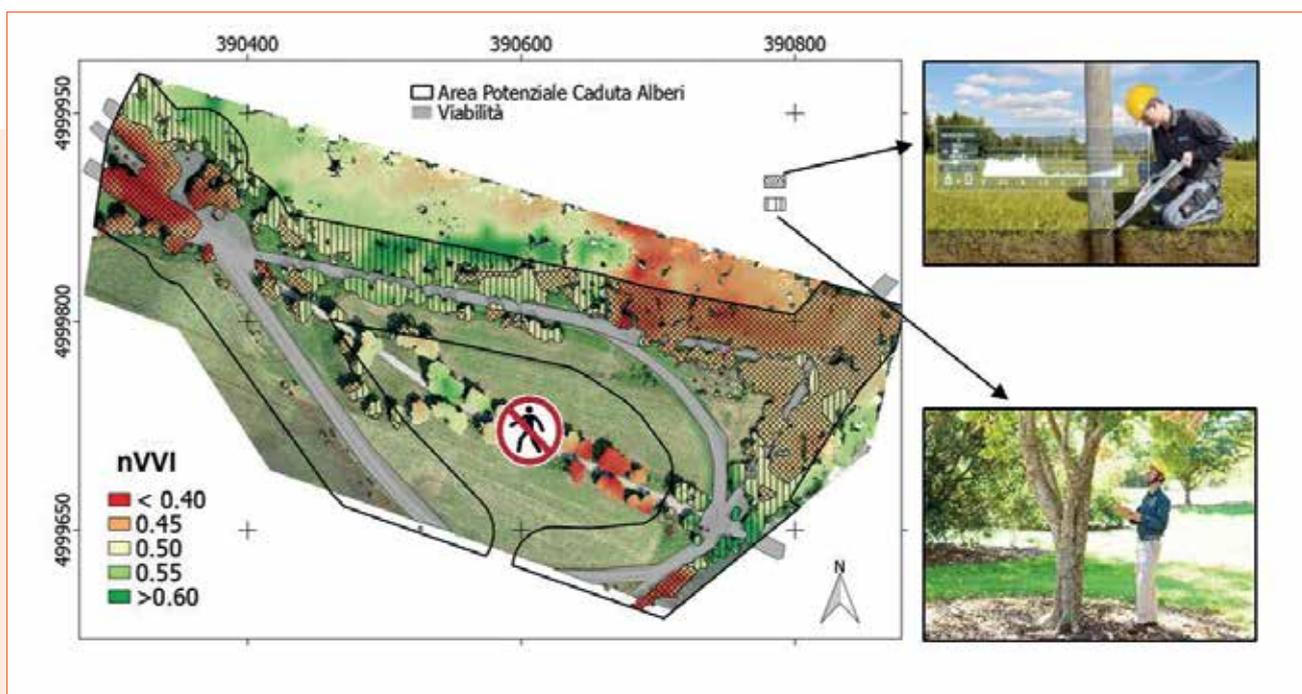


Fig.5 – Mappa dell'indice di deperimento delle chiome (nVVI). Gli alberi ricadenti nelle zone in cui nVVI è inferiore a 0.5 e potenzialmente ricadenti sulla viabilità sono considerati deperienti e quindi critici. In queste zone sono doverosi controlli accurati (analisi strumentali) mentre nelle restanti zone sono sufficienti controlli speditivi (analisi visive). L'area centrale è attualmente interdetta al passaggio (Sistema di riferimento: WGS84 / UTM32N).

posizione, diametro (DBH), specie, altezza (H), proiezione della chioma al suolo (P); complessivamente sono stati rilevati 134 alberi.

#### *Implementazione del processo decisionale*

Dati cartografici ausiliari, quali la carta vettoriale della viabilità locale (strade e sentieri) sono stati reperiti e utilizzati per introdurre, in una ipotetica funzione del rischio, la componente relativa alla probabilità dell'accadimento dell'evento. La zona potenzialmente interessabile dalla caduta di un albero è stata individuata, per buffering circolare, utilizzando un raggio pari all'altezza di ogni singolo individuo. Solo gli individui arborei per i quali tale area risultava interessare la sede stradale o il sentiero, sono stati considerati e valutati nelle successive fasi. L'utilizzo integrato della fotogrammetria digitale prossimale e del telerilevamento ottico passivo ad alta frequenza temporale può supportare efficacemente i processi decisionali collegati alla gestione del rischio caduta alberi, soprattutto in quei contesti estensivi in cui criteri di priorità debbano regolare i controlli a terra al fine di rendere i costi sostenibili per la comunità.

#### **Risultati e discussioni**

##### *Accuratezze della restituzione fotogrammetrica*

Con riferimento ai 9 punti di appoggio utilizzati, mediante procedura leave-one-out, è stato possibile definire le seguenti precisioni del rilievo fotogrammetrico:  $\sigma_{x,y} = 0.267$  m;  $\sigma_z = 0.229$  m;  $\sigma_{xyz} = 0.352$  m. Un totale di 36058127 di punti sono stati restituiti a formare la PPC determinando una densità media dei punti di 249 pt-m<sup>-2</sup>, ed una distanza media tra i punti di 0.06 m.

##### *Validazione parametri dendrometrici*

Con riferimento alla legge di propagazione della varianza e considerando le precisioni dedotte e dichiarate di DSM e DTM rispettivamente è stato possibile ottenere il valore teorico della precisione altimetrica del CHM da essi derivato che è risultata pari a 0.64 m. Questo risultato è di gran lunga superiore alle precisioni ottenibili con rilievo dendrometrico a terra di tipo ordinario, operato normalmente con ipsometri ottici dall'incertezza di misura delle altezze di chioma prossima ai 2 m (Larsen, Hann, and Stearns-Smith 1987).

Per confrontare i valori di campo con quelli ottenuti tramite il metodo proposto è stata condotta una comparazione tra i layer vettoriali P e C. Per quanto riguarda il conteggio degli alberi, l'algoritmo ML ha determinato una sovrastima di 11 piante; il MAE (Mean Absolute Error) relativo alla misura della loro altezza è risultato invece pari a 0.32 m. L'accuratezza di stima del diametro del fusto ottenuto tramite regressione lineare con l'altezza è risultata pari a 0.05 m (MAE). Questi risultati provano come l'utilizzo della Geomatica nel contesto dell'arboricoltura di precisione determini rilievi e stime molto più accurate rispetto agli ordinari metodi adottati in dendrometria.

##### *Implementazione del processo decisionale*

L'applicazione del modello biomeccanico SIA ha permesso di ottenere e mappare il fattore di sicurezza statica di ogni individuo presente nell'area studio e potenzialmente ricadente sulla viabilità (Fig.4).

Inoltre la mappa di nVVI ha permesso di delimitare le aree in

cui la vegetazione esprimeva un deperimento nel tempo, quantificando i fenomeni fisiopatologici precoci che un operatore a terra non potrebbe percepire visivamente (Fig.5).

La metodologia proposta afferra di tutto diritto al contesto più generale della arboricoltura di precisione; essa è di fatto intesa a supportare il processo decisionale della gestione di alberi mediante mappatura e quantificazione (almeno relativa) del rischio di caduta alberi. L'assunto è che alberi che presentino valori di SF e nVVI critici (rispettivamente SF < 150 e nVVI < 0.5) debbano essere valutati prioritariamente attraverso indagini a terra supportate da analisi strumentali che possano indirizzare le necessarie azioni di mitigazione del rischio (potature, consolidamento con tiranti, interdizione dell'area, abbattimento, etc.). I restanti individui potrebbero essere invece controllati con indagini speditive e meno onerose, con il dichiarato obiettivo di bilanciare costi e benefici in termini oggettivi al fine di sostenere politiche più mirate nell'arboricoltura urbana o nella gestione di patrimoni arborei nei parchi naturali.

#### **Conclusioni**

Nel contesto generale dell'arboricoltura di precisione e, specificamente, in quello della valutazione e mappatura del rischio di caduta alberi, le tecniche geomatiche possono certamente risultare un valido supporto tecnico e tecnologico. L'esperienza condotta dimostra che il rilievo fotogrammetrico da SAPR risulta efficace per rilevare i principali parametri dendrometrici con precisioni notevolmente superiori a quelle ottenibili con le ordinarie tecniche forestali. Ad integrazione, il telerileva-

mento ottico multispettrale operato su dati gratuiti da missioni ad alta risoluzione geometrica e temporale (come quella Copernicus Sentinel-2), ha dimostrato di poter efficacemente integrare il dato fotogrammetrico. E' infatti l'analisi spettrale multitemporale che ha permesso di quantificare e mappare i fenomeni di deperimento in atto, avvalendosi di informazioni (quelle derivabili da indici spettrali basati su bande diverse da quelle del visibile) che un operatore a terra non potrebbe cogliere. Tali nuove informazioni costituiscono variabili necessarie all'adozione di opportuni modelli biomeccanici in grado di calcolare un fattore di sicurezza statica che misuri la stabilità meccanica dei tronchi e la loro resistenza a carichi di vento di progetto. Se supportata da queste premesse l'arboricoltura di precisione va effettivamente configurandosi come uno strumento gestionale efficiente e, quella proposta, come una procedura possibile per una gestione oggettiva e trasparente dei patrimoni arborei. Tale considerazione è tutt'altro che secondaria nel panorama odierno dove i gestori, soprattutto quelli pubblici (e.g. settori tecnici del verde cittadino o tecnici di parchi naturali) sono chiamati ad assicurare la sicurezza pubblica assumendosi la responsabilità "politica" degli alberi nei confronti dei cittadini, i quali sono sempre più attenti alle tematiche del verde e della natura. In questo contesto delicato e poco alimentato da risorse economiche, l'arboricoltura di precisione si configura come un valore gestionale aggiuntivo qualora si dovesse rendicontare della gestione in contenziosi legali.

#### BIBLIOGRAFIA

- Borgogno-Mondino, E., Andrea Lessio, Luigi Tarricone, Vittorino Novello, and Laura de Palma. 2018. "A Comparison between Multispectral Aerial and Satellite Imagery in Precision Viticulture." *Precision Agriculture* 19 (2): 195–217.
- Bradley, Bethany A., Robert W. Jacob, John F. Hermance, and John F. Mustard. 2007. "A Curve Fitting Procedure to Derive Inter-Annual Phenologies from Time Series of Noisy Satellite NDVI Data." *Remote Sensing of Environment* 106 (2): 137–145.
- Corona, Piermaria, Francesco Chianucci, Valerio Quatrini, Vincenzo Civitarese, Fabrizio Clementel, Corrado Costa, Antonio Floris, Paolo Menesatti, Nicola Pulletti, and Giulio Sperandio. 2017. "Precision Forestry: Riferimenti Concettuali, Strumenti e Prospettive Di Diffusione in Italia." *Forest@-Journal of Silviculture and Forest Ecology* 14 (1): 1.
- De Petris S., Berretti R., Sarvia F., and Borgogno-Mondino E. 2019. "Precision Arboriculture: A New Approach to Tree Risk Management Based on Geomatics Tools." In *SPIE Remote Sensing, 2019*. Vol. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI, 111491G. SPIE. doi:10.1117/12.2532778.
- Isenburg, Martin. 2012. "LASTools-Efficient Tools for LiDAR Processing." *Available at: Http://Www. Cs. Unc. Edu/ Isenburg/Lastools/[Accessed October 9, 2012]*.
- La Marca, Orazio. 2017. *Elementi Di Dendrometria*. Patron.
- Larsen, David R., David W. Hann, and Stephen C. Stearns-Smith. 1987. "Accuracy and Precision of the Tangent Method of Measuring Tree Height." *Western Journal of Applied Forestry* 2 (1): 26–28.
- Lobis, V., E. Brudi, G. Maresi, and P. Ambrosi. 2002. "Valutazione Della Stabilità Degli Alberi: Il SIA (Statistics Integrated Assessment) Ed Il Metodo SIM (Statistics Integrated Method)." *Sherwood*, no. 78: 41–46.
- Plowright, Andrew. 2018. "R Package 'ForestTools.'" CRAN. <https://github.com/andrew-plowright/ForestTools>.
- Sani, Luigi. 2017. *Statistica Delle Strutture Arboree per La Valutazione Di Stabilità*. prima edizione edizione. gifer.
- Schwarze, Francis W. M. R., Julia Engels, and Claus Mattheck. 2013. *Fungal Strategies of Wood Decay in Trees*. Springer Science & Business Media.
- Shigo, Alex L. 1994. *Modern Arboriculture*. Shigo and Trees, Associates.
- Shigo, Alex L., and Harold G. Marx. 1977. "Compartmentalization of Decay in Trees." *Agric. Inf. Bull. 405. Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Service. 73 p. 405: 1–73*.
- Smiley, Nelda Matheny, and Sharon Lilly. 2017. *BMP Best Management Practices: Tree Risk Assessment*. Ed. 2. International Society of Arboriculture.
- Wessolly, and Erb. 1998. *Handbuch Der Baumstatik+ Baumkontrolle*. Patzer.
- Zambarda, A., M. Černý, and P. Vopěnka. 2010. "Field-Map-the New Technology Designed by IFER for the Collection and Processing of Forest Inventory Data." *Sherwood-Foreste Ed Alberi Oggi*, no. 167: 33–38.

#### PAROLE CHIAVE

PRECISION ARBORICULTURE; TREE STABILITY ASSESSMENT; PHOTOGRAMMETRY; SENTINEL-2

#### ABSTRACT

Trees provide social, economic and aesthetic benefits to human beings but often they present structural defects, physiological disorders and/or pathological processes that pose a danger to property and people. In this work we applied Precision Arboriculture approach at La Mandria regional park (Piedmont). UAV digital photogrammetry was used to retrieve tree parameters in a jointly use to multispectral satellite remote sensing (Copernicus Sentinel-2) to monitor the canopy health of trees. The adoption of biomechanical models has made it possible to assess the mechanical stability of the trunks and create a decision support system that create intervention priorities zones with the aim of reducing and optimizing ground tree inspections.

#### AUTORE

DE PETRIS SAMUELE  
 SAMUELE.DEPETRIS@UNITO.IT  
 SARVIA FILIPPO  
 FILIPPO.SARVIA@UNITO.IT  
 BORGOGNO-MONDINO ENRICO  
 ENRICO.BORGOGNO@UNITO.IT  
 DIPARTIMENTO SCIENZE AGRARIE, FORESTALI E ALIMENTARI, UNIVERSITÀ DI TORINO, LARGO P. BRACCINI 2, 10095 GRUGLIASCO (TO).



# DATRONIX

LET'S MEASURE THE WORLD

## IL NUOVO PUNTO DI RIFERIMENTO PER I PROFESSIONISTI DELLE MISURE TERRITORIALI

Le tecnologie più avanzate unite alla trentennale esperienza nel settore.

Sistemi completi per rilievi topografici terrestri, con GNSS e Stazione Totale, soluzioni per RTK cloud GIS, CORS e software per reti GNSS, sensori GNSS per macchine movimento terra ed agricoltura di precisione, scansioni aeree con Air LiDAR, rilievi idrografici di precisione, soluzioni per Industria 4.0...

**DATRONIX ha la risposta!**

## CHCNAV

DISTRIBUTORE ESCLUSIVO  
PER L'ITALIA **CHC Navigation**



### AlphaAIR450

AlphaAIR450 è il nuovo 'LiDAIR' completo di scanner, GNSS, fotocamera ed IMU di alta precisione



### i73

i73, il GNSS IMU RTK tascabile, 730 g di pura tecnologia ed il controller Android HCE 320 con software Landstar 7



### APACHE 3

APACHE 3 è il Drone Idrografico 'all in one' senza compromessi



**DATRONIX**  
LET'S MEASURE THE WORLD

**DATRONIX Srls**  
Via Francesco Petrarca. 33  
20851 Lissone (MB)



TELEFONO  
+39 9007520



EMAIL  
[info@datronix.it](mailto:info@datronix.it)



WEB  
[www.datronix.it](http://www.datronix.it)



FACEBOOK



INSTAGRAM



LINKEDIN