

Stato dell'arte delle applicazioni laser scanning aereo a supporto della gestione delle risorse forestali in Italia

Piermaria Corona (*), Marco Marchetti (**), Gianfranco Scrinzi (***), Chiara Torresan (****)

(*) Dipartimento per la Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali
Università degli Studi della Tuscia, Via S. Camillo de Lellis s.n.c., I-01100 Viterbo, Tel. +39 0761 357425
Fax +39 0761 357389, email: piermaria.corona@unitus.it

(**) EcoGeoFor, Laboratorio di Ecologia e Geomatica Forestale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie
per l'Ambiente ed il Territorio, Università del Molise, Contrada Fonte Lappone s.n.c., I-86090 Pesche (IS)
Tel. +39 0874 404113, Fax +39 0874 404123, email: marchettimarco@unimol.it

(***) CRA-Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio
e la Pianificazione Forestale, piazza Nicolini, 6, loc. Villazzano, I-38123 Trento, Tel. +39 0461 381117
Fax +39 0461 381131, email: gianfranco.scrinzi@entecra.it

(****) Dottoranda di ricerca in Ecologia Forestale, Università degli Studi della Tuscia, c/o CRA-Consiglio
per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e Pianificazione Forestale,
piazza Nicolini, 6, loc. Villazzano, I-38123 Trento, Tel. +39 0461 381135, Fax +39 0461 381131
email: chiara.torresan@entecra.it

Riassunto

I dati da laser scanning aereo (ALS) vengono sempre più proposti per la descrizione della struttura dei popolamenti forestali nei suoi aspetti della distribuzione verticale e orizzontale e di copertura delle chiome. Al contempo varie procedure sono state proposte per la stima del volume e della biomassa legnosa dei popolamenti forestali a partire dalla relazione tra valori di queste grandezze misurati in aree campione a terra e valori ipsometrici ottenuti dai ritorni ALS. La conoscenza sulle potenzialità dei dati ALS è però ancora relativamente modesta nell'ambiente operativo italiano. L'utilizzo dei dati ALS è stato finora finalizzato prevalentemente alla stratificazione dei popolamenti boschivi, all'identificazione di tipi forestali e colturali e alla stima delle masse legnose a scala locale. Rimangono ancora quasi inesplorate le possibilità di integrazione dei dati ALS nell'ambito di inventari forestali di ampie superfici e per la misurazione di fenomeni emergenti quali i boschi di neoformazione, le variazioni della *timberline*, la stima delle quantità di combustibile nelle formazioni forestali e preforestali. Anche l'integrazione di dati multispettrali e dati ALS in processi tesi all'inventariazione contestuale sia qualitativa che quantitativa delle risorse forestali rappresenta tematica di interesse così come, probabilmente in un futuro meno immediato, l'analisi della correlazione tra variazioni ipsometriche desunte da dati ALS e fattori quali l'incremento corrente di volume, il tasso di prelievo legnoso, i fenomeni di degradazione strutturale dei popolamenti forestali.

Abstract

State of the art of airborne laser scanning to support the management of forest resources in Italy

The information provided by airborne laser scanning (ALS) is increasingly being proposed for the structural description and assessment of forest stands, distinctively as concerns vertical and horizontal components and the crown coverage. At the same time, various procedures have been proposed for supporting the estimation of forest wood volume and biomass exploiting their relationship with the height data obtained by ALS return values. However, in Italy the awareness and the knowledge of the potential of ALS data to support forest management are still relatively modest. The attempts to use ALS data have been mainly focused on the stratification of forest

stands, the identification of forest types and the local estimation of forest wood volume. On the contrary, potential for ALS data exploitation concern also: their integration in forest inventories on large territories; the measurement of emergent phenomena such as woodlots of neo-formation, timberline dynamic, the estimation of fuel load in forest and pre-forest stands. The integration of multispectral and ALS data for simultaneous qualitative and quantitative inventory of forest resources is of interest too, as well as the analysis of the correlation between stand height changes and factors such as current annual increment of wood volume, harvesting rates and stand structural degradation.

1. Introduzione

La tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging* o *Laser Imaging Detection And Ranging*) attua la misura di distanze impiegando luce Laser (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) emessa da una sorgente e riflessa dagli oggetti territoriali. Nel settore forestale viene principalmente impiegata la scansione laser da piattaforma aerea (*Airborne Laser Scanning* o ALS). Circa la disponibilità di dati LiDAR utilizzabili nel settore forestale, occorre distinguere tra applicazioni sperimentali di ricerca, che in genere vengono attuate con progetti dedicati di scansione su scenari limitati (con idonei parametri di ripresa), e impieghi ai fini forestali di dati che non provengono da voli effettuati con tali scopi specifici: Clementel et al. (2011, *in press*), hanno definito tali dati *low-cost*. Si tratta di dati (di tipo *discrete return*, sovente limitato a primo e ultimo ritorno o eco) solitamente provenienti da riprese effettuate per la realizzazione di DEM (*Digital Elevation Model*) ad alta precisione o misure topografiche da utilizzare per scopi urbanistici, catastali, architettonici, idro-geologici, ecc. con una bassa densità di punti per metro quadrato. Queste scansioni vengono effettuate solitamente nei periodi invernali per minimizzare il “disturbo” della vegetazione, dal momento che l’interesse è raggiungere un elevato tasso di penetrazione attraverso le chiome, cioè far sì che un elevato numero di impulsi raggiunga la superficie del terreno (Kraus e Pfeifer, 1998). Il tasso di penetrazione delle chiome dipende, infatti, dalla stagione e in estate non supera il 25% nei boschi decidui e il 30% nei boschi di aghifoglie (Kilian et al., 1996). Poiché soprattutto nei boschi di latifoglie questo tasso può essere aumentato effettuando la scansione nel periodo invernale (Ackermann et al., 1994), ne deriva che i voli vengono effettuati frequentemente nel periodo citato. Dal punto di vista forestale, invece, il periodo più indicato per l’effettuazione delle riprese su aree boscate è quello estivo. La maggior parte dei capitoli di volo stabilisce di effettuare i voli in zone al di sopra di 2000 m di quota (normalmente prive o quasi di vegetazione arborea) nel periodo estivo, per evitare la presenza di neve sul terreno; nel periodo di minor copertura vegetale (novembre-marzo) si prescrive invece vengano rilevate le aree sotto 2000 m (quelle sulle quali normalmente è presente la vegetazione arborea). Da un punto di vista forestale, se nel caso di boschi di conifere tale aspetto non determina grandi differenze nella ricostruzione della componente ipsometrica, nel caso dei boschi di latifoglie (privi di chioma verde nel periodo invernale) la stagione diventa significativa, dal momento che in inverno soltanto la parte legnosa della chioma origina significativi echi LiDAR di ritorno. Correlazioni tra CHM (*Canopy Height Model*) ottenuti da dati di rilevamenti estivi e invernali sono state studiate da Clementel et al. (2010) in boschi di abete rosso alpini, evidenziando ottime concordanze funzionali, peraltro in un contesto di sistematica sottostima di 4-5 m del CHM invernale; si segnalano, invece, sottostime consistenti in presenza di larice. Una certa tendenza alla sottostima delle altezze reali è peraltro inevitabile anche con voli estivi, in quanto l’impulso emesso dal telemetro laser tende a penetrare all’interno delle chiome prima che possa essere registrato un apprezzabile segnale di ritorno ed inoltre l’interpolazione dei punti su celle regolari comporta un inevitabile smussamento della quota dei cimali (Brandtberg et al., 2003, Barilotti et al. 2005).

In sintesi, si può affermare che la più corretta informazione circa l’altezza della copertura delle chiome nei soprassuoli forestali potrebbe essere desunta dalla differenza algebrica tra un DSM (*Digital Surface Model*) ottenuto da rilevamento estivo e un DTM (*Digital Terrain Model*) desunto da rilevamento invernale.

2. Applicazioni ALS in campo forestale

Gli obiettivi di studi applicati al settore forestale basati su tecniche LiDAR riguardano principalmente le applicazioni assestamentali e inventariali ed in particolare:

- la caratterizzazione quali-quantitativa morfologico/strutturale dei soprassuoli;
- la stima quantitativa di masse e biomasse arboree e/o la loro spazializzazione.

Altre applicazioni delle tecniche ALS potenzialmente interessanti nel settore forestale riguardano lo studio idrogeologico del territorio e sfruttano le elevate precisioni altimetriche e risoluzioni dei modelli digitali del terreno elaborati a partire da dati ALS. Per motivi di spazio, tali applicazioni non vengono considerate in questo contributo.

A partire da dati ALS, gli approcci adottati per la stima di parametri quali-quantitativi forestali con finalità assestamentali e inventariali sono essenzialmente di due tipi, detti rispettivamente *area based* e *tree based*.

Nell'approccio *area based* rientrano le applicazioni basate sulla misura di variabili al suolo e dei corrispondenti parametri LiDAR nell'ambito di aree campione (*plot*) di dimensione variabile tra qualche centinaio e qualche migliaio di metri quadrati. In queste applicazioni si considerano, quindi, essenzialmente variabili dendrometriche collettive, cioè riferite, sia nel caso dei dati al suolo che di quelli, contestualizzati, ALS, ad aree di determinate dimensioni.

Nell'approccio *tree based* rientrano, invece, i metodi basati sulla preliminare individuazione e ricostruzione dal dato ALS dei singoli soggetti arborei presenti (o per lo meno di quelli effettivamente discriminabili) in un determinato scenario boschivo, con stima dei caratteri dendrometrici individuali (relativamente al fusto e alla chioma), valutazione delle masse individuali e successiva ricostruzione dei dati riferiti ai collettivi arborei per sommatoria di valori individuali.

2.1 Approcci area based negli studi morfologico/strutturali dei soprassuoli

Nell'ambito degli approcci *area based*, i dati ALS sono stati utilizzati per il calcolo di parametri finalizzati alla caratterizzazione strutturale e alla classificazione tematica dei popolamenti: altezza (Barilotti et al., 2005; Floris et al., 2009), densità, "scabrezza" (Floris et al., 2009), indice di penetrazione (Barilotti et al., 2005), in tutti i casi traducibili in mappe tematiche che possono essere di supporto al pianificatore nella stratificazione dei soprassuoli in aree omogenee (Floris et al., 2009).

Su dati ALS relativi a popolamenti della Foresta Demaniale di Cadino, Floris et al. (2009) hanno ridotto la risoluzione del CHM a un idoneo livello di dettaglio operativo attribuendo nuovo formato (3x3 m) ai *pixel*, assegnando loro il valore mediano dei 9 *pixel* originari ed inoltre ponendo successivamente a zero tutti i *pixel* con altezza fino a 5 m (copertura non significativa: vegetazione erbacea, arbustiva, rinnovazione). Utilizzando successivamente matrici di esplorazione (a scorrimento) su ciascun nuovo *pixel*, per intorni di 15x15 *pixel* da 9 m² ciascuno (2025 m²), hanno derivato *layers* tematici relativi a:

- copertura del soprassuolo (in tre classi);
- altezza media del soprassuolo (in quattro classi, compatibili con lo sviluppo medio ipсомetrico delle principali classi cronologiche trentine o "tipi strutturali");
- variabilità ipсомetrica locale del soprassuolo - "scabrezza"- (due classi), variabile derivata, tesa a caratterizzare la tendenza del soprassuolo ad assumere *facies* monoplane o multiplane.

Questi piani descrittivi GIS, in quanto tali, od opportunamente ricombinati, sono stati proposti in sede assestamentale come ausilio alla stratificazione tematica soggettiva a fini inventariali, secondo i nuovi metodi della pianificazione trentina.

Nella Alpi Carniche e nelle Prealpi Giulie su boschi di conifere e di latifoglie, Barilotti et al. (2005) hanno calcolato l'indice di penetrazione delle chiome (*Laser Penetration Index*, LPI) che indica la capacità del raggio laser di raggiungere il terreno in aree boscate. Oltre ad aver riscontrato una maggiore penetrazione fino al suolo degli impulsi LiDAR nei boschi di conifere rispetto a quelli di latifoglie, gli autori hanno appurato che LPI è inversamente proporzionale all'altezza degli alberi e alla densità dei popolamenti. Inoltre, LPI sembra essere strettamente e inversamente proporzionale

all'indice LAI (*Leaf Area Index*) misurato al suolo. Infine, una significativa relazione sembra esistere tra l'altezza media di popolamenti misurata al suolo e l'altezza massima riscontrabile sul CHM, pur con una certa tendenza alla sottostima di 3-4 metri.

Floris et al. (2010) hanno, invece, riscontrato una relazione praticamente 1:1 ($R^2 \text{ adjusted} = 0,81$), tra dati di altezza media misurati al suolo (rilevazione ipsometrica di tutti i soggetti presenti con diametro superiore a 2,5 cm e calcolo della relativa media) e dati misurati su CHM (in aree di saggio di 1256 m²) della "altezza media degli alberi" (media delle altezze evidenziate dai *pixel* aventi altezza superiore a 2 m e quindi con esclusione dei ritorni LiDAR che hanno colpito direttamente il suolo per assenza locale di copertura). Considerazioni simili sono desumibili dallo studio di Fusco et al. (2008).

I dati ALS sono stati utilizzati da Barbati et al. (2009), Botalico et al. (2009) e da Floris et al. (2009) per l'identificazione di *gaps* nella copertura forestale (vuoti, radure, superfici sottoposte ad utilizzazione, ecc.), cioè di zone prive di copertura boschiva incluse e significative sotto il profilo dimensionale. L'intento degli autori è stato quello di determinare, tramite processi automatizzabili, le interruzioni significative della copertura forestale, anche eventualmente per escluderle da processi di campionamento a fini assestamentali (in quanto non apportatori di contributo provvigionale rilevante) e quindi aumentare l'efficienza campionaria conseguente al contenimento delle variabilità campionaria.

Per l'identificazione di *gaps* su pinete monoplane artificiali di pino domestico della Riserva Naturale Statale Biogenetica "Tomboli di Cecina" (LI), di cui erano disponibili dati ALS acquisiti nell'inverno del 2004, Barbati et al. (2009) hanno applicato l'analisi *hot spot* basata sul calcolo della variabile statistica locale G_i^* di Getis-Ord (Getis e Ord, 1992). G_i^* è stato utilizzato per verificare l'esistenza di *cluster* spaziali. L'indice G_i^* è stato determinato attraverso l'impiego di una finestra mobile circolare (di raggio pari a 3 m, circa 28 m²) per analizzare localmente aree di dimensioni inferiori a quelle mediamente attese per le chiome dei pini nella pineta di Cecina. Botalico et al. (2009), prendendo come area di studio le stesse pinete, introducono anche una ulteriore procedura per l'individuazione dei *gaps* (proposta da Koukoulas e Blackburn, 2004) che sfrutta una funzione di riclassificazione per estrarre dal DCM i tratti di foresta di altezza inferiore a una soglia SH stabilita sulla base dei valori di pendenza e di altezza calcolati dal DCM in corrispondenza delle zone di contatto tra le aree aperte e le aree con copertura forestale. I tratti di foresta con altezza inferiore a SH, possono essere *gaps* veri e propri oppure corridoi (es. viabilità) e quindi attraverso ulteriori analisi basate sul calcolo dell'indice di forma IF (rapporto tra l'area ed il perimetro, con IF imposto minore di 0,67) sono stati individuati i soli *gaps*. Per confronto è stata effettuata l'identificazione dei *gaps* anche per fotointerpretazione di ortofoto digitali B/N con risoluzione di 1 m, calcolando il numero e la superficie dei *gaps* di dimensioni superiori a 50 m². Il confronto tra i risultati della fotointerpretazione e i risultati delle procedure automatiche mostra che il fotointerprete non riesce a identificare i piccoli *gaps* presenti nella copertura forestale e che il riconoscimento soggettivo dei limiti dei *gaps* è meno preciso di quello automatico.

Sempre in tema di identificazione delle zone di discontinuità significativa nella copertura forestale, Floris et al. (2009), nella Foresta Demaniale Provinciale di Cadino, dopo aver riclassificato il *raster* CHM, attribuendo il valore "1" a tutti i *pixel* il cui valore di altezza CHM era superiore a 5 m e "0" agli altri, hanno adottato una regola di contiguità spaziale su una superficie minima, definendo come appartenente a soprassuolo arboreo significativo qualsiasi *pixel* che, nell'ambito di una matrice di esplorazione di 2025 m², fosse circondato da almeno il 20% di *pixel* "1". La successiva conversione automatica in formato vettoriale della mappa *raster* derivata e la selezione dei soli poligoni "vuoto" di dimensioni superiori a 2000 m² (limite operativo minimo di riconoscimento dei "vuoti" della pianificazione trentina) ha portato all'elaborazione della mappa specifica.

2.2 Approcci tree based negli studi morfologico/strutturali dei soprassuoli

Barilotti et al. (2005; 2007b) hanno sviluppato un metodo per l'estrazione automatizzata dai dati LiDAR del numero di alberi presenti in bosco impiegando dati di verità al suolo provenienti da

transect realizzati in boschi di conifere (peccete, piceo-abieteti) delle Alpi Carniche ed in boschi di latifoglie (faggete e acero-frassineti) delle Prealpi Giulie.

Gli autori, attraverso una sequenza specifica di trasformazioni morfologiche sui DSM, hanno discriminato i singoli soggetti che compongono la superficie boscata mediante l'implementazione in ambiente *open-source* GrassGIS (Neteler e Mitašova, 2004) dell'algoritmo *Top Hat*, funzione matematica di elaborazione di immagini che permette di mettere in evidenza le strutture del rilievo (Schmidt e Hewitt, 2004), che nel caso delle formazioni forestali sono costituite dagli elementi apicali arborei (Turco et al., 2005).

Il confronto con i dati rilevati al suolo su *transect* mostra che, nei soprassuoli a conifere, la procedura individua circa l'80% dei soggetti arborei esistenti nella realtà, tranne nei casi in cui la densità del popolamento è particolarmente elevata. Considerando il numero di alberi contati nell'insieme dei transetti (952) e confrontando questo valore con quello stimato (924), gli autori hanno registrato una differenza di 28 alberi su un totale di 1,48 ettari. Il confronto sui transetti nell'area a latifoglie ha mostrato, invece, una marcata sottostima del numero di alberi estratti mediante la procedura *Top Hat*.

Barilotti et al. (2007a) hanno peraltro sviluppato un metodo per l'individuazione automatica della forma delle chiome degli alberi, che consiste nella creazione di un DSM privo dei punti "sotto-canopy", nell'estrazione automatica del numero di alberi secondo la procedura sopra descritta, nell'impiego di un algoritmo di segmentazione in grado di classificare i punti laser in sub-set dei punti appartenenti a singole chiome e infine nella definizione della proiezione verticale della chioma attraverso cerchi centrati nel baricentro geometrico. Per elevare la qualità dei parametri di chioma calcolati (area, profondità d'inserzione, volume), gli autori hanno sviluppato un'analisi statistica della distribuzione di frequenza dell'altezza che consente di ri-filtrare la vegetazione bassa (vegetazione di bordo o sotto-canopy). I risultati sono stati testati su dati rilevati al suolo in 13 *plots* (posizionati mediante stazioni topografiche totali) in boschi di conifere, misti e di latifoglie, con diversi livelli di densità, evidenziando un'alta correlazione tra i dati di campo ed i dati laser, in modo particolare nei boschi di conifere. La ricerca condotta ha messo in evidenza che a livello di *plot*, il laser tende a sovrastimare l'altezza di inserzione della chioma (ne consegue che la profondità della chioma è sottostimata). A livello di specie, il laser sottostima l'altezza di inserzione della chioma nel caso dell'abete rosso e bianco, mentre la sottostima nel caso del faggio.

Forzieri et al. (2009) hanno sviluppato una procedura automatica per l'individuazione della posizione degli alberi, la forma delle chiome degli alberi e la densità arborea a partire da dati ALS. Lo studio è stato realizzato su aree boscate lungo il fiume Serchio nel Comune di Galliciano (LU), lungo il fiume Sieve (FI) e in un'area Nord-Occidentale del Sevilleta National Wildlife Refuge nello stato del New Mexico (USA). I risultati mostrano che le prestazioni della procedura sono fortemente correlate alle caratteristiche della vegetazione nel senso che si sono ottenuti buoni risultati su aree nelle quali il rapporto tra distanza media degli alberi e diametro medio delle rispettive chiome era superiore a 0.59 e in cui la distanza media tra gli alberi era maggiore della risoluzione spaziale dei dati ALS.

2.3 Approcci area based nella stima quantitativa di masse e biomasse legnose e/o loro spazializzazione

Le metodologie sviluppate nell'ambito di ricerche nazionali per la stima delle masse legnose sono in maggioranza del tipo *area based*.

Le aree di studio coinvolte in studi specifici secondo tale approccio riguardano l'Italia Settentrionale e Centrale: in Lombardia nel bosco planiziale "Bosco della Fontana" (Corona e Fattorini, 2008; Corona et al., 2007; Corona et al., 2008) e in un bosco misto ceduo di latifoglie in Valsassina in provincia di Lecco (Fusco et al., 2008); in provincia di Trento su peccete (Clementel et al., 2010; Floris et al., 2010; Floris et al., 2009) e boschi misti di abete bianco, abete rosso, faggio, larice e pino silvestre (Tonolli et al., 2011); in Toscana, in boschi costieri di *Pinus pinea* (Barbati et al., 2009).

Lo sviluppo di modelli che sfruttano la correlazione tra variabili quantitative collettive desunte da dati ALS e corrispondenti variabili dendrometriche di interesse assestamentale, quali il volume e la biomassa legnosa, è il principale obiettivo di questi studi. L'interesse negli ambienti di ricerca è elevato per le implicazioni applicative che tali metodi fanno intravedere a livello assestamentale e inventariale in generale. Peraltro, nonostante la realizzazione di alcune applicazioni interessanti, la percezione di tali potenzialità è tuttora relativamente limitata in ambiente pratico-operativo, se si eccettuano alcuni passi concreti delle Amministrazioni forestali in Provincia di Trento e in Friuli.

Corona et al. (2007), nel bosco planiziale di farnia e cerro "Bosco della Fontana" (MN), di 236 ha, hanno verificato la correlazione tra il volume misurato su 37 aree circolari al suolo di 314 m² (10 m di raggio) con la sommatoria delle contestuali altezze CHM, ciascuna elevata a 3,5. L'esponente di 3,5 adottato deriva da considerazioni dendrometriche legate ad una più congrua rappresentazione del rapporto altezza/volume sul singolo soggetto arboreo (rispetto all'altezza in quanto tale), che in sostanza "linearizza" la relazione (su tale aspetto si ritorna in uno studio di Barbati et al. che verrà esaminato successivamente). Secondo gli autori, la relazione risulta essere una retta passante per l'origine, con fenomeni di eteroschedasticità e con coefficiente di correlazione tra le due variabili pari a 0,78 ($R^2 = 0,61$). La validazione del modello, effettuata con la tecnica *bootstrap resampling*, ha portato a valori di r e RMSE rispettivamente pari a 0,8 ($R^2 = 0,64$) e 3 m³, sulla singola unità di campionamento e cioè di circa 96 m³/ha.

Un successivo studio di Corona e Fattorini (2008), realizzato sugli stessi dati, inquadra, tra i primi nel panorama della letteratura forestale internazionale, l'utilizzo secondo l'approccio *area based* dei dati ALS nell'ambito di un esplicito contesto estimativo basato sul disegno campionario, proponendo in particolare uno specifico stimatore per rapporto del volume legnoso totale e uno stimatore corretto della varianza del valore totale stimato. Il caso di studio dimostra, in particolare, come utilizzando il dato ALS quale variabile ausiliaria sia possibile ridurre in modo altamente significativo l'intervallo fiduciario delle stime rispetto a quello ottenibile avendo a disposizione solamente i valori di volume ottenibili dalle aree campione a terra. L'approccio estimativo di Corona e Fattorini (2008) è stato ripreso in uno studio di Barbati et al. (2009) in pinete di pino domestico nell'area costiera toscana, nei pressi di Cecina, valutando tra l'altro l'impatto estimativo del valore dell'esponente cui elevare le altezze CHM da mettere in relazione con il volume rilevato al suolo. Quali verità a terra sono state realizzate 43 aree circolari di 20 m di raggio (1256 m²). Si è riscontrato che in tal caso (pinete litoranee) l'altezza CHM tal quale (*first return*) consente le migliori performance estimative ($R^2 = 0,77$, RMSE = 69 m³/ha, RMSE% circa pari al 24% della massa unitaria media). Interessante notare che, laddove il modello messo a punto da Barbati et al. (2009) viene valutato non in riferimento alle performance puntuali, ma a quelle estimative relative alla stima della provvigione dell'intera foresta di Cecina, la sua precisione è notevole (dell'ordine del 5%).

Uno studio di Fusco et al. (2008), realizzato su uno scenario boschivo prealpino (cedui mesofili) della Valsassina, conferma la relazione tra sommatoria locale delle altezze CHM e, in questo caso, biomassa arborea per ettaro. La capacità di adattamento del modello finale alle biomasse misurate al suolo si aggira attorno al 0,76 di R^2 con RMSE intorno al 21% (31 Mg/ha su circa 150 Mg di biomassa media per ettaro). Gli autori hanno peraltro verificato la correlazione tra le misure di altezza prese in campo a livello di singolo *plot* (considerando solo i soggetti con diametro a petto d'uomo maggiore di 5 cm) e le misure di altezza media ricavate dal CHM normalizzate (escludendo i valori al di sotto dei 2 metri di altezza dal suolo). La correlazione indica, secondo gli autori, un R^2 pari a 0,87.

Studi con approccio *area based* per la stima su base ALS delle masse assestamentali sono stati realizzati da Floris et al. (2010) su dati rilevati dal Servizio foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento che ha messo a disposizione anche i dati ALS. Gli autori hanno messo a punto un modello di regressione tra variabili ipsometriche derivate dal CHM e i valori di diametro, altezza, volumi misurati a terra in aree di saggio a raggio fisso (variabile da 13 a 20 m) nella Foresta Demaniale Provinciale di Paneveggio, quasi esclusivamente edificata da abete rosso. Gli stessi

hanno valutato la capacità esplicativa sulle masse di diverse variabili desunte dal CHM (sommatorie e medie di altezze depurate o meno della densità, altezza massima, % copertura) desumendo che la semplice altezza media locale del CHM (data dalla media delle altezze CHM dei pixel appartenenti all'area di saggio, considerando nella media con valore 0 i pixel CHM inferiori a 2 m) è dotata di ottime capacità previsionali della massa ad ettaro riscontrata al suolo, sia in relazione a quella totale (tutti i soggetti con diametro superiore a 2,5 cm) che a quella assestamentale (soli soggetti con diametro superiore a 17,5 cm), quest'ultima stimata dal modello a doppia entrata appropriato (rispetto alla specie) della serie di modelli denominati "MV2" (Scrini et al., 2010) in uso nella pianificazione forestale del Trentino. L'analisi della capacità predittive dei volumi unitari locali, attuata dopo *cross-validation* del modello, individua valori di R^2 *adjusted* ed RMSE intorno a 0,88 e 90 m³/ha per entrambi i tipi di masse e, considerata la massa media al suolo dello scenario (quasi 600 m³/ha), se ne desume un errore standard percentuale di stima del 15%. L'applicazione del modello di stima del volume assestamentale in senso predittivo ad alcune particelle facenti parte del piano di assestamento della Foresta demaniale di Paneveggio ha evidenziato che i dati della stima ALS sono altamente correlati con quelli della pianificazione (si veda anche oltre su tale aspetto).

La stima del volume di popolamenti forestali (fustaie multiplane prevalentemente di abete bianco e rosso) attraverso l'impiego di dati LiDAR multi-ritorno, in uno scenario forestale di Lavarone (TN) è stato l'obiettivo di una ricerca di Tonolli et al. (2011). I dati di verità a terra sono stati ottenuti da 50 *cluster* di aree relascopiche, ma anche da inventari di 6 singoli popolamenti estesi mediamente su 12 ha. Relativamente all'elaborazione dei dati ALS, i *pixel* con valori di CHM inferiori a 2 m sono stati assunti pari a zero. Ritenendo esista una relazione tra il volume assestamentale (a livello di varie estensioni unitarie tra 400 e 3600 m²) e le variabili predittive derivate dalla densità di distribuzione e altri parametri statistici delle altezze dei ritorni laser nell'ambito delle chiome rilevate sul CHM in posizioni e ampiezze corrispondenti, gli autori hanno individuato 20 variabili in ogni cella relativamente alla distribuzione degli echi di quattro impulsi laser (primo-quarto). Con la tecnica di regressione *stepwise forward* hanno selezionato le variabili più esplicative nella predizione della massa (altezza media del primo eco e mediana della distribuzione delle altezze dei secondi ritorni) da includere in un modello di regressione multipla di stima della massa unitaria. Dai dati si desume che la semplice altezza media locale CHM (*first return*) assume sempre la più alta capacità predittiva delle masse unitarie e che al diminuire della estensione dell'area al suolo considerata (stime fornite per aree unitarie via via più ampie) aumentano gli R^2 dei modelli (da 0,5 a 0,6 circa), diminuiscono gli errori previsionali, da 90 a 80 m³/ha circa quelli assoluti e meno significativamente quelli percentuali (dal 22,5% al 19% circa). Introducendo la variabile esplicativa citata relativa al secondo ritorno laser, unica selezionata tra le 20 esaminate come apportatrice di ulteriore capacità esplicativa oltre al *first return*, in riferimento alle stesse variazioni (in diminuzione) di risoluzione, si ottiene un aumento progressivo degli R^2 da 0,6 a 0,7, una diminuzione dell'errore previsionale assoluto da 80 a 70 m³/ha e di quello relativo dal 20 al 17%. Gli autori affermano che l'aumento di complessità dei modelli con l'inclusione del secondo ritorno determina vantaggi soprattutto in scenari di fustaie multiplane, data la probabile capacità del secondo ritorno di evidenziare piani vegetazionali sottoposti. Occorre peraltro chiedersi se il maggior costo di elaborazione e la minore disponibilità di dati (rispetto al semplice CHM *first return*) che l'aumento della complessità dei modelli comporta, siano giustificati da vantaggi estimativi ottenibili.

In quasi tutti i lavori citati si pone l'attenzione sulla valutazione puntuale delle capacità predittive dei modelli ALS-based in riferimento alla massa per unità di superficie o assoluta associabile ad una singola e limitata stima localizzata. Peraltro il settore operativo (in particolare quello assestamentale) è più interessato a valutare le precisioni di stima automatica ALS su superfici di una certa estensione (ad esempio, a livello di particella). Purché i modelli non siano distorti (cioè non affetti da errori sistematici e quindi dotati di buone distribuzioni dei residui), passando a stime riferite a superfici di una certa estensione è plausibile supporre una compensazione di errori positivi e negativi delle stime localizzate, con aumenti consistenti della accuratezza della somma di valori di

single realizzazioni estimative del modello su tratti limitati di superficie mutuamente indipendenti. Il problema è stato trattato da Floris et al. (2010) a livello di una generica particella forestale di 10 ha della Foresta di Paneveggio, ove, sia attraverso un approccio teorico (Tabacchi, 1989) che attraverso un processo di simulazione, gli autori sono pervenuti a una valutazione dell'incertezza totale della stima del volume particellare tra il 2 e il 3% del volume assestamentale di particella. Tale valore è addirittura inferiore a quello conseguibile con il cavallettamento totale standard trentino, affetto da un errore standard del 4% secondo stime effettuate da Scrinzi (1989).

Permane peraltro l'interesse delle applicazioni localizzate dei modelli di stima basati su dati ALS laddove esse danno la possibilità di visualizzare in continuo la variabilità assoluta e/o relativa delle masse unitarie a livello subparticellare - esempi in Floris et al. (2010) e Tonolli e al. (2011) - aspetto rilevante e innovativo ai fini della pianificazione (piano dei tagli, pianificazione operazioni di esbosco) e non conseguibile con le procedure inventariali attualmente in uso.

Circa la spazializzazione delle masse, Clementel et al. (2011) hanno proposto l'impiego del CHM per determinare una variabile derivata locale detta "K- LiDAR". Si tratta di un coefficiente di adeguamento locale su base LiDAR della massa media ad ettaro determinata da rilievi al suolo a livello di comparti inventariali di vario tipo (particella, strato campionario). Non presupponendo la costruzione di un vero e proprio modello ALS basato sulla raccolta di verità a terra, l'ipotesi è volta a ridurre i costi inventariali e ad aumentare il livello informativo laddove siano disponibili stime inventariale tradizionali di comparto derivanti dalla pianificazione ordinaria.

2.4 Approcci tree based nella stima quantitativa di masse e biomasse legnose e/o loro spazializzazione

In vari tipi di fustaie del Friuli Venezia Giulia (peccete, abieti-piceo-faggeti, piceo-abieteti, piceo faggeti e faggete) Abramo et al. (2007) hanno adottato un approccio *tree-based* nella stima su base ALS delle masse legnose attraverso una serie di fasi sequenziali. Innanzitutto gli autori hanno proceduto all'individuazione dei singoli alberi nell'area considerata elaborando i dati ALS attraverso un software sviluppato ad hoc in ambiente Linux (Beinat e Sepic, 2005), sulla base del quale hanno costruito uno specifico *tool* di algoritmi che permette il posizionamento e il conteggio dei singoli alberi, l'attribuzione ad ogni albero di un'altezza, la delimitazione della forma della chioma e la stima della sua profondità (Barilotti e Sepic, 2006). L'applicativo è stato testato su verità al suolo.

Il metodo ha permesso di individuare complessivamente il 71% dei soggetti presenti aventi diametro da 5 cm in su. La percentuale di individuazione sale all'89% considerando i soli soggetti sopra soglia di cavallettamento assestamentale (17,5 cm). Infine, in riferimento ai soli alberi dominanti, circa il 94% del totale è stato correttamente individuato.

Una ulteriore fase prevedeva che fosse nota da rilievi al suolo la corretta relazione locale del diametro rispetto all'altezza o quella attribuibile sinteticamente sulla base di un inquadramento del popolamento in serie ipsometriche tariffarie di derivazione assestamentale basate su equazioni in uso per le principali specie forestali in Friuli Venezia-Giulia (Del Favero et al., 2001). Ci si riferisce ad una relazione diametro su altezza e non alla consueta relazione ipsometrica (altezza su diametro); quest'ultima viene infatti adeguata tramite inversione degli assi per renderla compatibile con l'obiettivo di stimare il diametro dei soggetti arborei la cui altezza è stata quantificata mediante dati ALS. Il confronto tra il volume calcolato con il sistema tariffario classico e quello desunto attraverso la metodologia di ricerca illustrata ha mostrato per l'abete rosso uno scostamento percentuale contenuto intorno al 5-6% (tranne che in una situazione ove si registra uno scostamento dell'11,7%) e per il faggio intorno al 10% nel caso delle fustaie e di quasi il 19% nel caso dei cedui. Si tratta peraltro di differenze riscontrate sui volumi di insiemi ridotti di soggetti individuati sia con la metodologia descritta sul supporto ALS che misurati al suolo. Dai dati dello studio risulta difficoltoso risalire alle *performance* di precisione del metodo a livello di ampie superfici, circostanza che consentirebbe un confronto più realistico e su un livello di parità con i modelli messi a punto negli studi esaminati in precedenza. C'è da dire che con funzioni di questo tipo,

piuttosto variabili con la specie anche a parità di stazione, è critico, ai fini della stima delle masse legnose, il riconoscimento non solo dei singoli soggetti presenti ma anche della rispettiva specie, aspetto, che allo stato attuale, implica eventualmente la fusione dei dati ALS con dati multi- o iperspettrali (Dal ponte et al. 2008; Altobelli et al. 2004; Tonolli et al., 2011). In altri casi, molti autori determinano la composizione media in aree di saggio a terra e ripartiscono successivamente i volumi fra le specie in relazione alla composizione rilevata al suolo (Gobakken e Næsset, 2004; Parker, 2006).

Peraltro tali metodi possono avere notevole rilevanza qualora si sia interessati non solo (o non tanto) la stime di massa o biomassa, ma a sofisticate ricostruzioni 3D del bosco suscettibili di impieghi a livello ad esempio di studi ecologici e sugli habitat o sulla funzione estetico-paesaggistica.

Ancora nell'ambito dell'approccio *tree based*, Dalponte et al. (2011) hanno sviluppato un sistema per la stima del diametro e del volume di fusti arborei a livello di singoli soggetti a partire da dati ALS multi-ritorno. Lo studio adotta un metodo che attraverso un processo di segmentazione, il quale sfrutta un algoritmo elaborato da Hyyppä et al. (2001), identifica le singole chiome a partire dai dati ALS. In una successiva fase, nell'ambito delle regioni enucleate dal processo di segmentazione (riferibili quindi a chiome di singoli soggetti) vengono misurate diverse variabili (statistiche e dimensionali) derivate dai dati ALS di ciascuna regione e riprodotte per ognuno di 4 echi disponibili (1°, 2°, 3°, 4°). Selezionando poi (con diversi metodi) le variabili più significative vengono costruiti modelli per la stima del diametro e del volume del soggetto che ciascuna regione rappresenta. Il metodo è stato testato su un'area di studio localizzata nel comune di Lavarone (TN) su 481 alberi in 50 aree di saggio. Dallo studio emerge che il primo ritorno (CHM) fornisce il set di variabili più indicative; dai grafici presentati si desume che la capacità del modello di stima del diametro individuale è piuttosto bassa (circa 6 cm di errore medio assoluto su un soggetti medi di 45 cm di diametro) e tendente alla sovrastima per i diametri fino a 40 cm circa e alla sottostima per i diametri superiori. In relazione al volume le performance del metodo sono migliori con errori standard di stima di 0,7-0,8 m³ su soggetti medi di 2,275 m³. Sul totale dei 481 soggetti lo scostamento del volume stimato a partire dai dati ALS è invece soltanto del -5% circa. Dallo studio non è peraltro desumibile in quale misura il processo di segmentazione iniziale sia in grado di individuare il numero di soggetti realmente presenti su una superficie definita ed è perciò difficile individuare un terreno di confronto con i metodi *area-based*, descritti in precedenza.

3. Conclusioni

In questi ultimi anni è aumentato l'interesse verso lo studio delle applicazioni ALS, grazie ai numerosi vantaggi che la tecnologia consente in diversi settori e soprattutto per la possibilità di acquisire informazioni dimensionali della superficie terrestre anche nelle aree con caratteristiche morfologiche complesse. Lo sviluppo di metodologie per il trattamento dei dati ha favorito un forte incremento delle applicazioni anche nel settore forestale, cosicché in molti Paesi le tecniche ALS sono già ampiamente utilizzate a livello pre-operativo e operativo. La panoramica presentata in questa rassegna ne evidenzia la piena applicabilità anche con riferimento alle condizioni ambientali e operative italiane.

Rimangono, peraltro, ancora da sviluppare le possibilità di integrazione dei dati ALS nell'ambito di inventari forestali su ampie superfici basati su schemi di campionamento probabilistico: meritevoli di segnalazione in merito, oltre alla proposta di Corona e Fattorini (2008), sono i lavori di Gregoire et al. (2011) e Ståhl et al. (2011).

Un altro tema di interesse per lo sviluppo di applicazioni ALS, e con particolare riferimento al nostro paese, è la mappatura del combustibile in foresta, tradizionalmente basata su onerosi rilievi campionari. I pochi studi sperimentali su questo aspetto (e.g. Seielstad e Queen, 2003; Mutlu et al., 2008) suggeriscono la possibilità di elaborare indici derivati da dati ALS che distinguano alcuni modelli di combustibile utilizzabili come dati di input di modelli di comportamento del fuoco, incrementando l'accuratezza della stima dei parametri strutturali del combustibile sia attraverso

elaborazioni su dati *raw* (nube di punti) che in combinazione con tecniche di classificazione di immagini telerilevate multispettrali (e.g. Riaño et al., 2003; Mutlu et al., 2008; Erdody e Moskal, 2010). Infine si rileva che la tecnologia ALS sta evolvendo in maniera molto rapida e il settore forestale può beneficiarne direttamente, in particolare per quanto si potrà ottenere con l'ulteriore aumento della capacità di raccolta dei dati: questo fattore è particolarmente importante, perché legato al costo di acquisizione, che è necessario ridurre per favorire un mercato sempre più accessibile.

Riferimenti bibliografici

- Abramo E., Barilotti A., Sepic F., (2007). Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi laser-scanning. *Forest@* 4 (4): 373-385, 2007.
- Ackermann F., English M., Kilian J. (1994). Die Laser-Profil-Befliegung Gammertingen 1992. *ZfV* 119(5), pp. 264-277.
- Altobelli A., Coren F., Sterzai P., Napolitano R. (2004). Integrazione dei dati laser scan e iperspettrali per la stima di parametri strutturale e funzionali della vegetazione, V Meeting degli Utenti Italiani di GRASS, Padova, 5 - 6 febbraio 2004.
- Barbati A., Chirici G., Corona P., Montagni A., Travaglini D. (2009). Area-based assessment of forest standing volume by field measurements and airborne laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 30, No. 19, 10 October 2009, 5177-5194.
- Barilotti A., Sepic F. (2006). Delineazione automatica delle chiome in diverse tipologie forestali attraverso analisi di dati LiDAR. Atti 10° Conferenza nazionale ASITA, 14-17 novembre 2006, Bolzano.
- Barilotti A., Sepic F., Abramo E., Crosilla F. (2007a). Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests. In: Stilla U, Meyer H, Rottensteiner F, Heipke C, Hinz S. (eds). (2007). PIA07 - Photogrammetric Image Analysis 2007. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, Volume 36, Part 3/W49A.
- Barilotti A., Sepic F., Abramo E., Crosilla F. (2007b). Improving the morphological analysis for tree extraction: a dynamic approach to LiDAR data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, September 12-14, 2007, Finland.
- Barilotti A., Turco S., Napolitano R., Bressanc E. (2005). La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali. *Proceedings of 15th Meeting of the Italian Society of Ecology*, 12-14 September 2005, Torino.
- Beinat A., Sepic F. (2005). Un programma per l'elaborazione di dati LiDAR in ambiente LINUX. Atti del 50o Convegno Nazionale della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, 29-30 giugno 2005, Mondello, Palermo, Italy.
- Bottalico F., Montagni A., Travaglini D. (2009). Identificazione dei gaps nella copertura forestale con dati LiDAR. Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009.
- Brandtberg T., Warner T. A., Landenberger R.E., McGraw J.B. (2003). Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LiDAR data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85 (2003) 290-303.
- Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Scrinzi G., Torresan C. (2010). Stima operativa di parametri dendrometrici forestali con riprese LiDAR invernali a bassa risoluzione. Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010.
- Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Scrinzi G., Torresan C. (2011). Estimating forest timber volume by means of "low-cost" LiDAR data. *Rivista Italiana di Telerilevamento* (in press).
- Corona P., Chirici G., Lamonaca A., Travaglini D., Mason F., Minari E., Marchetti M., Montagni A. (2007). Sviluppo di una procedura innovativa per la cubatura del volume della massa legnosa di fustaie di latifoglie mediante LiDAR. In: Federazione italiana delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali (a cura di). Atti della XI Conferenza Nazionale ASITA (Torino, 6 - 9 novembre 2007). Milano, Federazione italiana delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali.

- Corona P., Fattorini L. (2008). Area-based LiDAR-assisted estimation of forest standing volume. *Can. J. For. Res.* 38: 2911–2916 (2008).
- Corona P., Lamonaca A., Chirici G., Travaglini D., Marchetti M., Minari E., Montagni A. (2008). Estimation of growing stock of broadleaved forests by airborne laser scanning. pp 39-44. In: Gianelle D., Travaglini D., Mason F., Minari E., Chirici G., Chemini C. (eds.). (2007). *Canopy analysis and dynamics of a floodplain forest. Rapporti Scientifici, 3. Centro Nazionale per lo studio e la conservazione della Biodiversità Forestale - Bosco della Fontana. Cierre Grafica Editore, Verona: 96 pp.*
- Dalponte M., Buzzone L., Pianelle D. (2008). Fusion of hyperspectral and LiDAR remote sensing data for classification of complex forest areas. *Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 46, No. 5, May 2008.
- Del Favero R., Bortoli P.L., Solari V., STAF Snc, Vanone G., Moro E. (2000). *Direttive per i piani di gestione delle proprietà forestali nella Regione Friuli Venezia Giulia. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, pp. 256.*
- Erdody T.L., Moskal L.M. (2010). Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels. *Remote Sensing of Environment*, 114:725-737.
- Floris A., Clementel F., Farruggia C., Scrinzi G. (2009). *Il LiDAR nella stratificazione tematica dei soprassuoli forestali: applicazioni in Trentino. Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009.*
- 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 - 2010*, 42 (3): 15-32.
- Forzieri G., Guarnieri L., Vivoni E. R., Castelli Fabio, Preti F. (2009). Multiple attribute decision making for individual tree detection using high-resolution laser scanning. *Forest Ecology and Management*. 258: 2501-2510.
- Fusco S., Pflugmacher D., Kirschbaum A., Cohen W., Chiatante D., Montagnoli A. (2008). *Uso di dati LiDAR per stima della biomassa forestale in un bosco misto di latifoglie: un caso studio in Valsassina (LC). Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 21-21 ottobre 2008.*
- Getis A., Ord K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24, 189–206.
- Gobakken T., Næsset E. (2004). Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 529-542.
- Gregoire T.G., Ståhl G., Næsset E., Gobakken T., Nelson R., Holm S. (2011). Model-assisted estimation of biomass in a LiDAR sample survey in Hedmark county, Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 41: 83-95.
- Kilian J., Haala N., Englich M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 31, Part B3, Pages 383-388.
- Koukoulas S., Blackburn G.A. (2004). Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LIDAR imagery and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 3049-3071.
- Kraus K., Pfeifer N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, Volume 53, Issue 4, August 1998, Pages 193-203.
- Mutlu M., Popescu S., Stripling C., Spencer T. (2008). Mapping surface fuel models using LiDAR and multispectral data fusion for fire behavior. *Remote Sensing of Environment*, 112:274-285.
- Neteler M., Mitašova H. (2004). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Second Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers/Springer. 424 pp, 2004.*
- Parker R. C. (2006). Computer automation of a LiDAR double-sample forest inventory. *Forest and Wildlife Research Center, Bulletin FO275, Mississippi State University, pp. 19.*

- Riaño D., Meier E., Allgower B., Chuvieco E., Ustin S. (2003). Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86:177-186.
- Schmidt J., Hewitt A. (2004). Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, 121: 243-256.
- Scrinzi G. (1989). Precisione degli inventari assestamentali per cavallettamento totale: un'analisi di trent'anni d'esperienza applicativa in Trentino. *Annali dell'Istituto Sperimentale per L'assestamento Forestale e l'Alpicoltura*. Volume XI, Trento – 1988. 143-186.
- Scrinzi G., Galvagni D., Marzullo L. (2010). I nuovi modelli dendrometrici per la stima delle masse assestamentali in provincia di Trento. *Provincia Autonoma di Trento, Servizio Foreste e Fauna*. 95 pp.
- Seielstad C., Queen L. (2003). Using airborne laser altimetry to determine fuel models for estimating fire behaviour. *Journal of Forestry*, 101:10-15.
- Ståhl G., Holm S., Gregoire T., G., Gobakken T., Næsset E., Nelson R. (2011). Model-based inference for biomass estimation in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 41: 96-107.
- Tabacchi G. (1989). Sulla precisione delle stime condotte con tavole di cubatura costruite con metodo analitico. *Annali dell'Istituto Sperimentale per L'assestamento Forestale e l'Alpicoltura*. Volume XI, Trento – 1988. 187-236.
- Tonolli S., Dalponte M., Vescovo L., Rodeghiero M., Bruzzone L., Gianelle D. (2011). Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research* (2011) 130: 569–577.
- Turco S., Alberti G., Barilotti A., Bonfanti P.L. Processamento di dati laser scanning con GRASS GIS per la determinazione automatica di parametri inventariali forestali. *Atti del VI Meeting degli utenti italiani di GRASS*, 2005.