

# Uso di dati telerilevati LiDAR e IKONOS per la caratterizzazione delle coperture forestali di Monte Morello

written by Rivista di Agraria.org | 10 luglio 2015  
di Nicolò Camarretta

## Introduzione

Il LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è un sistema di telerilevamento attivo che permette il posizionamento e la rilevazione dell'altezza degli oggetti presenti sulla superficie terrestre; questo è possibile misurando il tempo di volo fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del suo riflesso, conoscendo l'altezza del sensore.

Generalmente il territorio viene misurato da un telemetro laser installato su un velivolo (in genere un aereo o un elicottero).

La dimensione del raggio laser viene indicata con la sua impronta (*footprint*), che specifica il diametro della sezione trasversale del fascio sulla superficie riflettente alla distanza specificata (Goodwin et al., 2006). I sistemi LiDAR si distinguono in sistemi denominati *Small footprint* (diametro dell'impulso a terra fra 0.2 e 3 m) e in sistemi denominati *Large footprint* (diametro dell'impulso a terra > 3 m).

In base al tipo di strumentazione LiDAR a disposizione si può effettuare la registrazione di un singolo eco di ritorno per ogni impulso laser, di due o più ritorni (*multi-echoes*) relativi agli oggetti localizzati lungo l'impronta laser, oppure dell'intera forma d'onda riflessa (*full waveform*) (Leeuwen e Nieuwenhuis, 2010).

Il dato grezzo ALS (*Airborne Laser Scanning*) puntiforme fornisce un dato che può essere impiegato per descrivere la struttura forestale. Con questo sensore si può infatti caratterizzare gli oggetti nelle tre dimensioni (x, y e z), anche all'interno della chioma e sotto copertura. Le dimensioni x ed y corrispondono rispettivamente alla latitudine e longitudine del punto colpito dall'impulso LiDAR sulla superficie terrestre, mentre la dimensione z indica la sua altitudine sul livello del mare.

A partire dalla nuvola di punti LiDAR grezza si esegue una prima pulizia del dato per rimuovere i punti affetti da errore. Questo viene fatto attraverso l'utilizzo di algoritmi iterativi adattabili in base alle caratteristiche morfologiche del territorio (Checchinato, 2012).

I punti sono poi classificati e suddivisi in punti appartenenti al terreno (*ground*) e punti situati sopra il terreno (*over-ground*). Con i punti terreno così ottenuti si può calcolare, per interpolazione, il modello digitale del terreno (*Digital Terrain Model* - DTM), che rappresenta la sola superficie terrestre, senza vegetazione, edifici o altre opere poste al di sopra di essa.

Con i punti classificati sopra il terreno si calcola, sempre per interpolazione, il modello digitale della superficie (*Digital Surface Model* - DSM) inteso come rappresentazione della superficie terrestre con sopra tutti gli elementi presenti. Nelle applicazioni forestali il DTM e il DSM sono poi utilizzati per generare il modello digitale delle chiome (*Canopy Height Model* - CHM) che fornisce l'informazione dell'altezza della copertura forestale. Il CHM è calcolato come differenza fra il DSM e il DTM.

In ambito forestale il dato *multi-echoes*, con 2-10 echi di ritorno, fornisce informazioni sufficientemente dettagliate per eseguire analisi sulle caratteristiche strutturali delle coperture boschive.

Vari studi hanno evidenziato le potenzialità dei dati LiDAR per la stima di parametri dendrometrici di interesse inventariale e assesstamentale. Per esempio, per stimare il volume legnoso o la biomassa in piedi di una foresta, sono stati sviluppati dei modelli predittivi degli attributi forestali partendo dalle metriche derivate dai dati LiDAR. Queste metriche possono essere calcolate sia analizzando i dati ALS puntiformi per estrarre informazioni relative al numero di ritorni, come ad esempio l'elevazione del più alto ritorno sopra il suolo, il coefficiente di variazione dei ritorni di altezza e altre informazioni, oppure analizzando il dato raster che, con i valori del modello digitale delle chiome (CHM), permette di calcolare metriche più semplici come l'altezza media, il coefficiente di variazione dell'altezza, la somma delle altezze e altre metriche.

In Italia Corona et al. nel 2007 e 2008 ed anche Corona e Fattorini nel 2008 hanno proposto e testato un approccio

*area-based* per stimare con LiDAR il volume di un bosco misto di latifoglie all'interno della Riserva Naturale Bosco della Fontana, nella regione Lombardia. Dai dati grezzi è stato estratto il CHM, che in seguito è stato combinato con il volume del bosco misurato in 31 aree di saggio a terra, di forma circolare con raggio di 10 m. Il coefficiente di correlazione così riscontrato è risultato in un valore di  $r = 0.88$ .

Nel 2009 Barbati et al. hanno applicato l'approccio *area-based* proposto da Corona e Fattorini (2008) per stimare il volume di una pineta costiera all'interno della Riserva Naturale Statale Tomboli di Cecina. I dati ALS sono stati raccolti nel 2004 con un sensore ALTM Optech Gemini, con una densità media di circa 3 punti/m<sup>2</sup>. I rilievi a terra sono stati effettuati fra il 2005 e il 2006, per un totale di 43 aree circolari di 20 m di raggio. Anche in questo caso la correlazione tra i dati LiDAR e il volume misurato nelle aree di saggio è risultata buona, con un valore di  $r = 0.87$ .

Floris et al. nel 2010 hanno sviluppato dei modelli di regressione fra le metriche estratte dal CHM e il volume in piedi misurato in aree di saggio nel SIC (Sito di Importanza Comunitaria) Foresta di Paneveggio, nella provincia autonoma di Trento. Dal CHM sono state estratte sei metriche con le quali si è creato un modello lineare di regressione multivariata, utilizzando una selezione delle variabili per passaggi successivi per il volume totale e per il volume delle aree. I risultati ancora una volta mostrano come il dato LiDAR sia paragonabile alle tradizionali misure in bosco, fornendo un  $r = 0.93$ .

Gli incendi boschivi sono uno dei principali fattori di disturbo delle foreste Mediterranee e giocano un ruolo fondamentale sia nei cicli successionali sia per quanto riguarda le caratteristiche strutturali e la funzione ecosistemica del bosco (Koustias e Karteris, 2003). Un incendio, per propagare, ha bisogno di materiale combustibile vegetale vivo e morto. Negli ultimi anni, con il progressivo abbandono dei boschi e delle pratiche silvo-pastorali, ci troviamo davanti ad una situazione che ha profondamente cambiato la composizione e la struttura dei combustibili.

Ai fini della prevenzione e lotta agli incendi boschivi, la descrizione spaziale e strutturale dei combustibili risulta sempre più importante. Per rendere misurabile la quantità e qualità di combustibile presente in bosco sono stati identificati una serie di "tipi di combustibile" (*Fuel type*), definiti come "un'associazione identificabile di elementi di combustibile di specie, di forma, dimensione, disposizione e continuità con caratteristiche tali da produrre un determinato comportamento del fuoco in determinate condizioni di combustione" (Merril e Alexander, 1987).

Nel 2007 Mutlu et al. hanno sviluppato una metodologia per stimare i modelli di combustibile usando dati ALS insieme ad immagini multispettrali provenienti dal satellite *QuickBird*. L'area di studio, situata nel Texas orientale, è stata percorsa da 62 aree di saggio, con le quali sono stati paragonati i modelli di combustibile stimati a partire dai dati telerilevati. Un unico approccio è stato usato per classificare i modelli di combustibile usando una combinazione di *Height bins* provenienti dal LiDAR ed il dato multispettrale. Il metodo di classificazione usato fondendo il dato ALS con il QuickBird ha prodotto un'accuratezza del 90.10%, contro il 76.52% del solo dato QuickBird.

In Italia sono poche le sperimentazioni condotte con dati LiDAR per la classificazione dei tipi di combustibile. Ad esempio Chirici et al. (2013) hanno confrontato, in due aree di studio in Regione Sicilia, tre diversi approcci di classificazione dei tipi di combustibile: (a) *regression tree* (CART), (b) *Random Forests* e (c) *Stochastic Gradient Boosting* (SGB). Il metodo SGB ha prodotto i risultati migliori per l'identificazione dei tipi di combustibile con valori di accuratezza complessiva dell'84%.

## Obiettivi

L'obiettivo di questo lavoro è esaminare le potenzialità dei dati telerilevati per la caratterizzazione delle coperture forestali. In particolare, gli obiettivi specifici dello studio sono:

- 1) valutare l'efficacia dei dati LiDAR e dei dati multispettrali del satellite IKONOS per la stima con metodo regressivo dei seguenti parametri dendrometrici: numero di piante a ettaro, area basimetrica a ettaro, volume a ettaro, diametro medio di area basimetrica media, altezza media, altezza dominante, altezza di inserzione della chioma;
- 2) valutare le performance di stima dei parametri dendrometrici ottenute dall'analisi delle metriche LiDAR estratte dal CHM in formato puntiforme e per confronto dal CHM in formato raster;
- 3) valutare l'efficacia dei dati LiDAR per la classificazione dei tipi di combustibile secondo il Sistema di classificazione Prometheus.

## Area di studio

L'area di studio presa in esame ricade all'interno del complesso di Monte Morello, un'ampia dorsale posta a Nord-Ovest di Firenze. L'area esaminata si estende su una superficie di 480 ettari.

Il paesaggio di Monte Morello è caratterizzato da due formazioni forestali principali: la prima è rappresentata dai rimboschimenti di conifere, distribuiti soprattutto alle quote superiori; la seconda è identificabile nel bosco ceduo misto con prevalenza di roverella e cerro.

Nella zona di contatto fra il bosco di conifere e il bosco ceduo si registra l'ingresso delle latifoglie nello strato inferiore dei popolamenti di conifere, dando così inizio a vari processi di rinaturalizzazione dei rimboschimenti.

## Materiali e Metodi

### Rilievi

Le aree di rilevamento a terra sono state selezionate utilizzando il sistema di campionamento sistematico non allineato. A tal fine è stata utilizzata la maglia inventariale dell'Inventario forestale della Regione Toscana che risulta composta da celle di forma quadrata di 400 m di lato. All'interno di ogni cella è stato estratto casualmente un punto che è stato assunto come posizione centrale dell'area di saggio. Complessivamente sono state selezionate 29 aree di saggio (Figura 1).



Figura 1: aree di saggio e maglia inventariale.

Prima di effettuare i rilievi a terra si è verificato che le aree di saggio selezionate non fossero interessate dal passaggio di linee elettriche, che avrebbero potuto falsare i valori rilevati dal LiDAR.

Inoltre, esistendo una certa differenza temporale fra l'acquisizione dei dati LiDAR e IKONOS (2008) e i rilievi a terra (2013), si è scelto di escludere dal rilievo le aree sottoposte al taglio negli ultimi 5 anni (Simonson et al. 2012).

Le aree di rilevamento sono state raggiunte con l'utilizzo di un GPS trimble Juno SB (2-5 m di accuratezza) e le coordinate definitive del punto centrale di ciascuna area sono state acquisite con GPS.

I rilievi sono stati condotti all'interno di aree di forma circolare con raggio di 13 m (530.9 m<sup>2</sup>). È stato eseguito il cavallettamento totale a petto d'uomo (1.30 m) con soglia di cavallettamento a 2.5 cm. Di ciascuna pianta cavallettata è stata rilevata la specie ed è stata misurata l'altezza totale e l'altezza di inserzione della chioma. L'altezza di inserzione è stata misurata come la distanza fra il terreno e i più bassi rami verdi della chioma dell'albero; non sono stati considerati i rami verdi piccoli o isolati dalla chioma principale (Popescu e Zhao, 2008). Le misure relative all'altezza sono state effettuate tramite l'utilizzo di Ipsometro a ultrasuoni (Vertex IV).

Inoltre, in ciascuna area lo strato arbustivo è stato così rilevato: di ciascun gruppo di arbusti è stata misurata la lunghezza della diagonale maggiore e della diagonale minore ed è stata misurata l'altezza media degli arbusti con un'asta graduata (Wing et al., 2012).

### Dati LiDAR e IKONOS

Il satellite IKONOS è un sistema di telerilevamento passivo. La piattaforma satellitare orbita a 681 km dalla Terra, con un tempo di orbita di circa tre giorni, ed acquisisce 4 bande nel multispettrale (blu, verde, rosso e infrarosso vicino) con risoluzione geometrica di 4 metri ed anche una banda pancromatica con risoluzione spaziale di 1 metro (Chirici e Corona, 2006).

Il dato IKONOS multispettrale e pancromatico è stato acquisito il 7 luglio del 2008 ed è stato messo a disposizione in formato .tif già georeferenziato.

La nuvola di punti LiDAR è stata registrata nell'autunno del 2008. La densità media degli impulsi a terra è di 0.4 punti/m<sup>2</sup>, con una accuratezza verticale di 0.25 m ed una accuratezza orizzontale di 0.80 m. Va segnalato che delle 29 aree di saggio effettuate in bosco una di queste è risultata non coperta dal dato LiDAR e quindi è stata scartata nelle successive analisi.

## Elaborazioni dendrometriche e tipi di combustibile

I dati rilevati a terra sono stati utilizzati per calcolare per ciascuna area di saggio i principali caratteri dendrometrici: numero di piante ad ettaro; area basimetrica ad ettaro; diametro medio di area basimetrica media; altezza media (altezza della pianta di diametro medio letta sulla curva ipsometrica costruita con i dati di altezza rilevati a terra); altezza dominante (altezza media dei 100 alberi di maggiore diametro a ettaro); altezza di inserzione della chioma, calcolata come media delle altezze di inserzione misurate nell'area di saggio; volume ad ettaro, calcolato utilizzando le tavole di cubatura a doppia entrata dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (Tabacchi et al. 2011).

Ogni area è stata inoltre classificata in una delle tipologie di combustibile del sistema di classificazione Prometheus (tipi 5, 6 o 7). A tal fine in ciascuna area è stato calcolato il grado di copertura dello strato arbustivo e l'altezza media degli arbusti (Wing et al., 2012).

## Pre-elaborazioni dei dati telerilevati

La nuvola di punti Lidar è stata inizialmente pre-elaborata per separare i punti *ground* dai punti *over-ground*. I punti *ground* e punti *over-ground* sono stati utilizzati per generare, rispettivamente, il DTM e il DSM in formato raster con risoluzione di 2 m. Dalla differenza algebrica tra il DTM e il DSM è stato generato il CHM.

## Metriche LiDAR e variabili multispettrali

Per ciascuna area di saggio sono state estratte le seguenti metriche LiDAR dal CHM in formato sia puntiforme che raster: altezza minima, altezza massima, altezza media, deviazione standard delle altezze, somma delle altezze, *range*.

Inoltre, per ciascuna area di saggio sono state estratte le seguenti variabili multispettrali dalle singole bande del satellite IKONOS e dall'indice NDVI calcolato utilizzando le bande IKONOS del rosso e dell'infrarosso vicino: valore minimo, valore massimo, media, deviazione standard, sommatoria e *range*.

## Stima delle variabili dendrometriche

Dopo aver estratto le metriche LiDAR e IKONOS si è proceduto alla costruzione dei modelli predittivi delle variabili dendrometriche rilevate in campo: diametro medio; altezza media; altezza dominante; altezza di inserzione della chioma; numero di piante ad ettaro; area basimetrica ad ettaro; volume ad ettaro. A tal fine sono stati utilizzati dei modelli regressivi seguendo un approccio *area-based* (Corona et al., 2012).

La selezione delle metriche meglio correlate con le variabili dendrometriche è stata eseguita con una *Stepwise analysis*. L'analisi è stata effettuata due volte utilizzando le variabili multispettrali estratte dal dato satellitare IKONOS e le metriche LiDAR estratte dal CHM in formato raster e puntiforme.

Sulla base dei risultati prodotti dalla Stepwise analysis si sono poi selezionati i modelli regressivi più semplici, ovvero quei modelli che prevedono l'impiego di un numero minore di variabili predittive, ma che presentano un coefficiente di correlazione ( $r$ ) con le variabili target (variabili dendrometriche) uguale o superiore a 0.7 (Simonsen et al., 2012).

## Valutazione dei modelli predittivi

Al fine di valutare l'accuratezza di stima dei modelli selezionati sono stati calcolati, con procedura di *cross-validation Leave-One-Out* (LOO) (Chirici et al., 2008), lo scarto quadratico medio (RMSE *Root Mean Squared Error*) e lo scarto quadratico medio relativo (RRMSE *Relative Root Mean Squared Error*).

## Classificazione dei tipi di combustibile

Il Sistema Europeo Prometheus (Arroyo et al., 2006), rielaborato ed adattato dal sistema statunitense sviluppato presso il *Northern Forest Fire Laboratory* (NFFL), si basa principalmente sul tipo e l'altezza degli elementi di propagazione, identificando 7 tipi di combustibile. I tipi di combustibile sono classificati secondo la distribuzione

spaziale di tre elementi principali: erba, cespugli/arbusti e alberi. Il tipo di combustibile viene distinto tenendo conto dell'altezza del combustibile e della sua densità. Le caratteristiche principali dei 7 tipi di combustibile previsti dal Sistema Prometheus sono sintetizzate in figura 2.



Figura 2: Sistema di classificazione dei tipi di combustibile Prometheus.

Per la classificazione è stata seguita la procedura proposta da Garcia et al. (2011). Dal momento che la classificazione Prometheus si basa sulla percentuale di copertura al suolo delle chiome e sulla stratificazione verticale della componente vegetale, per prima cosa è stato necessario suddividere i dati relativi al CHM vettoriale di ogni area di saggio in *voxel* (*pixel* volumetrici). Si è infatti deciso di suddividere i punti appartenenti ad ogni area campione in strati dell'altezza di 0.5 m e superficie pari all'estensione dell'area di saggio. Questa stratificazione è stata fatta per tutti i punti situati nei primi 10 m dal suolo. Tutti i punti sopra questa soglia sono stati raggruppati in un unico strato. Considerando la percentuale di punti compresi fra 0 e 4 m e l'eventuale continuità verticale degli strati si è quindi proceduto alla classificazione dei tipi di combustibile forestale.

Infine la performance della procedura adottata per la identificazione dei tipi di combustibile è stata valutata calcolando l'accuratezza complessiva (OA, *Overall Accuracy*) della classificazione confrontando le classi del Sistema Prometheus ottenute sulla base dei rilievi a terra con quelle derivate dall'analisi dei dati LiDAR.

## Risultati

### Caratterizzazione dendrometrica

Dalle misurazioni effettuate a terra è emerso che 16 aree di saggio cadono all'interno di rimboschimenti di conifere e 13 aree di saggio all'interno di boschi misti di specie quercine. Nei rimboschimenti di conifere le specie prevalenti sono risultate essere il cipresso comune e il pino nero, presenti in popolamenti pressoché puri o in vario grado di mescolanza, ai quali si affiancano sporadicamente esemplari di douglasia e cedro. Si evidenzia una certa variabilità all'interno di questi popolamenti, passando da una provvigione minima di 100.8 m<sup>3</sup>/ha a valori massimi di 771. 2 m<sup>3</sup>/ha. Per quanto riguarda le 13 aree ricadenti nei di boschi misti di latifoglie, gestiti prevalentemente a ceduo matricinato, le specie prevalenti sono la roverella ed il cerro, con, in base alla stazione, presenza di carpino nero, ornio e leccio come specie associate. Anche per le latifoglie si è registrata una certa variabilità riguardo le caratteristiche dendrometriche, infatti si passa da un livello minimo di provvigione di 97.9 m<sup>3</sup>/ha fino ad un massimo di 189.3 m<sup>3</sup>/ha.

### Modelli predittivi delle variabili dendrometriche

I risultati della *Stepwise analysis* sono riportati in Tabella 1 (in rosso i modelli selezionati). Dall'analisi dei risultati ottenuti si osserva quanto segue:



Tabella 1: Modelli predittivi ottenuti utilizzando le variabili multispettrali derivate dalle bande satellitari IKONOS e le metriche LiDAR estratte dal CHM in formato raster e vettoriale.

a) per tutte le variabili dendrometriche considerate, a eccezione del numero di piante a ettaro, il predittore selezionato dalla *Stepwise analysis* per il modello regressivo con una sola variabile indipendente (Modello 1) corrisponde ad una metrica estratta dal CHM; le variabili multispettrali estratte dalle bande satellitari IKONOS non sono state mai selezionate come prima variabile predittiva;

b) il coefficiente di correlazione ( $r$ ) del modello regressivo con una sola variabile dipendente (Modello 1) è risultato  $\geq 0.7$  per le seguenti variabili dendrometriche: altezza media, altezza dominante, altezza di inserzione della chioma, area basimetrica a ettaro, volume a ettaro;

c) le metriche LiDAR selezionate dalla *Stepwise analysis* per il modello regressivo semplice (Modello 1), con valori del coefficiente di correlazione più elevati, sono risultate sempre le metriche estratte dal CHM in formato raster, a

eccezione del modello relativo alla altezza di inserzione della chioma; in particolare, l'altezza media è risultata ben correlata con la deviazione standard delle altezze estratte dal CHM raster ( $r = 0.97$ ); l'altezza dominante è risultata ben correlata con il valore massimo di altezza estratto dal CHM raster ( $r = 0.96$ ); l'area basimetrica a ettaro ( $r = 0.81$ ) e il volume a ettaro ( $r = 0.93$ ) sono risultate ben correlate con la media delle altezze estratte dal CHM raster; l'altezza di inserzione della chioma è risultata ben correlata con la media delle altezze estratte dal CHM puntiforme ( $r = 0.70$ );

d) per quanto riguarda il diametro medio, il modello più semplice con un coefficiente di correlazione ( $r \geq 0.7$ ) è risultato il modello a due variabili indipendenti (Modello 2); in questo caso i risultati migliori sono stati ottenuti utilizzando come variabili predittrici la media delle altezze estratte dal CHM in formato puntiforme ed il valore massimo di riflettanza spettrale estratto dalla banda 2 (lunghezza d'onda del verde) del satellite IKONOS.

In definitiva, per la stima delle varie variabili dendrometriche si sono scelti i seguenti modelli ottenuti utilizzando il CHM in formato raster e le bande multispettrali IKONOS (Tabella 1):

Modello 1 per l'altezza media, l'altezza dominante, l'area basimetrica ad ettaro, il volume ad ettaro; Modello 2 per il diametro medio e per l'altezza di inserzione della chioma.

Nel caso del diametro medio e dell'altezza di inserzione della chioma si è deciso di utilizzare i modelli basati sul CHM raster per i seguenti motivi:

per simulare un contesto operativo più frequente in Italia; infatti, almeno allo stato attuale, nel nostro Paese il CHM in formato raster è un tipo di dato più diffuso e più facilmente reperibile dai tecnici forestali (Corona et al., 2012) rispetto alla nuvola di punti lidar;

per la maggior praticità nell'analisi del dato raster rispetto al dato puntiforme.

## Errore di stima

L'accuratezza dei modelli è stata valutata con procedura di *cross-validation Leave-One-Out* (LOO) (Chirici et al., 2008) (Tabella 2).



Tabella 2: Errori di stima calcolati con procedura di *cross-validation LOO*.

Si evidenziano i buoni valori di correlazione tra le variabili dendrometriche misurate nelle aree di saggio e le stime ottenute dall'applicazione dei modelli selezionati. Inoltre dall'analisi bibliografica si evince che i risultati ottenuti in questo lavoro sono in linea con quelli ottenuti da altri Autori. Più in particolare si è visto come Tonolli et al. (2011a, b) utilizzando varie metriche LiDAR, tra cui l'altezza media e massima, abbiano ottenuto, partendo da dati LiDAR con una densità di 8.6 e 0.5 punti/m<sup>2</sup>, rispettivamente, degli alti valori del coefficiente di correlazione per il volume a ettaro ( $r = 0.85$  in entrambi gli studi), con uno scarto quadratico medio percentuale (RRMSE) rispettivamente del 16.7% e del 18.5%. Questi valori sono concordi con quanto evidenziato da questo studio ( $r = 0.87$  e RRMSE = 30%) che, ricordiamo, ha utilizzato dati LiDAR originati da una nuvola di punti con densità di 0.4 punti/m<sup>2</sup> e ha impiegato l'altezza media come metrica per costruire il modello di stima. González-Olabarria et al. (2012), utilizzando varie metriche LiDAR, fra cui l'altezza media e vari percentili di altezza, hanno ottenuto dei valori simili a quelli esposti in questo lavoro. Più in particolare si evidenzia come i coefficienti di correlazione ( $r$ ) riportati da González-Olabarria et al. (2012) relativamente alla stima dell'altezza media, altezza dominante e altezza di inserzione della chioma siano rispettivamente di 0.94, 0.95 e 0.74; tali valori sono simili a quelli ottenuti in questo lavoro di tesi, che sono risultati rispettivamente pari a 0.96, 0.95 e 0.69. Si nota invece una certa discrepanza per quanto riguarda i coefficienti di correlazione ( $r$ ) per il diametro medio di area basimetrica media e per l'area basimetrica a ettaro. Gli Autori hanno ottenuto valori di  $r$  rispettivamente di 0.85 e 0.89, mentre, in questo studio, si sono ottenuti valori di  $r$  di 0.63 e 0.59, rispettivamente. Questa differenza potrebbe essere imputabile al diverso tipo di metrica LiDAR utilizzata durante la creazione dei modelli di stima e all'impiego, in questo studio, di un dato LiDAR con una densità di punti relativamente bassa (0.4 punti/m<sup>2</sup>).

## Tipi di combustibile

Delle 28 aree di saggio prese in esame, 21 sono state classificate correttamente, anche se con una certa variabilità

nella disposizione verticale dei punti, mentre per 7 aree non si è trovata nessuna corrispondenza con i rilievi a terra.

Le 21 aree correttamente classificate appartengono tutte alla tipologia di combustibile 5. Delle 7 aree in cui la classificazione non ha avuto successo, 6 aree, appartenenti alle tipologie 6 e 7, sono state classificate in tipo 5 e un'area, identificata in campo come tipo 5, è stata erroneamente attribuita alla tipologia 7.

In definitiva, l'accuratezza complessiva (OA, *Overall Accuracy*) della classificazione dei tipi di combustibile del Sistema Prometheus basata sui dati LiDAR è risultata pari al 75%.

## Discussioni

L'utilizzo dei dati LiDAR e dei dati multispettrali IKONOS per la stima con metodo regressivo dei parametri dendrometrici ha prodotto buoni risultati, con valori del coefficiente di correlazione ( $r$ ) uguali o superiori a 0.7 e valori dell'errore quadratico medio relativo (RRMSE%) inferiori al 30%.

Il numero di piante a ettaro non è stato preso in considerazione per le prove di stima perché nessuno dei modelli predittivi ottenuti con la *Stepwise analysis* ha prodotto un valore del coefficiente di correlazione ( $r \geq 0.7$ ). Si deve tuttavia osservare che, nelle condizioni esaminate in questo studio, il numero di piante a ettaro è risultato correlato con le variabili multispettrali estratte dal satellite IKONOS (valore totale estratto dalla banda dell'infrarosso vicino e valore totale dell'indice NDVI,  $r = 0.60$ ) mentre non sono state osservate correlazioni con le metriche estratte dal dato *laser scanner*.

Per la stima dei parametri dendrometrici il dato CHM in formato raster ha prodotto modelli migliori, per semplicità e valore del coefficiente di correlazione, rispetto al CHM in formato vettoriale.

Per quanto riguarda invece l'identificazione dei tipi di combustibile del Sistema Prometheus le prestazioni dei dati LiDAR hanno prodotto un livello di accuratezza medio (*Overall Accuracy*=75%) che è risultato inferiore rispetto al livello di accuratezza (88%) riportato da García et al. (2011).

I motivi della più bassa capacità dei dati LiDAR di distinguere i tipi di combustibile presi in esame nell'area di studio di Monte Morello possono essere riconducibili a diversi fattori, tra i quali:

la bassa densità della nuvola di punti LiDAR utilizzata in questo studio (0.4 punti/m<sup>2</sup>) rispetto alla densità di punti (compresa tra 1.5 e 6 punti/m<sup>2</sup>) utilizzata da García et al. (2011);

il tipo di dato LiDAR utilizzato in questo studio, caratterizzato solo dal primo ed ultimo eco di ritorno.

Da quanto sopra si può dedurre che:

per quanto riguarda la stima delle principali caratteristiche dendrometriche, il tipo di dato LiDAR a disposizione si è rivelato efficace per produrre dei buoni modelli di stima, nonostante la bassa densità di punti (0.4 punti/m<sup>2</sup>), il suo periodo di acquisizione (autunno) e i tipi di ritorno registrati (primo e ultimo eco).

## Conclusioni

I risultati di questo studio confermano la buona capacità di stima delle variabili dendrometriche con tecnologia LiDAR, sia impiegata singolarmente che integrata con il dato multispettrale IKONOS. Malgrado il dato LiDAR sia risultato di bassa risoluzione spaziale e rilevato nel periodo autunnale (riposo vegetativo), anche dal confronto con quanto riportato in bibliografia, si evidenzia la sua adeguatezza nel fornire ottimi risultati di stima di diversi parametri dendrometrici.

La classificazione dei tipi di combustibile secondo il Sistema Prometheus con dati LiDAR ha prodotto un livello di accuratezza medio del 75%. Probabilmente la bassa densità di punti del dato LiDAR disponibile per questo studio non ha permesso l'ottenimento di risultati simili a quelli osservati in altri studi. Si rendono pertanto necessarie ulteriori indagini nel nostro Paese per la classificazione dei tipi di combustibile con tecnologia LiDAR e, in tal senso, si consiglia l'utilizzo di dati con una maggiore densità di punti a terra e con registrazione multipla degli echi di ritorno.

## Bibliografia

ARROYO L. A., HEALY S. P., COHEN W. B., COCERO D., 2006 - Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types

in a Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research* 111, G04S04.

BARBATI A., CHIRICI G., CORONA P., MONTAGHI 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, 5177 - 5194.

CHECCHINATO A., 2012 - Trattamento ed elaborazione dei dati LiDAR. Dai punti grezzi ai modelli digitali. *Dossier LiDAR: Applicazioni e Prospettive*. Sherwood, pp. 30-32.

CHIRICI G., CORONA P., 2006 - Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali. Programma triennale di ricerca agricola, agroambientale, agroalimentare ed agroindustriale della regione Lazio (PRAL). Università degli studi della Tuscia.

CHIRICI, G., BARBATI, A., CORONA, P., MARCHETTI, M., TRAVAGLINI, D., MASELLI, F., BERTINI, R., 2008 - Non-parametric and parametric methods using satellite images for estimating growing stock volume in alpine and Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2686-2700.

CHIRICI G., SCOTTI R., MONTAGHI A., BARBATI A., CARTISANO R., LOPEZ G., MARCHETTI M., MCROBERTS R.E, OLSSON E., CORONA P., 2013 - Stochastic gradient boosting classification trees for forest fuel types mapping through airborne laser scanning and IRS LISS-III imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25: 87-97. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.006>.

CORONA P. CARTISANO R., SALVATI R., CHIRICI G., FLORIS A., DI MARTINO P., MARCHETTI M., SCRINZI G., CLEMENTEL F., TRAVAGLINI D., TORRESAN C., 2012 - Airborne Laser Scanning to support forest resource management under alpine, temperate and Mediterranean environments in Italy. *European Journal of Remote Sensing* 45, 27 - 37.

CORONA P., LAMONACA A., CHIRICI G., TRAVAGLINI D., MARCHETTI M., MINARI E., MONTAGHI A., 2007 - Sviluppo di una procedura innovativa per la cubatura del volume della massa legnosa di fustaie di latifoglie mediante LiDAR. In: *Atti della 11° Conferenza Nazionale ASITA*, Torino, 6-9 Novembre, vol. 1, pp. 767-772.

CORONA P., LAMONACA A., CHIRICI G., TRAVAGLINI D., MARCHETTI M., MINARI E., MONTAGHI 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, Verona.

CORONA P., FATTORINI L., 2008 - Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 2911-2916.

FLORIS A., CLEMENTEL F., FARRUGGIA C., SCRINZI G., 2010 - Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 3, 15 - 32.

GARCÍA M., RIAÑO D., CHUVIECO E., SALAS J. DANSON F. M., 2011 - Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sensing of Environment* 115, 1369 - 1379.

GONZÁLEZ-OLABARRIA J.-R., RODRÍGUEZ F., FERNÁNDEZ-LANDA A., MOLA-YUDEGO B., 2012 - Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. *Forest Ecology and Management* 282, 149 - 156.

GOODWIN N. R., COOPS N. C., CULVENOR D. S., 2006 - Assessment of forest structure with Airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sens Environ* 103: 140 - 152.

KOUSTIAS N., KARTERIS M., 2003 - Classification analyses of vegetation for delineating forest fire fuel complexes in a Mediterranean test site using satellite remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing* 24, 3093 - 3104.

LEEUWEN M. V., NIEUWENHUIS M., 2010 - Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing *Eur J Forest Res* 129: 749 - 770.

MERRIL D. F., ALEXANDER M. E., 1987 - Glossary of forest fire management terms. National Research Council of Canada, Committee for Forest Fire Management, (Ottawa, ON).

POPESCU S. C., ZHAO K., 2008 - A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment* 112, 767 - 781.

SIMONSON W. D., ALLEN H. D., COOMES D. A., 2012 - Use of an Airborne Lidar System to Model Plant Species Composition and Diversity of Mediterranean Oak Forest. *Conservation Biology*, Volume 26, No. 5, 840 - 850.

TABACCHI G., DI COSMO L., GASPARINI P., MORELLI S., 2011 - Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. *Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea*. Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale.

TONOLLI S., DALPONTE M., VESCOVO L., RODEGHIERO M., BRUZZONE L., GIANELLE D., 2011a - Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research* 130 (4), 569-577.

TONOLLI S., DALPONTE M., NETELER M., RODEGHIERO M., VESCOVO L., GIANELLE D., 2011b - Fusion of airborne LiDAR and satellite multispectral data for the estimation of timber volume in the Southern Alps. *Remote Sensing of Environment* 115, 2486-2498.

WING B. M., RITCHIE M. W., BOSTON K., COHEN W. B., GITELMAN A., OLSEN M.J., 2012- Prediction of understory vegetation cover with airborne lidar in an interior ponderosa pine forest. *Remote Sensing of Environment* 124, 730 - 741.



Sintesi della Tesi di Laurea Magistrale:

**Uso di dati telerilevati LiDAR e IKONOS per la caratterizzazione delle coperture forestali di Monte Morello**

Candidato: **Nicolò Camarretta** (E-mail: nicolo.camarretta@gmail.com )

Relatore: Dr. Davide Travaglini

Correlatore: Prof. Enrico Marchi

Università degli Studi di Firenze – Scuola di Agraria

Corso di Laurea Magistrale in SCIENZE E TECNOLOGIE DEI SISTEMI FORESTALI

(Classe LM – 73 – classe delle lauree in Scienze e tecnologie forestali e ambientali)

La tesi ha vinto il Premio di laurea “Del Centenario”, indetto dall’Associazione di Agraria.org in accordo con i Corsi di laurea forestali dell’Università di Firenze, per valorizzare e premiare il merito e l’innovazione nel campo forestale.

<http://www.forumdiagraria.org/miscellanea-f72/premio-di-laurea-del-centenario-t83201.html>



**Atlante di selvicoltura**

Dizionario illustrato di alberi e foreste

Giovanni Bernetti - Edagricole

Una vera enciclopedia sulla selvicoltura. Le specie vegetali ed animali trattate sono più di 800...

[Acquista online >>>](#)