

VPLYV PRIESTOROVÉHO ROZLIŠENIA NA IDENTIFIKÁCIU POZÍCIE STROMOV Z LIDAROVÝCH DÁT

Róbert SMREČEK¹, Ivan SAČKOV², Ján TUČEK³

^{1,3} Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika
robert.smrecek@tuzvo.sk; jan.tucek@tuzvo.sk

² Národné lesnícke centrum, Lesnícky výskumný ústav Zvolen, Odbor lesníckej politiky, ekonomiky a manažmentu lesa, T. G. Masaryka 22, 960 92, Zvolen, Slovenská republika
sackov@nlcsk.org

Abstrakt

Dáta z LiDARu poskytujú informácie o lesnom prostredí, z ktorých je možné odvodiť pozíciu stromu, veľkosť koruny a následne ostatné parametre stromu. Na deviatich plochách s rôznym drevinovým zložením boli identifikované pozície stromov. Na identifikáciu pozície stromov bola použitá rastrová vrstva reprezentujúca korunový povrch, odvodená z LiDARových dát. Bolo odvodených päť korunových povrchov s priestorovým rozlíšením od 0,5 do 2,5 m, s krokom 0,5 m. V prípade rozlíšenia 0,5 m dochádzalo k vysokému nadhodnocovaniu počtu stromov. Naopak, pri rozlíšení 2,5m dochádzalo k podhodnocovaniu počtu stromov v dôsledku generalizácie. Ako najvhodnejšie sa ukázalo priestorové rozlíšenie 1 a 1,5 m.

Abstract

From LiDAR data is possible to obtain information about forest environment, to identify tree position, delineate tree crowns and derive other three parameters. Tree position was identified on nine research plots with different species composition. Raster layer representing crown surface was used for identification of tree position, this layer was derived from LiDAR data. Five crown surfaces with spatial resolution from 0.5 to 2.5 m (with 0.5 m step) were derived. By spatial resolution of 0.5m was big overestimation of tree numbers. On other hand, by spatial resolution of 2.5 m was underestimation due generalization of crown surface. The best results were by spatial resolution 1 and 1.5 m.

Kľúčové slová: LiDAR; lesníctvo; identifikácia stromov.

Keywords: LiDAR; forestry; tree identification.

ÚVOD

Techniky diaľkového prieskumu Zeme (DPZ) umožňujú získať podrobné informácie o povrchu Zeme a objektoch na jej povrchu. Na získanie informácií o lesnom prostredí sa okrem leteckých a satelitných snímok využívajú aj LiDARové dáta, ktoré na rozdiel od snímok získavajú trojrozmernú informáciu. LiDAR je aktívny systém DPZ, pomocou ktorého je možné behom krátkej chvíle zozbierať priestorové informácie z veľkej plochy (Carter et. al. 2012; Harvey 2008). Technológia našla svoje uplatnenie aj v lesníctve a v súčasnosti sa jedná o akceptovaný nástroj pre mnohé lesnícke aplikácie (Mass 2013, Hyypä et al. 2009). V práci Hyypä et al. (2009) je popísaná história využívania LiDARu v lesníctve.

Jednou z najdôležitejších informácií získavaných z LiDARových dát pre potreby inventarizácie lesa je pozícia a počet stromov v poraste/na ploche (Stereńczak 2013). Vo vedeckých prácach je popísaných množstvo algoritmov na určenie pozície a počtu stromov (Hyypä et al. 2001, Pitkänen et al. 2004, Solberg et al. 2006, Kaartinen & Hyypä 2008, Stereńczak & Miścicki 2012, Vauhkonnen et al. 2012, Jing et al. 2014, Khosravipour et al. 2015). Správnosť určenia počtu stromov a následná extrakcia korún má vplyv na odvodenie ďalších stromových parametrov ako sú hrúbka, kruhová základňa, objem stromu a pod. (Kaartinen, Hyypä 2008, Stereńczak & Miścicki 2012, Vastaranta et al. 2012). Na vizuálnu identifikáciu stromu, určenie vrcholu a odvodenie koruny je potrebné minimálna hustota bodov 4-5 bodov na m²

(Andersen et al. 2006). V prípade starých stromov s veľkými korunami sú postačujúce 2 body na m² (Kaartinen et al. 2012). na správnosť a presnosť identifikácie stromov a odvodenie korún z LiDARových dát vplyva okrem minimálneho počtu bodov na m² množstvo ďalších faktorov. Tieto faktory môžu byť rozdelené na niekoľko skupín – biologické faktory, technické faktory spojené s letom a parametrami získavania dát, technické faktory spojené so spracovaním dát a problémy s verifikáciou výsledkov (Stereńczak 2013).

Cieľom príspevku prezentácia identifikácie stromov v heterogénnych lesných porastoch s rôznym drevinovým zložením. Identifikácia stromov bola vykonaná na rastrových vrstvách s rôznym priestorovým rozlíšením.

EXPERIMENTÁLNE ÚZEMIE A MATERIÁL

Experimentálne územie sa nachádza na v časti Vysokoškolského lesníckeho podniku Technickej univerzity vo Zvolene (48°37'N, 19°04'E). Celé územie patrí do Kremnických vrchov a nachádza sa v severo-západnej časti okresu Zvolen.

Skenovanie územia prebehlo v septembri 2011. Na skenovanie bol použitý letecký laserový skener Riegl L-680i, výška letu 700 m, 50° FOV, PRR 30 kHz a SR 122 Hz. Dáta v poskytnuté dodávateľom boli spracované v prostredí Microstation V8 s nadstavbou TerraScan a filtrované na body reprezentujúce terén a body reprezentujúce povrch (vegetáciu, budovy a iné objekty). V tabuľke 1 sú zobrazené parametre dát pre jednotlivé plochy.

Tab. 1 Parametre LiDARových dát

Plocha		Počet bodov	Priem. rozstup bodov [m]	Minimum Z [m]	Maximum Z [m]	Výmera plochy [ha]
EP1	DMP	111353	0,218	382,34	435,05	0,53
EP2	DMP	119823	0,165	385,28	439,53	0,33
EP3	DMP	106902	0,153	421,39	459,05	0,25
EP4	DMP	86629	0,17	416,44	458,81	0,25
EP5	DMP	106247	0,155	573,23	625	0,25
EP6	DMP	62600	0,198	961,06	1008,37	0,25
EP7	DMP	86487	0,17	968,28	1016,99	0,25
EP8	DMP	172819	0,238	969,30	1026,25	1,0
EP9	DMP	121522	0,144	609,95	657,04	0,25

EP – experimentálna plocha; DMP – digitálny model povrchu

Snímky použité na vektorizáciu boli snímané digitálnou kamerou Microsoft Vexcel UltraCamX v Septembri 2011. Na spracovanie bol použitý softvér GrafNav a AEROoffice, ortorektifikácia bola vykonaná na Katedre hospodárskej úprave lesov a geodézie na Technickej univerzite vo Zvolene v softvérovom prostredí Inpho. Priestorové rozlíšenie ortofotosnímkov bolo 10 cm.

Na každej ploche prebehol terénny zber informácií technológiou FieldMap. Merala sa pozícia každého stromu, výška a hrúbka v prsnej výške ($d_{1,3}$). Pre každý strom sa identifikoval jeho sociálny stav – vertikálna pozícia v etáži. Na základe toho bol každému stromu priradený identifikátor reprezentujúci jeho potenciálnu viditeľnosť na DPZ záznamoch: (i) 0 – minimálna viditeľnosť (strom nebude pravdepodobne viditeľný na DPZ záznamoch), (ii) 1 – dobrá viditeľnosť (minimálne časť stromu/koruny bude viditeľná na DPZ záznamoch), (iii) výborná viditeľnosť (strom bude jasne viditeľný na DPZ záznamoch). V tabuľke 2 je uvedené drevinové zmiešanie plôch a vek plôch.

Tab. 2 Zastúpenie drevín na plochách

Plocha	Vek	Dreviny	Zastúpenie [%]	Druh dreviny
EP1	105	Listnaté	92	buk (<i>Fagus sylvatica</i>), dub zimný(<i>Quercus petraea</i>), hrab (<i>Carpinus betulus</i>), lipa malolistá(<i>Tilia cordata</i>)
		Ihličnaté	8	jedľa (<i>Abies alba</i>), smrek (<i>Picea abies</i>)
EP2	100	Listnaté	56,7	hrab (<i>Carpinus betulus</i>), buk (<i>Fagus sylvatica</i>), dub zimný(<i>Quercus petraea</i>), javor poľný(<i>Acer campestre</i>)
		Ihličnaté	43,3	jedľa (<i>Abies alba</i>), smrek (<i>Picea abies</i>)
EP3	90	Listnaté	39,1	hrab (<i>Carpinus betulus</i>), dub zimný(<i>Quercus petraea</i>), buk (<i>Fagus sylvatica</i>), javor horský(<i>Acer pseudoplatanus</i>), topoľ osika (<i>Populus tremule</i>)
		Ihličnaté	60,9	jedľa (<i>Abies alba</i>), smrek (<i>Picea abies</i>)
EP4	90	Listnaté	27,3	hrab (<i>Carpinus betulus</i>), dub zimný(<i>Quercus petraea</i>), buk (<i>Fagus sylvatica</i>)
		Ihličnaté	72,7	jedľa (<i>Abies alba</i>), smrek (<i>Picea abies</i>)
EP5	85	Listnaté	99	buk (<i>Fagus sylvatica</i>), dub zimný(<i>Quercus petraea</i>)
		Ihličnaté	1	jedľa (<i>Abies alba</i>)
EP6	65	Listnaté	23,1	buk (<i>Fagus sylvatica</i>), javor horský(<i>Acer pseudoplatanus</i>)
		Ihličnaté	76,9	smrek (<i>Picea abies</i>)
EP7	65	Listnaté	49,6	buk (<i>Fagus sylvatica</i>), breza previsnutá(<i>Betula pendula</i>), hrab (<i>Carpinus betulus</i>), javor horský(<i>Acer pseudoplatanus</i>)
		Ihličnaté	50,4	smrek (<i>Picea abies</i>)
EP8	85	Listnaté	25,1	buk (<i>Fagus sylvatica</i>), javor horský(<i>Acer pseudoplatanus</i>), breza previsnutá(<i>Betula pendula</i>), vŕba (<i>Salix sp.</i>)
		Ihličnaté	74,9	smrek (<i>Picea abies</i>), smrekovec opadavý (<i>Larix decidua</i>)
EP9	150	Listnaté	100	buk (<i>Fagus sylvatica</i>)
		Ihličnaté	0	

EP – experimentálna plocha

METODIKA

Spracovanie LiDARových dát prebehlo v softvérovom prostredí OPALS. Dáta vo formáte *.las boli importované do OPALS data manager (ODM), viac informácií v prácach Otepka et al. (2006) a Mandlbürger et al. (2009). Identifikácia stromov prebehla na piatich priestorových rozlíšeniach, od 0,5 do 2,5 m s krokom 0,5 m. Na definovanie priestorového rozlíšenia bol použitý modul Cell. Jeho cieľom je odvodenie rastrových modelov akumulovaním vybraných parametrov atribútov (OPALS manuál). Pri tvorbe rastrových vrstiev sa ako parameter použili max – najvyššia atribútová hodnota a atribútom bola nadmorská výška. Následne sa modulom Grid vytvorili dva digitálne modely povrchu (DMP). Prvý sa vytvoril metódou „moving planes“ a druhý s agregovaným parametrom max pre atribút nadmorskej výšky. Pomocou modulu Algebra sa vytvoril výsledný DMP. Pre potreby tvorby normalizovaného DMP (nDMP) sa vytvoril digitálny model terénu (DMT) metódou „moving planes“. Použitím modulu StatFilter na vrstve nDMP sa identifikovali lokálne maximá. Ako parameter bol použitý max – bunka s najvyššou hodnotou. Bunky vo výslednej rastrovej vrstve reprezentovali pozície stromov a ich hodnoty výšku jednotlivých stromov.

Na určenie správnosti identifikácie polohy stromov sa vytvorila vektorová vrstva korún stromov. 3D vektorizácia bola vykonaná na systéme PLANAR v softvérovom prostredí Summit Evolution 6.4.

Správnosť identifikácie jednotlivých stromov bola definovaná rozdielmi medzi jednotlivými dátovými sadami a počítaním chýb z nadhodnotenia (chN) a podhodnotenia (chP). Chyby chN vznikajú ak sa v jednej korune nachádza viacej identifikovaných vrcholov alebo bol identifikovaný iný objekt ako koruna stromu. chP chyby vznikajú ak v existujúcej korune nebol identifikovaný vrchol stromu. Následne bol vypočítaný pomer správnosti identifikácie (PSI) a index správnosti (IS) (Poulit et al. 2002, Strímbu & Strímbu 2015):

$$PSI = ((N - chP) / N) * 100 \quad (1)$$

$$IS = (N - chP - chN) / N * 100 \quad (2)$$

kde: N – celkový počet stromov; chP – chyby podhodnotenia; chN – chyby nadhodnotenia

VÝSLEDKY

Ako referenčné dáta boli použité počty stromov v teréne. Vytvorili sa dve sady referenčných dát. Jednu skupinu tvoria všetky stromy (T1), to znamená, že aj stromy v podúrovni s kódom viditeľnosti 0. V druhej skupine sa nachádzajú len viditeľné stromy (T2), stromy s kódom viditeľnosti 1 a 2. Ďalšou dátovou sadou je výstup z prostredia OPALS (O_xx), kde xx predstavuje rozlíšenie rastrovej vrstvy od 0,5 do 2,5 m s krokom 0,5 m. Počet stromov v jednotlivých dátových sádach je uvedený v tabuľke 3.

Tab. 3 Popčet stromov v jednotlivých dátových sádach

N	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6	EP7	EP8	EP9
T1	203	154	87	77	187	88	118	295	77
T2	107	106	69	67	144	83	94	272	55
O_0.5	1512	760	395	322	763	454	575	3335	597
O_1	340	114	64	79	160	131	114	352	146
O_1.5	123	71	59	69	112	71	95	248	71
O_2	108	48	43	58	75	47	52	201	62
O_2.5	76	46	35	32	38	45	55	158	37

N – počet stromov; EP – experimentálna plocha; T1 – všetky stromy na experimentálnej ploche; T2 – len viditeľné stromy na experimentálnej ploche; O_ - identifikovaný počet stromov z LiDARových dát s definovaným rozlíšením rastrovej vrstvy

V tabuľke 4 je uvedené percento identifikácie stromov na jednotlivých EP. Z tabuľky vidieť, že pri rozlíšení 0,5 m dochádza k vysokému nadhodnoteniu, spôsobeného množstvom lokálnych maxim, ktoré sú identifikované ako vrcholy stromov. Pri rozlíšení 2,5 m dochádza k podhodnocovaniu spôsobeného vysokým stupňom generalizácie vstupných dát. Výsledky sú podporené aj testom normality a párovým testom. Všetky kombinácie okrem T1 vs O_1 a T2 vs O_1,5 boli zamietnuté na $\alpha=0.05$.

Tab. 4 Percento identifikácie stromov z LiDARových dát [v %]

	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6	EP7	EP8	EP9	AVG
T1 vs O_0,5	744,8	493,5	454,0	418,2	408,0	515,9	487,3	1130,5	775,3	603,1
T1 vs O_1	167,5	74,0	73,6	102,6	85,6	148,9	96,6	119,3	189,6	117,5
T1 vs O_1,5	60,6	46,1	67,8	89,6	59,9	80,7	80,5	84,1	92,2	73,5
T1 vs O_2	53,2	31,2	49,4	75,3	40,1	53,4	44,1	68,1	80,5	55,0
T1 vs O_2,5	37,4	29,9	40,2	41,6	20,3	51,1	46,6	53,6	48,1	41,0
T2 vs O_0,5	1413,1	717,0	572,5	480,6	529,9	547,0	611,7	1226,1	1085,5	798,1
T2 vs O_1	317,8	107,5	92,8	117,9	111,1	157,8	121,3	129,4	265,5	157,9
T2 vs O_1,5	115,0	67,0	85,5	103,0	77,8	85,5	101,1	91,2	129,1	95,0
T2 vs O_2	100,9	45,3	62,3	86,6	52,1	56,6	55,3	73,9	112,7	71,8
T2 vs O_2,5	71,0	43,4	50,7	47,8	26,4	54,2	58,5	58,1	67,3	53,0

EP – experimentálna plocha; T1 – všetky stromy na experimentálnej ploche; T2 – len viditeľné stromy na experimentálnej ploche; O_ - identifikovaný počet stromov z LiDARových dát s definovaným rozlíšením rastrovej vrstvy

Správnosť identifikácie jednotlivých stromov bola vykonaná aj počítaním chýb chN a chP a výpočtom pomeru správnosti identifikácie a indexu správnosti. Hodnotenie bolo vykonané len pre dátovú sadu T2 a vrstvu s priestorovým rozlíšením 1,5, pre ktorú boli najlepšie výsledky identifikácie stromov (Tabuľka 4). Výsledky sú uvedené v tabuľke 5.

Tab. 5 Vyhodnotenie správnosti identifikácie pre dátovú sadu T1 a priestorové rozlíšenie 1,5 m [v %]

	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6	EP7	EP8	EP9
Chyby z podhodnotenia	23	47	40	38	23	35	27	32	28
Chyby z nadhodnotenia	27	14	11	17	15	15	15	7	43
Pomer správnosti identifikácie	77	53	60	62	77	65	73	68	72
Index správnosti	50	39	49	45	63	51	58	61	28

EP – experimentálna plocha

DISKUSIA A ZÁVER

Výsledky poukazujú na potenciál metódy pre identifikáciu jednotlivých stromov v poraste. V prípade vysokého rozlíšenia (0,5 m) dochádza k vysokému nadhodnoteniu počtu stromov. Dôvodom je množstvo lokálnych maxím, ktoré sú považované za vrcholy stromov. V prípade nízkeho rozlíšenia (2,5 m) dochádza k podhodnocovaniu v dôsledku generalizácie. V prípade porastov starších ako 100 rokov sa ukazuje ako vhodnejšie nižšie rozlíšenie (2 m), čo je spôsobené veľkosťou korún jednotlivých stromov.

Nevýhodou metódy je problém s identifikáciou stromov, ktoré sa nachádzajú v podúrovni. V prípade dátovej sady T1 sa vyskytuje chyba s polohou stromov, aj keď percento identifikovaných stromov je pomerne dobré. Dôvodom je skutočnosť, že algoritmus identifikuje vrcholy stromov na rastrovej vrstve, ktorá reprezentuje korunovú vrstvu najvyšších stromov. Stromy z podúrovne sú počítané ako stromy úrovne a dochádza k polohovej chybe, ktorá má za následok chybu napr. pri odvodzovaní korún. Problémy s identifikáciou stromov v podúrovni boli uvedené aj v iných prácach (Solberg et al. 2006, Heurich 2008).

Predstavená metóda identifikácie jednotlivých stromov má uplatnenie v prípade identifikácie stromov v hornej etáži. Výhodou je rýchly výpočet a minimálny vplyv operátora pri zmene územia/dát. Výsledky automatickej identifikácie sa dajú ďalej použiť pre odvodenie stromových parametrov a korún stromov.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky pre projekt č. 1/0953/13 „Geografická informácia o lese a lesnej krajine – špecifiká tvorby a využitia“.

LITERATÚRA

Andersen, H.-E., Reutebuch, S. E., R. J. McGaughey. (2006) A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Can J Remote Sens* 32 (5): 355-366.

Carter, J., Schmid, K., Waters, K., Betzhold, L., Hadley, B., Mataosky, R., Halleran, J. (2012) *Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications*. NOAA Coastal Services Center, Charleston, SC, USA, 72 s. URL <http://csc.noaa.gov/digitalcoast/_pdf/lidar101.pdf> [Citované: Február 2016]

Harvey, F. (2008) *A Primer of GIS: fundamental geographic and cartographic concept*. Guilford Press, New York, 310 p.

Heurich, M. (2008) Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park. *For Ecol Manag* 255 (7): 2416-2433.

Hyypä, J., Hyypä, H., Xiaowei, Y., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M. (2009) Forest inventory using small-footprint airborne LiDAR. In: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, s. 335-370.

Hyypä, J., Kelle, O., Lehikoinen, M., Inkinen, M. (2001) A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-dimensional tree height models produced by laser scanner. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 39, s. 969-975.

Jing, L., Hu, B., Li, J., Noland, T. (2014) Automated individual tree crown delineation from LiDAR data using morphological techniques. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 17(1)

Kaartinen, H. a Hyypä, J. (2008) EuroSDR/ISPRS Commission II project: "Tree Extraction"—final report. Official publication no. 53. EuroSDR, Frankfurt am Main, Germany, 60 s. URL < <http://bono.hostireland.com/~euroedr/publications/53.pdf> > [Citované: Február 2016]

Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyypä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, Ch., Hirschmugl, M., Mosdorf, F., Næsset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B. M., Wu, J-Ch. (2012) An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing* 4: 950-974

Khosravipour, A., Skidmore, A. K., Wang, T., Isenburg, M., Khoshelham, K. (2015) Effect of slope on treetop detection using a LiDAR canopy height model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104: 44-52.

Maas, H.-G. (2013) Forestry applications. In: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath, s. 213-235.

Mandlbürger, G., Otepka, J., Karel, W., Wagner, W., Pfeifer, N. (2009) Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data (OPALS) - concept and first results of a comprehensive ALS software. In: *ISPRS Workshop Laserscanning 2009*. Francúzsko, September 2009.

OPALS Manual. URL < <http://geo.tuwien.ac.at/opals/html/index.html> > [Citované: Február 2016]

Otepka, J., Briese, C., Nothegger, C. (2006) First steps to a topographic information system of the next generation. In: *Symposium of ISPRS Commission IV - Geo Spatial Databases for Sustainable Development*, 6 s., September 2006, India.

Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyypä, J., and X. Yu. 2004. "Adaptive Methods for Individual Tree Detection on Airborne Laser Based Canopy Height Model." In *Proceedings of ISPRS Workshop Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, Germany, 3–6 October 2004. Accessed Jun 2015. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/PITKAENEN.pdf>

Pouliot, D. A., King, D. J., Bell, F. W., Pitt, D. G. (2002) Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment* 82: 322-334.

Solberg, S., Naesset, E., Bollandsas, O. M. (2006) Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(12): 1369-1378.

Stereńczak, K. (2013) Factors influencing individual tree crowns detection based on airborne laser scanning data. *Forest Research Papers* 74 (4): 323-333.

Stereńczak, K. a Miścicki, S. 2012. Crown delineation influence on standing volume calculations in protected area. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B8. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.

Strimbu, V. F., a Strimbu, B. M. (2015) A graph-based segmentation algorithm for tree crown extraction using airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104: 30-43.

Vastaranta, M., Kankare, V., Holopainen, M., Yu, X., Hyyppä, J., Hyyppä, H. (2012) Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. ISPRS J. Photogramm 67, 73-79.

Vauhkonen, J., Ene, L., Gupta, S., Heinzl, J., Holmgren, J., Pitkänen, J., Solberg, S., Wang, Y., Weinacker, H., Hauglin, K.M., Lien, V., Packalén, P., Gobakken, T., Koch, B., Næsset, E., Tokola, T., Maltamo, M. (2012) Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. Forestry 85(1): 27-40.