

# Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio

Antonio Floris, Fabrizio Clementel, Claudia Farruggia e Gianfranco Scrinzi

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura – Unità per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale, Piazza Nicolini, 6, 38123 Trento. E-mail: antonio.floris@entecra.it

## Riassunto

Il LiDAR si pone come una tecnologia di telerilevamento molto promettente per fornire un contributo significativo nella valutazione della consistenza e della produttività delle risorse forestali sia a livello locale (pianificazione forestale) che a scala maggiore (inventari forestali regionali e nazionali). Lo studio illustra la messa a punto di un modello statistico regressivo basato su dati LiDAR e su dati rilevati a terra in aree di saggio a raggio fisso, per la stima dei volumi legnosi forestali per unità di superficie e per la rappresentazione tematica ad alta risoluzione della loro variabilità a livello delle piccole e medie superfici di riferimento della pianificazione forestale. Lo scenario di studio è quello della Foresta demaniale provinciale di Paneveggio (Trento). I risultati ottenuti evidenziano che le incertezze delle stime di volume appaiono comparabili se non migliori di quelle ottenibili da inventari forestali tradizionali al suolo (cavallettamento totale).

**Parole chiave:** LiDAR, laser scanning, inventari forestali, assestamento forestale, volume legnoso.

## *Forest volume estimate based on LiDAR data: a study for the Paneveggio Forest (NE Alpine area, Italy)*

### **Abstract**

*LiDAR is one of the most promising remote sensing technologies to supply a valid contribution in assessing consistency and productivity of forest resources both at a local (forest planning) and at a wider scale (regional and national forest inventories). The study shows the development of a forecasting model based on LiDAR data for the estimation of forest timber volume per area unit. It shows also a high-resolution thematic representation of volume variability at the level of typical small reference areas used in forest planning. The study area is the Forest of Paneveggio (Trentino, Italy). Uncertainties of volume estimates are comparable with (if not better than) those achieved by traditional measurements on the ground (full caliper).*

**Keywords:** *LiDAR, laser scanning, forest inventory, forest planning, stand volume.*

## **Introduzione**

La stima di variabili forestali attraverso dati LiDAR (*Light Detection And Ranging*) desta sempre maggior interesse nel settore forestale ed è volta in particolare alla modellizzazione

della relazione tra variabili biometriche (principalmente volumi legnosi e biomasse per unità di superficie) rilevate su aree di calibrazione al suolo e parametri desumibili dall'elaborazione dell'informazione LiDAR contestuale. Ciò potrebbe consentire di ottenere dati affidabili e periodicamente aggiornabili sulla consistenza e produttività legnosa dei boschi, con notevole risparmio di costi rispetto a quelli necessari ai rilievi al suolo.

L'inizio di tali tipi di studi risale alla fine degli anni '90 [Dubayah et al., 1997; Dubayah e Drake, 2000; Andersen et al., 2001] e in Italia al 2004-2005 [Barilotti et al., 2005a, 2005b]. In tempi recenti si assiste a un aumento dei contributi scientifici favorito dalla maggior disponibilità di dati e dall'aumento della loro qualità.

Il campo di indagine si può suddividere in due ambiti principali:

- quello dei metodi *single tree-based*, che prendono in esame singoli alberi e quindi muovono dalla loro preventiva discriminazione con dati LiDAR [Andersen et al., 2001; Barilotti et al., 2005b; Barilotti e Sepic, 2006]. Il livello di successo dei metodi *single tree-based* dipende molto dalla densità dei dati LiDAR, che deve essere di almeno 4-5 punti/m<sup>2</sup> [van Aardt et al., 2006; Abramo et al., 2007] e dal grado di penetrazione delle chiome, che non deve essere troppo elevato [Barilotti e Sepic, 2006];
- quello dei metodi *area-based*, che mirano invece a stimare le grandezze dendrometriche direttamente a livello di collettivi e a fornire dati di consistenza legnosa per unità di superficie. Più diffusi dei precedenti, permettono di conseguire risultati interessanti anche con densità della ripresa LiDAR non particolarmente elevate [Gobakken e Naesset, 2005; Packalén e Maltamo, 2006; Corona e Fattorini, 2008]. Inoltre sono più adattabili a situazioni diversificate di forma e grado di penetrazione delle chiome. Molti studi condotti con questo tipo di metodi utilizzano modelli di regressione che fanno uso di variabili elaborate dai dati LiDAR per stimare il volume legnoso [Naesset, 2004; Hollaus et al., 2007; Corona et al., 2008], oppure la biomassa [Fusco et al., 2008].

L'obiettivo di questo studio, rientrando nell'ambito delle tecniche *area-based*, è stato la valutazione di diverse variabili elaborate da dati LiDAR, usando procedure e algoritmi disponibili nei più diffusi applicativi GIS, al fine di ottenere un modello matematico-statistico per la stima delle provvigioni legnose sia a livello di singole unità spaziali (pixel) che a livello dei comparti tipici della pianificazione forestale di dettaglio (particelle forestali).

## Materiali e metodi

Nelle stagioni estive degli anni 2007-2008 il Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento ha raccolto i dati impiegati in questo studio. Si tratta di una ripresa LiDAR appositamente commissionata e di una serie di rilievi al suolo per aree di saggio effettuati nella Foresta demaniale di Paneveggio, estesa su 2500 ettari di superficie posti tra i 1500 e i 2000 m s.l.m., nel Parco naturale di Paneveggio e delle Pale di San Martino, in provincia di Trento. La foresta è vincolata sotto il profilo naturalistico ma è normalmente sottoposta a Piano di assestamento e soggetta a utilizzazioni forestali. Vi domina la Pecceta altimontana e subalpina (variante continentale), con presenza di Abete rosso (95%), Larice (3%) e Pino cembro (1%), con Abete bianco e Latifoglie altimontane sporadici. La Foresta

è caratterizzata da popolamenti con fertilità particolarmente elevate e altezze massime degli alberi che in qualche caso possono sfiorare i 50 metri.

Le caratteristiche esecutive del volo LiDAR sono riportate in Tabella 1.

**Tabella 1 - Dati tecnici principali del rilievo laser-altimetrico LiDAR nell'area studio di Paneveggio.**

<b>Data di acquisizione</b>	16 luglio 2008
<b>Aeromobile</b>	Elicottero ECUREUIL AS 350 B2
<b>Laser scanner</b>	ALTM 3100C OPTECH
<b>Lunghezza d'onda (nm)</b>	400-800 nm
<b>Frequenza d'impulso massima (kHz)</b>	70000/sec. (70 KHz)
<b>Altezza media di volo (m)</b>	1000 m agl.
<b>Ampiezza impronta al suolo (footprint)</b>	25-30 cm
<b>Densità media dei punti</b>	circa 5/m <sup>2</sup>
<b>Numero di echi</b>	fino a 4 (a seconda del target)
<b>Accuratezza altimetrica</b>	20-30 cm (1 $\sigma$ )

Per quanto attiene il rilievo al suolo, complessivamente sono stati rilevati dati su 39 aree di saggio circolari a raggio fisso, la cui posizione è stata selezionata casualmente nell'area interessata dal volo LiDAR, con il vincolo di rappresentare i principali tipi strutturali presenti (perticaie, fustaie adulte e mature). La dimensione delle aree di saggio è stata pari a 13 o 20 metri di raggio a seconda della densità del soprassuolo, impiegando il raggio minore nei soprassuoli più densi. Il raggiungimento delle coordinate nominali del centro delle aree è stato effettuato tramite navigazione assistita da GPS (*Global Positioning System*) secondo il protocollo adottato nell'inventario forestale nazionale [Scrinzi e Floris, 2003]. Con i parametri suggeriti da tale protocollo l'incertezza di posizionamento può essere stimata in 3-4 metri (*Root Mean Squared Error* o RMSE - 1  $\sigma$ ) [Colle et al., 2009].

Sulla base del tipo di rilievi effettuati, le aree di saggio sono state distinte in 26 aree "sommarie" e 13 aree "dettagliate". Nelle aree sommarie sono stati rilevati la specie e il diametro del fusto di tutti i soggetti arborei aventi diametro minimo di 2,5 cm e l'altezza dendrometrica di un campione di circa 1/5 degli alberi scelti casualmente. Nelle aree dettagliate, invece, la rilevazione dell'altezza è avvenuta su tutti i soggetti arborei presenti.

#### ***Elaborazioni dei dati rilevati sulle aree di saggio al suolo***

Nelle aree di saggio dettagliate il volume  $v_i$  di ciascun soggetto arboreo è stato determinato individualmente mediante l'applicazione del modello a doppia entrata appropriato (rispetto alla specie) della serie di modelli denominati "MV2" [Scrinzi et al., 2010] recentemente adottati nell'ambito delle nuove procedure di pianificazione forestale della Provincia Autonoma di Trento, aventi equazione generale:

$$v_i = a (d_i - d_0)^b h_i^c \quad [1]$$

dove  $a$ ,  $b$  e  $c$ , sono coefficienti variabili con la specie,  $d_i$  è il diametro a 1,30 m dell' $i$ -esimo soggetto,  $d_0$  è definito "diametro di azzeramento della massa cormometrica" (pari a circa 4 cm per latifoglie e a 3,7 cm per le conifere, [Scrinzi et al., 2010],  $h_i$  è l'altezza dendrometrica dell' $i$ -esimo soggetto.

La stima “locale” del volume in metri cubi ad ettaro è derivata da:

$$V = \sum (v_i / s) \quad [2]$$

dove  $s$  è la superficie dell’area di saggio in ettari e la sommatoria è estesa a tutti i soggetti presenti.

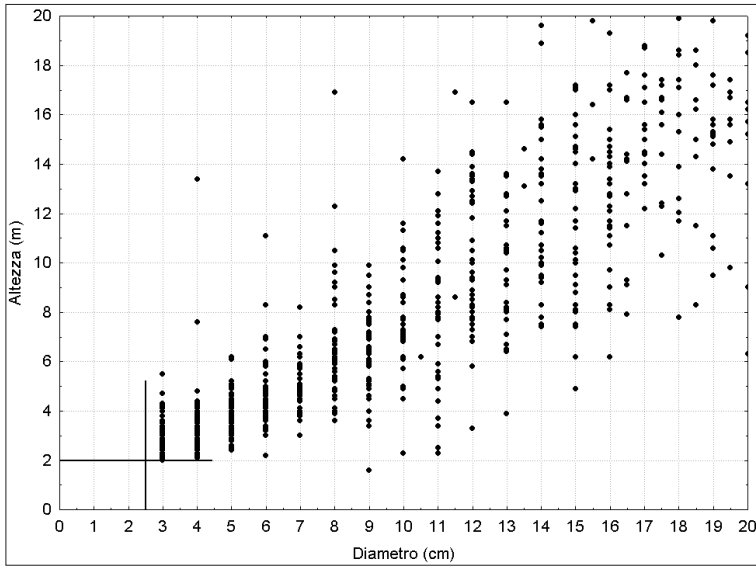
Nelle aree di saggio sommarie, ove era stato misurato, oltre al diametro di tutti i soggetti presenti, soltanto un campione delle loro altezze, è stato in primo luogo calcolato il volume medio dei soli alberi misurati anche per l’altezza, secondo l’appropriato modello MV2 di cui alla [1]. A tale volume è stato applicato un “coefficiente di adeguamento”, pari al rapporto tra l’area basimetrica media di tutti i soggetti presenti e quella dei soli soggetti dei quali è stata misurata anche l’altezza, per stimare il volume “dell’albero medio dell’area di saggio”. Come è noto, infatti, il volume di un soggetto arboreo è correlato pressoché linearmente con la sua area basimetrica. Tale volume è poi stato moltiplicato per il numero totale di alberi presenti nell’area di saggio ed il risultato è stato infine riferito all’ettaro per determinare  $V$ . Tale sistema “di adeguamento” per la stima del volume dell’albero medio è stato preferito a quello della costruzione di curve ipsometriche locali (e successiva applicazione individuale del modello MV2) perché, in funzione della loro scelta aleatoria, non sempre gli alberi modello dell’altezza erano ben distribuiti sull’intero campo di esplicazione diametrica e la curva ipsometrica risultante a volte condizionata da tale fenomeno, soprattutto in termini di “pendenza”.

Per disporre di una stima di parametri congruente anche con quelle fornite dai dati della pianificazione forestale (Piano di assestamento della Foresta demaniale di Paneveggio),  $V$  è stato determinato sia in riferimento ai soggetti di diametro a 1,3 m superiore a 2,5 cm (soglia di considerazione diametrica nelle aree di saggio realizzate al suolo) che per quanto riguarda i soli soggetti di diametro a 1,3 m maggiore di 17,5 cm (soglia diametrica di considerazione assestamentale). Tali soglie connotano rispettivamente il passaggio tra rinnovazione e classi arboree “preinventariali” e tra queste ultime e le classi “inventariali”.

Una ulteriore analisi ha riguardato i dati di altezze degli alberi rilevati al suolo considerati nel loro complesso, cioè indipendentemente dall’area di saggio di appartenenza. L’elaborazione è stata finalizzata alla identificazione di una soglia ipsometrica minima cui corrispondessero gli “ingressi” dei soggetti nel contingente delle preinventariali (2,5 cm di diametro ad 1,3 m), Figura 1. I valori di sintesi dei parametri dendrometrici rilevati nelle aree di saggio al suolo sono riportati in Tabella 2.

### ***Elaborazioni dei dati LiDAR***

Il CHM (*Canopy Height Model*) è un *layer* raster che si ottiene per sottrazione del DTM (*Digital Terrain Model*) al DSM (*Digital Surface Model*), anch’essi raster. A queste matrici raster si perviene attraverso opportune elaborazioni preliminari, svolte dalle stesse Società responsabili dell’esecuzione dei voli e delle riprese LiDAR, del seminato vettoriale di punti corrispondenti ai diversi ritorni (echi) degli impulsi laser [Casella, 2003; Manzano e Roggero, 2003]. In questo caso sono stati utilizzati il software DASHMap (Optech) per l’estrazione del dato laser grezzo e la sua proiezione in UTM, ed il software TerraScan (Terrasolid) per la classificazione del primo e ultimo eco con algoritmo di Axelsson [Vosselman, 2003].



**Figura 1 - Distribuzione dei valori ipsodiametrici rilevati al suolo (tutte le aree di saggio assieme) con evidenziazione della soglia ipsometrica minima dei soggetti censiti ( $h=2$  per  $2,5 < d < 3,5$  cm).**

**Tabella 2 - Valori dei parametri dendrometrici salienti rilevati nelle aree di saggio al suolo.**

Parametro	Valore totale	Valore assestamentale
<i>d</i> medio aritm. dei soggetti arborei (cm)	28,0	38,0
<i>d</i> max dei soggetti arborei (cm)	109,0	109,0
<i>d</i> min dei soggetti arborei (cm)	3,0	17,5
<i>h</i> media dei soggetti arborei (m)	18,2	26,1
<i>h</i> max dei soggetti arborei (m)	45,7	45,7
<i>h</i> min dei soggetti arborei (m)	1,6	7,8
media delle <i>h</i> medie delle aree di saggio (m)		19,6
<i>G</i> /ha media (m <sup>2</sup> )		51,6
<i>G</i> /ha max (m <sup>2</sup> )		78,7
<i>G</i> /ha min (m <sup>2</sup> )		16,6
<i>V</i> /ha medio (m <sup>3</sup> )	615,8	596,7
<i>V</i> /ha max (m <sup>3</sup> )	1016,7	1016,7
<i>V</i> /ha min (m <sup>3</sup> )	136,1	118,3

L'informazione contenuta in un layer CHM è il valore dell'altezza dello strato di vegetazione al di sopra del suolo, eventualmente pari a zero se nel pixel considerato il segnale è arrivato direttamente al suolo in assenza di vegetazione. A quest'ultima condizione sono stati assimilati tutti i pixel CHM di altezza inferiore a 2 metri, valore che ha consentito di escludere dalle successive analisi i ritorni LiDAR presumibilmente compatibili con la sola presenza di rinnovazione o sottobosco o che comunque non hanno contribuito ai volumi assestamentali censiti al suolo.

A partire dal raster CHM con risoluzione geometrica pari a 1 m sono stati applicati algoritmi focali di *Map Algebra* (matrici locali di esplorazione) per ottenere, a livello di ciascun pixel CHM, un vettore di variabili ritenute, in prima approssimazione, correlate alle misure dendrometriche rilevate al suolo e quindi aventi capacità predittiva di queste ultime (Tab. 3). I valori di tali variabili sono riferiti a ciascun pixel del CHM, ma alla loro formazione concorrono i valori dei pixel circostanti per un intorno pari a quello della matrice di esplorazione. Tali elaborazioni sono avvenute con l'impiego di ordinarie funzionalità di un applicativo commerciale (ESRI Arcgis 9.2).

**Tabella 3 - Valori delle variabili elaborate dal CHM in corrispondenza delle aree di saggio rilevate al suolo.**

Variabile CHM	Valore
$\bar{h}_a$ media degli alberi nelle aree di saggio (m)	19,9
$\bar{h}_a$ media max degli alberi nelle aree di saggio (m)	32,7
$\bar{h}_a$ media min degli alberi nelle aree di saggio (m)	8,6
$\bar{h}$ media del soprassuolo nelle aree di saggio (m)	15,9
$\bar{h}$ media max del soprassuolo nelle aree di saggio (m)	26,1
$\bar{h}$ media min del soprassuolo nelle aree di saggio (m)	2,9

Poiché le aree di saggio al suolo potevano avere dimensione diversa (raggio 13 o 20 m), nella elaborazione delle variabili sono state adottate matrici locali di esplorazione di entrambe le dimensioni, ottenendo quindi due *layer* distinti. Successivamente, a ciascuna area di saggio al suolo sono stati associati i valori derivati dalla matrice locale di esplorazione della dimensione corrispondente. Pertanto, se un'area di saggio aveva raggio pari a 20 m, ad essa è stato associato il vettore di variabili derivate dal CHM con matrici di esplorazione circolari di raggio 20 m; comportamento analogo è stato adottato per le aree di saggio con raggio 13 m.

Posto quindi che fossero:

- $N$ : numero totale di pixel appartenenti alla matrice locale di esplorazione;
- $N_a$ : numero di pixel appartenenti alla matrice locale di esplorazione che evidenziavano un valore di altezza CHM superiore a 2 m (con  $N_a \leq N$ );
- $h$ : valore di altezza CHM registrato in un generico pixel;

sono state calcolate, a partire dalla matrice CHM, le seguenti variabili:

sommatoria delle altezze del soprassuolo:  $H = \sum h$  [3]

altezza media del soprassuolo:  $\bar{h} = H/N$  [4]

altezza media degli alberi:  $\bar{h}_a = H/N_a$  [5]

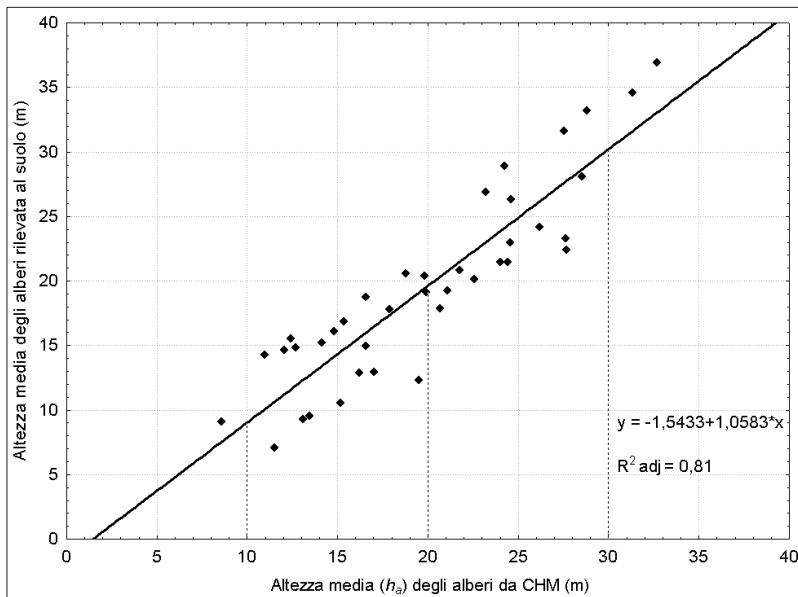
altezza massima del soprassuolo:  $h_{max}$  [6]

deviazione standard dell'altezza del soprassuolo  $s_h = \{ [\sum (h - \bar{h})^2] / (N-1) \}^{0.5}$  [7]  
copertura:  $C = N_a / N$  [8]

Per calcolare le diverse variabili di *soprassuolo* sono stati considerati anche i pixel con valori di altezza pari a zero.

### **Elaborazione dei modelli predittivi del volume ad ettaro su base LiDAR**

In via del tutto preliminare si è voluto verificare che l'altezza degli alberi desunta dal tematismo CHM fosse comparabile a quella reale determinata al suolo. Alcune decine di controlli empirici su chiome arboree ben visibili sulle immagini, la cui altezza era stata misurata in campo, hanno messo in luce l'evidente concordanza, peraltro attesa. La circostanza è inoltre desumibile anche mettendo in relazione la variabile  $\bar{h}_a$  (altezza media degli alberi) con l'altezza media dendrometrica calcolata in base ai rilievi effettuati al suolo in identica collocazione nelle aree di saggio. Osservando il grafico in Figura 2 si nota la relazione tra la variabile  $\bar{h}_a$  e l'altezza media "vera", in assenza di significativi scostamenti sistematici positivi o negativi, come confermato dagli esiti del test *t* eseguito ( $t = 0,746$ , con *t* critico = 2,024 per  $\alpha = 0,05$ ).



**Figura 2 – Relazione tra altezza media “vera” degli individui arborei (derivante da rilievi al suolo) e altezza media degli alberi (calcolata dai dati LiDAR). 39 aree di saggio (Foresta demaniale provinciale di Paneveggio).**

Verificata l'esistenza dei presupposti per lo studio di un modello statistico di stima per regressione del volume rilevato al suolo (39 casi) tramite le variabili predittive calcolate sul CHM, è stata attuata l'analisi statistica di regressione mediante l'applicativo STATISTICA 8 (*General Linear Model*, di Statsoft).

Ponendo:

- $V$ , cioè il volume ad ettaro stimato al suolo di tutti i soggetti con diametro superiore a 2,5 cm (o “volume totale”), come variabile dipendente;
  - $V_p$ , cioè il volume ad ettaro stimato al suolo dei soli soggetti con diametro superiore a 17,5 cm (o “volume assestamentale”), come variabile dipendente;
  - $\bar{h}$ ,  $\bar{h}_a$ ,  $h_{max}$ ,  $s_h$ ,  $C$ , come variabili descrittrici o predittrici,
- si è attuata un’analisi di regressione multipla dei modelli:

$$V = f(\bar{h}, \bar{h}_a, h_{max}, s_h, C) \quad [9]$$

$$V_p = f(\bar{h}, \bar{h}_a, h_{max}, s_h, C) \quad [10]$$

selezionando con la tecnica *stepwise (forward)* le variabili con contributo significativo alla stima di  $V$ . Si precisa che non sono state incluse nel modello variabili interazione.

Dall’analisi di cui sopra è emerso che i modelli ottimali risultano in entrambi i casi modelli lineari (rettilinei) del tipo:  $V = a + b \bar{h}$ . La tecnica *stepwise* seleziona infatti in entrambi i casi come sola variabile esplicativa con contributo altamente significativo “l’altezza media del soprassuolo”. Tale variabile è in sostanza data dalla media delle altezze CHM nei pixel appartenenti all’area di saggio, considerando che i pixel con valori CHM inferiori a 2 m sono stati forzati al valore zero. Partendo da un modello di regressione multipla privo di variabili interazione, la circostanza non ha potuto che portare ad un semplice modello rettilineo, peraltro per certi aspetti auspicabile sotto il profilo dell’applicazione pratica ai fini estimativi.

## Risultati

### *I modelli di stima del volume su base LiDAR e loro capacità di adattamento ai dati sperimentali*

In Tabella 4 sono sintetizzati i parametri dei modelli elaborati e le statistiche inerenti l’adattamento ai dati sperimentali. In Figura 3 sono rappresentati i modelli dei due tipi di volume e i dati osservati da cui derivano.

La capacità esplicativa dei modelli [9] e [10] (Tab. 4) risulta abbastanza elevata, pari a circa l’88% in termini di  $R^2$  *adjusted*.

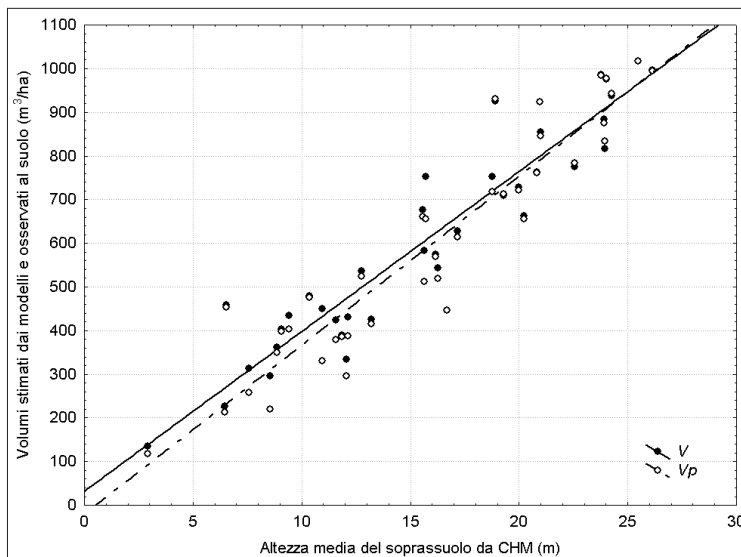
Mentre il coefficiente angolare  $b$  è sempre altamente significativo, non si può dire altrettanto per l’intercetta ( $a$ ), circostanza che dovrebbe far concludere che in realtà i modelli che stimano i due volumi dovrebbero essere semplificati al modello più elementare esistente che è quello di una retta che passa per l’origine degli assi.

La considerazione delle intercette, tuttavia, determina una tendenza dendrometricamente plausibile, cioè la convergenza dei modelli per i valori alti di volume per ettaro e, per contro, una divergenza verso il basso del volume assestamentale rispetto al volume totale, in corrispondenza di basse provvigioni per ettaro. Ciò corrisponde alle attese laddove si consideri che nei popolamenti giovani l’aliquota di volume fornita dai soggetti tra 2,5 e 17,5 cm di diametro (“preinventariali”) può assumere anche netta preponderanza su quella relativa ai soggetti “inventariali” (nel senso dell’assestamento trentino). In sostanza, al di sotto di certe soglie di  $\bar{h}$  (1-2 m) continua a sussistere volume totale mentre praticamente si azzerava il volume assestamentale.



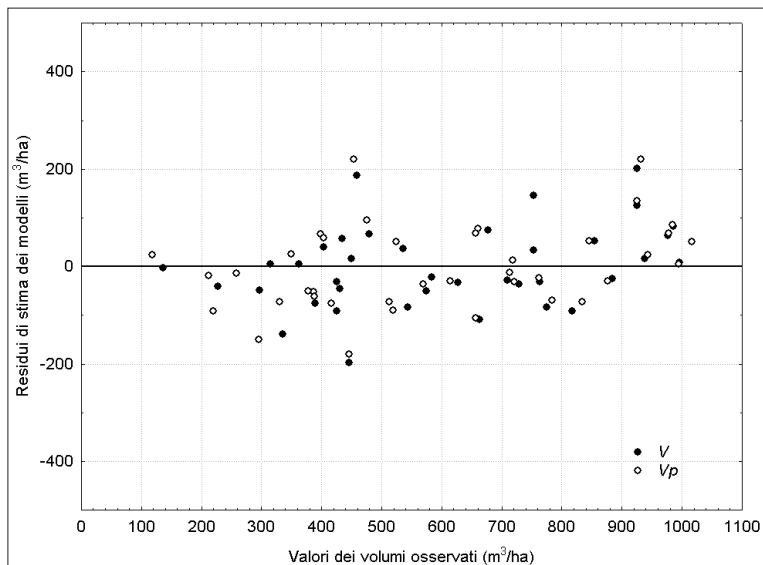
**Tabella 4 - Parametri dei modelli elaborati e statistiche inerenti il loro adattamento ai dati sperimentali.**

Variabile stimata dal modello		V	V <sub>p</sub>
tipo di volume stimato		Volume totale	Volume assest.
unità di misura		m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha
modello		$V = a + b \bar{h}$	$V_p = a + b \bar{h}$
parametri	intercetta (a)	32,24754	-19,8870
	coeff. ang. (b)	36,61670	38,6869
significatività	intercetta (a)	no	no
	coeff. ang. (b)	> 99%	> 99%
intercetta (a): intervallo fiduciale al 95%	inferiore	-45,0325	-99,8954
	superiore	109,5276	60,12142
coeff. angolare (b): interv. fiduciale al 95%	inferiore	32,0886	33,9990
	superiore	41,1448	43,37487
coefficiente di correlazione	R	0,937483	0,939750
coefficiente di determinazione	R <sup>2</sup>	0,878874	0,883130
coeff. di det. adattato al num. di predittori	R <sup>2</sup> adjusted	0,875600	0,879972
errore standard di stima (m <sup>3</sup> )	RMSE	85,01	88,27
errore standard di stima (%)	ESS (%)	13,8	14,8



**Figura 3 – Andamento dei modelli di stima del volume totale (linea continua) e di quello assestamentale (linea tratteggiata) e dati osservati al suolo per i due volumi. 39 aree di saggio (Foresta demaniale provinciale di Paneveggio).**

L'analisi dei residui per entrambi i modelli mostra una distribuzione abbastanza omogenea che non evidenzia particolari tendenze nei diversi intervalli di esplicazione della variabile osservata (Fig. 4). I valori caratteristici dei residui sono sintetizzati in Tabella 5.



**Figura 4 – Andamento dei residui di stima dei modelli per i due tipi di volume al variare dei volumi osservati al suolo. 39 aree di saggio (Foresta demaniale provinciale di Paneveggio).**

**Tabella 5 - Analisi dei residui tra dati stimati e osservati di volume ad ettaro e di volume assestamentale ad ettaro.**

Variabile stimata dal modello		V	Vp
tipo di volume stimato		Volume totale	Volume assest.
unità di misura		m³/ha	m³/ha
modello		$V = a + b \bar{h}$	$V_p = a + b \bar{h}$
residui con segno	media	0	0
	mediana	-3,521	-14,466
	min	-197,886	-180,473
	max	200,725	220,773
residui assoluti	media	65,069	68,655
	mediana	49,582	60,819
	min	3,521	4,326
	max	200,725	220,773

### **Analisi della capacità predittiva dei modelli**

I modelli di stima di  $V$  e  $V_p$  sono stati studiati essenzialmente in vista di un loro impiego per la predizione dei volumi unitari locali o riferibili alle particelle forestali (comparti territoriali propri della pianificazione forestale, in Trentino estesi 10-20 ettari in media).

Per predizione locale si intende una stima del volume ad ettaro riferita a ogni singolo pixel alla risoluzione del CHM e associata a quest'ultimo. La sommatoria di tutti i valori di volume unitario dei pixel appartenenti ad una determinata particella, rapportata al loro numero, fornirà una stima del volume legnoso medio ad ettaro della particella che, moltiplicata per la superficie di quest'ultima, darà una stima del suo volume totale.

Per giungere a ipotizzare gli errori che potrebbero affliggere tali stime, al di là della considerazione del valore singolare di RMSE emerso dall'analisi (85,01 m<sup>3</sup>/ha per  $V$  e 88,27 m<sup>3</sup>/ha per  $V_p$ , rispettivamente), in relazione ai modelli costruiti sull'intero insieme di dati disponibili si è operata una analisi di *cross-validation* dei modelli i cui risultati sono evidenziati in Tabella 6.

In questo contesto dal set di 39 casi disponibili sono stati selezionati casualmente il 60% dei valori facendoli confluire nel *training set*, mentre il rimanente 40% veniva assegnato al *test set*. Con i primi sono stati studiati di volta in volta i modelli di regressione nella struttura già nota per entrambi i tipi di volume. Sui secondi, non influenti nel *fitting* dei modelli, è stato calcolato l'errore standard di stima (ESS in percentuale, RMSE in valore assoluto) di ogni specifico modello risultante. L'operazione è stata ripetuta un congruo numero di volte (ogni volta con la ripetizione dell'estrazione dei casi) e sono stati quindi valutati gli intervalli di variabilità dell'errore standard di stima, assegnando alla media di tali valutazioni il ruolo di indicatore del presumibile errore (locale) di predizione dal quale saranno affette le stime nell'applicazione pratica del modello.

**Tabella 6 - Esiti dell'analisi di *cross-validation* dei modelli: medie dei parametri di performance di adattamento e stima sui dati test, ottenute in un congruo numero di iterazioni del *fitting* sul 60% dei dati sperimentali selezionati casualmente.**

Variabile stimata dal modello	V	$V_p$
tipo di volume stimato	Volume totale	Volume assestamentale
$R$	0,936	0,940
$R^2$	0,877	0,884
$R^2$ adjusted	0,871	0,878
RMSE (m <sup>3</sup> /ha)	87,7	91,1
ESS (%)	14,3	15,3

### **Capacità predittiva a livello di comparto assestamentale**

In uno scenario di impiego assestamentale realistico può essere interessante valutare la precisione di stima del volume legnoso totale di una particella, basata su una pluralità di campioni indipendenti di "misura" di  $\bar{h}$  sull'insieme di pixel CHM inclusi nella particella in questione. In tale situazione si assiste ad una compensazione di errori positivi e negativi e l'incertezza relativa della somma dei valori attesi, ciascuno derivante dall'applicazione di uno stesso modello di stima, diminuisce molto sensibilmente rispetto a quella conseguibile sul singolo valore atteso componente la somma. In uno studio di Tabacchi [1989], condotto sulla stima del volume di alberi con modelli ad una entrata, si sono riscontrati aumenti di

precisione relativa media di 13 volte tra la stima del volume del singolo albero e quella di un collettivo di 100 soggetti. Applicando tale approccio ad una ipotetica particella di 10 ettari della Foresta di Paneveggio per la quale si dispone della somma di 80 stime indipendenti del modello LiDAR del volume assestamentale (tale numerosità deriva dal rapporto fra la superficie totale particellare e l'estensione dell'intorno di analisi considerato nelle elaborazioni sul CHM, pari a 1256 m<sup>2</sup>) si perviene ad una valutazione dell'incertezza totale della stima del volume particellare del 3,1% (178 m<sup>3</sup> su quasi 6000 m<sup>3</sup>).

A esiti sostanzialmente analoghi si è pervenuti eseguendo una simulazione che ha generato una serie di valori virtuali sia per i volumi provenienti dalle misurazioni al suolo che per i rispettivi volumi stimati con il modello LiDAR. Tali valori sono stati prodotti a partire da distribuzioni normali del volume aventi i parametri statistici reali desunti dal complesso delle aree di saggio realizzate sull'intera foresta: per i dati al suolo, media di 590 m<sup>3</sup>/ha e deviazione standard di 200 m<sup>3</sup>/ha (CV= circa 34%); per i dati stimati dal modello LiDAR, ESS pari al 15,3% (Tab. 6). La simulazione ha prodotto 100 stime di volume particellare, ciascuna costituita dalla somma di 80 determinazioni indipendenti. Analizzando la distribuzione di tali stime si desume che in due casi su tre (errore standard) la differenza fra i valori di riferimento (volume "reale" particellare) e i valori stimati con il modello LiDAR, non supera il 2,3% (ESS del volume assestamentale particellare). Tale valore è inferiore a quello conseguibile con il cavallettamento totale (misura del diametro ad 1,3 m di tutti i soggetti arborei presenti nella particella, rilievo tipico della pianificazione forestale), affetto da un errore standard del 4% sul volume presente [Scrinzì, 1989].

### ***Impiego del modello nella previsione dei volumi assestamentali e confronto con le stime di piano***

Il modello di stima del volume assestamentale è stato applicato in senso previsionale ad alcune particelle facenti parte del piano di assestamento della Foresta demaniale di Paneveggio.

In tale ambito si è provveduto a stimare per ogni pixel del CHM disponibile, in riferimento ad una finestra di analisi pari a 20 metri di raggio (ampiezza prevalente delle aree di saggio rilevate al suolo), il volume assestamentale locale per ettaro. L'esito di tale processo è rappresentato nella Figura 5 (particolare) e costituisce una sorta di visualizzazione della variabilità spaziale del volume per ettaro a livello inter- e sub-particellare. Tali tipi di rappresentazione possono assumere grande rilevanza in molte fasi della redazione dei piani (stratificazione per l'inventario statistico, piano dei tagli, ecc.). Da tali elaborazioni è logicamente molto facile risalire ad una stima del dato complessivo di volume particellare (Fig. 5).

Alcune delle particelle rappresentate in figura hanno subito l'ultimo inventario disponibile per cavallettamento totale nel 1991. Su tali particelle si sono potute quindi confrontare le stime LiDAR con dati reali assestamentali. Pur assegnando al confronto un peso commisurato ai limiti derivati soprattutto dal riferimento temporale dei due dati (17 anni di differenza, durante i quali si sono verificati fenomeni di incremento, utilizzazioni, ecc.), dalla Figura 6 si osserva come i dati della stima LiDAR siano in evidente correlazione con quelli della pianificazione, se si eccettua il caso della particella 102. Alcuni controlli eseguiti sui dati assestamentali lasciano ipotizzare che alla particella in questione sia stata assegnata una serie tariffaria sottostimata per il passaggio dai dati di cavallettamento ai volumi.

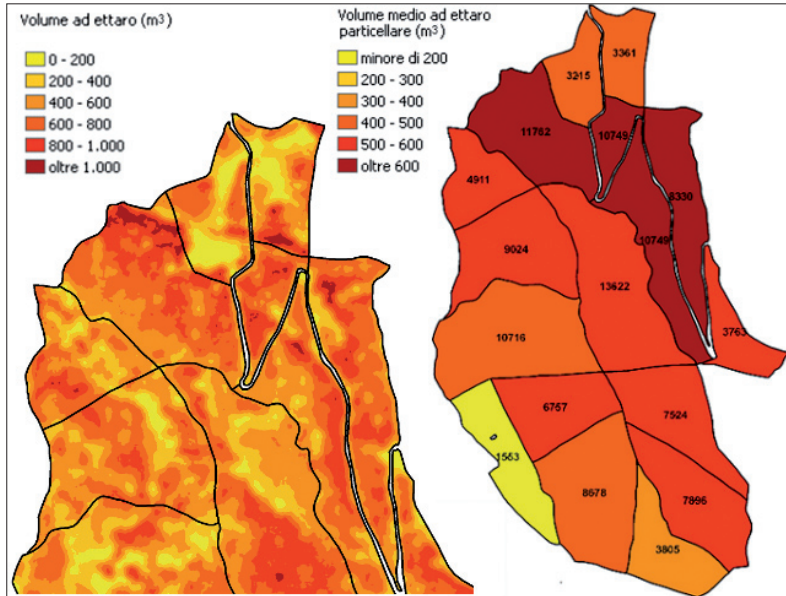


Figura 5 – Foresta demaniale provinciale di Paneveggio. A sinistra: variabilità spaziale della stima LiDAR del volume per ettaro nell’ambito di alcune particelle. A destra: rappresentazione del volume medio per ettaro derivante da stima LiDAR in alcune particelle; i numeri indicano il volume totale particellare stimato (m³).

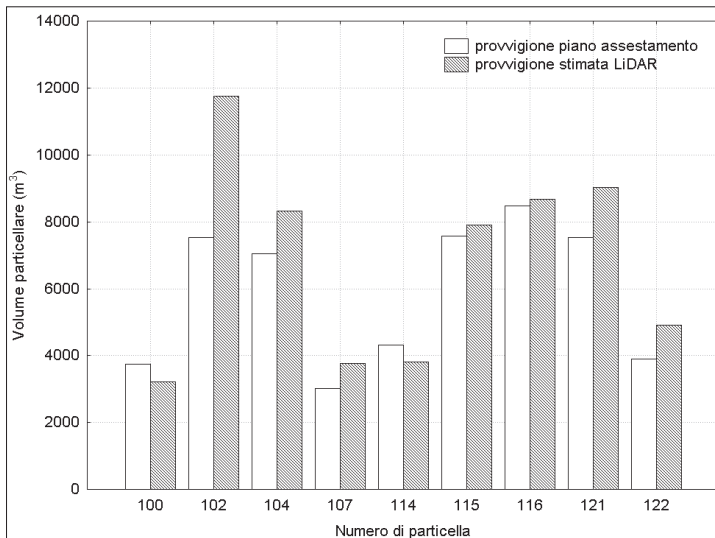


Figura 6 – Foresta demaniale provinciale di Paneveggio. Confronto dei volumi totali particellari del piano di assestamento del '91 con i dati delle stime LiDAR 2008 (m³). Si noti la divergenza nel caso della particella 102 di cui si fa cenno nel testo.

## Discussione

In primo luogo è il caso di fare qualche osservazione sul significato predittivo della variabile selezionata ( $\bar{h}$ ) dalla tecnica di regressione *stepwise* nei confronti delle altre variabili sottoposte a test e rivelatesi non altrettanto esplicative.

Se da un lato è logico attendersi che la media delle “quote” dello strato vegetale arboreo su una determinata superficie sia correlata al volume legnoso presente nella stessa superficie, tuttavia anche la densità di alberi presenti (numero di soggetti sulla superficie unitaria) dovrebbe influire sul volume unitario, dal momento che esso, a parità di altezza media dei soggetti presenti, sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la loro densità. Per tale motivo erano state inserite nel modello le variabili  $\bar{h}_a$  e  $C$  e cioè rispettivamente l'altezza media dei soli pixel CHM con valore superiore a 2 metri e il rapporto tra il numero di tali pixel e quello totale della matrice di esplorazione (copertura come espressione della densità).

Il fatto che la selezione *stepwise* non riconosca significato predittivo a tali due variabili si spiega con la considerazione che  $\bar{h}$  riassume il contributo esplicativo di entrambe le precedenti. Essa, infatti, assume valori identici ad  $\bar{h}_a$  nel caso di densità pari a 1 (nessun pixel CHM evidenzia valore inferiore a 2 m) mentre diverge negativamente rispetto ad  $\bar{h}_a$  tanto più drasticamente quanto  $C$  diminuisce, in modo congruente con la diminuzione presumibile del volume unitario.

Poco o per nulla significative sono invece risultate essere  $s_h$ , debolmente significativa solo nel modello privo di  $\bar{h}$ , e  $h_{max}$  sottoposta a test ipotizzandone un contributo esplicativo “di sostegno” alle altre variabili, ma evidentemente troppo influenzata dalle condizioni di densità.

Può essere utile un confronto con alcuni altri studi, italiani e stranieri, condotti con analoghi approcci di tipo *area based*.

Nel caso di uno studio realizzato da Corona et al. [2008] nella foresta di Farnia e Cerro del Bosco Fontana (MN), si è scelto un approccio nel quale la capacità esplicativa delle altezze CHM nella stima dei volumi per ettaro al suolo non è stata studiata in base ai loro valori nativi ma in base a trasformazioni di questi (potenza di 3,5 delle altezze CHM), ipotizzando che la trasformazione aumentasse la correlazione col volume arboreo in base ad alcune considerazioni di ordine dendrometrico. Tale ricerca dimostra l'indubbia esistenza di correlazione tra quote CHM e volumi al suolo pur pervenendo ad un modello con  $R^2 = 0,61$ .

Il lavoro di Fusco et al. [2008], realizzato su uno scenario boschivo prealpino (cedui mesofili) della Valsassina (Lecco) ad elevate pendenze, conferma la relazione tra 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 ESS intorno al 21% (31 Mg/ha su circa 150 Mg di biomassa media per ettaro).

Naasset [2004], in base a studi realizzati in foreste boreali scandinave, riporta errori standard di stima tra 17,5% e 22,5% del volume ( $R^2$  tra 0,83 e 0,97). Si tratta peraltro di ambienti ad orografia molto meno accentuata e di maggiore omogeneità compositiva e strutturale di quelli alpini.

In un lavoro di Hollaus et al. [2007] realizzato nel Vorarlberg austriaco e che presenta notevoli analogie con il presente studio per quanto attiene allo scenario forestale (fustaie di abete rosso subalpine ad elevate provvigioni), viene ripreso il modello generale di Naasset [2004] che riferendosi alle estensioni delle aree di saggio contiene, sia del primo

che dell'ultimo eco, numerose grandezze statistiche quali diversi valori percentili delle distribuzioni, i valori medi, i CV e i valori della distribuzione cumulata delle densità di segnali di ritorno in corrispondenza di frazioni caratteristiche del *range* di altezza. Nonostante la complessità del modello di partenza l'analisi riduce solo a tre le variabili significative finali. Le performance di stima sono leggermente inferiori a quelle ottenute in questo studio ( $R^2=0,84$ , ESS = 23%, RMSE = 97 m<sup>3</sup>/ha).

Dagli studi esaminati emerge la maggiore complessità e variabilità che un soprassuolo di latifoglie evidenzia rispetto a un bosco di conifere in termini di "lettura" LiDAR, che si traduce in modelli predittivi di minore capacità esplicativa.

Un utilizzo operativo della tecnologia LiDAR, peraltro, non può prescindere dall'analisi del rapporto costi/benefici, pur nella consapevolezza che in un settore tecnologico in veloce e costante evoluzione i costi tenderanno a contrarsi notevolmente.

Renslow et al. [2000] hanno messo a confronto i rilevamenti tradizionali al suolo e il rilevamento LiDAR in una foresta assestata ipotizzando il rilevamento di circa 80 ettari e stimando un risparmio, con l'uso del LiDAR, di circa 15.000 dollari, riducendo i tempi di acquisizione dei dati da 14 settimane (rilievi al suolo) a 4 settimane. Naeset [2004], attraverso analoghe comparazioni, giunge a conclusioni molto ottimistiche stimando che la tecnologia LiDAR abbia un rapporto costo/precisione nettamente migliore delle altre tecniche (campionamento per aree di saggio, campionamento relascopico, fotogrammetria tradizionale) nel determinare il volume della massa legnosa. Barilotti [2009], afferma che il costo medio di una ripresa LiDAR a risoluzione medio-alta (5 punti/m<sup>2</sup>) da elicottero, in zona unica estesa circa 10.000 ettari e con fornitura dei dati grezzi, si aggira sui 5 euro/ha, ai quali sommare 1-2 euro/ha per la simultanea ripresa di foto digitali ad alta risoluzione RGB+NIR. Si pensi che un inventario per cavallettamento totale particellare (peraltro ormai improponibile) prevede costi per almeno 60 euro/ha e un inventario statistico relascopico a scala assestamentale per circa 12 euro/ha. Pur considerando che normalmente consistenti parti di proprietà assestata, come i boschi di protezione e i pascoli arborati, nella realizzazione dei piani sarebbero esclusi da qualsiasi forma di rilevamento diretto, la differenza rimane comunque rilevante.

## Conclusioni

Lo studio conferma le notevoli prospettive delle tecniche di telerilevamento LiDAR nel settore degli inventari finalizzati alla pianificazione forestale, ma probabilmente anche agli inventari forestali in quanto tali.

Nell'ambito di una realtà come quella della Foresta demaniale provinciale di Paneveggio i modelli messi a punto per la stima inventariale dei volumi e della loro variabilità spaziale raggiungono performance analoghe e in taluni casi superiori a quelle riportate in altri studi nazionali e stranieri.

Particolarmente soddisfacenti risultano le previsioni di precisione ipotizzabili nella stima dei volumi a livello di particelle assestamentali, basate su un congruo numero di applicazioni locali sub-particellari del modello di stima. D'altra parte occorre ricordare la notevole quantità di informazione che è in grado di fornire un CHM anche a livello di piccole superfici, per le quali si può disporre di un numero di dati di altezza del soprassuolo, e quindi di volume, pari a quello della risoluzione del CHM.

Alla luce delle buone performance di stima conseguibili utilizzando modelli piuttosto

semplici, basati unicamente sulla media delle altezze CHM in ambiti di esplorazione di 1000-1300 metri quadrati, l'impiego di modelli che utilizzano molti indicatori derivati da dati LiDAR nativi appare forse da valutare attentamente, in termini di costi e complessità operativa.

La dimensione e la georeferenziazione delle aree di saggio di calibratura al suolo, sempre necessarie per la costruzione di modelli con tecniche *area based*, costituiscono elementi di criticità crescente al diminuire della loro estensione e all'aumentare dell'incertezza del loro posizionamento. Quest'ultima può essere già ora diminuita fino a 1,5-2,5 m migliorando la qualità e la durata dei rilievi GPS, peraltro rinunciando a qualche vantaggio in termini di rapidità di esecuzione. L'avvento di nuove tecnologie di radioposizionamento (sistema europeo Galileo) potrebbe tra non molto aumentare di un ordine di grandezza le precisioni oggi conseguibili, anche in un ambiente ostile ai segnali satellitari come il bosco.

Non è neppure azzardata la previsione che, con un parallelo sviluppo del telerilevamento radiometrico ad elevata risoluzione nel riconoscimento delle specie arboree, le stime dei volumi su base LiDAR possano in futuro essere realizzate dalle Amministrazioni in sede extra-assestamentale e divenire il punto di partenza per la redazione dei piani stessi.

Le diverse entità, collettive e individuali, deputate all'amministrazione del territorio, dovranno cercare di coordinare le loro campagne di acquisizione e analisi dei dati in modo da ottimizzare le risorse a disposizione e realizzare, in questo caso, un'integrazione non solo tecnologica, ma anche tra obiettivi, intenti e soggetti portatori d'interesse.

## Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito della Convenzione di Ricerca RESIA2 "Revisione dei metodi per la pianificazione forestale trentina", tra CRA-MPF di Trento e Servizio Foreste della Provincia Autonoma di Trento. Gli Autori ringraziano il responsabile dell'Ufficio Pianificazione e Selvicoltura, dott. Alessandro Wolynski e i suoi collaboratori dott. Angelo Carriero e dott. Massimo Miori, per aver messo a disposizione i dati provenienti dai voli LiDAR e dai rilevamenti al suolo (realizzati da Personale dell'Ufficio stesso), nonché per i preziosi contributi critici forniti durante lo svolgimento dello studio. Si ringrazia il dott. Gianni Tabacchi per il suo contributo nella stima delle incertezze a livello particellare.

## Bibliografia

- Abramo E., Barilotti A., Sepic F. (2007) – *Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi laser-scanning*. *Foresta@* 4 (4): 373-385.
- Andersen H., Reutebuch S.E., Schreuder G.F. (2001) – *Automated Individual Tree Measurement Through Morphological Analysis of LiDAR-Based Canopy Surface Model*. Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium. Seattle, Washington.
- Barilotti A., Turco S., Ciampalini R. (2005a) – *Misurazione automatica di singoli alberi attraverso analisi morfologiche su dati laser scanning*. Atti della IX Conferenza annuale ASITA, Catania.
- Barilotti A., Turco S., Napolitano R., Bressan E. (2005b) – *La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali*. XV Congresso della Società Italiana di



- Ecologia, Torino.
- Barilotti A., Sepic F. (2006) – *Delineazione automatica delle chiome in diverse tipologie forestali attraverso analisi di dati LiDAR*. Atti X Conferenza ASITA, Bolzano, 14-17 novembre 2006.
- Barilotti A. (2009) – *Aspetti teorici, principi tecnici generali e caratteristiche dei dati*. Comunicazione orale presentata al Seminario di aggiornamento Tecnico “Lidar Aereo Per I Rilevamenti Forestali”. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze 30 gennaio 2009.
- Casella V. (2003) – *Introduzione al Laser Scanning Aereo*. In Crosilla F., Galetto R., 2003 – *La tecnica del Laser Scanning. Teoria ed applicazioni*. CISM, Collana di Geodesia e Cartografia: 1-37.
- Colle G., Floris A., Scrinzi G., Tabacchi G., Cavini L. (2009) – *The Italian National Forest Inventory: geographical and positioning aspects in relation to the different phases of the project*. In: Proceedings, 8th annual forest inventory and analysis symposium; 2006 October 16-19; Monterey, CA, USA. USDA Forest Service, Gen. Tech. Report WO-79: 1-8.
- Corona P., Fattorini L. (2008) – *Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume*. Canadian Journal of Forest Research. 38: 2911-2916.
- 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.), *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.
- Dubayah R. O., Blair J. B., Bufton J. L., Clark D. B., Jaja J., Knox R. G., Luthcke S. B., Prince S., Weishampel J. F. (1997) – *The Vegetation Canopy Lidar mission*. Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda MD.
- Dubayah, R.O., Drake, J.B. (2000) – *Lidar remote sensing for forestry*. *Journal of Forestry* 98, n. 6: 44–46.
- Fusco S., Pflugmarcher D., Kirschbaum A., Cohen W., Chiantante 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 12° Conferenza Nazionale ASITA, L’Aquila, 21-21 ottobre 2008.
- Gobakken T., Naesset E. (2005) – *Weibull and percentile models for lidar-based estimation of basal area distribution*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20: 490-502.
- Hollaus M., Wagner W., Maier B., Schadauer K. (2007) – *Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment*. *Sensor-MDPI*, 7, 1559-1577.
- Manzino A. M., Roggero M. (2003) – *Il trattamento informatico del dato Laser*. In Crosilla F. Galetto R., 2003 – *La tecnica del Laser Scanning. Teoria ed applicazioni*. CISM, Collana di Geodesia e Cartografia: 39-74.
- Naesset E. (2004) – *Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19:164–179.
- Packalén P., Maltamo M. (2006) – *Predicting the Plot Volume by Tree Species Using Airborne Laser Scanning and Aerial Photographs*. *Forest Science* 52(6), pp. 611-622.

- Renslow M., Greenfield P., Guay T. (2000) – *Evaluation of Multi-Return LIDAR for Forestry Applications*. Report prepared for The Inventory & Monitoring Steering Committee, USDA Forest Service, San Dimas Technology & Development Center, CA.
- Scrinzi G. (1989) – *Precisione degli inventari assestamentali per cavallettamento totale: un'analisi di trent'anni d'esperienza applicativa in Trentino*. Annali dell'Istituto Sper. per l'Assestamento For. e per l'Alpicoltura vol. XI, Trento - 1988. 143 - 186.
- Scrinzi G., Floris A. (2003) – *Procedure di individuazione, materializzazione e ritrovamento dei punti campionamento (dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi forestali del Carbonio – INFC, Corpo Forestale dello Stato)*. Isafa, Trento. 48 p. (Allegati: Moduli di campagna e Norme di compilazione, 31 p.).
- 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 p.
- Tabacchi G. (1989) – *Sulla precisione delle stime condotte con tavole di cubatura costruite con metodo analitico*. Annali dell'Istituto Sper. per l'Assestamento For. e per l'Alpicoltura vol. XI, Trento - 1988. 187 - 236.
- van Aardt J. A. N., Wynne R. H., Oderwald R. G. (2006) – *Forest Volume and Biomass Estimation Using Small-Footprint LiDAR-Distributional Parameters on a Per-Segment Basis*. Forest Science 52(6), pp. 636-649.
- Vosselman G. (2003) – *Filtering of Laser Altimetry Data*. In Crosilla F. Galetto R., 2003 – La tecnica del Laser Scanning. Teoria ed applicazioni. CISM, Collana di Geodesia e Cartografia: 101-111.

**Ricevuto il 17/03/2010, accettato il 21/05/2010**