

Un nuovo approccio alla stima dell'inventario forestale

F. Prandi ^(a), F. Devigili ^(a), D. Magliocchetti ^(a), M. Andreolli ^(a)

^(a) Fondazione GraphiTech via alla cascata 56/c 38123 Trento Italy (federico.prandi,
daniele.magliocchetti, michele.andreolli, federico.devigili)@graphitech.it

Abstract

La produzione di legname rappresenta un'importante risorsa economica per le aree montuose essendo per molte regioni montane la principale fonte di reddito. Tuttavia la catena di gestione in questi contesti differisce significativamente dagli schemi tradizionali per via dei limiti imposti dalla morfologia del terreno sia per quanto riguarda l'aspetto operativo logistico che per i macchinari necessari. Infatti, i problemi logistici legati al territorio montuoso richiedono un alto livello di dettaglio nella pianificazione del lavoro per raggiungere il livello di produttività presente nelle zone pianeggianti. In particolare è necessaria una dettagliata mappatura delle risorse forestali per migliorare la sostenibilità a lungo termine e raggiungere un'alta efficienza di raccolta. Queste informazioni sono solitamente relegate all'interno di mappe storiche e, solo in pochi casi, sono basate su tecniche di rilevamento remoto e immagini satellitari. Questo non è sufficiente per sfruttare al meglio le risorse che le zone boschive montane offrono dove il valore della foresta è dettato dalle caratteristiche dei singoli alberi.

La motivazione

Le foreste rappresentano un'importante risorsa economica per le aree montane: per molte comunità di montagna sono la forma principale di reddito. Negli ultimi decenni la produzione del legno in Europa, Russia e Sud America è cresciuta sensibilmente, mettendo in evidenza una tendenza confermata almeno fino al 2030 (FAO, 2010). Tuttavia, la gestione del taglio del legno in questi contesti si differenzia dagli schemi tradizionali a causa dei limiti imposti dalla morfologia del terreno, sia per gli aspetti progettuali che operativi. La complessità del taglio, dell'estrazione e la necessità di *hardware* specifico, aumentano i costi e riducono la competitività sul mercato del legno proveniente da aree montane. Una pianificazione più accurata degli interventi di taglio nelle foreste montane potrebbe essere cruciale per raggiungere il livello di produttività dei boschi pianeggianti. I "Forest Information Systems" (FIS) sono strumenti che raggruppano e forniscono l'insieme di informazioni necessarie alla gestione e alla pianificazione dei lavori nei boschi. La crescente quantità di dati a disposizione e il potenziale della tecnologia informatica moderna può essere utilizzata per ottimizzare le operazioni di raccolta del legname. Attraverso questi sistemi è possibile raggiungere alti livelli di efficienza sia in boschi montani che in foreste pianeggianti.

Il lavoro presentato in questo documento si basa sui risultati del progetto SLOPE (*Integrated processing and control systems for sustainable forest production in mountain areas*) finalizzato a sviluppare un "Forest Information System" (FIS) per l'ottimizzazione delle operazioni di taglio e raccolta del legname in aree montuose. L'obiettivo del progetto è quello di creare strumenti di supporto alla gestione della logistica della raccolta del legname attraverso l'utilizzo di dati geografici satellitari, modelli forestali e modelli previsionali; e mettere a disposizione questi modelli attraverso un globo tridimensionale interattivo che possa visualizzare terreni, foreste e le altre informazioni presenti.

La visualizzazione interattiva è una delle tecnologie che sta facendo enormi progressi nell'ambito della gestione delle foreste. Può essere utilizzata per visualizzare alberi, terreni e intere foreste in

ambienti virtuali. In ambienti montuosi queste tecnologie permettono ai responsabili di capire meglio l'impatto ambientale, l'impatto visivo ed in generale le necessità operazionali e di hardware richieste per l'attività da svolgere.

Stato dell'arte

I recenti sviluppi nel campo degli UAV (Unmanned Aerial Vehicles), in sistemi ottici e algoritmi fotogrammetrici nonché sistemi di scansione laser terrestri hanno permesso di abbassare il costo e la disponibilità dei spaziali; i quali possono essere utilizzati come base per la creazione di sistemi per la gestione delle foreste. Questi dati possono essere utilizzati non solo per generare il modello forestale delle chiome e del terreno, ma anche per generare modelli tridimensionali dei tronchi degli alberi.

Organizzazione del documento

Il documento comprende cinque parti principali. Dopo una prima introduzione, il capitolo 2 descrive una metodologia per la raccolta, l'elaborazione e la visualizzazione dei dati di organizzazione che rappresentano la spina dorsale del sistema sviluppato. Il capitolo 3 si concentra sullo strumento di visualizzazione 3D del sistema di gestione forestale. Infine, il capitolo 4 presenta i risultati di un caso di studio in Trentino con alcune conclusioni nel capitolo 5.

Metodologia

Un migliore accesso alle informazioni territoriali e l'adozione di sistemi informativi digitali nell'ambito della gestione forestale sono state riconosciute come priorità dalla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo nell'ambito dell'Agenda 21, capitolo 40 (UNCED, 1992).

I responsabili delle risorse forestali hanno bisogno di informazioni per la realizzazione di una adeguata base di conoscenze tecniche su cui possono prendere le decisioni per la gestione sostenibile delle foreste in accordo con un uso proficuo delle risorse. Un sistema di informazione forestale (FIS) dovrebbe fornire una serie completa di informazioni e facilitare decisioni più tempestive e puntuali (Dykstra 1997). I sistemi informativi forestali devono fornire tre tipologie di informazioni:

- Informazioni per la pianificazione e l'analisi strategica.
- Informazioni per la pianificazione tattica (medio e breve termine).
- Informazioni per la gestione e il controllo operativo.

Il sistema presentato in questo documento risponde principalmente ai casi 1 e 3. Per soddisfare questi bisogni un dettagliato workflow di gestione dell'informazione è stato definito. Il workflow definisce come misurare, collezionare e analizzare i dati necessari. Le informazioni necessarie vengono così estratte dai dati e da essi vengono derivate le azioni da prendersi. La metodologia generale per progettare il sistema di gestione forestale è composta da 7 componenti principali:

- Definizione dell'area di lavoro.
- Campagna di acquisizione dati per mezzo di UAV.
- Identificazione degli alberi e pianificazione delle misurazioni sul campo.
- Misurazione sul campo con Scanner laser terrestre.
- Processamento dei dati e caricamento sul database.
- Visualizzazione dei dati e interazione utente sul visualizzatore 3D.
- Marcatura degli alberi per taglio selettivo sul campo.

La metodologia si basa su dati geospaziali integrati dentro un sistema interattivo tridimensionale costantemente aggiornato. Il sistema è in grado di fornire informazioni dettagliate del terreno, lo stato di crescita degli alberi, le caratteristiche delle chiome ed altri parametri forestali. Il sistema di pianificazione può inoltre usufruire di modelli matematici di previsione basati in parte sui dati rilevati e in parte sugli input dell'utente.

Raccolta ed elaborazione dei dati 2.1

La caratterizzazione generale della foresta in termini di numero, specie e caratteristiche degli alberi è chiamata inventario forestale (Forest Inventory, FI). Tipicamente i database di inventari forestali sono basati sulle caratteristiche di zona invece che sugli alberi individuali. Nelle foreste alpine un sistema basato sulla caratterizzazione della zona non è sufficiente per la corretta pianificazione delle operazioni forestali (Koch et al., 2006). I sistemi di pianificazione di interventi forestali lavorano solitamente a livello di singolo albero (Lamas e Eriksson, 2003). Il primo passo è dunque quello di raccogliere dati e creare una metodologia che permetta la creazione di un inventario forestale che permetta la descrizione del singolo albero.

I dati richiesti per la generazione del modello forestale includono:

- Il DTM per la rappresentazione del terreno.
- Il DSM e le ortofoto della foresta ottenute dal volo UAV.
- I dati TLS acquisiti sul campo.
- Il database dell'inventario forestale.

Nello studio non è stata presa in considerazione la possibilità di effettuare rilevazioni laser da voli aerei per via degli alti costi di acquisizione dei dati soprattutto per piccole aree. Tuttavia diversi paesi europei hanno effettuato scansioni lidar aree su tutto il territorio nazionale (Bohlin et al. 2012); generando DTM accurati su grandi superfici. Questi DTM possono essere combinati con DSM fotogrammetrici ottenuti da UAV al fine di ricreare modelli delle chiome della foresta ad altissima risoluzione spaziale. L'affidabilità del dato dipende anche dalla possibilità di effettuare i rilevamenti poco prima l'effettivo intervento forestale.

Solitamente le caratteristiche della foresta sono estratte dai modelli di altezza delle chiome attraverso sistemi di regressione che estrapolano le caratteristiche degli alberi. Per migliorare la stima delle caratteristiche metriche e fornire una più accurata stima dell'inventario forestale il sistema combina le altezze delle chiome con un rilevamento laser effettuato dal terreno che stima le caratteristiche dei tronchi degli alberi.

Grazie al rilevamento TLS è possibile creare un modello tridimensionale estremamente preciso dei fusti degli alberi. Una stima accurata delle risorse forestali su grandi aree geografiche è di particolare interesse ai proprietari delle foreste ed alle aziende coinvolte nel taglio. I dati dei fusti di una piccola zona possono essere utilizzati per derivare le caratteristiche di un'intera foresta. Il sistema sviluppato analizza ed identifica i fusti degli alberi a partire da una nuvola di punti creando così un modello 3D di ogni tronco analizzato dal quale possono essere estratte le caratteristiche principali di ogni singolo albero rilevato. I dati estrapolati dal sistema sono tra gli altri:

- Diameter at Breast Height (DBH).
- L'altezza dell'albero.
- Il volume totale.
- La qualità e la rettilineità del fusto.

Questo permette di avere un report preciso del legname che si andrà ad ottenere da un'operazione di esbosco o esbosco anche anni prima dell'effettivo intervento forestale.

Per ottenere il modello tridimensionale dei fusti sono state utilizzate 3 tecniche: CHM, L'algoritmo dei massimi locali, e il "watershed segmentation" (Jakubowski et al. 2013). Per trovare il massimo locale è stata utilizzata una finestra bidimensionale a dimensione variabile sull'immagine delle chiome. La correlazione tra la dimensione e la forma delle chiome e l'altezza dell'albero dipende da specie a specie e dalla condizione generale del territorio. Rispetto alla tecnica EO, l'UAV CHM permette di identificare le chiome più facilmente. Test preliminari hanno evidenziato un matching tra immagini e risultati del 94% (Considerando gli alberi che possono essere identificati nell'immagine). Infine, per ogni albero rilevato per il quale non era presente la ricostruzione 3D da TLS è stato estrapolata la dimensione ed altezza del fusto e la stima del DBH basandosi sui modelli studiati.

Analisi dei dati 2.2

L'approccio innovativo del sistema è basato sulla combinazione dei dati TLS e dei dati rilevati tramite UAV. L'alta correlazione tra l'altezza predetta dal CHM e il volume dell'albero può essere utilizzata per stimare il volume del legno in base all'informazione ottenuta tramite UAV.

I passi più importanti descritti nella metodologia sono:

- **Analisi TLS:** L'analisi sul campo dei fusti tramite laser viene utilizzata per stimare la distribuzione del DBH degli alberi ed il numero di alberi per specie e dimensione.
- **Taratura DHM:** I campioni di fusti ottenuti tramite TLS devono corrispondere agli alberi ottenuti tramite Digital Height Model (DHM). Questo permette di capire il numero di alberi per ogni specie ed ogni diametro.
- **Generalizzazione:** Il numero totale di alberi viene stimato analizzando gli alberi rilevati nel DHM assumendo una distribuzione simile a quella rilevata nel passo precedente. Gli alberi rilevati in rapporto alla zona presa in considerazione determinano il numero e le caratteristiche degli alberi dell'intera foresta.

Per poter analizzare i parametri dendrometrici di ogni albero, ciascuna specie deve poter essere analizzata separatamente. Per ogni specie, avendo diverse forme e caratteristiche e quindi rapporti tra i parametri differenti, va utilizzato un modello di estrapolazione differente. E' quindi necessario rilevare per ogni specie un numero significativo di campioni anche se questo non è sempre facile, specialmente per le specie poco presenti nella zona. Il lavoro aggiuntivo per poter analizzare questo genere di specie non sempre è economicamente vantaggioso. Con l'eccezione di specie di particolare alto valore, quando la presenza nella zona è molto bassa, l'analisi viene fatta in maniera più grossolana e la specie viene associata ad una già presente che possa essere identificata dalle immagini aeree. Combinare le rilevazioni TLS con quelle UAV necessita di avere una georeferenziazione assoluta precisa in entrambi i casi. In particolare sono necessari ricevitori GNSS e buone immagini ortorettificate. In caso contrario è necessario procedere ad una correzione manuale per allineare i due dataset. Tipicamente le cime degli alberi rilevate dalle ortofoto hanno posizione leggermente diversa dal fusto rilevato dal TLS che non arriva fino alla cima dell'albero, tuttavia nella maggior parte dei casi la differenza è stata relativamente bassa. I due dataset sono combinati per inferire le caratteristiche del resto della foresta generando le seguenti proprietà per ogni albero:

- ID Albero
- Posizione Albero
- Parametri dell'Albero
- Profilo dell'Albero 3D

Questi risultati sono poi trasferiti nel database forestale per poter essere utilizzate e visualizzate dal software di gestione.

Visualizzazione Dati

Le quattro tipologie di dati estratti dai rilevamenti sono la base per il sistema di visualizzazione della foresta 3D sviluppato; combinando questi dati è quindi possibile creare una riproduzione 3D multiscala e precisa della foresta. Grazie alla ricostruzione è possibile fornire una piattaforma WEB che permetta di esplorare i dati forestali a partire dal livello regionale fino ad arrivare al modello tridimensionale ed alle caratteristiche del singolo albero. Le informazioni dei singoli alberi possono inoltre essere aggregate per permettere la computazioni di modelli matematici previsionali o economici. Il portale forestale 3D web permette di accedere ad informazioni geografiche, territoriali e forestali grazie alle quali i proprietari ed i gestori delle foreste possono ottimizzare le loro attività. A livello più alto è possibile visualizzare l'intero globo terrestre e le mappe topografiche. Immagini satellitari di diverso tipo possono offrire un'ampia vista sull'area d'interesse e possono essere utilizzate per individuare le parti principali delle foreste non solo dal punto di vista prettamente visivo. Infatti utilizzando altri tipi di immagini come le NDRE che stimano il livello di clorofilla e le CCCI che possono essere utilizzate per stimare la quantità di azoto e clorofilla le immagini possono essere di supporto alla decisione. Il sistema permette inoltre di accedere a banche dati ausiliarie come network stradali, confini, e punti d'interesse. Questi dati sono solitamente disponibili come "open-data" e accessibili gratuitamente. Il sistema integra questi dati ausiliari direttamente sul visualizzatore tridimensionale come dimostrato dalle seguenti immagini.

Ad una scala inferiore, pensata per valutare il valore delle parcelle forestali, ottimizzare il processo di taglio e trasporto del legname e preservare l'equilibrio selvicolturale è possibile andare ad accedere a elementi più specifici dello stand. Per esempio è possibile andare ad accedere alle immagini ad alta risoluzione catturate dal sorvolo UAV oppure alla visualizzazione della nuvola di punti generata dalle stesse attraverso l'utilizzo di tecniche di fotogrammetria allo stato dell'arte che permettono di raggiungere livelli di precisione nell'ordine dei centimetri.

Utilizzando gli algoritmi "Structure from Motion" utilizzati negli ambiti di computer-vision è possibile generare una nuvola di punti 3D attraverso l'applicazione di image-matching su un grande numero di immagini (Baltsavias, 2008), che applicati all'ambito della foresta possono produrre accurati modelli tridimensionali dei tronchi.

Il DSM generato dal volo UAV può raggiungere una risoluzione di 20cm, la quale permette di sfruttarlo per l'analisi delle chiome. I DTM/DSM sono esposti attraverso servizi TMS e WMS (Tile Map Service, Web Mapping Service) che sono standard interoperabili con molti software di visualizzazione di mappe. Un aspetto importante del globo virtuale è che permette la visualizzazione e la gestione contemporanea di vari dataset terrestri a differente risoluzione e su differenti zone. Nelle immagini si può vedere un terreno ad alta risoluzione utilizzato per la zona d'interesse sovrapposto ad un terreno a bassa risoluzione utilizzato per le zone esterne. La stessa feature è utilizzata per le ortofoto che possono essere sovrapposte attraverso la trasparenza ed a livelli di risoluzione differenti.

Un modello forestale estremamente accurato non necessariamente è la scelta migliore per ogni tipo di pianificazione. Per questo il sistema permette di accedere ai dati del database forestale attraverso livelli di precisione differenti. Si può accedere ad una mappa delle chiome colorata in base alla specie dell'albero dove ogni chioma è definita da un poligono. Ad un modello 3D di albero semplificato che ne mostra grossolanamente altezza, diametro alla base e specie, dati inferiti in base alle equazioni forestali utilizzate per inferire questi dati. Ed a un modello 3D avanzato che mostra la vera e propria forma del fusto dell'albero basato sull'analisi dei dati ottenuti tramite TLS.

L'analisi dei dati TLS permette di generare un modello del fusto dell'albero formato da molteplici dischi di 5 cm che possono riprodurre le caratteristiche morfologiche del tronco e permette un'esplorazione visuale accurata dello stesso. Il più semplice modello basato su coni permette

invece una più veloce analisi del valore economico dell'albero ed è funzionale alle feature che andremo a descrivere nella prossima sezione.

Sistema di supporto alla decisione

Il sistema di supporto decisionale, sviluppato nell'ambito del progetto europeo SLOPE e basato sulla tecnologia GeoBrowser3D (Prandi, 2015), è basato sulle tecniche di creazione e visualizzazione dei database forestali descritte nel capitolo 2. Il sistema di supporto in particolare ha gli obiettivi di generare l'inventario forestale e il pianificatore di taglio.

Inventario forestale

L'inventario forestale è basato su un database relazionale MySQL con il supporto alle estensioni spaziali che permettono di gestire informazioni georiferite. Grazie a questo dati come punti, linee e poligoni sono salvati nel database in maniera efficiente e sono disponibili funzioni spaziali per fare query su determinate aree o per esempio calcolare aree e distanze in sui geoidi. L'inventario forestale è accessibile dall'esterno attraverso un interfaccia REST sicura. L'inventario forestale è suddiviso in 4 parti:

- La gestione dell'utente.
- La gestione dei lotti terrieri.
- La gestione della logistica e dello stoccaggio.
- La gestione dell'albero e del prodotto.

La sezione che gestisce l'utente ha il compito di assegnare ad ogni operazione ed ogni dato un livello di sicurezza e quindi di definire chi può fare cosa attraverso un sistema di autenticazione. La sezione di gestione immobiliare include tutte le informazioni relative all'origine degli alberi e dei prodotti, memorizzando dati riguardanti origine, zona, piano di gestione, operazione e tipo di operazione. La sezione di gestione dello stoccaggio e della logistica include i dati che permettono di tracciare il singolo tronco attraverso tutto il processo di produzione e vendita. Infine la sezione di gestione degli alberi include le informazioni riguardanti gli alberi da tagliare e tagliati, inclusi i dati raccolti durante il taglio dei tronchi collezionati con l'ausilio degli RFID tag sperimentali descritti in seguito.

I parametri raccolti durante la fase di inventario includono la posizione, il volume, la qualità, il DBH, l'altezza, la conicità e la ramosità del tronco e sono arricchiti durante la fase di taglio con la tipologia del prodotto finale, la lunghezza il diametro minimo e massimo, il volume e la qualità del singolo tronco tagliato che sono parametri determinati attraverso una serie di test automatici che sono svolti durante le fasi di processamento del tronco. IN questo contesto, l'adozione di un sistema di visualizzazione 3D ha permesso di semplificare l'accesso alle informazioni e migliorare l'interattività con il sistema.

Dal portale è possibile selezionare una delle zone di interesse ed accedere alle informazioni relative. Una volta selezionata l'area è possibile procedere alla visualizzazione tridimensionale degli alberi relativi. Le modalità di visualizzazione degli alberi sono 3 e permettono di accedere a:

- Un modello digitale della foresta che include i modelli tridimensionali più accurati (TLS) insieme a quelli estrapolati, per la massima fedeltà visuale.
- Un modello che visualizza gli alberi in maniera semplificata utilizzando colori diversi in base allo stato dell'albero (tagliato, da tagliare, da non tagliare, etc.). Da questa visualizzazione è inoltre possibile modificare lo stato dell'albero.
- Un modello digitale che mostra, per gli alberi ad alta risoluzione, i prodotti finali ottenibili da quel tronco in base ai parametri ed alla forma del singolo albero.

Tutti i sistemi di visualizzazione permettono di selezionare un albero ed accedere ai dati associati ad esso presenti nell'inventario forestale. La stessa interfaccia permette di modificare lo stato della marcatura virtuale del singolo albero se necessario. Questa funzionalità è particolarmente utile per il pianificatore che può valutare prima di recarsi sul posto quali alberi marcare realmente per il taglio e quindi esportare la relativa lista. In questo contesto sono molto utili le query spaziali che permettono di disegnare un poligono sul terreno tridimensionale ed ottenere un report riguardante le specie e le caratteristiche degli alberi in quella zona come numero di alberi per specie, volume, diametro, altezza. Tra gli altri i seguenti dati sono calcolabili: area disponibile, area produttiva, volume totale di taglio.

Conclusioni

L'uso di immagini UAV e osservazioni terrestri ad alta risoluzione possono migliorare significativamente la qualità di un inventario forestale. Anche se il rilevamento degli alberi si è concluso con successo sia per le immagini UAV che con le EO la maggior risoluzione spaziale dell'UAV migliora significativamente l'accuratezza delle rilevazioni. L'utilizzo della fotogrammetria basata sulle immagini UAV ha permesso di stabilire una buona relazione tra altezza delle chiome, specie e caratteristiche dell'albero rilevato. Tuttavia esistono ancora numerose limitazioni per quanto riguarda la stima dei parametri dendrometrici degli alberi causati sia dai limiti tecnici delle tecnologie che dalle condizioni della foresta. Riguardo i limiti tecnologici, la limitazione nella risoluzione spaziale nelle immagini, ha un effetto negativo sull'accuratezza dell'identificazione delle chiome degli alberi. L'utilizzo di immagini UAV con risoluzione di 0.1m ha portato a risultati con precisione del 98% (98% degli alberi sono stati rilevati) rispetto alla procedura manuale. Riguardo le condizioni della foresta, l'utilizzo delle immagini non ha mostrato un alto grado di correlazione tra dimensioni della chioma e volume dell'albero. L'utilizzo dell'informazione di altezza ottenuta dall'analisi stereo dell'UAV è risultata decisiva per ottenere un accurato modello forestale e delineare una corretta relazione tra altezza, chioma e volume dell'albero. L'utilizzo di sistemi di rilevamento remoti per la creazione di inventari forestali dovrebbe sempre essere complementare all'utilizzo di rilevazioni *on-the-field* per ottenere campioni di riferimento. Le ragioni per l'integrazione di dati telerilevati in inventari forestali sono molteplici e comprendono, tra gli altri:

- La possibilità di avere dati aggiornati ed in poco tempo.
- Riduzione dei costi dei rilevamenti, in particolare per l'individuazione di aree produttive.
- Vantaggi nella gestione e nel monitoraggio, attraverso l'utilizzo di criteri spaziali per conoscere la distribuzione delle caratteristiche forestali nell'area.

Riconoscimenti

The work presented in this paper has received funding from the European Commission through the 7th Framework Programme under the Grant Agreement n. 604129 (project "SLOPE – Integrated processing and Control Systems for Sustainable Production in Farms and Forests"). The authors are solely responsible for this work which does not represent the opinion of the EC. The EC is not responsible for any use that might be made of information contained in this paper.

E' con grande tristezza che Graphitech annuncia la morte del nostro collega e amico Federico Prandi. Federico era un membro importante e stimato del nostro gruppo e di questa comunità. Chiunque abbia avuto il piacere di lavorare con lui, lo ricorderà per la sua allegria, la dedizione al lavoro e la disponibilità verso tutti. Noi lo ricordiamo come lui avrebbe voluto, con un sorriso. Ciao Federico.

References

- Baltsavias, E., Gruen, A., Eisenbeiss, H., Zhang, L., Waser, L.T., 2008. High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. *Int. J. Remote Sensing*, 29, pp. 1243–1259.
- Bohlin, J., Wallerman, J., Fransson, J.E.S., 2012. Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scand. J. For. Res.* 27, pp. 692–699.
- Craglia, M., et al., 2012. *Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade International Journal of Digital Earth.*
- Dykstra, D.P., 1997. *Information systems in forestry, Unasylva*, 189, pp. 10-15.
- Europe's ecological backbone: recognizing the true value of our mountains. *EEA Report No 6/2010.*
- GeoBrowser3D interactive WebGL Virtual globe. www.geobrowser3d.com.
- Global Forest resource assessment. FAO: Food and Agriculture Organization of the United States report. 2010. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>
- Jakubowski, M., Li, W., Guo, Q., Kelly, M., 2013. Delineating Individual Trees from Lidar Data: A Comparison of Vector- and Raster-based Segmentation Approaches. *Remote Sensing*. 2013.
- Koch, B., Heyder, U., Weinacker, H., 2006. Detection of individual tree crowns in airborne LiDAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, pp. 357-63.
- Lämås, T., Eriksson, L.O., 2003. Analysis and planning systems for multiresource, sustainable forestry: The Heureka research programme at SLU. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, pp. 500-08.
- Magliocchetti, D., Prandi, F., Panizzoni, G., Lotto, D., De Amicis, R., 2015. "SLOPE: A 3D forest virtual system to support harvesting operation in mountain areas". *FORMEC 2015*. Linz, Austria.
- Prandi, F., Panizzoni, G., Magliocchetti, D., Devigili, F., De Amicis, R., 2015. "WebGL virtual globe for efficient forest production planning in mountainous area". *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*, pp. 143-151. ACM, New York, NY, USA, 2015.
- UNCED United Nations Conference on Environment and Development, 1992, Agenda 21, United Nations, New York, NY.