

Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi *laser-scanning*

Abramo E*, Barilotti A, Sepic F

Dipartimento di Georisorse e Territorio - Università degli studi di Udine, via Cotonificio 114, 33100 Udine (Italy) -

*Corresponding Author: Elena Abramo (elena.abramo@uniud.it).

Abstract: *From a diameter-based to a height-based dendrometry: estimate of tree volume from laser scanning measurements.* Laser scanning is a recently-introduced remote sensing technology that shows high potentiality in the context of the forestry resources management. The research group of the University of Udine, within an INTERREG IIIA Phare/CBC Italy-Slovenia project, developed specific methods regarding the use of *LiDAR* data for forestry applications. A specific methodology which makes possible to obtain the position of the single trees and their relative heights has been implemented. On the basis of the height distributions, using stand height curves relation already available in the stand volume tables, a method to derive the volume values of each tree is proposed. The paper shows the first results obtained with the above method in terms of diameter and volume estimation on the basis of laser scanning data surveyed in different composed forestry plots. A comparison between laser-based and traditional methods-based data is also presented. Some of the consequences of this different way to use the stand volume tables were analyzed, and an experimental procedure is proposed that seems to guarantee a sufficient reliability of the results, and their historical continuity. Furthermore, the approach described may reduce the costs of the traditional dendrometric assessment, nowadays not sustainable in forest management.

Keywords: Laser scanning, Tree volume, Stand volume tables, Forest management, Friuli Venezia Giulia.

Received: Apr 16, 2007 - Accepted: Nov 06, 2007

Citation: 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. [online] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>.

Introduzione

Nell'ultimo decennio le scienze ambientali applicate hanno subito un radicale cambiamento grazie alla comparsa di nuove tecnologie relative al reperimento e al trattamento dei dati territoriali. Anche il mondo forestale ha tratto benefici da tali innovazioni, soprattutto nel settore della pianificazione. Infatti, la gestione informatizzata dei dati territoriali (*raster* o vettoriali), quali ortofoto, carte tecniche, mappe tematiche e banche dati, ha permesso di mettere a punto varie applicazioni (interrogazioni, visualizzazioni, report, ecc.) che rendono banali quesiti di natura territoriale, la cui risposta, solo alcuni anni fa, necessitava di tempi lunghi, generando talvolta imbarazzanti semplificazioni (Köhl et al. 2006).

Grazie a queste nuove tecnologie vi è stato un notevole miglioramento nella percezione e nell'analisi

dell'ambiente da pianificare, fatto che ha permesso un salto di qualità negli elaborati tecnici di supporto alle scelte pianificatorie.

Nonostante questi miglioramenti la pianificazione forestale appare spesso sull'orlo di una crisi a causa degli alti costi (Maistrelli 2007, Wolynsky 2005), a fronte di benefici non sempre chiari e comprensibili, soprattutto nel caso le si attribuisca riduttivamente la sola funzione di organizzazione, nel tempo e nello spazio, delle utilizzazioni legnose (Corona & Tabacchi 2001). In particolare, paiono insostenibili i costi dei rilievi di natura dendrometrica, che potrebbero essere omessi in proprietà forestali a lunga tradizione assestamentale (proprietà con 4-5 revisioni di piano d'assestamento), ma ai quali molte Amministrazioni non vogliono rinunciare per garantire la continuità storica di quelle fondamentali informazioni che

solo la pianificazione forestale è in grado di fornire (evoluzione della massa, delle utilizzazioni, dell'incremento, della struttura, ecc.).

Fra le nuove tecnologie di rilievo che si stanno diffondendo in campo ambientale, il *laser scanning* da aeromobile sembra poter portare un significativo contributo nella riduzione dei costi dei rilievi dendrometrici, senza peraltro pregiudicare la qualità e la continuità storica delle informazioni.

In questo lavoro si introduce un metodo finalizzato all'estrazione di dati dendrometrici a partire da rilievi *laser scanning* per la caratterizzazione e la pianificazione degli ecosistemi forestali.

Le applicazioni del laser scanning in ambito forestale

La tecnica del *laser scanning* aerotrasportato (*ALS - airborne laser scanning*) rappresenta un nuovo ed efficiente metodo per il rilievo a distanza di porzioni di territorio e la modellazione di oggetti aventi qualsiasi forma e dimensione.

Il sistema è costituito da un telemetro laser, che permette la misura della distanza fra l'apparecchio in volo e l'oggetto riflettente, da un ricevitore GPS, che consente il posizionamento assoluto del sistema e da un apparato inerziale che determina, istante per istante, l'orientamento del telemetro laser.

In corrispondenza di un territorio boscato, una parte degli impulsi emessi dal laser è riflessa direttamente dalle chiome degli alberi mentre una percentuale di essi (dipendente dalla specie, dalla struttura e dalla densità del popolamento) filtra verticalmente attraverso la copertura e raggiunge il suolo prima di ritornare al ricevitore (Turco et al. 2005). Il risultato della scansione è costituito da una "nube georeferenziata di punti" che nel caso di elevata densità di campionamento consente di ottenere una copertura pressoché omogenea dell'area rilevata (Barilotti et al. 2006).

La tecnica di scansione aerea con strumentazione laser (*LiDAR - Light detection and ranging*), appena descritta per sommi capi, appare particolarmente promettente per la determinazione di alcuni parametri di natura forestale, poiché consente di realizzare, grazie al campionamento di un elevato numero di punti, la rappresentazione tridimensionale del bosco.

L'aspetto informatico riveste un ruolo di primaria importanza nel trattamento e nello sviluppo di algoritmi necessari per il filtraggio, la classificazione e la modellazione della "nube di punti".

In questo contesto, particolare attenzione è stata volta allo sviluppo di metodologie informatiche e di

algoritmi utili per l'estrazione automatica dei parametri che caratterizzano la struttura tridimensionale dei singoli alberi (Barilotti et al. 2007b). Il substrato informatico sul quale sono stati condotti gli esperimenti è costituito da un *software* per la gestione dei dati *LiDAR*, sviluppato *ad hoc* in ambiente *Linux* (Beinat & Sepic 2005), sulla base del quale è stato implementato uno specifico *tool* di algoritmi che permette:

- il posizionamento e il conteggio dei singoli alberi¹;
- l'attribuzione ad ogni albero di un'altezza;
- la delimitazione della forma della chioma e la stima della sua profondità (Barilotti & Sepic 2006).

1 - Le *performance* degli algoritmi di estrazione degli alberi sono state verificate precedentemente a questo lavoro, attraverso estese sperimentazioni in aree di saggio di diversa composizione, struttura e stadio di sviluppo. La trattazione di quest'argomento, che richiederebbe un ampio spazio di analisi, esula dagli obiettivi dell'elaborato e pertanto si rimanda alla bibliografia indicata (Barilotti et al. 2007a, Barilotti et al. 2007b). In breve, si può segnalare che la percentuale di estrazione del numero di alberi dal rilievo *laser scanning* rispetto al numero di soggetti cavallettati e misurati a terra, varia dal 60% al 98%. La soglia di cavallettamento è stata fissata in 5 cm, al fine di valutare le reali potenzialità degli algoritmi anche sugli alberi del piano dominato (evidentemente le *performance* migliorano utilizzando la soglia tradizionale di 17.5 cm). Tali percentuali sono influenzate da diversi fattori; in generale si può affermare che popolamenti di latifoglie, giovani, bistratificati o multistratificati densi, governati a ceduo o convertiti all'alto fusto forniscono percentuali di estrazione inferiori (mediamente del 70-80%) rispetto ai popolamenti di conifere, maturi, monostratificati, regolarmente diradati (percentuali di estrazione mediamente del 90-98%). Gli algoritmi di estrazione degli alberi implementati dal gruppo di ricerca dell'Università di Udine sono stati sottoposti, nel corso del 2006, a un test internazionale di verifica (*Tree Extraction Test*), organizzato dall'ISPRS (*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) e dall'EuroSDR (*European Spatial Data Research*), al quale hanno partecipato Università ed Istituti di ricerca di vari continenti (America, Asia, Europa). L'obiettivo principale del confronto era quello di valutare la qualità, l'accuratezza e la fattibilità dei metodi di estrazione dei parametri arborei basati su dati *laser scanning* e immagini aeree digitali. A tale scopo sono stati messi a confronto i metodi sviluppati dai vari partecipanti, i quali hanno potuto lavorare sugli stessi *dataset* di partenza. Il test richiedeva a ciascun *partner* di estrarre le seguenti informazioni: posizione degli alberi (coordinate x, y del fusto); delimitazione delle chiome; altezza degli alberi; altezza d'inserzione e volume delle chiome. I risultati del test (in fase di pubblicazione), gentilmente concessi dall'Istituto Geodetico della Finlandia (il coordinatore del progetto), hanno dimostrato che gli algoritmi utilizzati dal gruppo di ricerca di Udine (unico partecipante italiano) forniscono i migliori risultati.

Tab. 1 - Caratteristiche principali delle aree di saggio. *Ads*: area di saggio; *N/ha*: numero di alberi per ettaro; *Area*: superficie in m² dell'area di saggio; *Governo*: governo del popolamento presente nell'area di saggio; *Struttura*: struttura descritta in termini di distribuzione verticale del popolamento; *Fase*: fase-stadio del popolamento monopiano; *Dati LiDAR*: densità di punti per m².

Ads	N/ha	Area	Governo	Struttura	Fase	Dati LiDAR
FO_A	663	450	fustaia	monoplana	adulto	2 pt/m ²
FO_B	531	450	fustaia	monoplana	adulto	2 pt/m ²
MB_A	619	450	fustaia	monoplana	adulto	6 pt/m ²
MB_B	1525	450	fustaia	monoplana	spessina	7 pt/m ²
MB_C	575	450	fustaia	monoplana	giovane perticaia	8 pt/m ²
MB_D	463	2000	fustaia	monoplana	adulta	10 pt/m ²
PR_B	840	450	fustaia	monoplana	perticaia	1.5 pt/m ²
PR_C	752	450	fustaia	monoplana	giovane fustaia	1.5 pt/m ²
SA_A	336	2000	fustaia	monoplana	adulto	4 pt/m ²
TU_A	538	700	conv. alto fusto	monoplana	perticaia	2 pt/m ²
TU_B	862	450	conv. alto fusto	monoplana	perticaia	2 pt/m ²
TU_C	553	450	conv. alto fusto	monoplana	perticaia	2 pt/m ²
VB_A	1105	450	fustaia	monoplana	perticaia	5 pt/m ²

Con la medesima scansione laser² è possibile ottenere numerose altre informazioni di notevole interesse anche per la pianificazione forestale. Ad esempio, con diversa elaborazione dei dati³, si può disporre di un modello digitale del terreno (DTM - *Digital Terrain Model*) che, non risentendo più delle interpolazioni dovute al processo fotointerpretativo nelle aree boscate (Barilotti et al. 2005), costituisce un ottimo supporto per la progettazione, ad esempio: della viabilità forestale, dei sistemi d'esbosco, delle opere di sistemazione, ecc. Questo prodotto consente inoltre di utilizzare direttamente la superficie 3D del terreno superando gli inconvenienti che crea quella proiettata sul piano orizzontale comunemente impiegata⁴.

Fra le altre applicazioni del *laser scanning* nella pianificazione forestale si può accennare alla possibilità di analizzare e, quindi, facilmente riportare in carto-

grafia la struttura fisionomica del bosco, nei suoi tre aspetti della distribuzione verticale, della copertura e della distribuzione orizzontale (Del Favero 2004), disponendo così della carta dei tipi strutturali, documento richiesto da molte delle normative assestamentali regionali in vigore.

Infine, fra le varie applicazioni realizzate dal gruppo di ricerca del Progetto INTERREG sopracitato è stata predisposta la possibilità, sempre attraverso l'elaborazione dei dati *LiDAR*, di un viaggio virtuale in 3D all'interno del bosco. Di là dell'effetto scenico, quest'applicazione può essere molto utile per effettuare una prima ricognizione del territorio da pianificare, oltre a rimanere consultabile dal tecnico in qualsiasi momento per eventuali controlli o ripensamenti, assai frequenti nella pratica, ma spesso molto onerosi.

Oltre a quanto sin qui indicato, ciò che può costituire una vera e propria innovazione in termini di costi/benefici, è l'opportunità di utilizzare i dati *LiDAR* per ricavare dati dendrometrici.

Per queste applicazioni è stata stimata (Maroncelli 2005) l'entità dei risparmi ottenibili rispetto ai rilievi tradizionali; essa varia sensibilmente in relazione alla metodologia adottata, in particolare alla quantità di rilievi complementari da compiere a terra.

Alcuni autori hanno già affrontato la possibilità di ottenere informazioni dendrometriche a partire da rilievi *laser scanning* (Bollandsås & Næsset 2006, Maltamo et al. 2006, Gobakken & Næsset 2004, Parker 2006). In questi lavori sono state proposte metodolo-

2 - Una densità di punti pari a 4-5 punti/m² costituisce il limite al disotto del quale i risultati ottenibili con gli algoritmi di individuazione dei singoli soggetti arborei forniscono performance qualitativamente non elevate. Per queste specifiche applicazioni forestali sarebbe opportuno utilizzare rilievi con una densità di punti di 8-10 punti/m².

3 - Realizzabile anche con *software* commerciali come ad esempio Terrascan® della Terrasolid.

4 - Giova ricordare che la convenzione di riferire le superfici al piano orizzontale provoca spesso notevoli inconvenienti in fase di progettazione degli interventi selvicolturali (rimboschimenti, diradamenti, ecc.), ma ancor più ne provoca in fase di collaudo dei lavori, con conseguenze per i tecnici anche di natura penale.

gie utili al calcolo del volume di un popolamento che prevedono modelli di regressione tra le seriazioni ipsometriche ottenute da *LiDAR* e i valori di diametro e altezza misurati a terra in aree di saggio⁵. Ai lavori di questi autori si rimanda per un approfondimento di tale approccio metodologico, pensato e applicato nei boschi in massima parte monospecifici e relativamente poco densi dell'area scandinava o nord americana.

Per l'ambito alpino, notoriamente più complesso dal punto di vista forestale in termini di orografia, composizione, struttura e densità, il gruppo di ricerca del Progetto INTERREG IIIA ha sviluppato una metodologia differente che viene proposta in questo articolo.

Si tratta di un approccio che vuole salvaguardare la possibilità di comparare i dati dendrometrici ereditati dal passato con quelli attuali (cosa non possibile con le metodologie nord europee che prevedono l'impiego di specifiche relazioni). Inoltre, consente di limitare al minimo le integrazioni con rilievi a terra, riducendo i costi della manodopera, pur mantenendo elevati standard qualitativi nella pianificazione.

Per raggiungere questi obiettivi si utilizzano le relazioni già esistenti tra altezza e diametro presenti nelle tavole stereometriche in uso (le tariffe della Regione Friuli Venezia Giulia nel caso di studio) e le seriazioni ipsometriche ricavabili dall'elaborazione di dati *LiDAR*.

Area di studio

Pur non disponendo di dati *LiDAR* acquisiti specificamente per elaborazioni forestali (i dati sono dotati di una densità di punti variabile tra 1.5 e 10 punti/m² con prevalenza di quelli a densità minore) sono state realizzate 13 aree di saggio a terra (di forma circolare e di estensione variabile tra i 450 e i 2000 m²) in ambiti boscati della montagna friulana per i quali era disponibile la copertura *LiDAR*.

Nella scelta delle aree di saggio sono state prese in considerazione situazioni diverse in termini di tipologia forestale (peccete, abieti-piceo-faggeti, piceo-abieteti, piceo faggeti e faggete), di densità (regolare colma, regolare scarsa), di stadio di sviluppo (spessine, perticaie, fustaie adulte) e di forma di governo (fustaie e cedui convertiti all'alto fusto). Il rilievo di dati copre un totale di 555 alberi cavallettati e georeferenziati con precisione centimetrica mediante stazione totale collegata a due stazioni GPS geodetiche.

5 - Alcuni di questi metodi prevedono anche l'onerosa operazione di georeferenziazione degli alberi censiti.

Le caratteristiche principali delle aree di saggio sono riassunte in Tab. 1.

Il Metodo

Dalla seriazione diametrica alla seriazione ipsometrica

In Dendrometria, il volume del fusto di un singolo albero in piedi è classicamente calcolato moltiplicando l'area basimetrica, corrispondente al diametro rilevato a 1.30 m da terra, per l'altezza dell'albero, per un coefficiente di riduzione. Solitamente i valori del volume unitario sono precalcolati e si possono leggere in apposite tabelle, le tavole stereometriche, nelle quali il volume è espresso in funzione del diametro (tavola stereometrica a una entrata) o del diametro e dell'altezza (tavole stereometriche a doppia entrata).

Passando dal volume del fusto di un singolo albero al volume dei fusti degli alberi presenti in un soprassuolo, la procedura più classica prevede un rilievo integrale, sopra una certa soglia, dei diametri a 1.30 m da terra di tutti gli alberi. Tale rilievo può essere fatto sull'intera superficie coperta dal soprassuolo (cavallettamento totale) o su aree campione (metodo campionario per aree di saggio). Si stabilisce successivamente per campionamento la relazione esistente fra il diametro a 1.30 da terra e l'altezza. Questa relazione, detta curva ipsometrica, può avere un diverso impiego secondo la tavola stereometrica disponibile. Così, nel caso si disponga di una tavola a una entrata, la curva ipsometrica teoricamente non entra direttamente nella procedura di calcolo del volume, ma può essere ugualmente utile, ad esempio per verificare la rispondenza della tavola al soprassuolo da stimare (Hellrigl 1986). Se invece si dispone di un sistema di tariffe, vale a dire un insieme affiancato di più tavole a una entrata, la curva ipsometrica (o una sua parte) è utile per stabilire la tariffa adatta al soprassuolo. Infine, se si dispone di una tavola a doppia entrata, la curva ipsometrica permette di scegliere il volume che corrisponde alla "giusta" combinazione diametro-altezza propria del soprassuolo.

Già da questa sintetica illustrazione della procedura adottata in Dendrometria per la stima del volume degli alberi di un soprassuolo, appare evidente che i rilievi previsti si concentrano in massima parte sul diametro a 1.30 m da terra, mentre il rilievo delle altezze è complementare e sempre di tipo campionario. Semplificando i concetti si può quindi parlare di una Dendrometria diametrica, ossia di una procedura che si basa essenzialmente sul rilievo dei diametri.

Il motivo della scelta di questo modo di procedere

Tab. 2 - Sistema di tariffe per l'abete rosso valido nella Regione Friuli Venezia Giulia (Del Favero et al. 2001). Vengono riportate le tavole cormometriche regionali nell'asestamento dei boschi di abete rosso, che forniscono il volume cormometrico con corteccia del fusto svettato a cm 7, il volume netto si ottiene detraendo dal volume tariffario la perdita per corteccia (10-12%) e la perdita di lavorazione (6-8%).

N. tavola	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
	ø	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
[cm]	[m]	[m ³]	[m]	[m ³]														
10	10.7	0.043	9.8	0.040	9.0	0.036	8.1	0.032	7.3	0.029	6.4	0.026	5.6	0.022	4.7	0.019		
15	15.8	0.145	14.6	0.132	13.3	0.119	12.0	0.107	10.8	0.094	9.5	0.082	8.3	0.070	7.0	0.059		
20	20.3	0.329	18.6	0.298	17.0	0.268	15.4	0.239	13.8	0.211	12.2	0.183	10.6	0.156	9.0	0.130		
25	23.8	0.593	21.9	0.538	20.0	0.484	18.1	0.431	16.3	0.380	14.4	0.329	12.5	0.280	10.6	0.233		
30	26.8	0.937	24.7	0.850	22.5	0.765	20.4	0.682	18.3	0.601	16.2	0.521	14.0	0.443	11.9	0.367		
35	29.4	1.364	27.0	1.238	24.7	1.115	22.4	0.994	20.0	0.876	17.7	0.760	15.4	0.646	13.0	0.535		
40	31.5	1.862	29.0	1.691	26.5	1.524	24.0	1.359	21.5	1.198	19.0	1.040	16.5	0.885	14.0	0.733		
45	32.9	2.394	30.3	2.176	27.7	1.962	25.1	1.751	22.5	1.544	19.9	1.341	17.2	1.141	14.6	0.944		
50	34.1	2.973	31.3	2.705	28.6	2.440	25.9	2.180	23.2	1.923	20.5	1.670	17.8	1.421	15.1	1.176		
55	35.0	3.599	32.2	3.277	29.4	2.958	26.7	2.644	23.9	2.333	21.1	2.027	18.3	1.725	15.6	1.426		
60	35.7	4.255	32.9	3.876	30.0	3.501	27.2	3.130	24.4	2.764	21.5	2.401	18.7	2.042	15.9	1.688		
65	36.3	4.955	33.4	4.516	30.6	4.082	27.7	3.651	24.8	3.224	21.9	2.801	19.0	2.382	16.1	1.966		
70	36.8	5.685	33.9	5.184	31.0	4.687	28.1	4.193	25.1	3.703	22.2	3.217	19.3	2.734	16.4	2.255		
75	37.2	6.437	34.2	5.872	31.3	5.310	28.3	4.752	25.4	4.197	22.4	3.645	19.5	3.096	-	-		
80	37.5	7.208	34.5	6.578	31.5	5.950	28.6	5.325	25.6	4.703	22.6	4.083	-	-	-	-		

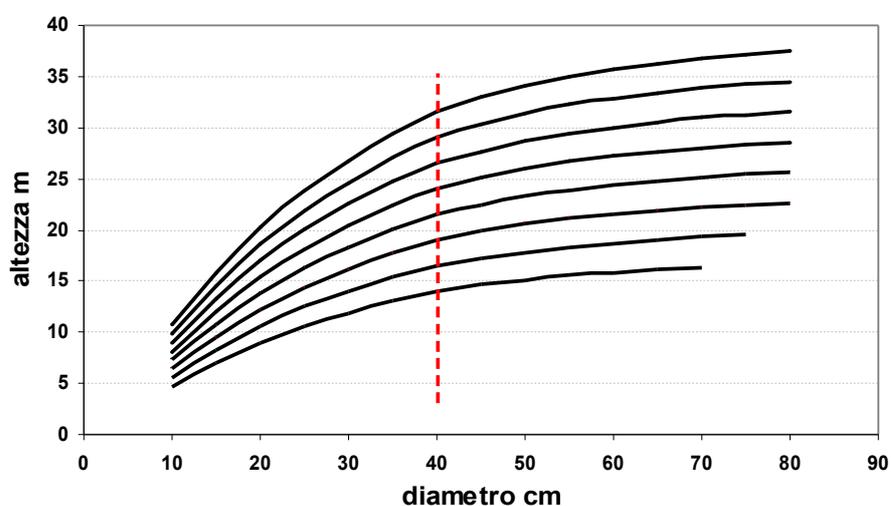
è a dir poco lapalissiano: utilizzando i rilievi a terra è evidentemente molto più semplice e immediato misurare il diametro di un albero piuttosto che la sua altezza.

Attraverso l'elaborazione di dati *laser scanning* (Barilotti et al. 2007a) è invece disponibile il rilievo integrale delle altezze di un popolamento, fatto che consente di introdurre in questo lavoro il passaggio da una dendrometria diametrica a una dendrometria ipsometrica.

Dai sistemi di tariffe in funzione del diametro a quelli in funzione dell'altezza

I sistemi di tariffe adottati in sede di pianificazione forestale dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (Del Favero et al. 2000) costituiscono un insieme coordinato di tavole stereometriche a una entrata. In particolare, ogni sistema di tariffe, diverso per ogni specie legnosa, è costituito da otto (abete rosso, abete bianco, larice) o da sette o meno (faggio, pino silvestre, pino nero) serie stereometriche (relazione

Fig. 1 - Curve ipsometriche di riferimento nel sistema di tariffe dell'abete rosso valido nella Regione Friuli Venezia Giulia



Tab. 3 - Esempio delle prime tre tariffe, valide per l'abete rosso, accorpate in classi ipsometriche.

Classe Diam	Intervallo classe diam.	tariffa 1			tariffa 2			tariffa 3		
		intervallo classe ipsom.	classe ipsom.	volume	intervallo classe ipsom.	classe ipsom.	volume	intervallo classe ipsom.	classe ipsom.	volume
10	7.5-12.5	< 13.4	10.7	0.043	< 12.3	9.8	0.040	< 11.2	9	0.036
15	12.5-17.5	13.41-18.10	15.8	0.145	12.31-16.60	14.6	0.132	11.21-15.20	13.3	0.119
20	17.5-22.5	18.11-22.10	20.3	0.329	16.61-20.30	18.6	0.298	15.21-18.6	17	0.268
25	22.5-27.5	22.11-25.40	23.8	0.593	20.31-23.40	21.9	0.538	18.61-21.4	20	0.484
30	27.5-32.5	25.41-28.20	26.8	0.937	23.41-25.90	24.7	0.850	21.41-23.70	22.5	0.765
35	32.5-37.5	28.21-30.40	29.4	1.364	25.91-28.00	27	1.238	23.71-25.60	24.7	1.115
40	37.5-42.5	30.41-32.20	31.5	1.862	28.01-29.60	29	1.691	25.61-27.10	26.5	1.524
45	42.5-47.5	32.21-33.60	32.9	2.394	29.61-30.90	30.3	2.176	27.11-28.20	27.7	1.962
50	47.5-52.5	33.61-34.60	34.1	2.973	30.91-31.90	31.3	2.705	28.21-29.10	28.6	2.440
55	52.5-57.5	34.61-35.40	35.0	3.599	31.91-32.60	32.2	3.277	29.11-29.80	29.4	2.958
60	57.5-62.5	35.41-36.00	35.7	4.255	32.61-33.20	32.9	3.876	29.81-30.30	30	3.501
65	62.5-67.5	36.01-36.50	36.3	4.955	33.21-33.60	33.4	4.516	30.31-30.70	30.6	4.082
70	67.5-72.5	36.51-36.90	36.8	5.685	33.61-34.00	33.9	5.184	30.71-31.10	31	4.687
75	72.5-77.5	36.91-37.30	37.2	6.437	34.00-34.40	34.2	5.872	31.11-31.40	31.3	5.310
80	>77.5	>37.31	37.5	7.208	>34.41	34.5	6.578	>31.41	31.5	5.950

fra diametro e volume), ciascuna affiancata da una serie ipsometrica (relazione diametro-altezza - Tab. 2).

In realtà, ciascun sistema di tariffe ha in questo caso un'origine piuttosto anomala. Esso deriva, infatti, da un'unica relazione ipsometrica, detta "curva guida", che moltiplicata per un'altezza di riferimento, corrispondente a quella del diametro a 40 cm (H_{40}), genera una serie di 7 o 8 curve ipsometriche (Fig. 1).

Con una specifica funzione, in cui il volume è posto in relazione col diametro a 1.30 m da terra e con l'altezza, è poi calcolato il volume.

La curva guida è uguale per gruppi di specie:

- la prima, per abete rosso, abete bianco e larice;
- la seconda per faggio, pino nero e pino silvestre

Le funzioni stereometriche, invece, sono diverse da specie a specie.

Non entrando nel merito della qualità di tali sistemi di tariffe, compito che esula dal presente lavoro, ma accettandoli nella loro integrità, fatto che consente di conservare la continuità storica dei dati, è possibile tentare di esprimere diversamente le curve ipsometriche di riferimento, ribaltando la relazione fra diametro e altezza.

Infatti nel caso in cui un sistema di tariffe sia prescritto, è stabilita una relazione univoca tra il diametro e l'altezza rendendo tale relazione predeterminata (differentemente da quanto avviene nel caso di

coppie di diametri e altezze tratti da un campionamento)⁶.

Per semplicità di esposizione si considerano le curve ipsometriche derivanti dalla curva guida dell'abete rosso, abete bianco e larice. Tali curve sono ben interpretate dalla seguente funzione (eqn. 1):

$$H = H_{40} \cdot (2.7838 D^3 - 6.0335 D^2 + 4.6164 D - 0.0641)$$

dove H è l'altezza in metri e D il diametro in metri a 1.30 m da terra.

Tale relazione polinomiale di terzo grado può essere espressa in funzione dell'altezza risolvendo la seguente equazione (eqn. 2):

$$2.7838 D^3 - 6.0335 D^2 + 4.6164 D - 0.0641 - \frac{H}{H_{40}} = 0$$

In questo modo è possibile ottenere per ogni valore di altezza un corrispondente valore di diametro. I valori ottenuti divergono per meno dell'1%: sono state osservate differenze massime pari a 15 cm in altezza su alberi alti 20 m; tali differenze sono del tutto ininfluenti operando per classi ipsometriche. Infatti, per costruire delle tariffe equivalenti a quelle esistenti, sono state realizzate delle classi ipsometriche che corrispondono in termini di intervallo a quelle dia-

6 - Dal punto di vista stocastico sarebbe come operare in una correlazione con coefficiente di correlazione pari a 1 e per la quale il "ribaltamento" risulta matematicamente corretto.

Tab. 4 - Tabella di sintesi dei risultati ottenuti con l'applicazione dell'algoritmo di individuazione degli alberi nelle 13 aree di saggio.

Dati rilevati in campo	
N alberi $\emptyset > 5$ (totale)	555
N alberi $\emptyset < 17.5$	113
N alberi $\emptyset > 17.5$	442
N alberi dominati	138
N alberi dominanti	417
Dati estratti da LiDAR	
Alberi estratti / N > 5 (totale)	71%
Alberi estratti / N > 17.5 cm	89%
Alberi estratti / N dominanti	94%

metriche (Tab. 3). Per ogni classe ipsometrica è stato calcolato il volume utilizzando la funzione stereometrica presente nelle tariffe tradizionali. I valori di volume ottenuti coincidono con quelli delle tariffe tradizionali (confronta Tab. 2 e Tab. 3).

Disponendo di un siffatto sistema di tariffe, pur diversamente espresso rispetto a quello tradizionale, si calcola il volume di un popolamento utilizzando la seriazione ipsometrica ottenuta con il rilievo *laser scanning*.

La procedura così organizzata ha il duplice vantaggio di non richiedere rilievi complementari a terra, salvo quelli usualmente adottati per l'individuazione della tariffa da applicare, di cui si dirà nel paragrafo delle considerazioni, e di conservare inalterate le relazioni ipso-diametriche, garantendo così la continuità delle informazioni.

Le prove sperimentali

I dati *laser scanning* relativi all'area di studio sono stati processati attraverso il *software* sviluppato dal gruppo di lavoro (vedi bibliografia indicata precedentemente) al fine di estrarre la seriazione ipsometrica dei vari popolamenti.

Il metodo ha permesso di individuare complessivamente 392 alberi pari al 71% dei soggetti cavallettati⁷. La percentuale di estrazione sale all'89% se si considerano i soli soggetti sopra soglia di cavallettamento con diametro > 17.5 cm (442 in luogo di 555). Considerando inoltre i soli alberi dominanti (417), circa il 94% del totale è correttamente individuato.

In Tab. 4 sono riassunti i risultati complessivi di estrazione degli alberi nelle 13 aree di saggio.

Per valutare l'affidabilità della metodologia del

Tab. 5 - Esempio estratto dalla tabella di calcolo dei diametri a partire da valori LiDAR di altezza, costruita per l'abete rosso. *Altezza*: altezza dell'albero espressa in m ricavata dall'elaborazione di dati LiDAR; *Diam.*: diametro dell'albero espresso in cm calcolato risolvendo l'equazione 2.

valido per tariffa I		valido per tariffa II		valido per tariffa III	
Altezza	Diam.	Altezza	Diam.	Altezza	Diam.
10.7	10.0	10.7	10.8	10.7	11.9
10.8	10.1	10.8	10.9	10.8	12.0
10.9	10.2	10.9	11.0	10.9	12.1
11.0	10.3	11.0	11.1	11.0	12.2
11.1	10.4	11.1	11.2	11.1	12.3
11.2	10.4	11.2	11.4	11.2	12.5
11.3	10.5	11.3	11.5	11.3	12.6
11.4	10.6	11.4	11.6	11.4	12.7
11.5	10.7	11.5	11.7	11.5	12.8
11.6	10.8	11.6	11.8	11.6	12.9
11.7	10.9	11.7	11.9	11.7	13.0
11.8	11.0	11.8	12.0	11.8	13.2
11.9	11.1	11.9	12.1	11.9	13.3
12.0	11.2	12.0	12.2	12.0	13.4
12.1	11.3	12.1	12.3	12.1	13.5
12.2	11.4	12.2	12.4	12.2	13.6
12.3	11.5	12.3	12.5	12.3	13.8
12.4	11.6	12.4	12.6	12.4	13.9
12.5	11.7	12.5	12.7	12.5	14.0
12.6	11.8	12.6	12.8	12.6	14.1
12.7	11.9	12.7	12.9	12.7	14.2
12.8	12.0	12.8	13.0	12.8	14.4
12.9	12.1	12.9	13.1	12.9	14.5
13.0	12.1	13.0	13.3	13.0	14.6

calcolo del volume sono stati relazionati univocamente gli alberi rilevati a terra con quelli ricavati dall'elaborazione dei dati LiDAR in modo tale da considerare solamente quelli correttamente individuati.

Ogni albero cavallettato nelle aree di saggio (e georeferenziato con strumento topografico di precisione collegato a due stazioni GPS) è stato messo in relazione con l'albero individuato dall'algoritmo (se esistente) che si trova alla più breve distanza e comunque entro la proiezione della chioma reale dell'albero cavallettato a terra⁸.

Nelle aree di saggio a composizione mista è stata presa in considerazione solo la specie prevalente. Le

8 - In sede di rilievo di campagna sono stati rilevati per ogni albero anche quattro punti rappresentanti la proiezione a terra di tutte le chiome degli alberi cavallettati.

7 - Tutte le sperimentazioni sono state condotte a partire da rilievi laser a bassa densità di punti.

Tab. 6 - Esempio di affiancamento di seriazione diametrica rilevata a terra con seriazione ipsometrica rilevata da LiDAR. La tabella, che costituisce un estratto del totale, è completata con le colonne del diametro calcolato a partire dai dati di altezza e della differenza dei due diametri. *Id_campo*: codice attribuito dalla stazione totale all'albero a terra; *Id_Laser*: codice attribuito all'albero individuato dall'algoritmo di elaborazione dei dati LiDAR relazionato con *Id_campo*; *Specie*: specie arborea rilevata a terra; *D_campo*: diametro dell'albero *Id_campo* misurato a terra; *H*: altezza dell'albero *Id_Laser* calcolato dai dati LiDAR; *D_laser*: diametro calcolato a partire dai dati LiDAR di altezza; *Differenza D - D_laser*: differenza in cm tra il diametro misurato a terra e il diametro derivato a partire dai dati laser.

Id_campo	Id_Laser	Specie	D_campo (cm)	H (m)	D_laser (cm)	Differenza D - D_laser (cm)
0000C015	1022	<i>Picea abies</i>	27	21.4	27.5	-0.5
0000C034	1006	<i>Picea abies</i>	35	24.8	35.3	-0.3
0000B006	459	<i>Picea abies</i>	30	22.6	30.0	+0.0
0000B020	403	<i>Picea abies</i>	25	20.0	24.9	+0.1
0000B025	377	<i>Picea abies</i>	27	21.1	26.9	+0.1
0000B023	351	<i>Picea abies</i>	42	26.9	41.8	+0.2
0000B009	486	<i>Picea abies</i>	34	24.1	33.5	+0.5
0000C014	1065	<i>Picea abies</i>	30	22.3	29.4	+0.6
0000C025	992	<i>Picea abies</i>	34	24.0	33.2	+0.8
0000B031	367	<i>Picea abies</i>	20	16.4	19.2	+0.8

Tab. 7 - Differenze fra diametri rilevati a terra e diametri calcolati da dati laser nei due campioni complessivi dell'abete rosso e del faggio. *Specie*: specie legnosa; *N*: numero complessivo di alberi considerati nei gruppi omogenei di aree di saggio; *Min*: scostamento massimo negativo tra il diametro misurato a terra e quello calcolato da laser; *Max*: scostamento massimo positivo tra il diametro misurato a terra e quello calcolato da laser; *Media*: media degli scostamenti in cm; *Dev. st*: deviazione standard della media; *DmVA*: media delle differenze in valore assoluto.

Specie	N	Min	Max	Media	Dev. st	DmVA
abete rosso	196	-31.0	+17.0	0.76	5.19	3.86
faggio	88	-26.6	+9.7	0.84	6.64	5.00

due tariffe utilizzate ai fini dell'analisi sono quelle dell'abete rosso e del faggio.

Dopo tali adeguamenti il campione di alberi considerati si è ridotto a 196 soggetti di abete rosso e 88 di faggio. Per questo campione e per gruppi omogenei di aree di saggio è stata generata una seriazione di diametri misurati a terra relazionata univocamente a una seriazione di altezze determinate da dati LiDAR.

Stabilita la relazione e individuata la tariffa secondo la procedura prevista dalle norme assestamentali⁹, si è proceduto alla determinazione dei valori di

9 - Le normative friulane prevedono quanto segue: "per l'individuazione della tariffa potrà essere sufficiente rilevare uno spezzone ipsometrico misurando i diametri e le altezze di almeno 15 soggetti appartenenti rispettivamente alla classe di diametro che presumibilmente contiene il diametro medio (5 soggetti), a quella precedente (5 soggetti) e a quella successiva (5 soggetti); la media di tutte le altezze rilevate in ogni classe consente di individuare la ta-

diametro a partire dalle altezze calcolate con i dati LiDAR. Tali valori sono stati ricavati da tabelle, costruite appositamente per queste elaborazioni, che riportano nella prima colonna altezze con modulo di 10 cm a cui corrispondono valori di diametro calcolati risolvendo l'equazione 2 (Tab. 5).

Successivamente è stato realizzato un primo confronto tra i diametri reali misurati a terra e quelli derivati dall'elaborazione dei dati laser evidenziandone le differenze (Tab. 6).

In Tab. 7 sono riportate tali differenze considerando i campioni complessivi dell'abete rosso e del faggio, mentre in Tab. 8 è evidenziata l'entità delle differenze di diametro per aree di saggio omogenee.

Dall'analisi della Tab. 7 si può osservare che la media da impiegare; ovviamente è da calcolare una media per ogni specie presente (nel caso di specie minoritarie si può procedere a raggruppamenti" (Del Favero et al. 2000).

Tab. 8 - Analisi delle differenze tra i diametri rilevati a terra e quelli calcolati da dati laser. Dall'accorpamento dei dati di 13 aree di saggio sono stati ricavati 8 gruppi omogenei. Nella prima parte della tabella vi sono i gruppi con abete rosso, nella seconda quelli con il faggio. *Goads*: gruppi omogenei di aree di saggio; *N*: numero di alberi considerati per ogni gruppo omogeneo di aree di saggio; *D medio*: diametro medio rilevato a terra delle *N* piante relazionate; *Media*: media degli scostamenti in cm; *Dev. st.*: deviazione standard degli scostamenti.

Abete rosso				
Goads	N	D medio	Media	Dev. st.
FO_AB	18	35	1.61	5.38
MB_AB	20	30	0.20	9.21
MB_C	17	27	-0.49	5.35
MB_D	59	38	1.32	3.98
PR_BC	56	34	0.82	5.01
VB_A	26	29	0.00	3.48
totale	196	-	0.58	5.40
Faggio				
Goads	N	D medio	Media	Dev. st.
SA_A	50	35	-0.31	7.86
TU_ABC	27	26	2.39	4.21
totale	88	-	1.04	6.04

dia tra le differenze dei diametri è pari a 0.76 cm per l'abete rosso e 0.84 per il faggio. Si tratta di valori molto vicini allo 0 ad indicare la probabile assenza di errori di tipo sistematico. In media gli indici di dispersione (deviazione standard e DmVA) variano intorno a 5 cm, range di variazione della classe diametrica. A livello di singoli individui gli errori possono essere di discreta entità, con sottostime che possono raggiungere i 25-30 cm. Ciò è probabilmente dovuto alla presenza nelle aree di saggio di alberi anomali, ovvero caratterizzati da rapporti H/D o troppo elevati o troppo bassi. Si deve infatti considerare che, dato l'elevato grado di tecnologia utilizzato nei rilievi a terra (1 stazione totale e 2 GPS geodetici che necessitano di radure di una certa estensione), si è dovuto privilegiare nella scelta delle aree quelle prossime a strade percorribili da auto. In questi contesti è facile immaginare che il disturbo antropico gioca un ruolo determinante nelle condizioni di vegetazione degli alberi (che non sono le medesime di quelle di boschi indisturbati) e che si ripercuotono spesso sulla forma degli stessi.

Osservando, invece, il contenuto della Tab. 8, nella quale le differenze sono valutate a livello di gruppi

omogenei di aree di saggio, si può notare come gli scostamenti medi siano piuttosto ridotti per l'assenza di sistematismi, mentre la deviazione standard si mantiene sull'ordine dei 5 cm in quasi tutti i casi.

In generale, l'analisi statistica mostra risultati migliori nelle fustaie monoplane (MB_D fustaia adulta, PR_BC giovane fustaia e VB_A perticaia) e con densità non elevata nonostante un diametro medio basso (MB_C). Diversamente, laddove si riscontra una variabilità nella struttura, o non marcatamente monoplane nei casi di FO_AB e MB_AB o eterogenea in termini diametrici, come MB_AB, le differenze tra diametri reali e calcolati aumentano.

Per quanto concerne le aree a faggio si nota un lieve peggioramento dei risultati. Il gruppo di aree di saggio TU_ABC (un ceduo convertito all'alto fusto) dimostra performance paragonabili a SA_A, fustaia adulta ma non ancora ben differenziata.

In una seconda elaborazione si è valutato come le differenze di diametro si ripercuotono in termini di volume.

Per ogni gruppo omogeneo di aree di saggio si è proceduto al confronto tra i valori ottenuti applicando il nuovo sistema di tariffe e quello classico con le seriazioni diametriche misurate a terra.

Tab. 9 - Analisi dello scostamento % tra volume misurato a terra e volume misurato da laser distinto tra aree di saggio con abete rosso e faggio. *Goads*: gruppi omogenei di aree di saggio; *N*: numero di alberi considerati per ogni gruppo omogeneo di aree di saggio; *Vol. a terra*: volume calcolato con i diametri rilevati a terra; *Vol. laser*: volume calcolato con le altezze determinate da dati laser; *Scostamento %*: differenza in termini percentuali tra il *Vol. laser* e il *Vol. a terra*.

Abete rosso				
Goads	N	Vol. a terra	Vol. laser	Scostamento %
FO_AB	18	20.238	17.868	-11.7
MB_AB	20	17.594	18.480	+5.0
MB_C	17	7.600	7.688	+1.2
MB_D	59	100.327	94.210	-6.1
PR_BC	56	41.602	39.102	-6.0
VB_A	26	21.981	20.745	-5.6
Faggio				
Goads	N	Vol. a terra	Vol. laser	Scostamento %
SA_A	36	50.316	55.407	+10.1
TU_ABC	27	18.503	14.866	-19.7

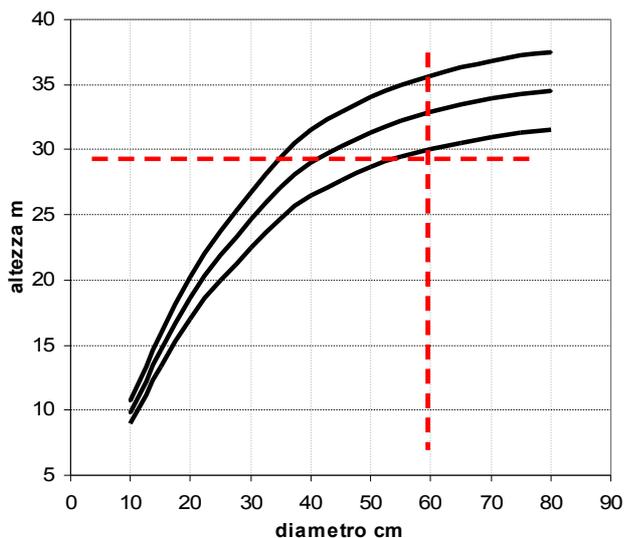


Fig. 2 - Serie ipsometriche tratte dal sistema di tariffe dell'abete rosso valido nella Regione Friuli Venezia Giulia.

Dopo aver accorpato le seriazioni in classi (diametriche e ipsometriche) sono stati calcolati i volumi per le due serie di dati (quelli rilevati a terra e quelli da laser). I risultati, proposti in Tab. 9 hanno messo in evidenza, per le aree di saggio ad abete rosso, uno scostamento percentuale contenuto entro il 6%, tranne che in una situazione (FO_AB) ove si registra uno scostamento dell'11.7%. Quest'area si caratterizza, come detto in precedenza, per una elevata variabilità in termini strutturali e diametrici, associata ad un limitato numero di osservazioni. Si può inoltre notare un sensibile miglioramento dei risultati ottenuti in alcune aeree (MB_C e MB_AB) passando dal diametro al volume, dovuto probabilmente all'accorpamento in classi.

Per le aree a faggio si riscontrano risultati meno favorevoli. Più contenuto è lo scostamento riscontrato nella fustaia (SA_A con -10.1%) rispetto a quello del ceduo convertito all'alto fusto (TU_ABC 19.7%).

In definitiva dai risultati delle elaborazioni nelle diverse aree di saggio emerge che¹⁰:

- la differenza in termini volumetrici per le aree ad abete rosso è inferiore rispetto a quella a faggio;
- buoni risultati, con differenze anche minime, in termini sia diametrici sia volumetrici si ottengono in aree caratterizzate da densità non elevate di bo-

10 - In dendrometria molto spesso non si ha la percezione delle differenze che si possono avere applicando diversi metodi di cubatura. Ad esempio utilizzando i dati rilevati a terra e applicando rispettivamente una tavola a doppia entrata e il sistema di tariffe si ottengono differenze medie dell'ordine del 3-4%.

- schi monoplani;
- nelle aree a struttura monoplana, soprattutto se regolarmente diradate e nelle fasi adulte, si ottengono risultati migliori rispetto a quelle in cui vi è una struttura più articolata.

Considerazioni

L'applicazione della procedura per il calcolo del volume appena descritta è senza dubbio connessa al riconoscimento delle specie arboree presenti, aspetto non ancora del tutto risolto nel caso si utilizzino i soli dati *LiDAR* in soprassuoli misti. La maggior parte degli autori determina la composizione in aree di saggio a terra e ripartisce successivamente i volumi fra le specie in relazione alla composizione rilevata (Gobakken & Næsset 2004, Parker 2006). Volendo evitare questa via, che comunque potrebbe essere poco percorribile in molti boschi alpini a composizione complessa, si sta cercando di definire delle procedure diverse. Discreti risultati si sono finora ottenuti nella distinzione fra conifere e latifoglie, che potrebbe essere ulteriormente migliorata abbinando al rilievo laser quello iperspettrale, possibilità che tuttavia, ad oggi, farebbe lievitare non di poco i costi. La possibilità di discriminare fra conifere e latifoglie d'altra parte è già un notevole passo avanti, in considerazione anche di quanto la prassi assestamentale solitamente fa. Infatti, per la cubatura delle latifoglie presenti in area montana (esclusi quindi i castagneti, gli orno-ostrieti, ecc., per i quali si usano specifiche tavole stereometriche o tavole di popolamento - Del Favero et al. 2000) è in ogni caso adottato il sistema

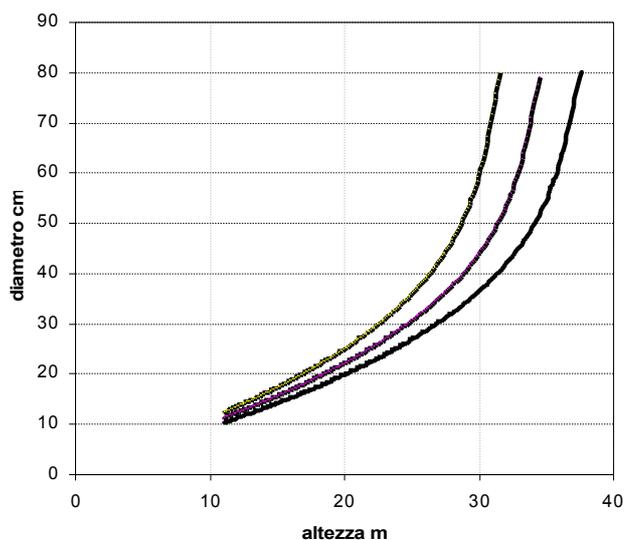


Fig. 3 - Relazione fra altezza e diametro per tre curve tratte dal sistema di tariffe "ribaltato" dell'abete rosso.

di tariffe del faggio. Questo fa sì che, laddove con i dati *LiDAR* sia riconosciuta la presenza di una latifolia, il sistema di tariffe cui riferirsi è quello del faggio, senza con ciò introdurre una diversità rispetto alla procedura classica.

Più complessa è, invece, la possibilità di discriminare fra le diverse specie di conifere. Un'ipotesi che si sta verificando è quella di discriminare fra grandi gruppi di specie. Questo potrebbe permettere di eliminare almeno gli errori di una certa rilevanza nel calcolo del volume. Infatti, se in un popolamento misto di abete rosso e abete bianco si applica il solo sistema di tariffe dell'abete rosso per cubare entrambe le specie al posto di due sistemi di tariffe, le differenze in termini di volume del popolamento sono limitate ad alcune frazioni di punti percentuali. Viceversa errori più evidenti compaiono se vi è elevata presenza dei pini o del larice.

L'applicazione della metodologia proposta si basa inoltre sulla scelta della tariffa da applicare. Nei boschi già pianificati essa è nota o comunque è facilmente individuabile seguendo la procedura stabilita dalle normative.

Come detto un problema nasce, invece, nel caso la scelta della tariffa non sia stata fatta in modo corretto. Operando, infatti, con la seriazione ipsometrica ottenuta da dati *LiDAR* piuttosto che con quella diametrica, gli effetti di una scelta poco appropriata della tariffa possono essere molto diversi. Per spiegare il problema è opportuno osservare la Fig. 2, sulla quale sono riportate, per semplificare, tre sole serie ipsometriche tratte dal sistema di tariffe relativo all'abete rosso.

Dalla figura appare evidente che, a parità di diametro, l'altezza aumenta spostandosi dalla tariffa più bassa a quella più alta. Ad esempio, in corrispondenza del diametro di 60 cm a 1.30 m da terra si ha un'altezza di 30 m nella tariffa III, 32.9 m nella tariffa II e di 35.7 m nella tariffa I.

Mantenendo, invece, costante l'altezza, i diametri corrispondenti saranno decrescenti man mano che dalla tariffa più bassa si va verso la più alta. Così, considerando un'altezza di 30 m, i corrispondenti diametri saranno rispettivamente 60 nella tariffa III, 44 nella tariffa II e 36.5 nella tariffa I. A causa della tendenza asintotica della curva ipsometrica, in corrispondenza di altezze elevate, le differenze diametriche divengono anche notevoli. Di conseguenza, se la scelta della tariffa non è corretta, perché ad esempio è stata utilizzata una tariffa più "bassa", i diametri corrispondenti all'altezza sono più alti e quindi vi

sarà una sovrastima nel calcolo del volume.

Pur non potendo ancora trarre delle conclusioni esaustive, fondate su un'ampia casistica, pare delinearne la necessità, almeno nelle situazioni dubbie, di operare un controllo sulla bontà della scelta della tariffa.

Un terzo aspetto da tenere in considerazione riguarda la funzione interpretativa della relazione ipsometrica.

Come si è visto precedentemente, la funzione che meglio interpreta le curve ipsometriche di riferimento delle principali specie è costituita da un polinomio di terzo grado. Se tale funzione ha una buona rispondenza in termini perequativi, dato che la differenza fra valori reali e valori calcolati non supera mai i 10-15 cm di altezza, può non essere altrettanto efficace in termini dendrometrici. Infatti essa prevede, entro il suo campo di validità, un punto di flesso in corrispondenza del diametro di 72 cm che, in quel tratto della curva ipsometrica, non dovrebbe essere presente (Del Favero 1980). Tuttavia, di là dell'aspetto formale e non volendo modificare l'impianto del sistema di tariffe, l'inconveniente può essere tollerato non portando significative differenze nel calcolo dei volumi in quanto sono generalmente pochi in un popolamento i soggetti arborei che superano i 70-80 cm di diametro. Un inconveniente più evidente si ha, invece, nell'uso della funzione "ribaltata" (ossia quella del diametro in funzione dell'altezza). Questa funzione ha un andamento crescente e concavo verso l'alto (Fig. 3) e in corrispondenza di valori piuttosto elevati di altezza tende ad assumere un andamento molto ripido, ossia ad avere una forte inclinazione.

Per questo motivo il sistema di tariffe fondato sull'altezza non ammette estrapolazioni, ovvero non risulta applicabile al di fuori del suo campo di validità (comunque il medesimo valido per il sistema di tariffe originali).

Conclusioni

In questo lavoro è stato sperimentato l'utilizzo di dati *laser scanning* per ricavare dati dendrometrici.

Con specifici algoritmi che utilizzano in ingresso i dati *LiDAR*, è possibile ottenere le seriazioni ipsometriche di interi popolamenti forestali, fatto che consente di utilizzare non più il diametro bensì l'altezza come parametro d'entrata nei sistemi di cubatura.

L'approccio metodologico messo a punto in questo lavoro ha consentito di esprimere in funzione dell'altezza le tariffe della Regione Friuli Venezia Giulia, ambito territoriale entro il quale sono state condotte

le sperimentazioni. Per ottenere questo risultato sono state utilizzate le relazioni ipso-diametriche presenti nelle tariffe tradizionali. Questo accorgimento fa sì che i volumi calcolati con le nuove tariffe possano essere confrontabili con quelli calcolati con le tariffe tradizionali.

Sono stati confrontati i valori di diametro e di volume ricavati rispettivamente dall'elaborazione dei dati *LiDAR* e dei dati misurati in campo. I risultati si sono dimostrati promettenti sia in termini diametrici che volumetrici.

La procedura proposta è pertanto potenzialmente capace di garantire, sia una sufficiente affidabilità dei risultati, sia di contenere i costi dei rilievi dendrometrici tradizionali, ormai non più sostenibili.

Varie sono comunque le ipotesi di affinamento del metodo che potranno essere analizzate e studiate in ulteriori sperimentazioni in boschi con diversa composizione, struttura, e densità.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare: il prof. Roberto Del Favero per la lettura critica del testo e i consigli forniti; la Regione Friuli Venezia Giulia - Direzione centrale delle Risorse Agricole, Naturali Forestali e Montagna - che ha finanziato la ricerca nell'ambito dell'Iniziativa Comunitaria INTERREG IIIA Phare CBC ITALIA SLOVENIA - Azione 3.2.4 - Estensione Progetto "Ricomposizione della cartografia catastale e integrazione della cartografia tecnica regionale numerica per i sistemi informativi territoriali degli Enti locali mediante sperimentazione di nuove tecnologie di rilevamento"; il dottor Emiliano Sossai e l'ingegner Alberto Beinat per il supporto fornito.

Bibliografia

Barilotti A, Beinat A, Fico B, Sossai E (2006). Produzione e verifica di DTM da rilievi *LiDAR* aerei su aree montane ricoperte da foresta. Relazione a Convegno Nazionale: "Le nuove frontiere della rappresentazione 3D". Sifet Castellana Marina, Taranto, 2006.

Barilotti A, Beinat A, Turco S (2005). L'influenza del DTM per la valutazione del rischio da scivolamento della coltre superficiale nei bacini montani. *MondoGIS* 49 (luglio/agosto).

Barilotti A, Sepic F (2006). Delineazione automatica delle chiome in diverse tipologie forestali attraverso analisi di dati *LiDAR*. Atti 10^a Conferenza nazionale ASITA, 14-17 novembre 2006, Bolzano.

Barilotti A, Sepic F, Abramo E, Crosilla F (2007a). Improving the morphological analysis for tree extraction: a dynamic approach to *LiDAR* data. ISPRS Workshop on La-

ser Scanning 2007, 12-14 settembre 2007, Espoo, Finland.

Barilotti A, Sepic F, Abramo E, Crosilla F (2007b). Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests. *PIA07 Photogrammetric Image Analysis*, 19-21 settembre 2007, Munich, Germany.

Beinat A, Sepic F (2005). Un programma per l'elaborazione di dati *LiDAR* in ambiente Linux. 50° Convegno Nazionale della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, 29-30 giugno 2005, Mondello, Palermo, Italy.

Bollandsås OM, Næsset E (2006). Estimating percentile-based diameter distributions in uneven-sized Norway spruce stands using airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 22 (1): 33-47.

Corona P, Tabacchi G (2001). Inventariazione delle risorse forestali su ampi territori. Finalità, metodi e prospettive. *Monti e Boschi* 6: 27-38

Del Favero R (1980). Indagini sulle funzioni impiegate nella perequazione della curva ipsometrica. *Annali dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali* XXIX: 321-341.

Del Favero R (2004). I boschi delle Regioni alpine italiane. *Clup Padova*, pp. 599.

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 Udine, pp. 256.

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.

Hellrigl B (1986). Nuove metodologie nella elaborazione dei piani di assestamento dei boschi. I.S.E.A., Bologna.

Köhl M, Magnussen SS, Marchetti M (2006). Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 373.

Maistrelli F (2007). La pianificazione forestale per il futuro. *Sherwood* 129: 23-26.

Maltamo M, Eerikäinen K, Packalén P, Hyyppä J (2006). Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. *Forestry* 79: 217-229 (doi: 10.1093/forestry/cpl007).

Maroncelli E (2005). Gestione mediante GIS di parametri selvicolturali derivati da scansioni laser aeree. Tesi di master in Sistemi informativi territoriali. Università degli Studi di Udine, Anno Accademico 2003-2004, pp. 34.

Parker RC (2006). Computer automation of a *LiDAR* double-sample forest inventory. *Forest and Wildlife Research Center, Bulletin FO275*, Mississippi State University, pp. 19.

Turco S, Alberti G, Barilotti A, Bonfanti PL (2005). Processamento di dati laser scanning con GRASS GIS per la determinazione automatica di parametri inventariali forestali. 6° Meeting degli Utenti Italiani di GRASS, 14-15

aprile 2005, Roma.

Wolynsky A (2005). Sviluppi recenti dell'asestamento forestale in Italia settentrionale. SAFE-infoblatt Nr. 19: 6-7.

Author's Box

Elena Abramo è dottore forestale; fa parte del gruppo di ricerca INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia nell'ambito del quale studia e sperimenta l'applicazione dei rilievi *laser scanning* per la valutazione delle risorse forestali. Andrea Barilotti è laureato in Scienze Ambientali e sta svolgendo il dottorato di ricerca in "Economia, Ecologia e tutela dei sistemi agricoli e paesistico ambientali" presso l'Università di Udine; fa parte del gruppo di ricerca INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia nell'ambito del quale si occupa dello studio di metodi innovativi di analisi dei dati *laser scanning* ai fini ambientali e forestali. Francesco Sepic è laureato in Informatica; fa parte del gruppo di ricerca INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia nell'ambito del quale si occupa della gestione informatica e dell'elaborazione dei dati *LiDAR*.
