

Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia

Piermaria Corona ⁽¹⁾, Francesco Chianucci* ⁽¹⁾, Valerio Quatrini ⁽¹⁾, Vincenzo Civitarese ⁽²⁾, Fabrizio Clementel ⁽³⁾, Corrado Costa ⁽²⁾, Antonio Floris ⁽³⁾, Paolo Menesatti ⁽²⁾, Nicola Puletti ⁽¹⁾, Giulio Sperandio ⁽²⁾, Stefano Verani ⁽⁴⁾, Rosario Turco ⁽⁵⁾, Vincenzo Bernardini ⁽⁵⁾, Manuela Plutino ⁽¹⁾, Gianfranco Scrinzi ⁽³⁾

(1) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Centro di ricerca per la selvicoltura, Arezzo; (2) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Unità di ricerca per l'ingegneria agraria, Monterotondo (Roma); (3) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Unità di ricerca per il monitoraggio forestale, Villazzano (Trento); (4) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Unità di ricerca per le produzioni legnose fuori foresta, Roma; (5) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Unità di ricerca per la selvicoltura in ambiente mediterraneo, Rende (Cosenza) - *Corresponding Author: Francesco Chianucci (fchianucci@gmail.com).

Abstract: *Precision forestry: concepts, tools and perspectives in Italy.* Recent advancements in informatics and communication technologies have led to an increasing employment of analytical and communication tools in forestry, including data from satellite, airborne, unmanned aerial vehicles, global positioning systems, and many sensors, devices and other geospatial tools. Precision forestry enables highly repeatable measurements, actions and processes to manage and harvest forest stands, simultaneously allowing information linkages between production and wood supply chain, involving resource managers and environmental community; all these factors are contributing to the wider goal of sustainable forest management. In this report, we review the most recent advances in the precision forestry applications and tools, with particular reference on advanced forest inventory, decision support systems, precision forest harvesting, and wood traceability. We discuss the opportunities and challenges towards implementing precision forest practices in forest management and planning and forest industry in Italy.

Keywords: Silviculture, Forestry-wood Chain, Forest Inventory, Precision Agriculture, Bio-economy, Digital Agriculture, ICT

Received: Nov 16, 2016; Accepted: Jan 10, 2017; Published online: Jan 31, 2017

Citation: Corona P, Chianucci F, Quatrini V, Civitarese 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: 1-21 [online 2017-01-31] URL: <http://www.sisef.it/forest@contents/?id=efor2285-014>

Introduzione

Negli ultimi decenni è avvenuta una profonda trasformazione del settore forestale italiano, in linea con quanto osservato anche a livello europeo (MI-PAAF 2015). Il sorgere di nuove funzioni e ruoli produttivi e sociali attribuiti alle risorse forestali (*sensu lato*, incluse le aree verdi in ambito urbano, le pianta-

zioni da legno e gli alberi fuori-foresta) hanno determinato una crescita dell'importanza, ma anche della complessità del sistema foresta-legno. In Italia esiste una significativa tradizione nella ricerca forestale e una radicata consapevolezza che l'innovazione e la competitività sono possibili grazie a un'alleanza tra iniziative di ricerca strategiche a scala nazionale con

quelle a scala regionale ed europea. La diversità ambientale delle regioni italiane rappresenta, anche per le foreste, una ricchezza biologica, paesaggistica e culturale ma, soprattutto, un'importante risorsa in termini di possibilità di sviluppo della *green economy*, con riflessi potenziali sulla opportunità di occupazione e di presidio ambientale nelle aree rurali e montane.

Considerando l'ampia varietà di beni e servizi che vengono forniti dalle risorse forestali, emerge sempre più la necessità di potenziare la filiera produttiva valorizzando economicamente le utilità materiali e immateriali ritraibili dal bosco, anche alla luce di quanto indicato nella *Strategic Research and Innovation Agenda for 2020* (SRIA 2013) messa a punto da *European Forest Institute & Forest-based Technology Platform*. In particolare, l'anello più debole della filiera foresta-legno è rappresentato dalla base produttiva, ossia dai settori della gestione selvicolturale, delle utilizzazioni e della prima trasformazione (MIPAAF 2013). In Italia questa filiera risulta fortemente dipendente dall'estero per l'approvvigionamento della materia prima (*wood insecurity*): oltre due terzi del fabbisogno nazionale viene coperto dalle importazioni. L'importazione dall'estero di elevate quantità di materia prima è causa dei crescenti problemi dovuti alla mancata conformità ai requisiti di qualità e di regolarità nelle forniture legnose e alla possibilità che il legname provenga da attività illegali o da attività di gestione non sostenibile nelle zone di origine (Regolamenti FLEGT-Regolamento CE 2173/2005; *European Timber Regulation* - EUTR Regolamento 995/2010). Diventa dunque prioritario allargare l'effettiva base produttiva nazionale, considerando non solo gli aspetti quantitativi ma anche quelli qualitativi, al contempo garantendo la riduzione degli impatti delle utilizzazioni forestali.

Il patrimonio forestale italiano copre complessivamente quasi 11 milioni di ettari, corrispondenti a più di un terzo della superficie nazionale. La massa legnosa presente, pari a circa 1500 Mm³, è in continua crescita (MIPAAF 2012). L'incremento annuale complessivo della massa legnosa dei boschi italiani è superiore a quello effettivamente utilizzato: i prelievi risultano complessivamente inferiori a un terzo dell'incremento annuale, risultando tra i più bassi dell'Unione Europea. Parallelamente, le attività connesse alla filiera del legno (dalla produzione, alla trasformazione industriale in prodotti semilavorati e finiti, fino alla commercializzazione) coinvolgono circa 80.000 imprese, per quasi 400.000 unità lavorative occupate. In particolare, la filiera nazionale del le-

gno, soprattutto grazie all'industria del mobile, garantisce un saldo commerciale positivo: si tratta del secondo settore dell'industria manifatturiera italiana, con un volume di affari annuo complessivo di oltre 40 miliardi di euro.

In questo contesto diventa fondamentale una calibrata ma concreta utilizzazione delle risorse nazionali: si stima che la quota di produzione legnosa effettivamente utilizzabile in più rispetto all'attualità e in maniera sostenibile, sia verosimilmente pari ad almeno 8-9 milioni di metri cubi all'anno. Come emerge da un Dossier Coldiretti (<http://www.coldiretti.it/news/Pagine/472---7-Luglio-2016.aspx>), il correlato incremento delle possibilità occupazionali nel medio periodo può essere stimato, a livello nazionale, in non meno di 35.000 nuovi posti di lavoro, con riferimento al solo settore della gestione, coltivazione e utilizzazione delle risorse legnose. In questa prospettiva, la selvicoltura e l'arboricoltura da legno possono rappresentare in Italia uno dei settori più dinamici della *green economy*, in grado anche di contribuire in modo significativo alla stabilizzazione delle popolazioni rurali e alla limitazione di ulteriori processi di urbanizzazione del territorio.

Alla mobilitazione delle risorse legnose ritraibili dai boschi e dalle piantagioni forestali è strettamente collegato il tema della tracciabilità dei prodotti, come previsto dal Regolamento EU - *Timber Regulation* - n. 995/2010 (sistema di *Due Diligence*). Con particolare riferimento a quest'ultimo aspetto, la trasmissione di dati relativi ai flussi di legname prelevati, sia in termini quantitativi che di localizzazione geografica, congiuntamente ai benefici attesi dall'implementazione della tecnologia, contribuiranno a migliorare significativamente la politica dei controlli e di tutela delle risorse.

In questo quadro, che presenta numerose opportunità, diventa importante favorire l'implementazione e l'integrazione delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) nella prospettiva di quella che viene definita *Precision Forestry*, quali elementi imprescindibili di innovazione nel sistema produttivo forestale nazionale. L'impiego di queste nuove tecnologie da parte degli imprenditori, tecnici forestali, proprietari e gestori del patrimonio forestale e delle piantagioni da legno consente la messa a punto di strumenti operativi idonei anche all'uso non specialistico, in grado di permettere di: (i) effettuare analisi complesse di dati forestali e territoriali di interesse in modo guidato, semplice ed economico; (ii) supportare le decisioni pianificatorie e progettuali delle operazioni forestali secondo percorsi concet-

tuali standardizzati e riproducibili; (iii) favorire l'integrazione tra tecnici, operatori del settore, *policy makers* e collettività sociale, garantendo al contempo la trasparenza delle operazioni di gestione dei patrimoni forestali, sulla base di piattaforme informative condivise, standardizzate e ad alta accessibilità informatica (ad es., *Web-Gis* e *App* per terminali mobili di uso quotidiano).

In questo contributo vengono analizzate le tecnologie disponibili per la *Precision Forestry*, orientate a poter conseguire obiettivi strategici di miglioramento e valorizzazione della filiera foresta-legno, con particolare riferimento alla situazione italiana.

Definizione di *Precision Forestry*

Il termine *Precision Forestry* entra a fare parte del vocabolario tecnico a seguito del *First Precision Forestry Symposium* organizzato nel 2001 dall'Università di Washington in collaborazione con il Servizio Forestale Nazionale degli Stati Uniti. In tale ambito viene proposta la seguente definizione: "*precision forestry uses high technology sensing and analytical tools to support site-specific, economic, environmental, and sustaina-*

ble decision-making for the forestry sector supporting the forestry value chain from bareland to the customer buying a sheet of paper or board" (Bruce Bare & Dean 2001). In questa definizione manca un riferimento esplicito al concetto di conservazione/miglioramento dell'ambiente, che viene introdotto successivamente e diventa uno dei pilastri della *Precision Forestry*. In Tab. 1 sono riportate alcune definizioni proposte per inquadrare la *Precision Forestry*.

In Italia il termine *Precision Forestry* viene generalmente tradotto con "selvicoltura di precisione", dove il termine "selvicoltura" è inteso in un senso ampio che include l'insieme di attività di monitoraggio, pianificazione, gestione e utilizzazione delle risorse forestali. Ad esempio, Lubello & Cavalli (2006) definiscono la selvicoltura di precisione come "la disciplina che utilizza i dispositivi informatici per migliorare la gestione forestale, tramite la più efficiente misurazione e rilevazione dei dati al fine di ottenere un sistema di supporto decisionale". In questa accezione, la *Precision Forestry* può essere inquadrata come una specifica branca disciplinare all'interno della più ampia Agricoltura di Precisione.

Tab. 1 - Definizioni e concetti riguardanti la *Precision Forestry*, secondo SILVAVOC-IUFRO (<http://www.iu-fro.org/science/special/silvavoc/definitions-scic-summaries/>).

Definizioni	Riferimento bibliografico
La <i>Precision Forestry</i> implica l'utilizzo di dati ad elevata risoluzione spaziale per supportare i decisori nelle attività operative. Ciò consente di operare misure, azioni e processi ripetibili tesi a favorire lo sviluppo e l'utilizzazione delle risorse forestali, ma anche la protezione e la valorizzazione delle zone ripariali, la conservazione degli habitat naturali, la tutela delle risorse ambientali. La <i>Precision Forestry</i> permette una connessione informativa tra gestori ambientali, comunità e decisori. Essa collega le pratiche della gestione forestale sostenibile con gli strumenti per implementare tali approcci e produrre i migliori ritorni economici ed ambientali	Bruce Bare & Dean 2001
Pianificazione e svolgimento di attività forestali sito-specifiche e di azioni volte al miglioramento della qualità della produzione legnosa riducendo le emissioni e incrementando i profitti, preservando la qualità dell'ambiente. L'ambito della <i>Precision Forestry</i> comprende due principali settori: uso dell'informazione spazializzata a supporto della gestione e pianificazione forestale; gestione della variabilità sito-specifica	Taylor et al. 2002
Scopo della <i>Precision Forestry</i> è lo sviluppo di <i>applicazioni</i> e processi finalizzati ad aumentare la precisione della pianificazione, implementazione e revisione delle pratiche di gestione forestale sostenibile multiobiettivo	Bruce Bare 2003
La <i>Precision Forestry</i> è un concetto multi- e inter-disciplinare, che non riguarda una semplice lista di <i>applicazioni</i> ma sottende un utilizzo integrato delle nuove tecnologie per proporre una serie di soluzioni innovative alle problematiche specifiche del settore forestale	Ziesak 2006
Uso di tecnologie avanzate di rilevamento e analisi finalizzate al supporto di azioni sito-specifiche di rilevanza economica, ambientale a un supporto decisionale della gestione sostenibile in ambito forestale	Moskal et al. 2009

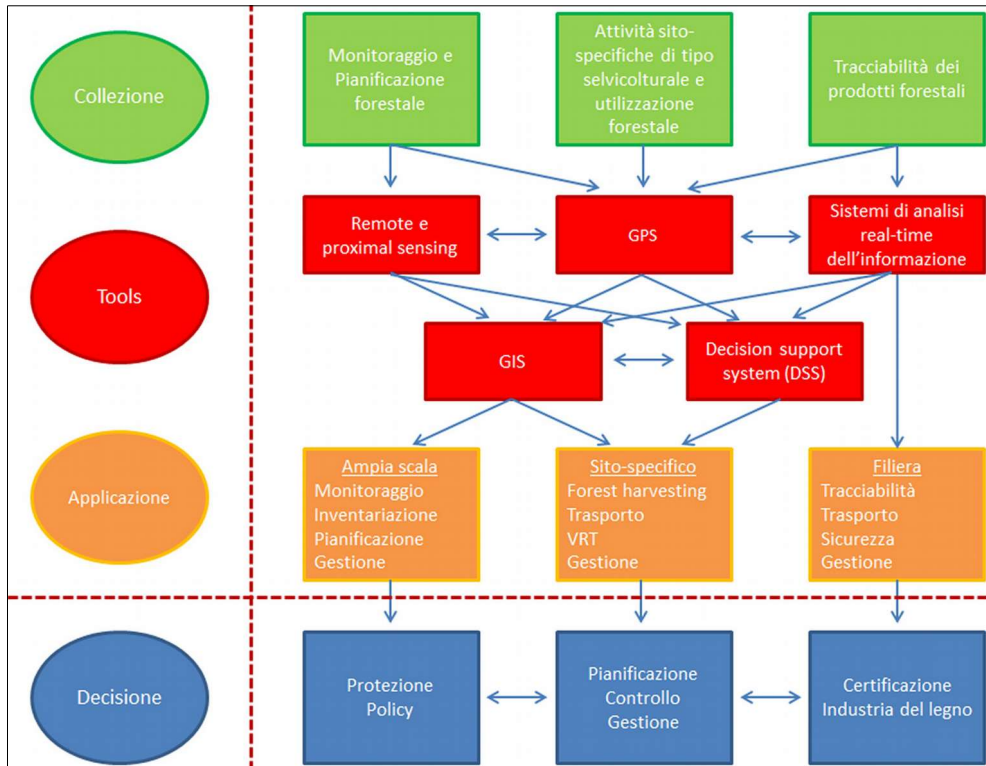


Fig. 1 - Inquadratura applicativa della *Precision Forestry* (Kovácsová & Antalová 2010, modificato).

Applicazioni della *Precision Forestry*

Il concetto di *Precision Forestry* comprende una serie di applicazioni che hanno come denominatore comune l'utilizzo di tecnologie ICT abbinato alle tecniche di posizionamento (georeferenziazione) dell'informazione a supporto delle attività forestali. Rispetto all'Agricoltura di Precisione, questa branca disciplinare non si limita alle attività sito-specifiche ma fornisce un approccio integrato e multiscale alla gestione delle risorse forestali. In tal senso, gli strumenti e i metodi della *Precision Forestry* possono essere inquadrati con riferimento ai tre seguenti ambiti applicativi (Fig. 1):

- monitoraggio e pianificazione forestale;
- applicazioni sito-specifiche di tipo colturale e di utilizzazione forestale;
- applicazioni relative alla tracciatura dei prodotti nella filiera foresta-legno.

La suddetta distinzione non è comunque da intendersi rigida, in quanto molti degli strumenti disponibili sono utilizzati a vari livelli (ad esempio, i sistemi GIS sono utilizzati sia per descrivere informazioni sito-specifiche ad elevata risoluzione sia per analizzare e coordinare informazioni ad ampia scala). Questa multiscalarità deve essere intesa in senso spaziale (da misurazioni a livello di foglia fino alle mappe globali di produttività) ma anche in senso temporale (monitoraggio forestale). Nei paragrafi successivi verranno descritti i principali strumenti disponibili

per i tre ambiti applicativi sopra elencati.

Monitoraggio e pianificazione forestale

La *Precision Forestry* eredita una lunga tradizione forestale di applicazioni che utilizzano il telerilevamento e le tecniche geomatiche. Si tratta, in particolare, di metodologie per acquisire, integrare, analizzare, archiviare e distribuire dati georeferiti in formato digitale:

- sistemi di posizionamento satellitare, a volte integrati con i sistemi inerziali;
- sistemi informativi geografici;
- telerilevamento satellitare, aereo e (recentemente) da sistemi a pilotaggio remoto (droni);
- sistemi di rilievo prossimale;
- sistemi di supporto alle decisioni.

Sistemi globali di posizionamento e navigazione satellitare

I sistemi globali di posizionamento e navigazione satellitare (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) rappresentano il pilastro nella georeferenziazione dei dati forniti dalle tecnologie di *Precision Forestry* in ambito forestale. I recenti progressi hanno permesso di sviluppare ricevitori con sempre maggiore accuratezza posizionale, in funzione delle varie tecniche applicate per la collezione delle coordinate e le loro correzioni (*post-processing* o in *real-time*), riducendone al contempo dimensione e costi. Con il com-

pletamento del nuovo sistema Europeo di posizionamento satellitare Galileo si prevede un significativo incremento nelle prestazioni in termini di precisione. Negli inventari forestali le informazioni vengono raccolte in punti di campionamento posizionati sulla superficie terrestre secondo uno schema probabilistico predefinito. La navigazione verso i punti di campionamento a terra è garantita dai moderni GNSS. I sistemi GNSS sono normalmente implementati anche sulle piattaforme a pilotaggio remoto, sui moderni sistemi autoguidanti di cui sono equipaggiate le moderne trattrici agricole o macchine abbattitrici-allestatrici forestali, oltre che essere integrati nei tablet di bassa fascia economica e, talora, nelle fotocamere digitali.

In Italia il progetto "Targetstars" (Corpo Forestale dello Stato e CREA) ha creato una rete nazionale di siti forestali per il test di ricevitori e procedure sotto copertura arborea su punti di coordinate note con altissima precisione: il sistema è liberamente accessibile nel sito gestito dal CREA, e fornisce i risultati di precisione conseguiti dall'utente (Pompei et al. 2009).

Telerilevamento delle risorse forestali

L'utilizzo del telerilevamento per il monitoraggio ad ampia scala delle risorse forestali ha una lunga e consolidata tradizione, iniziata a partire dai primi anni '70. Da allora, le applicazioni più diffuse hanno riguardato il telerilevamento con sensori ottici, a esempio per:

- la mappatura dei tipi forestali (Fig. 2), utilizzando immagini satellitari ad alta risoluzione; ad esempio, Formosat, IKONOS, Quick-Bird, OrbView-3, WorldView-2, Pleiades, Rapid-Eye, Sentinel-2, solo per citare alcuni tra i sensori più utilizzati per mappature a livello operativo (scala: 1:5.000 - 1:10.000), mentre le immagini Landsat, Spot HRV e Spot5 e Aster rappresentano correntemente le migliori soluzioni per mappatura a scale più piccole (1:25.000-1:50.000);
- il monitoraggio per la prevenzione e la lotta agli incendi boschivi, per esempio per la valutazione della quantità di materiale combustibile vegetale e la prevenzione e monitoraggio degli incendi (Bot-tai et al. 2008);
- il supporto all'inventariazione forestale: in questo caso le immagini telerilevate vengono utilizzate in primo luogo per identificare i punti di campionamento che ricadono in aree boscate (fotointerpretazione), utilizzando ortofoto aree ad alta risoluzione; inoltre, le informazioni telerilevate da satellite

vengono spesso utilizzate per integrare i dati a terra e spazializzare (mappatura) le stime inventariali sulla base delle informazioni telerilevate (Corona 2010).

Se da un lato l'utilizzo di sistemi satellitari e aerei per il telerilevamento passivo (radiazione elettromagnetica solare riflessa) delle risorse forestali è prassi

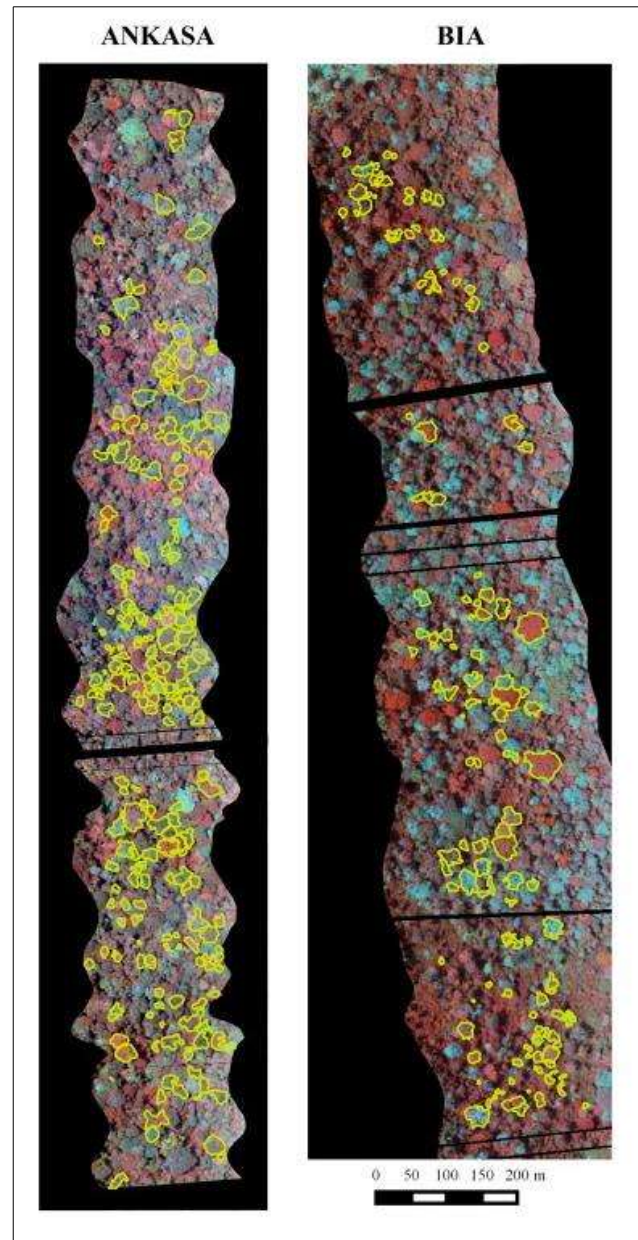


Fig. 2 - Composizione in falso colore (rosso 829 nm, verde 604 nm, blu 465 nm) di immagini multispettrali Sentinel-2 (risoluzione geometrica: 1 metro, risoluzione spettrale: 244 canali) in due Parchi Nazionali del Ghana con sensore aviotrasportato. I poligoni in giallo rappresentano le chiome di soggetti arborei delle singole specie di interesse, individuate utilizzando *software* GIS (Laurin et al. 2016).

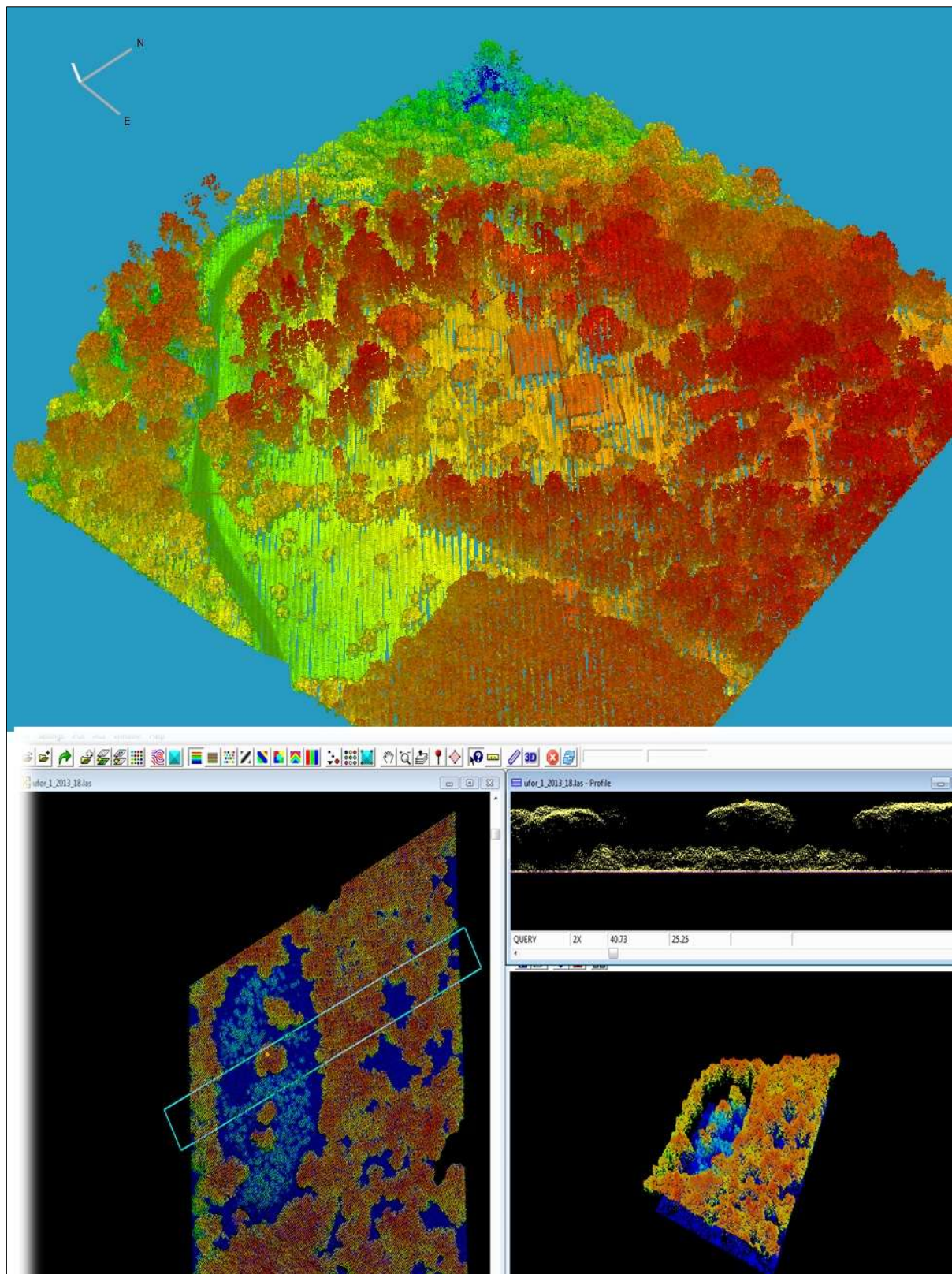


Fig. 3 - (a) Immagine su *tile* di dato LiDAR acquisito in Casentino (Chiavetta et al. 2014): sono evidenti, oltre alle formazioni forestali, anche edifici e viabilità. (b) Immagine di restituzione 3D degli echi nativi LiDAR (.las) di tratto boschivo a pineta nella foresta Presidenziale di Castelporziano (Scrini & Clementel 2015b)

consolidata, i più recenti sviluppi tecnologici hanno aperto nuove frontiere mediante l'utilizzo dell'informazione tridimensionale fornita dai sistemi di telerilevamento attivo (radiazione elettromagnetica emessa dal sensore) che utilizzano tecniche LiDAR (radiazione emessa nel campo visibile - infrarosso) da piattaforma aerea (ALS - Fig. 3) o radar (radiazione emessa nell'intervallo spettrale delle onde radio) da satellite (Corona et al. 2015).

Di norma il dato ALS viene utilizzato per modellizzare il volume legnoso rilevato in aree di saggio a terra in funzione di metriche estratte dal contestuale modello digitale delle chiome (*Canopy Height Model* - CHM) ottenuto da LiDAR. L'utilizzo di ALS a supporto dell'inventariazione forestale ha avuto un notevole sviluppo nell'ultimo decennio in molti paesi del Centro e Nord Europa, Stati Uniti e Canada. Peraltro, i sistemi ALS sono ampiamente utilizzabili anche in contesto mediterraneo, generalmente più complesso in termini di struttura e morfologia (Corona & Fattorini 2008). Ad esempio, nell'ambito del progetto "Alforlab" (PON03PE 00024 1 - <http://www.alforlab.it/>) sono stati messi a punto modelli di predizione della massa legnosa basati su dati ALS per tutte le principali formazioni forestali della Calabria (Scrinzi et al. 2017). Varie ricerche svolte in Italia hanno evidenziato la capacità dei dati ALS di produrre stime accurate dei principali parametri dendrometrici a supporto della pianificazione forestale a livello aziendale (Clementel et al. 2012, Corona et al. 2012, 2014, Floris et al. 2010, Pirotti et al. 2012, Torresan et al. 2012, Scrinzi et al. 2015, 2017) e anche per la stessa delineazione della copertura boschiva in funzione di altezza minima degli alberi, grado di copertura arborea, superficie e larghezza minima (Alivernini et al. 2016). Nella Tenuta Presidenziale di Castelporziano il Sistema Informativo forestale (SIF-TEC) in uso dal 2015 è stato corredato da dati di volume legnoso e fitomasse, sia in continuo che per singolo popolamento (Scrinzi & Clementel 2015b, Colle 2015). La recente disponibilità di dati derivati da ALS grazie a progetti realizzati da amministrazioni pubbliche permette di guardare a questa tecnologia come uno strumento di concreto interesse anche per gli operatori e i professionisti forestali.

Nuovi ambiti applicativi del telerilevamento sono rappresentati dai sistemi aerei a pilotaggio remoto (SAPR), i quali sono in grado di fornire informazioni a scale di dettaglio e con maggiore flessibilità rispetto agli altri strumenti da telerilevamento remoto. Attualmente l'utilizzo di questi sistemi ha avuto un maggiore sviluppo nell'ambito dell'agricoltura di

precisione (Castaldi et al. 2016, Pelosi et al. 2015); a livello forestale le prime esperienze ne hanno mostrato le potenzialità (Floris et al. 2012, Chianucci et al. 2016a, Chirici 2016), promettenti per diversi motivi:

- la risoluzione spaziale delle immagini ottiche da SAPR è particolarmente elevata (nell'ordine di pochi centimetri), come conseguenza della bassa quota di volo: questa caratteristica permette, ad esempio, l'identificazione della specie dei singoli alberi forestali, la perimetrazione di aree danneggiate o soggette a utilizzazioni, l'analisi della trasparenza delle chiome (Chianucci et al. 2016a);
- la risoluzione temporale: i bassi costi di manutenzione e di volo dei SAPR permettono di acquisire immagini della stessa area più frequentemente rispetto a quanto sia possibile con aeromobili con pilota o da satellite; è inoltre possibile effettuare nuove acquisizioni in tempi molto brevi nel caso di eventi specifici o monitoraggio *real-time*;
- la possibilità di effettuare acquisizioni multi-sensore, data la disponibilità di SAPR dotati di strumenti sia ottici che multispettrali e, recentemente, anche LiDAR ("mini/micro LiDAR" - Fig. 4).

D'altro canto, rispetto alle applicazioni agricole di precisione, l'utilizzo dei SAPR nel settore forestale presenta maggiori difficoltà di implementazione, quali: difficoltà di decollo e atterraggio, autonomia non sufficiente per coprire grandi superfici (superiori a 10 km²), necessità di algoritmi più complessi per la restituzione fotogrammetrica di immagini delle coperture forestali. Tuttavia, il rapido sviluppo che stanno avendo questi sistemi e i *software* di fotogrammetria dedicata fa prevedere che essi possano a breve rappresentare un'importante risorsa tecnologica anche a livello pratico-operativo. Da segnalare inoltre, che la *European Space Agency* (ESA) ha recentemente promosso un programma per regolare l'utilizzo e la messa in regime di sistemi *satellite-controlled* a pilotaggio remoto per il monitoraggio degli incendi forestali: esperienze positive sono state condotte in proposito negli Stati Uniti, in America latina e Spagna.

Rilevamento prossimale delle risorse forestali

Le tecnologie sensoristiche sviluppate per il telerilevamento remoto trovano largo impiego anche nelle strumentazioni utilizzabili per rilievi a terra (*proximal sensing*); sono un esempio il rilievo prossimale con fotocamere termiche, RGB, multi o iperspettrali, il laser scanning terrestre, il georadar. L'onerosità dei rilievi in campo e talora il costo di alcuni strumenti



Fig. 4 - Sistemi a pilotaggio remoto impiegati in ambito forestale: a sinistra, ottocottero sviluppato dalla ditta Oben ed equipaggiato con sistema LiDAR; a destra, drone ad ala fissa modello eBee Ag della ditta SenseFly, equipaggiabile con fotocamera RGB, multispettrale e termica.

rende adatto il loro impiego solo per misure di dettaglio su superfici limitate, spesso usate per acquisire dati di verità al suolo per calibrare misure da rilievo remoto (satellite o aereo). Ad esempio, il laser scanning terrestre (TLS) permette la caratterizzazione tridimensionale delle strutture arboree (Fig. 5) ad un dettaglio elevatissimo rispetto a quanto ottenibile con il laser scanning aereo. Tali dati permettono la misura di attributi dendrometrici (volume, diametro, area basimetrica) e strutturali (profili verticali, distribuzione orizzontale) a livello di singolo albero o popolamento arboreo con precisione sub-millimetrica. Tuttavia, l'adozione del TLS è attualmente limitata dai costi e dalla complessità delle operazioni di pre-

processamento e trattamento dei dati acquisiti dal sistema.

Tra le ulteriori strumentazioni di rilievo prossimale, per le quali si rimanda anche in Appendice, merita di essere menzionato Field-Map. Si tratta di una stazione computerizzata portatile che permette di acquisire in campo un'ampia serie di dati dendrometrici, strutturali e posizionali a livello di singolo albero o di popolamento (IFER 2007) e quindi trova largo impiego nelle misure di campo di tipo inventariale. L'equipaggiamento standard di Field-Map è composto da un distanziometro laser, una bussola elettronica, un ricevitore GNSS e può essere interfacciato con un cavalletto dendrometrico con sensore elettronico

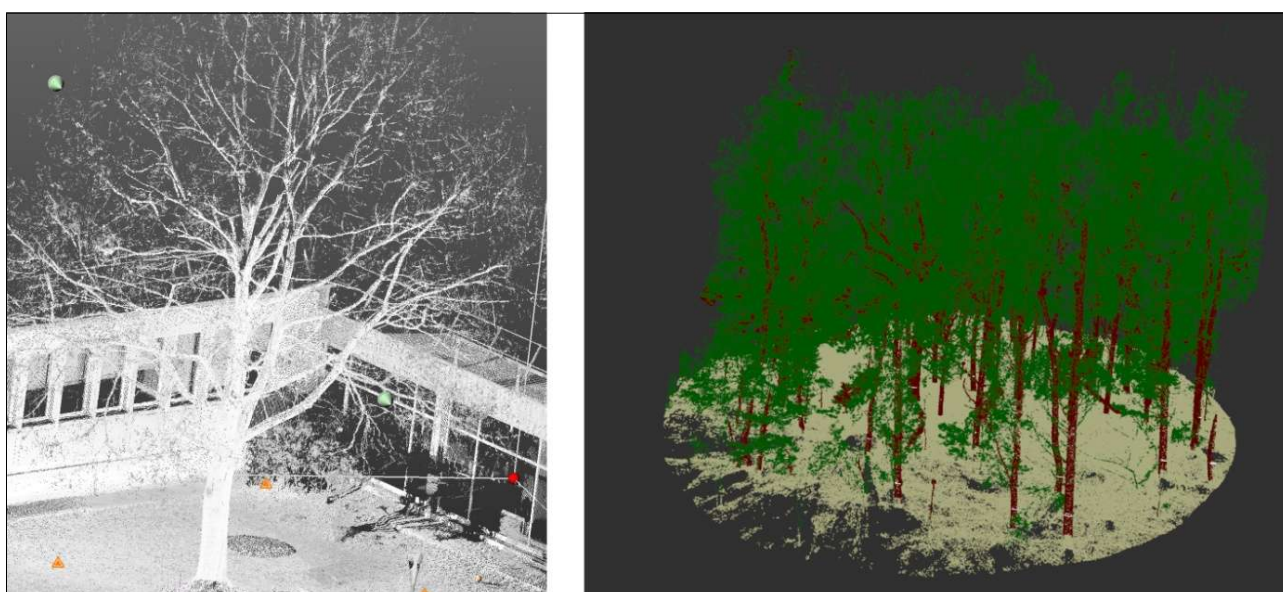


Fig. 5 - Restituzioni 3D da rilievi con tecnologia laser scanning terrestre (TLS).

per l'acquisizione e trasmissione dei dati alla stazione computerizzata (Fig. S1 in Appendice). Le funzioni base di Field-Map permettono di fare stazione in un punto, localizzare topograficamente un soggetto arboreo e archivarne dati quali: diametro a petto d'uomo, altezza, altezza di inserzione della chioma, profilo del fusto, profilo della chioma, area di insidenza, distanza metrica e angolare (Fig. S2). I vantaggi di Field-Map consistono nella registrazione dei dati direttamente in formato digitale ed esportabili nei più svariati formati tabellari e GIS, e nella elaborazione direttamente in campo degli attributi di interesse (calcolo area basimetrica ad ettaro, area di insidenza, distribuzione orizzontale).

La fotografia digitale viene ampiamente impiegata per il monitoraggio di attributi eco-fisiologici (Fig. S3). Tra le varie metodologie si segnalano le tecniche fotografiche per la stima degli attributi della copertura forestale (*canopy photography* - Chianucci 2013), i sistemi ad acquisizione ripetuta per l'analisi della fenologia (Nagai et al. 2016), la conservazione della biodiversità (Chianucci et al. 2016b). I vantaggi nell'uso della fotografia per il calcolo di attributi della copertura quali l'indice di area fogliare (LAI) hanno il vantaggio dell'economicità della strumentazione, la rapidità di esecuzione dei rilievi (Chianucci 2016, Chianucci & Cutini 2013), che le rendono idonee al monitoraggio e alla calibrazione dei dati telerilevati.

La combinazione di più strumentazioni fotografiche permettono inoltre approcci di fotogrammetria cosiddetta *close-range*. Un esempio è l'analisi stereometrica da fotogrammetria terrestre, che permette per stereovisione la stima indiretta e prossimale di parametri dendrometrici delle formazioni boschive

(Herrera et al. 2009). Questi sistemi si avvalgono di sofisticati apparati ottici, *software* di acquisizione e analisi delle stereo-immagini. L'apparato optoelettronico è formato da due video/fotocamere ad alta risoluzione posizionate su una barra metallica a distanza nota (Costa et al. 2006, Menesatti et al. 2014, Pallottino et al. 2015).

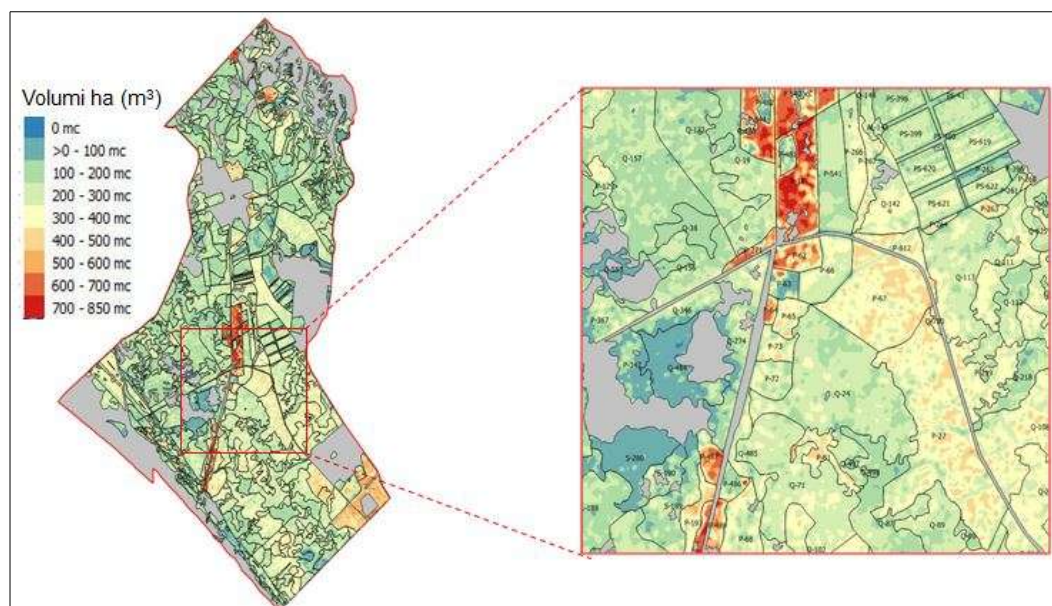
Una menzione merita infine il tomografo sonico, strumento di recente applicazione nell'analisi delle alberature (Fig. S4 e Fig. S5). Si tratta di uno strumento che sfrutta la propagazione delle onde sonore nel legno per determinarne densità e possibili alterazioni interne. Lo strumento è applicato per scopi diversi, quali la valutazione di stadi precoci di evoluzione delle patologie interne ai fusti o l'identificazione del percorso di sostanze liquide iniettate con mezzi endoterapici nei tronchi, operando sopra e sotto il punto di applicazione del trattamento di endoterapia.

Sistemi informativi geografici

L'utilizzo dei sistemi informativi geografici (GIS) nel settore forestale è ampiamente diffuso. I GIS costituiscono applicazioni insostituibili per rappresentare, analizzare, distribuire (web-GIS) e raccogliere (mobile-GIS) l'informazione georiferita relativa alle risorse forestali (Fig. 6).

Le aumentate capacità di elaborazione dati dei software, unitamente ai progressi nel telerilevamento e allo sviluppo di applicativi *consumer grade* (mobile-GIS) integrati con il GIS, hanno permesso negli ultimi anni di sviluppare applicazioni di grande dettaglio informativo e, soprattutto, di estendere l'utilizzo di queste tecnologie per la raccolta dell'informazione

Fig. 6 - Esempio di mappe *raster* del volume legnoso (a) e della biomassa epigea (b) di tratti di foresta (Scrini & Clementel 2015a).



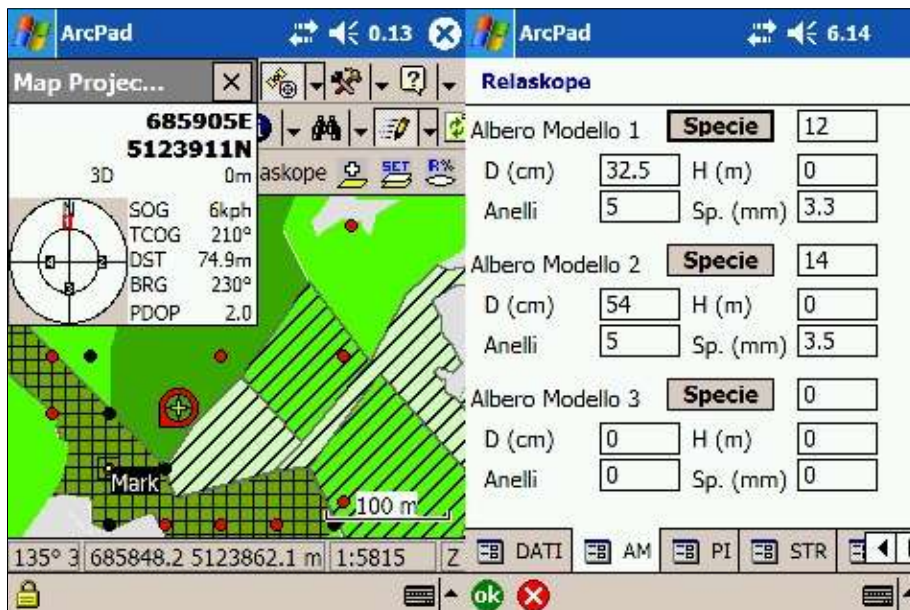


Fig. 7 - Applicazione Relaskope (esempi *clips* schede di interfaccia monitor su palmare) per la gestione dei campionamenti assestamentali in Provincia di Trento (realizzazione: F360 s.r.l.).

georiferita in campo. Un esempio applicativo è rappresentato dal sistema mobile-GIS messo a punto da Corpo Forestale dello Stato e CREA per la gestione della navigazione, digitalizzazione in campo e trasmissione dati ad un *server* centrale dei rilievi dell'Inventario Forestale Nazionale (INFC 2005). In Provincia di Trento gli inventari assestamentali vengono uniformemente effettuati utilizzando applicazioni di mobile-GIS che gestiscono sia la navigazione verso punti di campionamento predefiniti che la digitalizzazione dei dati di rilievo in campo (Scrinzi et al. 2008, 2011 - Fig. 7). Analoghe procedure di mobile-GIS sono state utilizzate per la codifica in campo dei dati delle unità forestali omogenee nella realizzazione del sistema informativo SIFTEC della foresta di Castelporziano (Scrinzi & Clementel 2015a, Colle 2015). Una complessa piattaforma di mobile-GIS è stata utilizzata nel progetto FutMon dal Corpo Forestale dello Stato (CREA e CNR) per i rilievi nazionali dello stato di salute delle foreste (Colle et al. 2010, 2014). Nel progetto CFS-PARTI è stata sviluppata una procedura di mobile-GIS "autocustomizzabile" per il rilievo di eventi territoriali di interesse forestale (Colle et al. 2009).

Sistemi spaziali di supporto alle decisioni

Negli ultimi anni è stata sviluppata l'applicazione di sistemi spaziali di supporto alle decisioni (*Spatial Decision Support Systems* - SDSSs), progettati per aiutare il pianificatore e gestore forestale nel definire le possibili soluzioni a problemi aventi componenti che si configurano spazialmente sul territorio. Questi sistemi, in genere interattivi, integrano sistemi di sup-

porto decisionale (DSS) che prevedono la produzione di *output* nell'ambito di sistemi informativi geografici. Un SDSS comporta, dunque, l'utilizzo di: (i) un sistema di gestione di database (DBMS), che contiene e permette di manipolare i dati geografici; (ii) una libreria dei potenziali modelli che possono essere utilizzati per prevedere i possibili esiti delle decisioni (MBMS); (iii) un'interfaccia grafica (*Graphical User Interface* - GUI) per supportare gli utenti nella fase di interrogazione e nell'interpretazione dei risultati.

Si rimanda a Portoghesi et al. (2014) per un'ampia illustrazione e analisi dei DSS sviluppati in Italia. Un esempio di SDSS per la valutazione delle potenzialità di produzione di legname a fini energetici è BIOMASFOR, sviluppato da Sacchelli et al. (2013) e disponibile in versione *open source*. Un altro esempio di DSS per la valutazione della funzione idrogeologica del bosco su singoli elementi geografici (coordinate puntuali, compartimenti assestamentali) è stato sviluppato da Scrinzi et al. (2006) e implementato in una applicazione *online* liberamente accessibile (http://www.targetstars.org/ricerca_ex_isafa/riselvitatia43/index.htm). Nel progetto Alforlab (PON03PE 00024 1 - <http://www.alforlab.it>) è attualmente in fase di sviluppo il SDSS denominato CFOR che ha le finalità di integrare informazioni da inventariazione continua di variabili dendrometriche (volume, biomassa) e la mappatura delle risorse forestali con strati informativi che permettono di definire modelli di gestione forestale ottimali per favorire la multifunzionalità, includendo moduli per estrarre informazioni economiche, ecologiche, selvicolturali. Anche il

modello INVEST, strumento nato per valutare i servizi ecosistemici in Nord-America (Tallis et al. 2013), è impiegato per la gestione di patrimoni forestali nel nostro Paese (Bottalico et al. 2016). In fine si segnala il DSS "Castadiva" sviluppato da CREA e implementato nelle procedure della pianificazione forestale aziendale trentina (Scrini & Clementel 2015a), in grado di fornire stime di volumi legnosi e incrementi per popolamenti forestali omogenei inserendo indicazioni e valutazioni di larga massima sul tipo di popolamento.

Gestione di attività sito-specifiche

Coltivazione di piantagioni da legno

Le tecniche di precisione applicate alla piantagioni da legno sono simili a quelle sito-specifiche che nell'agricoltura di precisione sono focalizzate su approcci a rateo variabile (VRT) per consentire l'ottimizzazione della quantità di immissioni agronomiche (concimi, diserbanti, acqua da irrigazione) in funzione della variabilità spaziale delle colture. I moderni trattori agricoli vengono integrati con sensoristiche per la mappatura, sistemi elettro-meccanici a rateo variabile (nei trattori agricoli, barre con controllo di sezioni), sistemi di conduzione dei mezzi assistita o automatica, collegati tramite ISOBUS ad un unico terminale che gestisce con un SDSS le operazioni culturali.

In ambito di piantagioni da legno, si utilizzano anche informazioni geospazializzate (GNSS e GIS) per favorire l'ottimizzazione delle attività di impianto; queste tecniche sono diffuse soprattutto in piantagio-

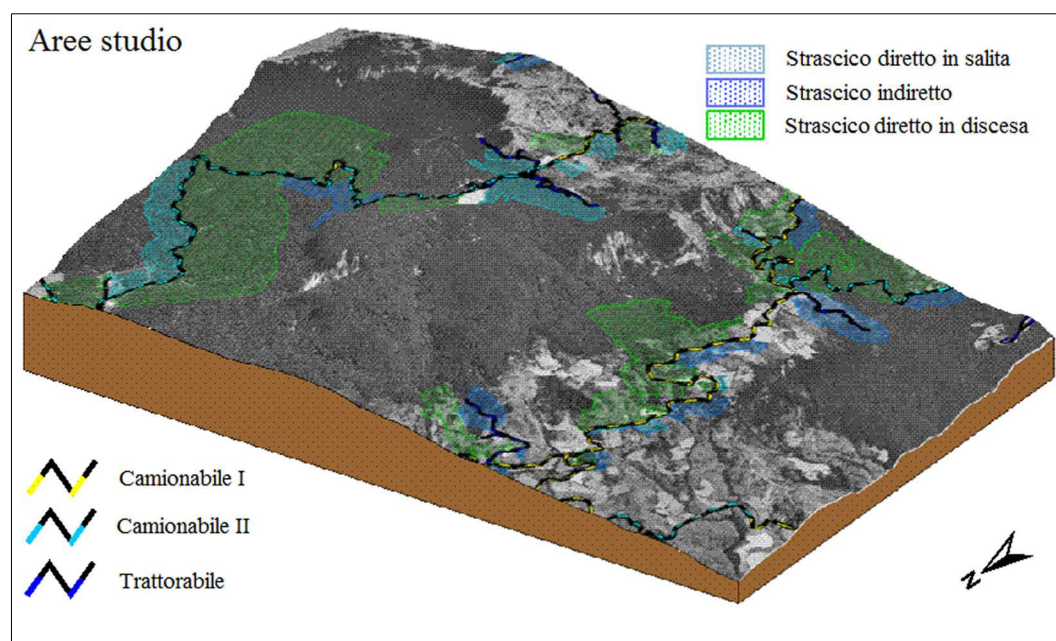
ni di specie arboree con legno di pregio (Rosell & Sanz 2012) e in pioppicoltura.

Utilizzazioni forestali

Uno specifico campo di applicazione della selvicoltura di precisione è la cosiddetta *Precision Forest Harvesting*. Apposite strumentazioni permettono di raccogliere informazioni dalle macchine abbattitrici/allestiatrici sulla specie, qualità e assortimento legnoso, che possono essere utilizzate per effettuare operazioni in tempo reale (pezzatura) o in post-processamento (valutazione del prezzo di macchiatico). Tali misure possono essere integrate ad informazioni rilevate a terra o disponibili da dataset georeferiti (carte della viabilità e del volume legnoso) processate da un terminale SDSS equipaggiato sulle macchine, che permette di effettuare valutazioni sulle caratteristiche dell'intervento (intensità dei diradamenti, densità dei fusti arborei, linee di percorrenza). Peraltro, a differenza delle operazioni agricole, la precisione dei sistemi GNSS sotto copertura forestale è ancora spesso insufficiente per una completa automatizzazione di alcune procedure quali, ad esempio, conduzione automatica dei mezzi su linee di percorrenza autodefinite (Fig. 8, Fig. 9).

La disponibilità di cartografie digitali è importante per l'esecuzione dei lavori forestali. Con un approccio di precisione, gli operatori possono visualizzare in tempo reale, sul *display* del terminale della cabina, diverse informazioni quali aree ad accesso limitato (per restrizioni di carattere ambientale), aree di deflusso o ristagno idrico, mappe particellari, viabilità principale e secondaria, interventi previsti e alberi

Fig. 8 - Delimitazione delle fasce boscate servite in relazione all'utilizzo del trattore e del verricello nello strascico diretto e indiretto.



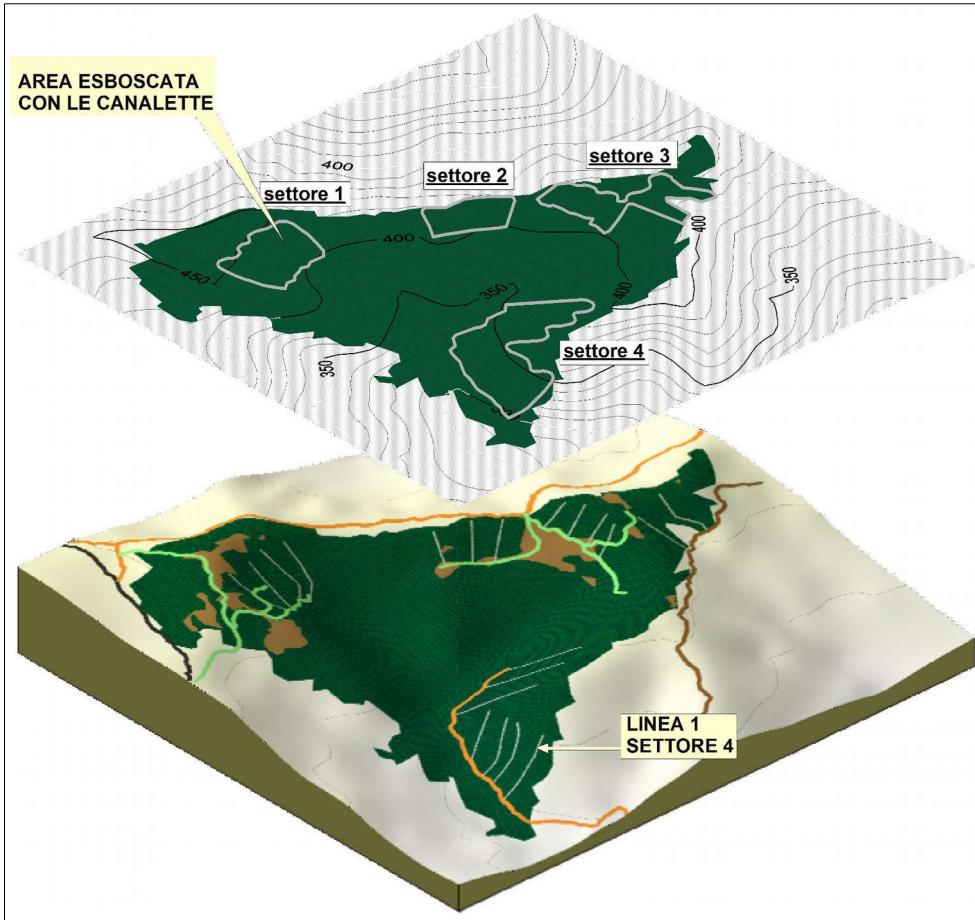


Fig. 9 - Visione tridimensionale delle aree esboscabili con risine e relative linee di posizionamento.

martellati. In generale, l'utilizzo di cartografie digitali permette di ottimizzare molte operazioni tramite

pianificazioni *a priori* (analisi della viabilità forestale e dei percorsi tramite applicativi GIS), oppure per in-



Fig. 10 - Harvester in fase di lavoro su pioppeto.

Fig. 11 - Computer di bordo equipaggiato su *harvester*.



tegrare dati acquisiti tramite sensori montati sulle macchine che permettono di monitorare i tempi di lavoro ed effettuare analisi delle prestazioni dei cantieri di raccolta (McDonald & Fulton 2005, Pari & Civitarese 2010, Nitami et al. 2011, Gallo & Mazzetto 2013) o dei percorsi dei vettori durante il trasporto del legname e lo studio dell'impatto del traffico su determinati siti (Sikanen et al. 2005, Devlin & McDonnell 2009, Simwanda et al. 2011). L'uso di informazioni georiferite è ovviamente più efficiente dei tradizionali metodi di misura a terra non georiferiti (Berti et al. 1989, Spinelli & Kofman 1996).

Molto spesso i sensori equipaggiati nelle macchine vengono utilizzati per decidere in tempo reale e automatizzare le procedure di abbattimento, pezzatura e allestimento. Sensori sulle teste abbattitrici (Fig. 10), sono in grado di misurare e registrare il diametro dei fusti ad intervalli di 10 cm, registrandone il profilo (Fig. 11) e ripartendo direttamente negli assortimenti richiesti il materiale abbattuto. Ulteriori sensoristiche permettono di effettuare valutazioni sulla qualità del legname. Queste informazioni sono anche utili come input per i SDSS per effettuare stime di redditività delle utilizzazioni. Ulteriori sensori integrati con GPS sono in grado di rilevare, in automatico, i punti di prelievo e accumulo della biomassa realizzando delle utili mappe di movimentazione (McDonald et al. 2000). Le medesime macchine possono essere equipaggiate con sistemi di acquisizione dati in grado di misurare le caratteristiche degli alberi lasciati in piedi usando tecniche MLS (*multisource*

information) o 2.5D scanner (Miettinen et al. 2007, Öhman et al. 2008).

Tracciabilità dei prodotti legnosi

La tracciabilità del legname con tecnologie di vario tipo (Barcode, QRcode, RFID) ha avuto un recente incremento di impiego in Italia per il monitoraggio della filiera foresta-legno. In Tab. 2 sono sintetizzate le tecniche/tecnologie in uso o in fase sperimentale per la marcatura (*tag*) del legname. Tra le tecnologie disponibili, l'identificazione in radiofrequenza (RFID), applicata con successo in vari settori, sembra la più promettente in ambito forestale.

I sistemi RFID consentono, una volta apposti sui singoli alberi all'atto della martellata e/o sui singoli topi a seguito del taglio, l'identificazione rapida, georiferita e ad alto contenuto informativo dei singoli elementi. Essi prevedono l'impiego di *tag* attivi (il cui utilizzo pratico è svantaggiato dal maggiore costo) e passivi, resistenti all'usura e agli estremi di variazioni climatiche (Picchi et al. 2015) abbinati a lettori portatili (*Reader* e antenne standard) i quali possono essere utilizzati su alberi in piedi (in sede di inventariazione forestale) o sulle diverse tipologie di assortimenti forestali (tronchi, paleria, legname da falegnameria, legna da ardere e cippato - Costa et al. 2015).

Tra i *tags* disponibili in commercio, i più idonei all'impiego nel settore forestale sono quelli a forma di chiodo (*nail tag*) o di clip. Il *nail tag* risulta la scelta migliore sia per le modalità di inserimento (con mar-

Tab. 2 - Modalità di marcatura del legname.

Metodo	Caratteristiche	Costi	Formazione operatori	Archiviazione dati	Stato
Martello forestale	Marcatura con simboli o numeri impressi nel legno	trascurabili	no	Trascrizione manuale su supporto cartaceo o digitale	In uso
Uso di vernici	Marcatura tronchi con vernici colorate, con simboli o codici numerici scritti a mano	trascurabili	no	Trascrizione manuale su supporto cartaceo o digitale	In uso
Etichette numerate in plastica (<i>plastic tag</i>)	Etichette con codice numerico in serie inserite con sistema a percussione	0.02-0.08 €/tag	no	Trascrizione manuale su supporto cartaceo o digitale	In uso
Barcode QRcode	Codice a barre 1 o 2 D riportato su supporti di carta plastificata o metallo.	0.05-0.2 €/tag	sì	Automatica tramite lettore elettronico o <i>smartphone</i> (sola lettura)	In uso
RFID (passivi)	Tag con tecnologia RFID montati su supporti diversi (chiodi, etichette, cunei) leggibili fino a 1 m di distanza.	da 1 €/tag (in calo)	sì	Automatica tramite lettore elettronico (lettura/scrittura)	In fase di test
Micro traccianti	Microscopiche particelle contenenti un microchip polimerico. Si aggiungono alle vernici o ai supporti plastici.	0.03-0.1 €/supporto	sì	Trascrizione manuale su supporto cartaceo o digitale	In fase di test



Fig. 12 - Diagramma di flusso della tracciabilità del legno mediante le tecnologie RFID sviluppate nell'ambito del progetto PON Alforlab.

tello apposito), che per il basso rischio di perdita o danneggiamento, una volta che è stato fissato all'interno del tronco. Per valutare la fattibilità tecnica ed economica di un sistema di tracciabilità del legname tramite utilizzo di RFID, la Regione Friuli, ha applicato 700 *tags* (500 a chiodo, 100 a etichetta e 100 a forma di disco) ad alberi di abete rosso e faggio destinati in parte al settore dell'edilizia e in parte alla combustione; lo studio ha seguito i *tags* dall'inserimento, all'avvallamento, al carico sull'autocarro, fino allo scarico nel piazzale di segheria; sono stati persi per distacco o danneggiamento 8.5% dei *tags* sul legname da opera e il 4.3% dei *tags* applicati sulla legna da ardere; i *nail tags* sono risultati i più sicuri nelle fasi di avvallamento e trasporto, ma devono essere inseriti con attenzione (circa il 5% dei *nail tags* è stato danneggiato durante l'inserimento).

Nell'ambito del progetto PON Alforlab è in corso di sperimentazione un sistema integrato di tracciabilità del legno (dall'albero in piedi alla segheria) basato su tag *ad hoc* passivi e antenne basate su tecnologie *open source* come Arduino (Fig. 12).

Prospettive

In Italia, il settore forestale si trova ad affrontare problemi che, in ampia misura, sono connessi alla necessità di valorizzare in maniera più efficace le potenzialità e le opportunità che il patrimonio forestale è in grado di garantire in termini di sviluppo, occupazione, salvaguardia ambientale e presidio del territorio. In questa prospettiva, la ricerca italiana in tema di *Precision Forestry* sta raccogliendo la sfida di tradurre i risultati degli avanzamenti tecnologici in applicazioni operative, anche se, in vari casi, il settore forestale sembra ancora impreparato per una diffusa ricettività delle innovazioni sperimentate. D'altro canto, l'eterogeneità delle risorse forestali, del territorio e degli attori rappresenta un elemento che concorre a rendere problematico il passaggio a standard operativi generalizzati.

Alla luce di quanto prefigurato nel Piano di Settore per la Filiera Foresta Legno e nel Piano strategico per l'innovazione e la ricerca nel settore agricolo alimentare e forestale (PSIR, 2014-2020), per una efficace mobilitazione delle risorse forestali e la tracciabilità dei prodotti ritraibili occorre poter ottimizzare l'uso di tutte le opportunità offerte dalle nuove tecnologie, con particolare riferimento a quelle geomatiche e ICT (SRIA 2013, Joint Research Centre 2014, European Commission 2016). Di fatto, l'impiego delle tecnologie geomatiche e ICT rappresentano strumenti che possono condurre a una significativa revisione

delle regole della gestione delle risorse legnose ritraibili dai boschi e dalle piantagioni forestali, consentendo di ridurre i costi e rendere più accurate le varie fasi di lavoro connesse alla filiera foresta-legno. Secondo Holopainen et al. (2014), in condizioni idonee, i vantaggi economici riconducibili alla *Precision Forestry* si attestano tra il 15% e il 20% di incremento di redditività, rispetto a interventi di tipo tradizionale. L'integrazione di tecnologie consolidate (a esempio, telerilevamento, sistemi informativi geografici) con quelle di più recente sviluppo (a esempio, sistemi aerei a pilotaggio remoto, nuova sensoristica, *web-Gis*, *App*, realtà aumentata e virtuale) apre, dunque, concrete prospettive di valorizzazione della filiera foresta-legno.

L'opportunità di definire ed inserire, in un più ampio e completo processo organizzativo, parametri quali a esempio la posizione, la quantità, la qualità e le dimensioni del legname favorisce il soddisfacimento delle richieste di mercato, la valorizzazione del prodotto, la tracciabilità e la certificazione, oltre a contribuire alla minimizzazione degli impatti e alla salvaguardia della funzionalità ecologica dei boschi e delle piantagioni da legno. Un approccio integrato e interconnesso offre anche il vantaggio di poter variare gli interventi programmati in corso d'opera attraverso comunicazioni dirette tra proprietario/acquirente e operatori in bosco, favorendo la riduzione dei tempi necessari per la raccolta, lo stoccaggio ed il trasporto.

A livello concettuale, le prospettive in questo contesto promuovono la disponibilità distribuita e interattiva dell'informazione (*web-* e *mobile-* GIS) e una caratterizzazione quali-quantitativa delle risorse forestali (*smart forest*) che supera l'informazione testuale e cartografica su area minima rappresentata (approccio attuale della pianificazione forestale) e adottano quella più innovativa "in continuo" (ad alta risoluzione spaziale) su ogni singolo punto (non pre-stabilito) del dominio territoriale considerato.

A livello tecnico, le principali opportunità di sviluppo sono attualmente legate a:

- miglioramento dell'accuratezza degli strati informativi disponibili, grazie ai progressi nelle tecnologie di rilevamento e posizionamento; in particolare, le prospettive più promettenti riguardano: (i) l'avanzamento nella tecnologia SAPR che procede a un ritmo elevato da far presupporre che questi sistemi rappresentino la frontiera di molte applicazioni operative; (ii) l'avanzamento nei sistemi di scansione laser da terra (TLS), che stanno ampliando significativamente le possibilità di supporto

delle principali misurazioni dendrometriche di campagna; (iii) l'accoppiamento funzionale dei sistemi LiDAR da piattaforma aerea (o SAPR) con TLS per il monitoraggio e l'inventariazione delle risorse forestali;

- possibilità di integrare tra loro tecnologie esistenti tramite le tecnologie di comunicazione e scambio dati in tempo reale (*WiFi*, *bluetooth*, *RFID*, ecc.);
- impiego di macchine forestali più efficienti e tendenti a produrre un minore impatto per l'ambiente (*Reduction Impact Logging*) e, in particolare, un ulteriore sviluppo di sistemi che permettano di connettere tutte le macchine impiegate in un determinato cantiere forestale, come già osservabile nello standard ISOBUS delle trattrici agricole, in modo da ottimizzare le *performance* e la gestione dell'intera cantieristica, minimizzando gli spostamenti;
- utilizzo a livello sempre più avanzato delle potenzialità analitiche fornite dai *BigData* e loro maggiore condivisione con l'utente pubblico.

Si evidenzia, peraltro, che l'avanzamento della ricerca in questo settore ha finora fatto prevalentemente riferimento a esperienze nord-americane e nord-europee, spesso non direttamente trasferibili nella realtà forestale italiana, caratterizzata da peculiari condizioni ambientali, colturali e socioeconomiche, che nella gran parte dei casi richiedono specificità di approcci, sia sotto il profilo metodologico che tecnologico.

In particolare, gli aspetti da considerare per la diffusione della *Precision Forestry* in Italia sono:

- necessità di realizzare studi pilota per la dimostrazione dei benefici potenziali come esempi idonei alla sensibilizzazione dei proprietari forestali, dando particolare rilievo alla scalarità e flessibilità delle applicazioni di precisione, caratteristiche che ne favorirebbero l'uso in una ampia gamma aziendale per tipologia produttiva e dimensioni;
- standardizzazione di dati promuovendo ulteriormente l'utilizzo di dati ottenuti tramite rigorosi processi e corredati da metadati (a esempio, strati informativi delle mappe forestali), e degli strumenti (a esempio, calibrazione degli strumenti di misura potenzialmente equipaggiabili sulle macchine forestali);
- miglioramento del segnale GNSS sotto copertura forestale; essendo i GNSS il pilastro delle tecnologie di precisione in ambito forestale, la carente ricezione del segnale sotto copertura rappresenta, in determinate condizioni, un aspetto ancora particolarmente critico;
- *open access* e *big data*: lo sviluppo delle tecnologie

geomatiche e ICT ha favorito la disponibilità di una mole ingente di dati in capo alle amministrazioni, che devono essere "aperti" e soprattutto "leggibili" da parte di cittadini e imprese. L'Agenda per l'Italia Digitale ha posto i dati territoriali al centro del processo per il libero accesso ai dati della pubblica amministrazione in quanto "costituiscono l'elemento conoscitivo di base per tutte le politiche per la gestione del territorio" (AGID 2014). In prospettiva, risulta interessante la realizzazione di siti web regionali o locali di facile visualizzazione ed interrogazione, dotati di SDSS basati su modelli di simulazione dei parametri specifici per la gestione forestale sito-specifica delle principali tipologie colturali presenti su un territorio, quali quello in corso di sviluppo nell'ambito del progetto PON AmbiTecLegno/Alforlab;

- trasferimento dell'innovazione e creazione di un *Knowledge Hub*: il coinvolgimento degli attori forestali rappresenta un punto chiave per il trasferimento delle innovazioni geomatiche e ICT alla realtà operativa; è necessario valutare accuratamente l'effettiva trasferibilità dell'innovazione tecnologica, il cui utilizzo talora si attesta ancora al livello della ricerca e sperimentazione; all'uopo, è utile la creazione di un *Knowledge Hub* che sia un punto di riferimento nazionale per lo sviluppo tecnologico della *Precision Forestry*;
- sostegno alle attività di innovazione pubblico-private, favorendo una integrazione tra ricerca e imprenditoria (*spin-off*, acceleratori di impresa) e irrobustendo l'incremento di *know-how* all'interno del sistema produttivo, anche con il consolidamento di nuove figure operative all'interno delle imprese in grado di supportarne i processi di crescita tecnologica;
- sviluppo dei SDSS a supporto della pianificazione e gestione forestale partecipata; in questo contesto, un aspetto strategico consiste nell'affrontare i processi decisionali in maniera collegiale e in chiave multi-obiettivo, in considerazione della multifunzionalità delle foreste nella capacità di fornire beni e utilità, nell'ambito dei quali i SDSS possono svolgere un ruolo fondamentale per la definizione operativa degli scenari connessi a scelte decisionali alternative;
- aspetti culturali e *governance* del settore: l'introduzione di tecnologie di precisione richiede un cambio di mentalità, in un settore come quello forestale radicato nella tradizione e non sempre aperto alla innovazione tecnologica. È necessario pertanto investire su specifiche azioni di sensibilizzazione,

promuovendo il dialogo con le realtà innovative nazionali e internazionali e una adeguata strategia di *policy* e *governance* del settore mirata all'aggiornamento e miglioramento della professionalità da parte degli operatori.

- la formazione di sistema gioca un ruolo chiave, sia nel favorire l'aggregazione e la cooperazione tra i diversi soggetti interessati, sia come strumento conoscitivo per il corretto sviluppo applicativo delle migliori tecnologie di *Precision Forestry*; è necessario investire su opportune azioni di formazione sia del personale delle amministrazioni pubbliche coinvolto nella gestione forestale, sia sulla divulgazione degli avanzamenti tecnologici agli imprenditori e liberi professionisti (eventi formativi promossi presso Associazioni di categoria, Ordini professionali, ecc.); sotto il profilo tecnico, le competenze formative più pressanti in questo settore riguardano: (i) a livello di operatori: impiego di GNSS e utilizzo degli strumenti di misura equipaggiabili sulle macchine forestali; (ii) a livello di tecnici e professionisti: impiego interattivo di *web*, *mobile* GIS, SDSS e sistemi RFID.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato dal progetto "ALFor-Lab" (PON03PE_00024_1) cofinanziato dal Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività (PON R&C) 2007-2013, attraverso il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) e risorse nazionali (Fondo di Rotazione [FDR] - Piano di Azione e Coesione [PAC] MIUR).

Bibliografia

AGID (2014). Obiettivi di accessibilità per l'anno 2014. Agenzia per l'Italia Digitale. [online] URL: http://www.agid.gov.it/sites/default/files/documentazione/obiettivi_accessibilita_agid_2014.pdf

Alivernini A, Barbati A, Fares S, Corona P (2016). Unmasking forest borderlines by an automatic delineation based on airborne laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 37: 3568-3583. - doi: [10.1080/01431161.2016.1201225](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1201225)

Berti S, Piegai F, Verani S (1989). Manuale d'istruzione per il rilievo dei tempi di lavoro e delle produttività nei lavori forestali. Quaderni dell'Istituto di Tecnologia ed Assestamento Forestale, Università degli Studi di Firenze.

Bottai L, Montagni A, Maselli F (2008). Il telerilevamento per il monitoraggio degli effetti degli incendi forestali. *Rivista italiana di Telerilevamento* 40: 75-87. [online] URL: [http://server-geolab.agr.unifi.it/public/completed/2008_RIT_VOL40\(1\)_075_087_Bottai_et_al.pdf](http://server-geolab.agr.unifi.it/public/completed/2008_RIT_VOL40(1)_075_087_Bottai_et_al.pdf)

Bottalico F, Pesola L, Vizzarri M, Antonello L, Barbati A, Chirici G, Corona P, Cullotta S, Garfi V, Giannico V, Laforzezza R, Lombardi F, Marchetti M, Nocentini S, Riccioli F, Travaglini D, Sallustio L (2016). Modeling the influence of alternative forest management scenarios on wood production and carbon storage: a case study in the Mediterranean region. *Environmental Research* 144: 72-87. - doi: [10.1016/j.envres.2015.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.10.025)

Bruce Bare B (2003). Opening remarks and welcome to the First International Precision Forestry Symposium. In: "Proceeding of the Second International Precision Forestry Symposium". University of Washington, Seattle (WA), 15-17 June 2003, pp. 1-2.

Bruce Bare B, Dean A (2001). Opening remarks and welcome to the First International Precision forestry Symposium. In: Proceeding of the "First International Precision Forestry Symposium". University of Washington, Seattle (WA, USA) 17-20 June 2001. [online] URL: http://www.cfr.washington.edu/research.pfc/pubs/pdf/pfc_symposium1.pdf#page=9

Castaldi F, Castrignanò A, Casa R (2016). A data fusion and spatial data analysis approach for the estimation of wheat grain nitrogen uptake from satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 37: 4317-4336. - doi: [10.1080/01431161.2016.1212423](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1212423)

Cevenini L (2012). La diagnostica sonica nell'arboricoltura ornamentale. PhD thesis, Università di Bologna, Italia, pp. 33.

Chianucci F (2013). Canopy properties estimation in deciduous forests with digital photography. PhD Thesis, Università degli studi della Tuscia, Viterbo, pp. 80. [online] URL: <http://dspace.unitus.it/handle/2067/2709>

Chianucci F (2016). A note on estimating canopy cover from digital cover and hemispherical photography. *Silva Fennica* 50. [online] URL: <http://www.silvafennica.fi/article/1518>

Chianucci F, Cutini A (2013). Estimation of canopy properties in deciduous forests with digital hemispherical and cover photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 168: 130-139. - doi: [10.1016/j.agrformet.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.002)

Chianucci F, Disperati L, Guzzi D, Bianchini D, Nardino V, Lastri C, Rindinella A, Corona P (2016a). Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 47: 60-68. - doi: [10.1016/j.jag.2015.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005)

Chianucci F, Minari E, Fardusi MJ, Merlini P, Cutini A, Corona P, Mason F (2016b). Relationships between overstory and understory structure and diversity in semi-natural mixed floodplain forests at Bosco Fontana (Italy). *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9: 919-926. - doi: [10.3832/ifor1789-009](https://doi.org/10.3832/ifor1789-009)

- Chiavetta U, Puletti N, Pelleri F, Miozzo M (2014). LiDAR e pianificazione forestale: la mappatura dei volumi legnosi del Pratomagno casertinese. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 207: 15-18.
- Chirici G (2016). FRESH LIFE: droni e dati LiDAR a supporto della gestione sostenibile. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 218: 27-29.
- Clementel F, Colle G, Farruggia C, Floris A, Scrinzi G, Torresan C (2012). Estimating forest timber volume by means of "low-cost" LiDAR data. *Italian Journal of Remote Sensing* 44: 125-140. - doi: [10.5721/ItJRS201244110](https://doi.org/10.5721/ItJRS201244110)
- Colle G (2015). SIFTec: un sistema informatico per aggiornare e organizzare stabilmente la conoscenza del patrimonio forestale della Tenuta di Castelporziano. Web site. [online] URL: http://drive.google.com/file/d/0B48vukXz_i6AQms1enBYN2hDT3M/view
- Colle G, Clementel F, Floris A, Marzullo L, Scrinzi G (2010). Strumenti evoluti di mobile GIS a supporto del monitoraggio e della pianificazione forestale. *Forest@* 7: 148-157. - doi: [10.3832/efor0622-007](https://doi.org/10.3832/efor0622-007)
- Colle G, Floris A, Scrinzi G, Clementel F (2014). Futmon-mob: una piattaforma informatica di mobile GIS e web-database per i rilievi fito-sanitari nel progetto FutMon. *Forest@* 11: 5-51. - doi: [10.3832/efor1023-001](https://doi.org/10.3832/efor1023-001)
- Colle G, Floris A, Scrinzi G, Marzullo L, Piccoli D, Pompei E, Scrinzi G (2009). CFS-PARTI: software di mobileGIS ad "architettura flessibile" per la raccolta di dati ambientali georeferenziati. In: *Atti della "13ª Conferenza Nazionale ASITA"*. Bari, 1-4 Dic 2009, pp. 735-741.
- Corona P (2010). Integration of forest mapping and inventory to support forest management. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 3: 59-64. - doi: [10.3832/ifor0531-003](https://doi.org/10.3832/ifor0531-003)
- Corona P, Ascoli D, Barbati A, Bovio G, Colangelo G, Elia M, Garfi V, Iovino F, Laforteza R, Leone V, Lovreglio R, Marchetti M, Marchi E, Menguzzato G, Nocentini S, Picchio R, Portoghesi L, Puletti N, Sanesi G, Chianucci F (2015). Integrated forest management to prevent wildfires under Mediterranean environments. *Annals of Silvicultural Research* 39: 1-22. - doi: [10.12899/ASR-946](https://doi.org/10.12899/ASR-946)
- Corona P, Cartisano R, Salvati R, Chirici G, Floris A, Di Martino P, Marchetti M, Scrinzi G, Clementel F, Travaglini D, Torresan C (2012). Airborne Laser Scanning to support forest resource management under alpine, temperate and Mediterranean environments in Italy. *European Journal of Remote Sensing* 45: 27-37.
- Corona P, Fattorini L (2008). Area-based LiDAR-assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 2911-2916. - doi: [10.1139/X08-122](https://doi.org/10.1139/X08-122)
- Corona P, Fattorini L, Franceschi S, Scrinzi G, Torresan C (2014). Estimation of standing wood volume in forest compartments by exploiting airborne laser scanning information: model-based, design-based, and hybrid perspectives. *Canadian Journal of Forest Research* 44: 1303-1311. - doi: [10.1139/cjfr-2014-0203](https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0203)
- Costa C, Loy A, Cataudella S, Davis D, Scardi M (2006). Extracting fish size using dual underwater cameras. *Aquacultural Engineering* 35 (3): 218-227. - doi: [10.1016/j.aquaeng.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.02.003)
- Costa C, Menesatti P, Scrinzi G, Colle G, Bezzi M, Pallottino F, Figorilli S, Antonucci F, Scarascia G (2015). From digital to print: RFID and QR-code integration in Calabria (southern Italy) wood chain logistics. Extended abstract presented at the "42nd International Research Conference of Iarigai". Helsinki (Finland) 6-9 Sep 2015, session 1A (Communication interfacing), pp. 1-5.
- Devlin G, McDonnell J (2009). Performance accuracy of real-time GPS asset tracking systems for timber haulage trucks travelling on both internal forest road and public road networks. *International Journal of Forest Engineering* 20 (1): 45-49. [online] URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14942119.2009.10702575>
- European Commission (2016). Designing the path: a strategic approach to EU agricultural research and innovation. Conference, 26-28 Jan 2016.
- Floris A, Clementel F, Colle C, Gubert F, Bertoldi L, De Lorenzi G (2012). Stima di volumi legnosi forestali con dati fotogrammetrici telerilevati da UAV su piccole superfici: un caso di studio in Trentino. In: *Atti della "16a Conferenza Nazionale ASITA"*. Fiera di Vicenza 6-9 nov 2012, pp. 681-688. [online] URL: <http://www.researchgate.net/publication/260042334>
- Floris A, Clementel F, Farruggia C, Scrinzi G (2010). Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio. *Rivista Italiana di Telerilevamento/Italian Journal of Remote Sensing* 42: 15-32. - doi: [10.5721/ItJRS20104232](https://doi.org/10.5721/ItJRS20104232)
- Gallo R, Mazzetto F (2013). A methodology study for the application of Precision Forestry approach in logging operation chains. In: "EFITA-WCCA-CIGR Conference - Sustainable Agriculture through ICT Innovation". Turin (Italy), 24-27 June 2013. [online] URL: <http://bia.unibz.it/handle/10863/684>
- Herrera PJ, Pajares G, Guijarro M, Ruz JJ, Cruz JM, Montes F (2009). A feature-based strategy for stereovision matching in sensors with fish-eye lenses for forest environments. *Sensors* 9 (12): 9468-9492. - doi: [10.3390/s91209468](https://doi.org/10.3390/s91209468)
- Holopainen M, Vastaranta M, Hyyppä J (2014). Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests* 5: 1682-1694. - doi: [10.3390/f5071682](https://doi.org/10.3390/f5071682)
- IFER (2007). Tool designed for computer aided field data collection. Field-Map technology. IFER, Monitor and mapping solutions Ltd, Czech Republic, pp. 26.
- INFC (2005). Linee generali del progetto per il secondo inventario forestale nazionale italiano *Inventario Nazionale*

- delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAF - Direzione Generale per le Risorse Forestali, Montane ed Idriche, Corpo forestale dello Stato, CRA-ISAF, Trento, pp. 57.
- Joint Research Centre (2014). Precision agriculture: an opportunity for EU-farmers - potential support with the CAP 2014-2020. Policy Department B, European Union, pp. 56.
- Kováčová P, Antalová M (2010). Precision forestry - definition and technologies. *Šumarski list* 134: 603-610. [online] URL: http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=94069&lang=en
- Laurin GV, Puletti N, Hawthorne W, Liesenberg V, Corona P, Papale D, Chen Q, Valentini R (2016). Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment* 176: 163-176. - doi: [10.1016/j.rse.2016.01.017](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.017)
- Lubello D, Cavalli R (2006). Ambiti applicativi della Precision Forestry. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 125: 11-16.
- McDonald TP, Fulton JP (2005). Automated time study of skidders using global positioning system data. *Computers and Electronics in Agriculture* 48: 19-37. - doi: [10.1016/j.compag.2005.01.004](https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.01.004)
- McDonald TP, Taylor SE, Rummer RB (2000). Deriving forest harvesting machine productivity from positional data. ASAE Technical Paper No. 00501, ASAE Annual International Meeting, USDA Forest Service, pp. 7. [online] URL: <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/2086>
- Menesatti P, Costa C, Antonucci F, Steri R, Pallottino F, Catillo G (2014). A low-cost stereovision system to estimate size and weight of live sheep. *Computers and Electronics in Agriculture* 103: 33-38. - doi: [10.1016/j.compag.2014.01.018](https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.01.018)
- Miettinen M, Ohman M, Visala A, Forsman P (2007). Simultaneous localization and mapping for forest harvesters. In: "IEEE International Conference on Robotics and Automation". Rome (Italy) 10-14 April 2007. [online] URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4209143/>
- MIPAAF (2012). Piano della filiera legno 2012-2014. Ministero delle Politiche Alimentari, Agricole e Forestali, Roma.
- MIPAAF (2013). Bioreport 2013: l'agricoltura biologica in Italia. Rete rurale nazionale 2007-2013, Ministero delle Politiche Alimentari, Agricole e Forestali, Roma.
- MIPAAF (2015). Piano strategico per l'Innovazione e la ricerca nel settore agricolo, alimentare e forestale 2014-2020. Ministero delle Politiche Alimentari, Agricole e Forestali, Roma.
- Moskal LM, Erdody T, Kato A, Richardson J, Zheng G, Briggs D (2009). LiDAR applications in precision forestry. In: Proceedings of "Silvilaser", pp. 154-163. [online] URL: <http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30843890/>
- Nagai S, Nasahara KN, Inoue T, Saitoh TM, Suzuki R (2016). Review: advances in in situ and satellite phenological observations in Japan. *International Journal of Biometeorology* 60 (4): 615-627. - doi: [10.1007/s00484-015-1053-3](https://doi.org/10.1007/s00484-015-1053-3)
- Nitami T, Soil S, Kataoka A, Mitsuyama T (2011). Tower Yarder operation in Japan and the performance analysis by GPS-based system. In: Proceeding of the "44th International Symposium on Forestry Mechanisation". Graz (Austria) 9-13 Oct 2011, pp. 6. [online] URL: http://www.formec.org/images/proceedings/2011/formec2011_paper_nitami_etal.pdf
- Öhman M, Miettinen M, Kannas K, Jutila J, Visala A, Forsman P (2008). Tree measurement and simultaneous localization and mapping system for forest harvesters. In: Proceeding of the "6th International Conference on Field and Service Robotics". Chamonix (France) 9-12 Jul 2008.
- Pallottino F, Steri R, Menesatti P, Antonucci F, Costa C, Figorilli S, Catillo G (2015). Comparison between manual and stereovision body traits measurements of Lipizzan horses. *Computers and electronics in agriculture* 118: 408-413. - doi: [10.1016/j.compag.2015.09.019](https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.019)
- Pari L, Civitarese V (2010). Un GPS per i cantieri di raccolta. Metodologia innovativa per il monitoraggio e la mappatura. In: *Innovazioni tecnologiche per le agroenergie. Sinergie tra ricerca e impresa*. Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi 168: 26-30.
- Pelosi F, Castaldi F, Casa R (2015). Operational unmanned aerial vehicle assisted post-emergence herbicide patch spraying in maize: a field study. *Precision Agriculture* 15: 159.
- Picchi G, Kühmaier M, Marques JDDD (2015). Survival test of RFID UHF tags in timber harvesting operations. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36 (2): 165-174. [online] URL: <http://hrcak.srce.hr/151777?lang=en>
- Pirotti F, Grigolato S, Lingua E, Sitzia T, Tarolli P (2012). Laser scanner applications in forest and environmental sciences. *Italian Journal of Remote Sensing* 44: 109-103. - doi: [10.5721/ItJRS20124419](https://doi.org/10.5721/ItJRS20124419)
- Pompei E, Clementel F, Colle G, Floris A, Galvagni D, Librandi I, Marzullo L, Piccoli D, Scrinzi G (2009). Sistema di valutazione e certificazione delle performance di precisione delle tecnologie di rilievo satellitare in dotazione al Corpo Forestale dello Stato in presenza di copertura forestale. In: *Atti della "13ª Conferenza Nazionale ASITA"*. Bari, 1-4 Dic 2009, pp. 1627-1632.
- Portoghesi L, Torresan C, De Meo I, Floris A, Scrinzi G (2014). Computer-based tools to support decisions in forest planning in Italy. In: "Computer-based tools for sup-

- porting forest management. The experience and the expertise world-wide" (Borges JG, Nordstrom EM, Garcia-Gonzalo J, Hujala T, Trasobares A eds). SLU, Sweden, pp. 227-250.
- Rosell JR, Sanz R (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture* 81: 124-141. - doi: [10.1016/j.compag.2011.09.007](https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007)
- Sacchelli S, Zambelli P, Zatelli P, Ciolli M (2013). Biomassfor: an open-source holistic model for the assessment of sustainable forest bioenergy. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 6: 285-293. - doi: [10.3832/ifer0897-006](https://doi.org/10.3832/ifer0897-006)
- Scrinzi G, Gregori E, Giannetti F, Galvagni D, Zorn G, Colle G, Andrenelli MC (2006). Un modello di valutazione della funzionalità protettiva del bosco per la pianificazione forestale: la componente stabilità dei versanti rispetto ai fenomeni franosi superficiali. *Forest@* 3 (1): 98-155. - doi: [10.3832/efor0349-0030098](https://doi.org/10.3832/efor0349-0030098)
- Scrinzi G, Clementel F, Colle G, Floris A, Galvagni D, Gecele S, Marzullo L (2008). Soluzioni statistico-matematiche, informatiche e tecnologie per la nuova pianificazione forestale aziendale trentina. In: *Atti del "III Congresso Nazionale di Selvicoltura"*. Taormina 15-18 ott 2008.
- Scrinzi G, Clementel F, Colle G, Farruggia C, Floris A, Torresan C (2011). L'inventario dendrometrico dei complessi assestamentali nella nuova pianificazione forestale aziendale trentina (NPFAT). Provincia Autonoma di Trento - Servizio Foreste e Fauna, Trento, pp. 101. [online] URL: http://www.foreste.provincia.tn.it/pubblicazioni/pub_index.htm
- Scrinzi G, Clementel F (2015a). CASTADIVA: un sistema software di supporto decisionale per la stima sintetica dei parametri dendrometrici di popolamento nella NPFAT. Provincia Autonoma di Trento - Servizio Foreste e Fauna, Trento, pp. 58. [online] URL: http://www.foreste.provincia.tn.it/pubblicazioni/pub_index.htm
- Scrinzi G, Clementel F (2015b). ELITE: un progetto innovativo per la descrizione, caratterizzazione e quantificazione ad alta risoluzione delle biomasse arboree della Foresta di Castelporziano. [online] URL: http://dl.dropboxusercontent.com/u/62432813/Presentazione_Elite_dicembre_2015_MATTM_Scrinzi.pdf
- Scrinzi G, Clementel F, Floris A (2015). Angle count sampling reliability as ground truth for area-based LiDAR applications in forest inventories. *Canadian Journal of Forestry Research* 45 (4): 506-514. - doi: [10.1139/cjfr-2014-0408](https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0408)
- Scrinzi G, Floris A, Clementel F, Turco R, Bernardini V, Greco S, Puletti N, Chianucci F, Corona P (2017). LiD-CAL: un sistema di modelli di stima attraverso dati LiDAR del volume e delle fitomasse per le principali formazioni forestali della Calabria. *Forest@* [in corso di stampa]
- Sikanen L, Asikainen A, Lehtikainen M (2005). Transport control of forest fuels by fleet manager, mobile terminals and GPS. *Biomass and Bioenergy* 28 (2): 183-191. - doi: [10.1016/j.biombioe.2004.08.011](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.011)
- Simwanda M, Wing MG, Sessions J (2011). Evaluating global positioning system accuracy for forest biomass transportation tracking within varying forest canopy. *Western Journal of Applied Forestry* 26 (4): 165-173. [online] URL: <http://www.ingentaconnect.com/content/saf/wjaf/2011/0000026/00000004/art00002>
- Spinelli R, Kofman P (1996). A review of short-rotation forestry harvesting in Europe. In: *Proceedings of the "1st Conference on the Short Rotation Woody Crops Operations Working Group"*, pp. 23-25.
- SRIA (2013). Strategic research and innovation agenda for 2020. Web site. [online] URL: http://www.forestplatform.org/files/SRA_revision/Renewed_SRA_for_2020.pdf
- Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Sharp R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Griffin R, Hamel P, Chaplin-Kramer R (2013). InVEST 2.6.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Taylor SE, Veal MW, Grift TE, McDonald TP, Corley FW (2002). Precision forestry: operational tactics for today and tomorrow. In: *Proceedings of the International Meeting of the "Council on Forest Engineering"*, vol. 23, pp. 6. [online] URL: <http://www.legal-ethics-courses.bece.auburn.edu/files/file169.pdf>
- Tomao A, Quatrini V, Agrimi M, Cartisano R, Mattioli W, Giulianielli D (2012). Applicazione della tecnologia Field-Map in selvicoltura urbana: sviluppo di GIS per l'inventario e la gestione dei parchi storici. In: *Atti della "16^a Conferenza Nazionale ASITA"*. Fiera di Vicenza 6-9 nov 2012, pp. 1289-1294. [online] URL: <http://www.researchgate.net/publication/235999968>
- Torresan C, Clementel F, Floris A, Scrinzi G (2012). LiDAR e stima del volume legnoso - un confronto col cavallettamento totale a livello particellare. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 181: 28-32.
- Ziesak M (2006). Precision Forestry - An overview on the current status of Precision Forestry. A literature review. In: *"Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests"*. IUFRO Precision Forestry Conference Technical University, Munich, Germany, 5-10 March 2006.

Materiale Supplementare

Fig. S1 - Field-Map: a sinistra il *notebook*, come appare una volta montato sul treppiede, a destra l'equipaggiamento completo (IFER 2007).

Fig. S2 - Esempio di mappatura Field-Map degli alberi di un parco urbano. A destra, il database informativo associato al poligono di proiezione reale a terra della chioma di un esemplare di leccio (Fonte: Tomao et al. 2012).

Fig. S3 - Esempi di tre tecniche fotografiche digitali per la stima degli attributi della copertura. (Chianucci 2013, modificato).

Fig. S4 - Esempio di rilievo tomografico sonico.

Fig. S5 - Esempio di grafico *lines* e tomogramma di un'analisi effettuata con 12 sensori (Fonte: Cevenini 2012)

Link: [Corona_2285@suppl001.pdf](#)