

Sviluppo di una procedura innovativa per la cubatura del volume della massa legnosa di fustaie di latifoglie mediante LiDAR

Piermaria CORONA (*), Gherardo CHIRICI (**), Andrea LAMONACA (*), Davide TRAVAGLINI (***), Franco MASON (****), Emma MINARI (****), Marco MARCHETTI (**), Alessandro MONTAGHI (***)

* sisFOR, Laboratorio di Inventari Forestali e Sistemi Informativi Geografici, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse, Università della Tuscia, Via S. Camillo de Lellis s.n.c., I-01100 Viterbo. Tel. +39 0761 357425, Fax: +39 0761 357389, e-mail: piermaria.corona@unitus.it

**EcoGeoFor - Laboratorio di Ecologia e Geomatica Forestale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università del Molise, Contrada Fonte Lappone snc, I-86090 Pesche (Isernia). Tel.: +39 0874 404113, Fax: +39 0874 404123, e-mail: gherardo.chirici@unimol.it

***geoLAB – Laboratorio di Geomatica, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Ambientali Forestali, Università degli Studi di Firenze, Via S. Bonaventura 13, I-50145 Firenze. Tel.: +39 055 3288621, Fax: +39 055 319179, e-mail: davide.travaglini@unifi.it

**** CFS, CNBF Centro Nazionale per lo Studio e la Conservazione della Biodiversità Forestale “Bosco Fontana” di Verona. Via Carlo Ederle 16/a. I-37100 Verona. Tel. +39 045 8345445 Tel. +39 045 8301569, e-mail utb.verona@corpoforestale.it

Riassunto

La tecnica di scansione aerea con strumentazione LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è sempre più presa in considerazione ai fini di analisi e monitoraggio degli attributi dendrometrici dei popolamenti forestali, ma anche per stimare attributi complessi quali il volume della massa legnosa e la biomassa legnosa. Il presente contributo propone una procedura innovativa per la stima del volume di massa legnosa di soprassuoli forestali mediante elaborazione di dati LiDAR in ambiente GIS, in particolare per i popolamenti a prevalenza di latifoglie dove i convenzionali metodi di stima basati sulle misurazioni LiDAR dell'altezza dei singoli fusti arborei conducono in genere a risultati relativamente insoddisfacenti.

Abstract

The aerial scanning by LiDAR (*Light Detection and Ranging*) is increasingly being proposed for the survey of forest attributes. In addition, this tool has proven to be suitable also for the estimation of complex variables like the growing stock and the biomass of forest stands. This contribution proposes an innovative procedure for growing stock assessment on the basis of LiDAR data elaboration under GIS environment, distinctively developed for broadleaved stands where conventional growing stock estimation methods based on LiDAR measurements of single tree heights frequently provide poor results.

Introduzione

La tecnica di scansione aerea con strumentazione LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è sempre più presa in considerazione ai fini di analisi e monitoraggio degli attributi biometrici dei popolamenti forestali. Mediante questa tecnica è infatti possibile ottenere numerose informazioni sulla struttura verticale e orizzontale dei popolamenti: varie ricerche hanno dimostrato le potenzialità applicative del LiDAR per la identificazione della posizione e del numero dei fusti arborei e per la misurazione della loro altezza e della loro chioma (tra gli altri: Nilsson, 1996; Koukoulas et al., 2004, 2005; Tiede et al., 2004, 2005, 2007; Barilotti et al., 2005a). Mediante modelli di regressione, i dati LiDAR possono essere utilizzati anche per la stima di attributi quali area basimetrica, LAI (*Leaf Area Index*), volume della massa legnosa (provvigione legnosa), biomassa legnosa (Nilsson, 1996; Lesfsky et al., 1999; Means et al., 1999; Næsset, 1997; Dubayah

e Drake, 2000; Holmgren et al., 2003; Lim et al., 2003; Parker e Evans, 2004; Barilotti et al., 2005b; Wallerman e Holmgren, 2007).

Dalla letteratura emerge peraltro una significativa incertezza nella stima dei suddetti attributi, in particolare nella stima della provvigione legnosa, e soprattutto nel caso di popolamenti forestali a prevalenza di latifoglie. Ciò è imputabile a vari aspetti che influenzano la risposta al segnale del sensore, tra i quali principalmente, con riferimento ai convenzionali metodi di stima della provvigione basati su misurazioni LiDAR, la conformazione delle chiome (forma per lo più irregolare, forti variazioni di densità, ecc.) e, soprattutto, alla loro organizzazione spaziale: nei popolamenti di latifoglie infatti le chiome tendono a compenetrarsi in maniera in genere molto più marcata che in quelli di conifere, formando una serie di piani sovrapposti che originano una superficie complessa, rispetto alla quale l'identificazione dei singoli individui arborei sulla base dei dati restituiti dai sensori *laser* risulta spesso difficile (tra gli altri: Lefsky et al., 2002; Barilotti et al., 2005b; Koukoulas et al., 2005).

In tal senso, il presente contributo propone una procedura di stima LiDAR della provvigione legnosa alternativa a quelle basate sulla identificazione e misurazione dei singoli individui arborei.

Background dendrometrico

La procedura proposta parte dalla considerazione che il volume V della massa legnosa di un soprassuolo forestale composto da N fusti arborei è pari a:

$$V = \sum_{j=1}^N v_j \quad [1]$$

dove il volume unitario v di un fusto arboreo è tale che $v \propto D^2 * H$, indicando con D il diametro a petto d'uomo del fusto arboreo e con H l'altezza dendrometrica, cioè quella totale dall'estrema vetta delle piante al livello del suolo.

Tenuto conto che $H \propto D^{0,8}$ (Curtis, 1970), si ha che $D \propto H^{1,25}$ e quindi $v \propto H^{3,5}$. In base a ciò, la relazione [1] può essere trasformata in:

$$V \propto \sum_j^N H_j^{3,5}$$

Nelle applicazioni LiDAR in cui sia difficile, o poco accurata, l'individuazione di H dei singoli fusti arborei, come in genere avviene nel caso di soprassuoli a prevalenza di latifoglie, una efficace variabile *proxy* di $\sum_{j=1}^N H_j^{3,5}$ è rappresentata da $\sum_{i=1}^{Npix} Hpix_i^{3,5}$, dove $Hpix_i$ è l'altezza della copertura arborea, alla volta superiore della chioma, misurata sull' i -esimo pixel e $Npix$ è il numero totale di pixel dell'area boschiva sottoposta a scansione. Quindi:

$$V \propto \sum_i^{Npix} Hpix_i^{3,5} \quad [2]$$

Nel presente lavoro l'andamento della relazione [2] viene verificato con riferimento a uno specifico caso di studio.

Caso di studio

L'area oggetto di studio è rappresentata dal Sito Natura 2000 denominato "Bosco della Fontana" (codice pSIC IT 20B0011, Nord Italia, Lombardia, Mantova Marmirolo, 236.111 ha, UTM 32T 636632 5006732, 25 m s.l.m.). Bosco Fontana è una "foresta antica" e rappresenta uno degli ultimi e meglio conservati relitti di bosco planiziario esistenti nella pianura padana - veneta (Mason, 1998). Del Favero (2002) considera questa formazione la "variante orientale" del Quercus - carpino della bassa pianura e la ritiene affine alle foreste dell'area orientale della Pianura Padana. Il mosaico forestale è attualmente in una fase biostatica di pre-equilibrio caratterizzata da due "stufen" (Oldeman, 1990) in cui si riconosce ancora oggi, a più di 60 anni dall'abbandono del trattamento, l'impronta strutturale del ceduo composto. Lo "stufen" dominante è infatti edificato prevalentemente da Farnia (*Quercus robur* L.) e Cerro (*Q. cerris* L.) con altezze intorno ai 30 m, mentre quello dominato è formato da Carpino bianco (*Carpinus betulus* L.) con altezze intorno ai

20 m (Mason 2002). Lo *stufè* arbustivo è dominato dal nocciolo (*Corylus avellana* L.) e l'erbaceo prevalentemente a punigitopo (*Ruscus aculeatus* L.).

Rilievi a terra

Nei soprassuoli forestali del sito sono state realizzate 31 aree di saggio circolari di raggio pari a 10 m, con una campagna di rilievi svolta nel 2007. Il centro di ogni area è stato georeferenziato mediante GPS a precisione submetrica e picchettato in modo tale da renderlo permanente. Di tutti i fusti arborei con $D \geq 10$ cm, distinti per specie, sono stati misurati sia D che H . Sulla base di questi dati e di tavole di cubatura a doppia entrata locali è stata determinata la provvigione legnosa (V) di ciascuna area di saggio.

Rilievi LiDAR

I dati LiDAR sono stati acquisiti tramite scansione effettuata con sensore Optech ALTM 3100. Per ogni impulso emesso dallo strumento si dispone delle coordinate x , y , la quota del target (z) e l'intensità di riflessione degli echi di ritorno, corrispondenti al *first* e *last pulse*. Il dato ottenuto corrisponde a una nebulosa di punti georeferenziati, che deriva dalla riflessione dell'impulso sulle superfici presenti nell'area oggetto della scansione.

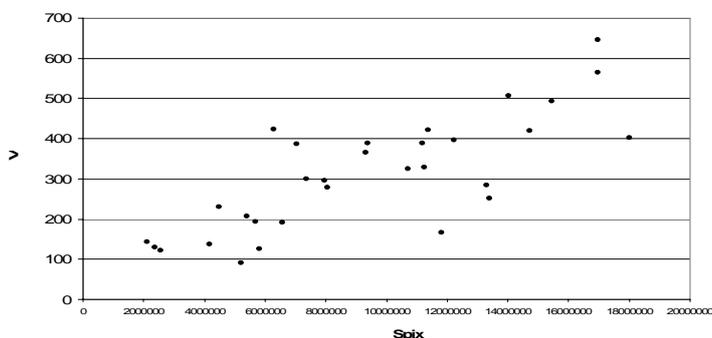
Elaborazioni

I dati LiDAR sono stati elaborati in ambiente Terrascan (Terrasolid, 2005) in modo da separare i punti laser della nebulosa appartenenti al terreno da quelli afferenti alla copertura arborea. La prima fase di processamento riguarda l'individuazione, e successiva eliminazione, dei punti *outlier* che corrispondono, data la loro posizione nello spazio, a errori del sensore. La successiva classificazione dei punti corrispondenti al livello del suolo è stata eseguita in modalità automatica. Per la classificazione dei punti appartenenti alla copertura arborea sono stati utilizzati i punti del primo eco di ritorno (*first pulse*). I dati di quota del terreno e della copertura arborea corrispondono rispettivamente al *Digital Terrain Model* (DTM) e al *Digital Surface Model* (DSM).

In ambiente GIS è stato quindi generato un modello digitale in formato TIN (*Triangulated Irregular Model Network*) sia del DTM che del DSM. Entrambi i modelli sono stati convertiti in formato raster con risoluzione spaziale di 1x1 m. Il risultato della sottrazione algebrica tra DSM e DTM corrisponde al *Digital Crown Model* (DCM), che esprime per ciascun i -esimo pixel l'altezza H_{pix_i} della copertura arborea rispetto al terreno. Il DCM ottenuto è stato successivamente elaborato elevando le altezze rilevate sui singoli pixel a una potenza pari a 3,5. Dal nuovo strato informativo sono stati estrapolati i valori corrispondenti ai pixel inclusi in ciascuna area di saggio e per ciascuna m -esima area di saggio è stata eseguita la sommatoria: $Spix_m = \sum_{i=1}^{N_{pix_m}} H_{pix_{i,m}}^{3,5}$, dove N_{pix_m} è il numero di pixel inclusi nella m -esima area di saggio.

Relazione V-Spix

In Figura 1 è riportato l'andamento di V in funzione di $Spix$ nelle 31 aree di saggio esaminate. L'andamento è strettamente lineare, passante per l'origine e tendenzialmente caratterizzato da eteroscedasticità con le due variabili che risultano caratterizzate da un coefficiente di correlazione pari a 0,78. A livello generale, si può dunque supporre che la relazione [2] sia espressa da una equazione stocastica del tipo:



$$V = K * Spix + e \quad [3]$$

con valore medio atteso del termine di errore (e) pari a 0.

Figura 1 – provvigione legnosa (V , in $m^3 ha^{-1}$) delle aree di saggio in funzione della sommatoria delle altezze (elevata a

3,5) della copertura arborea, misurate sui pixel inclusi in ciascuna area di saggio ($Spix$).

Valutazione della capacità predittiva dell'equazione [3]

L'insieme di aree di saggio è relativamente poco numeroso per poter effettuare una suddivisione al fine di operare una validazione completamente indipendente. Quindi, per valutare la capacità predittiva di V da parte di $Spix$ mediante la [3], si è proceduto con la tecnica *bootstrap resampling*, ripetendo per 1000 volte la seguente sequenza di operazioni:

- selezione casuale di 20 aree di saggio;
- determinazione del valore della variabile K della equazione [3]:
$$K = \frac{\sum_{m=1}^{20} V_m}{\sum_{m=1}^{20} Spix_m}$$
, dove V_m è il volume della massa legnosa misurato a terra nella m -esima area di saggio e $Spix_m$ la sommatoria dell'altezza (elevata a 3,5) della copertura arborea misurata su ciascun pixel incluso nella m -esima area di saggio;
- inserimento del valore K così ottenuto nella equazione [3] e stima della provvigione legnosa di ciascuna delle restanti 11 aree di saggio, sulla base del valore $Spix$ misurato per ciascuna di esse;
- determinazione del coefficiente di correlazione (r) e dell'errore quadratico medio ($RMSE$) sulla base dei valori di V misurati e stimati in queste 11 aree di saggio.

Le distribuzioni di r e di $RMSE$ così ottenute sono riportate in Figura 2. I valori medi di questi due indicatori, rispettivamente pari a 0,8 e a $3 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (circa 1% rispetto al valore medio di V misurato), permettono di valutare positivamente la potenzialità predittive della equazione [3].

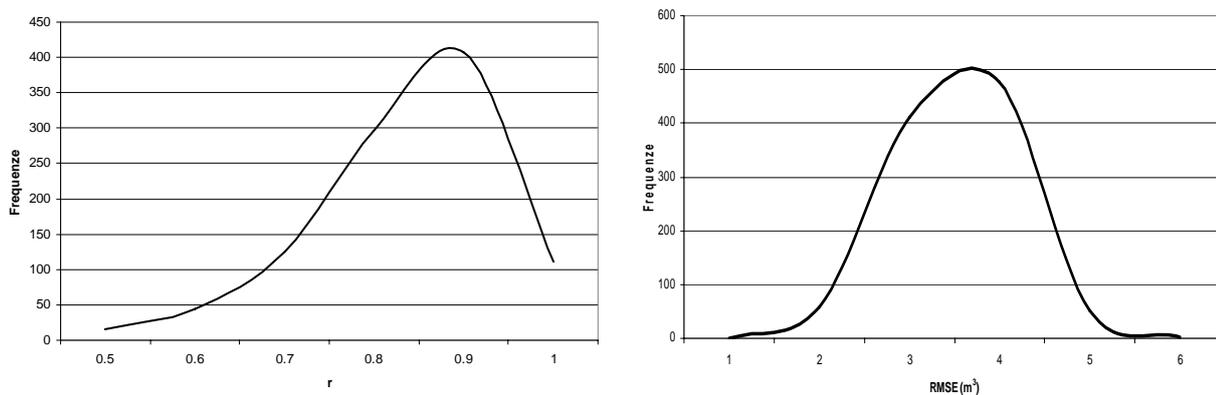


Figura 2 – Distribuzioni bootstrap di r (a sinistra) e $RMSE$ (a destra) riferite al confronto tra i valori di V misurati e i valori stimati mediante l'equazione [3].

Proposta di procedura campionaria di cubatura

Sulla base di quanto descritto nel *background* dendrometrico e di quanto verificato nel caso di studio, ai fini della cubatura della provvigione legnosa di un dato popolamento forestale è direttamente consequenziale fare riferimento a una modalità di campionamento monofase per rapporto (Corona, 2000):

- 1) viene determinata l'altezza $Hpix_i$ della copertura arborea (tramite DCM) su ciascuno degli $Npix$ pixel inclusi nel popolamento forestale e viene calcolata la sommatoria
$$Spix_T = \sum_{i=1}^{Npix} Hpix_i^{3,5};$$
- 2) viene selezionato un adeguato campione di aree di saggio (con numerosità M non inferiore a 15-20);
- 3) viene determinata a terra con accuratezza la provvigione legnosa V_m (in m^3) di ciascuna m -esima area di saggio;

4) viene calcolata la sommatoria $Spix_m$ dell'altezza $Hpix_{i,m}$ (elevata a 3,5) di ciascun i-esimo pixel incluso in ciascuna m-esima area di saggio;

5) viene determinato $K = \frac{\sum_{m=1}^M V_m}{\sum_{m=1}^M Spix_m} = \frac{\bar{V}}{\bar{Spix}}$.

La provvigione legnosa del popolamento può quindi essere stimata pari a

$$\hat{V}_T = K * Spix_T$$

L'errore standard di \hat{V}_T può essere stimato pari a

$$\hat{s}_{\hat{V}_T} = \hat{s}_{\hat{K}} * Spix_T$$

con

$$\hat{s}_{\hat{K}}^2 = \frac{\frac{A}{a} - M}{\frac{A}{a}} * \frac{s_V^2 - 2 * \hat{K} * s_{SpixV} + \hat{K}^2 * s_{Spix}^2}{M * \bar{Spix}^2}$$

dove: s_{Spix}^2 = varianza campionaria di $Spix$ determinata sulle aree di saggio; s_V^2 = varianza campionaria di V determinata sulle aree di saggio; s_{SpixV} = covarianza campionaria di $Spix$ e V determinata sulle aree di saggio; a = ampiezza unitaria delle aree di saggio; A = superficie del popolamento forestale (nota con esattezza ed espressa nella stessa unità di misura di a).

L'intervallo fiduciario della stima della provvigione legnosa del popolamento è pari a $\hat{V}_T \pm t * \hat{s}_{\hat{V}_T}$ dove: t = valore critico del t di Student, in corrispondenza degli $M-1$ gradi di libertà della stima e in corrispondenza del livello di sicurezza statistica prescelto.

Considerazioni conclusive

La sperimentazione condotta ha messo in evidenza come la procedura proposta per la cubatura della provvigione legnosa di boschi a prevalenza di latifoglie tramite rilievi LiDAR possa condurre in modo agevole a stime sufficientemente affidabili, almeno in condizioni simili a quelle del caso esaminato. Di fatto, nelle condizioni analizzate, complesse per la vegetazione forestale ma facilitate dalla giacitura pianeggiante, la variabile $Hpix$ è risultata di semplice e accurata determinazione per tutta l'area boschiva. La procedura è dunque direttamente estendibile alla stima della biomassa legnosa (indicatore vicino alla biomassa totale epigea, importante per valutazioni ecologico-funzionali e conservative), attributo dendrometrico strettamente correlato alla provvigione legnosa. L'aspetto più critico della procedura proposta è probabilmente la necessità di una rigorosa e molto accurata georeferenziazione sia dei dati LiDAR che delle aree di saggio. Alla luce dei risultati ottenuti, si ritiene dunque che la sperimentazione della procedura meriti di essere allargata a un campione esaustivo delle condizioni vegetazionali, strutturali e colturali che caratterizzano i soprassuoli a prevalenza di latifoglie nel nostro Paese, in differenti condizioni morfologiche.

Bibliografia

- Barilotti A., Sepic F., (2006), "Delineazione automatica delle chiome in diverse tipologie forestali attraverso analisi di dati LiDAR", *Atti 10a Conferenza nazionale ASITA*, Bolzano.
- Barilotti A., Turco S., Alberti G., (2006), "LAI determination in forestry ecosystem by LiDAR data analysis", *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna.
- Barilotti A., Turco S., Ciampalini R. (2005)a, "Misurazione automatica di singoli alberi attraverso analisi morfologiche su dati laser scanning", *Atti 9a Conferenza nazionale ASITA*, Catania.
- Barilotti A., Turco S. Napoletano R., Bressan E., (2005)b, "La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali", *Atti XV Congresso della Società Italiana di Ecologia*, Torino.

- Corona P., (2000), *Introduzione al rilevamento campionario delle risorse forestali*. Editrice CUSL, Firenze.
- Curtis R.O., (1970), "Stand density measures: an interpretation", *Forest Science*, 16: 403-414.
- Del Favero R. (2002), *I tipi forestali della Lombardia. Inquadramento ecologico per la gestione dei boschi lombardi*. Cierre Edizioni, pp. 512.
- Dubayah R.O., Drake J.B., (2000), "LiDAR remote sensing for forestry", *Journal of Forestry*, 98: 44-46.
- Holmgren J., Nilsson M., & Olsson H. (2003), "Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning", *Forest Science*, 49, 419-428.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D.J. (2002), "LiDAR Remote Sensing for Ecosystem studies", *Bioscience*, 52 (1): 19-30.
- Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B., Flood M., (2003), "LiDAR remote sensing of forest structure", *Progress in Physical Geography*, 27(1): 88-106.
- Koukoulas S., Blackburn G.A., (2005), "Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne LiDAR and multi-spectral remotely sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, 26 (3): 431-455.
- Koukoulas S., Blackburn G.A., (2004), "Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS", *International Journal of Remote Sensing*, 25 (15): 3049-3071.
- Mason F., (2002), *Dinamica di una foresta della Pianura Padana. Bosco della Fontana. Primo contributo, monitoraggio 1995*. Rapporti scientifici 1. Centro Nazionale Biodiversità Forestale Verona-Bosco della Fontana, Arcari Editore, Mantova, 208 pp.
- Mason F., (1998), "Some aspect of habitat conservation management and their implication for the public access: the case of Bosco della Fontana Natural Reserve (Mantova Province, Northern Italy)", pp. 179-185. In: M Krott e K. Nilson (eds.). *Urban Forestry Multiple-use of Town Forests in International Comparison*. Forum on Urban Forestry, Wuppertal.
- Means J.A., Acker S.A., Harding D.J., Blair J.B., Lefsky M.A., Cohen W.B., Harmon M.E., McKee W.A. (1999), "Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon", *Remote Sensing of Environment*, 67, 298-308.
- Næsset E. (1997), "Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data", *Remote Sensing of Environment*, 61, 246-253.
- Nilsson M. (1996), "Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system", *Remote Sensing of Environment*, 56, 1-7.
- Oldeman, R.A.A. (1990), *Forests: Elements of Silvology*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 624 pp.
- Parker R.C., Evans D.L. (2004), "An application of LiDAR in a doublesample forest inventory", *Western Journal of Applied Forestry*, 19, 95-101.
- Tiede D., Lang S., Maier B., (2007), "Transferability of a Tree-Crown Delineation Approach Using Region-specific Segmentation", *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE: 1883-1890.
- Tiede D., Hochleitner G., Bòaschke T., (2005), "A full GIS-based work for tree crown delineation using laser scanning", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI, Part 3/W24, Vienna: 9-14.
- Tiede, D., M. Heurich and T. Blaschke (2004), "Object-based semi automatic mapping of forest stands with Laser scanner and Multi-spectral data", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI-8W2, Freiburg: 328-333.
- Turco S., Barilotti A., Beinat A., Bonfanti P.L. (2005), "Stima di variabili ecologiche da dati laser scanning in diverse tipologie forestali", *Atti V Congresso Nazionale SISEF "Foreste e Società: cambiamenti, conflitti, sinergie"*, Torino.
- Wallerman J.P., Holmgren J. (2007), "Data capture for forest management planning using sample plot imputation based on spatial statistics, laser scanner, and satellite image data", *Remote Sensing of Environment*, doi: 10.1016/j.rse.2007.02.028.