

Potenzialità del telerilevamento *laser scanner* aereo per la classificazione delle coperture forestali in funzione della forma di governo

Davide Travaglini (*), Francesca Bottalico (*), Gherardo Chirici (**),
Piermaria Corona (***), Susanna Nocentini (*)

(*) Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali, Università degli Studi di Firenze.
Via San Bonaventura 13, 50145 Firenze, Tel. 055 3288618, Fax 055 319179,

e-mail: davide.travaglini@unifi.it, francesca.bottalico@unifi.it, susanna.nocentini@unifi.it

(**) Dipartimento di Bioscienze e Territorio, Università degli Studi del Molise. Contrada Fonte Lappone snc,
86090 Pesche (Isernia), Tel. 0874 404113, Fax 0874 404123, e-mail: gherardo.chirici@unimol.it

(***) Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali,
Università degli Studi della Tuscia, Via San Camillo de Lellis snc, 01100 Viterbo,
Tel. 0761 357406, Fax 0761 357389, e-mail: piermaria.corona@unitus.it

Riassunto

In questo studio è stata valutata la potenzialità del telerilevamento *laser scanner* aereo (ALS) per classificare le forme di governo forestale in un bosco misto di latifoglie. La metodologia applicata prevede l'utilizzo del modello digitale delle chiome (CHM) ottenuto da dati ALS e l'impiego di procedure automatizzate per la segmentazione *object-oriented* delle immagini telerilevate. La classificazione delle forme di governo si basa sulle metriche estratte dal CHM. I risultati ottenuti indicano che la media delle altezze e il coefficiente di variazione delle altezze estratti dal CHM sono utili per distinguere i boschi governati a ceduo da quelli governati a fustaia.

Abstract

In this study aerial laser scanning (ALS) data has been tested to classify coppice stands and high forest stands in a mixed broadleaved forest. The method is based on a canopy height model (CHM) obtained from ALS data. Forest stands have been delineated using a object-oriented approach. The polygons have been classified into coppices and high forests based on the metrics derived from CHM. Our results indicate that the mean of the heights and the coefficient of variation of the heights extracted from CHM are useful to discriminate coppices from high forests.

Introduzione

Il telerilevamento con *laser scanner* aereo (*Airborne Laser Scanning* - ALS) con strumentazione LiDAR (*Light Detection And Ranging*) rappresenta un ottimo strumento di supporto per l'inventariazione delle risorse forestali. Le ricerche svolte nel nostro Paese evidenziano la capacità dei dati ALS di produrre stime accurate dei principali parametri dendrometrici delle foreste a supporto della pianificazione a livello aziendale (Clementel et al., 2012; Corona et al., 2012; Pirotti et al., 2012).

A esempio, utilizzando approcci *area-based* (Corona e Fattorini, 2008) per la stima della provvigione legnosa (o della biomassa epigea) con metodi parametrici, è stata osservata in diversi contesti forestali una buona relazione tra il volume legnoso rilevato in aree di saggio e le metriche estratte dal modello digitale delle chiome (*Canopy Height Model* - CHM) ottenuto da ALS. Le metriche CHM più efficienti per la stima del volume sono risultate: media delle altezze, mediana delle altezze, somma delle altezze (Corona et al., 2008; Fusco et al., 2008; Barbati et al., 2009; Floris et al., 2010). Approcci *area-based* sono stati utilizzati per classificare la struttura dei

soprasuoli boschivi in termini di densità e altezza media sfruttando le informazioni contenute nel CHM (Barilotti et al., 2005; Fusco et al., 2008; Floris et al., 2009; Floris et al., 2010). I dati CHM si sono dimostrati utili anche ai fini della identificazione dei *gaps* nella copertura forestale (Barbati et al., 2009; Bottalico et al., 2009). Tale informazione, oltre ad essere utile per lo sviluppo di indagini di carattere ecologico e per l'analisi delle dinamiche forestali, risulta vantaggiosa anche per aumentare l'efficienza dei campionamenti inventariali tramite l'esclusione dei *gaps* dal processo di campionamento. Inoltre, l'uso combinato di dati LiDAR e di dati iperspettrali è stato testato per l'identificazione e la classificazione delle specie forestali (Dalponte et al., 2008).

Un aspetto ancora inesplorato ma di rilevante interesse per la gestione forestale in ambiente mediterraneo è la valutazione delle potenzialità dei dati ALS nel discriminare le coperture forestali in funzione della forma di governo. Di fatto, la possibilità di differenziare tra loro le forme di governo forestale mediante tecniche di *remote sensing* passivo è limitata dalla scarsa capacità dei sensori di caratterizzare la struttura verticale dei soprasuoli boschivi (Wulder et al., 2007). Le tecniche di *remote sensing* attivo, quali quelle ALS che vengono sempre più proposte per la descrizione della struttura dei popolamenti forestali nei suoi aspetti di distribuzione verticale e orizzontale e di copertura delle chiome, rappresentano invece un filone di ricerca promettente a tal fine. In questa prospettiva, di particolare interesse a livello operativo è l'utilizzo del CHM ottenibile da ALS, il quale non di rado può essere acquisito dai professionisti a costo relativamente basso o, talora, addirittura nullo (come *by-product* di progetti realizzati da amministrazioni pubbliche per scopi diversi, soprattutto topografici, da quelli forestali: v. Corona et al., 2011).

Obiettivo di questo studio è, dunque, di testare le prestazioni del CHM per la classificazione dei soprasuoli forestali in cedui e fustaie, con riferimento, come prima sperimentazione, a un caso di studio relativo a un bosco misto di latifoglie decidue a prevalenza di specie quercine.

Materiali e metodi

Area di studio

Lo studio è stato condotto nel complesso territoriale delle Cerbaie in Provincia di Pisa. Le Cerbaie sono caratterizzate da basse colline boschive situate a quote comprese tra 0 e 114 m s.l.m. Le temperature medie annue sono comprese tra 14 °C e 15 °C; le precipitazioni annue sono comprese tra 1000 mm e 1150 mm. Secondo la classificazione fitoclimatica di Pavari, le Cerbaie ricadono nella zona del *Lauretum* sottozona media con siccità estiva.

La vegetazione forestale delle Cerbaie può essere inquadrata in due piani distinti in funzione della morfologia del territorio (Paci, 2009; Travaglini et al., 2011). Il primo piano è dominato dalle pinete di pino marittimo e si può individuare nelle superfici alle quote maggiori e nelle zone pianeggianti, caratterizzate da un ambiente di tipo mediterraneo, termofilo e con una buona esposizione. Il secondo piano vegetazionale è individuabile negli impluvi e nei piani di fondovalle, caratterizzati da un ambiente di tipo mesofilo e con un certo grado di umidità. In questo piano domina il bosco misto di latifoglie decidue a prevalenza di specie quercine, composto per lo più da cerro e orniello, con rovere e farnia negli ambienti più freschi.

Dati

È stato utilizzato un CHM raster con risoluzione pari a 1 m prodotto con dati ALS acquisiti per finalità topografiche. I dati ALS sono stati rilevati nell'inverno del 2008 con sensore Altm Gemini. L'accuratezza orizzontale e l'accuratezza verticale dichiarate dal produttore sono rispettivamente di 0,3 m e di 0,15 m.

Nella zona coperta dal CHM, i boschi misti di latifoglie decidue a prevalenza di specie quercine sono stati individuati per fotointerpretazione di ortofoto digitali AGEA a colori del 2007. Sono presenti sia cedui semplici matricinati regolarmente gestiti, sia soprasuoli transitori (Ciancio e Nocentini, 2004) derivanti da avviamento a fustaia che presentano ormai un solo pollone per ceppaia e quindi con una struttura verticale del soprasuolo assimilabile a una giovane fustaia. I

soprasuoli così identificati sono stati visitati a terra. L'età dei boschi cedui è stata stimata tagliando un pollone rappresentativo e contando gli anelli alla base del fusto; l'età dei soprassuoli transitori è stata ricavata da un precedente piano di gestione forestale (Gualdi, 1977) ed è risultata compresa tra 40 e 60 anni. Nel caso del ceduo è stata effettuata la distinzione tra ceduo e ceduo giovane per separare i soprassuoli di età vicina all'età del turno minimo di utilizzazione (18 anni secondo il regolamento forestale della Regione Toscana) dai soprassuoli utilizzati da non più di 10 anni. La distinzione tra ceduo e ceduo giovane, oltre ad essere rilevante ai fini gestionali, è da ritenersi funzionale anche ai fini della classificazione dei dati ALS. Infatti, la struttura di un ceduo giovane è differente da quella di un ceduo adulto, ad esempio: in un ceduo giovane, la differenza tra l'altezza delle matricine e l'altezza dei polloni è superiore rispetto a quella che si osserva in un ceduo adulto; in un ceduo giovane, la dimensione delle chiome delle matricine è inferiore a quella che si rileva in un ceduo adulto; in un ceduo giovane, nei primi anni dopo il taglio, il grado di copertura esercitato dalle chiome dei polloni e delle matricine è inferiore rispetto a quello di un ceduo adulto. Tali differenze di struttura sono potenzialmente rintracciabili con il telerilevamento sfruttando le informazioni acquisite con strumentazione ALS (Koch et al., 2006; Pascual et al., 2008).

Dall'insieme dei boschi misti di latifoglie decidue è stato estratto un campione casuale di soprassuoli di estensione pari a 45 ettari, equamente ripartito tra i seguenti tipi: fustaia (T1), ceduo (T2) e ceduo giovane (T3). La superficie di ciascun tipo è stata poi separata casualmente in *training sites* e *test sites*, per una percentuale rispettivamente pari al 20% e all'80%.

Pre-elaborazioni e analisi

Il CHM è stato riclassificato in modo da assegnare un valore di 0 a tutti i *pixel* del CHM con altezza inferiore a 2 m, in modo da escludere l'eventuale presenza dello strato arbustivo. In seguito, il CHM è stato sottoposto ad un processo automatico di segmentazione multilivello (Chirici et al., 2006; Lamonaca et al., 2008) per valutare le prestazioni dei dati ALS al variare della scala di analisi spaziale. Utilizzando il *software* Definiens (vers. 5) sono stati creati 6 livelli di segmentazione variando il fattore di scala tra 50 e 5; gli altri parametri della segmentazione (colore, forma, compattezza e regolarità) sono stati mantenuti costanti assegnando loro un valore di 0,5. Passando da un fattore di scala di 50 fino ad un fattore di scala di 5, si sono generati poligoni di dimensione sempre più piccola. Nel caso dei cedui, utilizzando un fattore di scala ≤ 10 , è stato possibile segmentare le chiome delle piante più alte, che verosimilmente corrispondono alle matricine (Figura 1).

Per ciascun poligono generato con i diversi livelli di segmentazione sono state calcolate le seguenti metriche sulla base dei valori di altezza estratti dai *pixel* del CHM: altezza minima, altezza massima, somma delle altezze, media delle altezze, range delle altezze, deviazione standard (DS) e coefficiente di variazione (CV) delle altezze.

I *training sites* sono stati utilizzati per eseguire l'analisi statistica delle metriche CHM allo scopo di individuare le metriche che, nel caso di studio esaminato, consentono una migliore discriminazione tra boschi governati a ceduo e boschi governati a fustaia. A tal fine sono stati applicati due test non parametrici (Kruskal-Wallis test e Median test) per valutare se le metriche CHM variano significativamente tra i tipi T1, T2 e T3; in caso di differenza significativa, è stato applicato il test di confronto a coppie di Mann-Whitney per individuare le differenze tra i tipi. Tutte le analisi statistiche sono state eseguite con il *software* SPSS (vers. 13.0).

Classificazione e valutazione dell'accuratezza

Le metriche che dell'analisi statistica sono risultate più efficienti per la differenziazione dei tipi T1, T2 e T3 sono state utilizzate per classificare i dati ALS con approccio *supervised*. La classificazione è stata eseguita con il *software* Idrisi (vers. 32.22) utilizzando un algoritmo di massima verosimiglianza (Lillesand, Kiefer, 2000) e i *training sites* descritti in precedenza. I valori originali delle metriche calcolati sull'immagine del CHM sono stati standardizzati nell'intervallo di valori 0-255 utilizzando una procedura di riclassificazione lineare.

L'accuratezza della classificazione è stata valutata sui *test sites* confrontando i risultati della classificazione *supervised* con la verità osservata a terra e calcolando i seguenti indici di accuratezza tematica: *overall accuracy* (OA), *producer's accuracy* (PA), *user's accuracy* (UA) e *kappa index of agreement* (KIA) (Congalton, 1991).

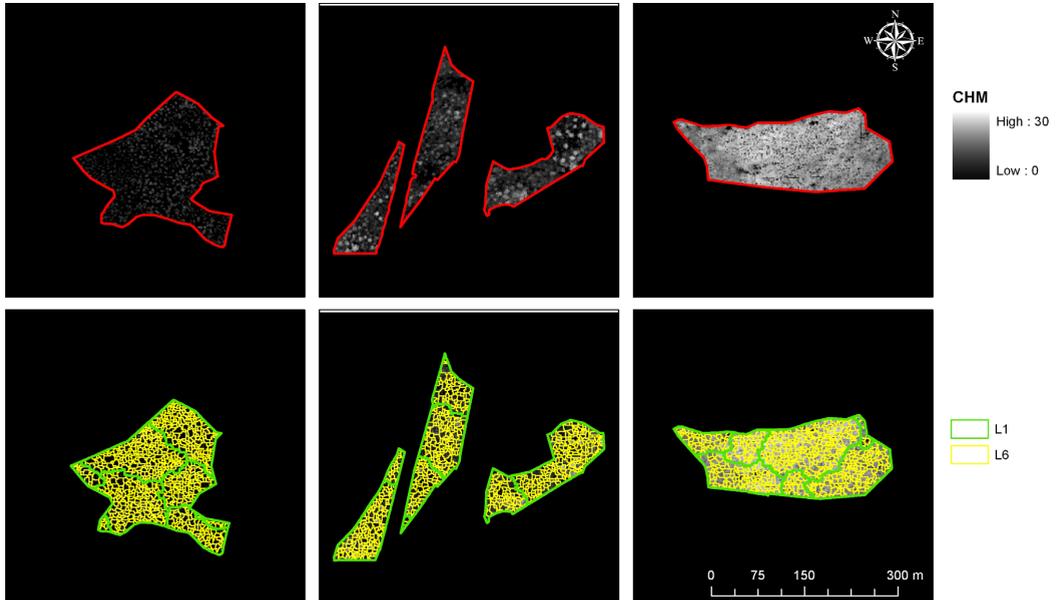


Figura 1. In alto, visualizzazione dei tipi strutturali T1 (fustaia, a destra), T2 (ceduo, al centro) e T3 (ceduo giovane, a sinistra) sull'immagine del CHM. In basso, poligoni generati con la segmentazione dei tipi strutturali utilizzando due diversi fattori di scala: 50 (livello di segmentazione 1, poligoni in verde) e 5 (livello di segmentazione 6, poligoni in giallo).

Risultati

In Tabella 1 sono riportati i risultati dei test eseguiti sulle metriche estratte dal CHM in corrispondenza dei poligoni dei *training sites* generati con la segmentazione multilivello. Tali risultati evidenziano la possibilità di discriminare la forma di governo del bosco sulla base dei dati ALS. Tuttavia, nelle condizioni esaminate, alcune metriche mostrano un comportamento diverso al variare del fattore di scala utilizzato nella procedura di segmentazione. Tali metriche sono da considerarsi meno efficienti per la classificazione dei boschi cedui regolarmente gestiti e dei boschi con struttura tipica della fustaia, visto che producono risultati sensibili alla scala di analisi dei dati ALS.

Le metriche CHM che hanno presentato un tale comportamento sono: altezza minima, somma delle altezze e deviazione standard delle altezze. In particolare, dall'analisi della Tabella 1 si evince quanto segue:

- l'altezza minima è capace di differenziare i tipi T1, T2 e T3 quando il fattore di scala è ≤ 15 ; con un fattore di scala = 20, i tipi T1 e T2 risultano ancora differenti, mentre con un fattore di scala = 30 non si osservano differenze tra i tipi;
- la somma delle altezze permette di differenziare i tipi T1, T2 e T3 quando il fattore di scala è ≤ 30 , mentre con un fattore di scala = 50 non si rilevano differenze tra i tipi;
- la deviazione standard delle altezze consente di differenziare i tipi T1, T2 e T3 quando il fattore di scala è ≤ 10 ; con un fattore di scala ≥ 15 si osservano differenze tra i tipi T2 e T3, ma non si rilevano differenze tra il tipo T1 e i tipi T2 e T3.

Viceversa, le metriche CHM che hanno prodotto risultati consistenti al variare della scala di analisi, e che per ciò possono essere considerate maggiormente affidabili per la classificazione della forma di governo del bosco, sono: altezza massima, valore medio delle altezze, range e CV delle altezze. Tali metriche sono state utilizzate per effettuare la classificazione *supervised* dei dati ALS. La classificazione è stata eseguita rispetto ai poligoni generati con il primo livello di segmentazione (fattore di scala = 50). Considerato che a questa scala di analisi le metriche relative all'altezza massima e al range coincidono nel caso di studio qui esaminato, si è deciso di escludere il range dalla procedura di classificazione.

Livello di segmentazione (fattore di scala)	Numero di poligoni generati con la segmentazione dei <i>training sites</i>			Metrica estratta dal CHM	Valore medio della metrica calcolato sui poligoni dei <i>training sites</i>			Kruskal-Wallis test (sig.)	Median test (sig.)	Mann-Whitney test
	T1	T2	T3		T1	T2	T3			
L1 (50)	7	8	9	Minimo	0,0	0,0	0,0	-	-	-
				Massimo	26,5	20,5	13,0	0,000	0,001	T1≠T2≠T3
				Somma	91123	27661	9490	0,009	0,002	T1=T2=T3
				Media	18,9	6,4	2,2	0,000	0,001	T1≠T2≠T3
				Range	26,5	20,5	13,0	0,000	0,001	T1≠T2≠T3
				DS	4,3	4,3	3,1	0,002	0,002	T1=T2≠T3
L2 (30)	10	16	21	CV	0,2	0,7	1,4	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Minimo	0,4	0,0	0,0	0,157	0,151	T1=T2=T3
				Massimo	26,8	20,1	12,9	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Somma	63786	13831	3615	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Media	19,5	7,0	2,3	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Range	26,3	20,1	12,9	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
L3 (20)	37	48	42	DS	4,3	4,2	3,1	0,000	0,000	T1=T2≠T3
				CV	0,2	0,7	1,5	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Minimo	1,7	0,5	0,0	0,000	0,000	T1≠T2=T3
				Massimo	23,5	16,7	10,4	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Somma	17238	4610	1808	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Media	17,5	7,1	2,0	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
L4 (15)	73	102	80	Range	21,9	16,3	10,4	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				DS	3,6	3,5	2,6	0,000	0,001	T1=T2≠T3
				CV	0,2	0,7	1,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Minimo	3,7	0,8	0,0	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Massimo	24,0	15,4	9,9	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Somma	8737	2170	949	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
L5 (10)	169	235	212	Media	18,4	7,2	2,2	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Range	20,2	14,5	9,9	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				DS	3,4	3,3	2,5	0,000	0,000	T1=T2≠T3
				CV	0,2	0,7	1,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Minimo	6,8	1,6	0,1	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Massimo	23,3	13,4	9,0	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
L6 (5)	770	785	882	Somma	3774	942	358	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Media	18,3	7,3	2,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Range	16,5	11,8	8,9	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				DS	3,2	2,8	2,4	0,000	0,029	T1≠T2≠T3
				CV	0,2	0,6	1,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Minimo	12,1	2,9	0,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Massimo	21,9	10,7	6,2	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Somma	828	282	86	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Media	18,4	7,0	2,8	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				Range	9,8	7,8	5,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				DS	2,4	2,0	1,6	0,000	0,000	T1≠T2≠T3
				CV	0,2	0,5	1,1	0,000	0,000	T1≠T2≠T3

Tabella 1. Risultati dei test non parametrici condotti sulle metriche estratte dal CHM sui poligoni della segmentazione multilivello dei training sites dei tipi T1 (fustaia), T2 (ceduo) e T3 (ceduo giovane).

L'accuratezza complessiva della classificazione calcolata sui *test sites* è risultata pari all'86%. La *producer's accuracy* e la *user's accuracy* sono risultate massime per i tipi T1 e T3, mentre, per il tipo T2, sono risultate rispettivamente pari al 58% e al 71%, a causa di una imprecisa assegnazione del tipo T2 ad alcuni poligoni test appartenenti al tipo T3 (Tabella 2). L'indice KIA è risultato pari a 0,79.

Considerando solo la distinzione tra il tipo T1 e i tipi T2 e T3, l'accuratezza tematica della classificazione risulta pari al 100% (Tabella 3), con indice KIA pari a 1.

		Verità			UA (%)
		T1 (ha)	T2 (ha)	T3 (ha)	
Classificazione	T1 (ha)	11,7	0,0	0,0	100,0
	T2 (ha)	0,0	11,9	4,9	70,8
	T3 (ha)	0,0	0,0	6,8	100,0
	PA (%)	100,0	100,0	58,1	OA (%) = 86,1

Tabella 2. Accuratezza tematica (OA = overall accuracy, PA = producer's accuracy; UA = user's accuracy) della classificazione dei tipi T1 (fustaia), T2 (ceduo) e T3 (ceduo giovane) calcolata sui test sites.

		Verità		UA (%)
		T1 (ha)	T2+T3 (ha)	
Classificazione	T1 (ha)	11,7	0,0	100,0
	T2+T3 (ha)	0,0	23,6	100,0
	PA (%)	100,0	100,0	OA (%) = 100,0

Tabella 3. Accuratezza tematica (OA = overall accuracy, PA = producer's accuracy; UA = user's accuracy) della classificazione dei tipi T1 (fustaia) e T2+T3 (ceduo e ceduo giovane) calcolata sui test sites.

Discussione e conclusioni

Il telerilevamento ALS con strumentazione LiDAR fornisce una vasta gamma di informazioni utili per la caratterizzazione delle risorse forestali. Tali informazioni possono essere sfruttate in modo efficace durante le fasi analitiche della redazione dei piani di gestione forestale al fine di contenere i costi connessi alle attività di rilievo a terra. Gli studi condotti in Italia e all'estero dimostrano infatti l'effettiva capacità dei dati ALS di supportare la stima di importanti parametri biofisici come la provvigione legnosa e l'area basimetrica, con errori simili se non addirittura inferiori a quelli prodotti con metodi tradizionali basati esclusivamente sui rilievi a terra (Corona et al., 2012).

Lo studio qui presentato dimostra le potenzialità dei dati ALS per caratterizzare la forma di governo del bosco in soprassuoli di latifoglie decidue di ambiente mediterraneo. La metodologia descritta prevede l'utilizzo del CHM ottenibile da dati ALS e l'impiego di procedure automatizzate per la segmentazione *object-oriented* delle immagini telerilevate. La classificazione della forma di governo si basa sulle metriche estratte dal CHM.

Le potenzialità della segmentazione *object-oriented* per differenziare strutture forestali con tecniche di *remote sensing* passivo sono state dimostrate da Lamonaca et al. (2008). Una procedura basata su dati ALS e segmentazione, simile a quella sperimentata dal presente studio, è stata utilizzata da Pascual et al. (2008) per caratterizzare la struttura dei boschi di pino silvestre in Spagna centrale. Questo studio, per la prima volta (non è infatti reperibile alcun riferimento bibliografico in merito), ha esteso questo tipo di procedura per caratterizzare la forma di governo del bosco.

Nelle condizioni esaminate, le metriche CHM più efficaci per la differenziazione dei boschi governati a ceduo rispetto a quelli con struttura a fustaia sono risultate: altezza massima, media delle altezze, CV delle altezze. La capacità di queste metriche di differenziare i tipi strutturali non sembra essere condizionata dalla scala di analisi dei dati ALS. Risultati per certi versi simili a quelli qui evidenziati, sebbene non riferiti alla differenziazione tra cedui e fustaie, sono stati ottenuti da Lefsky et al. (2005) e da Pascual et al. (2008). Secondo Lefsky et al. (2005), l'altezza media e la

variabilità delle altezze estratte dai dati LiDAR sono ben correlate con la struttura delle coperture forestali. Secondo Pascual et al. (2008), la media e la deviazione standard delle altezze sono utili per discriminare i boschi di pino silvestre con struttura orizzontale omogenea, mentre, nel caso di pinete con struttura orizzontale eterogenea, la mediana e la deviazione standard sono più efficienti. In conclusione, i risultati ottenuti da questo studio indicano che la media e il CV delle altezze (metrica che include implicitamente la deviazione standard) estratti dal CHM prodotto con dati ALS sono utili per distinguere i boschi a prevalenza di cerro governati a ceduo da quelli con la struttura tipica della fustaia coetanea. Da ribadire l'importanza di aver dimostrato come a tal fine siano sufficienti le informazioni contenute nel CHM, dato in genere acquisibile dai professionisti forestali a costo relativamente basso o, talora, addirittura nullo. Ulteriori indagini sono comunque necessarie per testare la metodologia proposta in contesti forestali più vasti e con diversa composizione specifica.

Ringraziamenti

I dati ALS sono stati gentilmente concessi dalla Provincia di Pisa nell'ambito della convenzione "Piano di Gestione del Consorzio Forestale delle Cerbaie" (responsabile scientifico: S. Nocentini), stipulata nell'ambito del Progetto BIOMASS del "Programma Operativo Italia – Francia Marittimo 2007-2013".

Il lavoro è stato svolto in parte con fondi di ricerca di Ateneo anno 2011 (responsabile scientifico: D. Travaglini), in parte con fondi del progetto PRIN 2009 "in_FLAMING: Sperimentazione di modelli e tecniche innovative per la gestione integrata dei combustibili nella prevenzione degli incendi boschivi in foreste mediterranee e temperate" (coordinatore nazionale: P. Corona) finanziato dal Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca, e in parte con fondi del progetto FIRB 2008 "Modellizzazione dell'accumulo di carbonio negli ecosistemi forestali nazionali tramite integrazione di dati convenzionali, dati telerilevati e modelli di produttività" (coordinatore nazionale: G. Chirici).

Bibliografia

- Barbati A., Chirici G., Corona P., Montagni A., Travaglini D. (2009), Area-based assessment of forest standing volume by field measurements and airborne laser scanner data, *International Journal of Remote Sensing*, 30(19): 5177–5194.
- Barilotti A., Turco S., Napolitano R., Bressan E. (2005), La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali, *Atti del XV Congresso della Società Italiana di Ecologia, 12-14 Settembre 2005, Torino*.
- Bottalico F., Montagni A., Travaglini D. (2009), Identificazione dei gaps nella copertura forestale con dati LiDAR, *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 Dicembre 2009*.
- Chirici G., Barbati A., Corona P., Lamonaca A., Marchetti M., Travaglini D. (2006), Segmentazione di immagini telerilevate multirisoluzione per la derivazione di cartografie di uso/copertura del suolo multiscala, *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 37: 113–136.
- Ciancio O., Nocentini S. (2004), *Il bosco ceduo, selvicoltura, assestamento, gestione*, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze.
- Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Scrinzi G., Torresan C. (2012), Estimating forest timber volume by means of "low-cost" LiDAR data, *Italian Journal of Remote Sensing*, 44(1): 125–140.
- Congalton R. (1991), A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, 37: 35–46.
- 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, 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.
- Corona P., Marchetti M., Scrinzi G., Torresan C. (2011), Stato dell'arte delle applicazioni laser scanning aereo a supporto della gestione delle risorse forestali in Italia. *ASITA, Atti XV Conferenza Nazionale*, 2011, Colorno: 721-732.
- Corona P., Cartisano R., Salvati R., Chirici G., Floris A., Di Martino P., Marchetti M., Scrinzi G., Clementel F., Travaglini D., Torresan C. (2012), Airborne Laser Scanning to support forest resource management under alpine, temperate and Mediterranean environments in Italy, *European Journal of Remote Sensing*, 45: 27–37.
- Dalponte M., Gianelle D., Bruzzone L. (2008), Use of hyperspectral and LIDAR data for classification of complex forest areas, 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.
- Floris A., Clementel F., Farruggia C., Scrinzi G. (2009), Il LiDAR nella stratificazione tematica dei soprassuoli forestali: applicazioni in Trentino, *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009*.
- Floris A., Clementel F., Farruggia C., Scrinzi G. (2010), Stima su base Lidar delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la foresta di Paneveggio, *Italian Journal of Remote Sensing*, 42(3): 15–32.
- Fusco S., Pflugmacher D., Kirschbaum A., Cohen W., Chiatante D., Montagnoli A. (2008), Uso di dati LiDAR per stima della biomassa forestale in un bosco misto di latifoglie: un caso studio in Valsassina (LC), *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 21-21 Ottobre 2008*.
- Gualdi V. (1977), *R.N.B. di Montefalcone. Piano di assestamento per il decennio 1977-1986*, MAF-CFS, Gestione ASFD, Roma.
- Koch B., Heyder U., Weinacker H. (2006), Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72: 357–363.
- Lamonaca A., Corona P., Barbati A. (2008), Exploring forest structural complexity by multi-scale segmentation of VHR imagery, *Remote Sensing of Environment*, 112: 2839–2849.
- Lefsky M.A., Hudak A.T., Cohen W.B., Acker S.A. (2005), Patterns of covariance between forest stand and canopy structure in the Pacific Northwest, *Remote Sensing of Environment*, 95: 517–531.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. (2000), *Remote Sensing and Image Interpretation*, Wiley.
- Paci M. (2009), *Le pinete delle Cerbaie: struttura, dinamismo e possibili indirizzi selvicolturali*, in: *Scritti in onore di Mario Cantiani* (a cura di: Hermanin L. e La Marca O.), Edizioni Polistampa, Livorno: 173–183.
- Pascual C., García-Abril A., García-Montero L.G., Martín-Fernández S., Cohen W.B. (2008), Object-based semi-automatic approach for forest structure characterization using lidar data in heterogeneous Pinus sylvestris stands, *Forest Ecology and Management*, 255: 3677–3685.
- Pirotti F., Grigolato S., Lingua E., Sitzia T., Tarolli P. (2012), Laser Scanner Applications in Forest and Environmental Sciences, *Italian Journal of Remote Sensing*, 44: 109–103.
- Travaglini D., Bottalico F., Fiorentini S., Lisa C., Marchi E., Mottola S., Neri F., Nocentini S., Puletti N. (2011), *I boschi delle Cerbaie: gestione, conservazione e uso sostenibile*, Pacini Editore SpA, Ospedaletto (Pisa).
- Wulder M.A., Han T., White J.C., Sweda T., Tsuzuki H. (2007), Integrating profiling LIDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization, *Remote Sensing of Environment*, 110: 123–137.