

Detecção de árvores individuais em área florestal mista de coníferas por meio de dados LiDAR aerotransportando

Iasmim Louriene Gouveia Silva^{1*} Carlos Alberto Silva² Carine Klauberg³ José Márcio de Mello¹

¹ Universidade Federal de Lavras, Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal - LEMAF, Caixa Postal 3037, Lavras - MG, 37200-000, Brasil.

² Universidade de Idaho, Colégio de Recursos Naturais, 975 W 6th, Moscow, ID 83844, EUA.

³ USDA Serviço Florestal, Estação de Pesquisa "Rocky Mountain", Laboratório de Ciências Florestais, 1221 S Main Street, Moscow, ID 83843, EUA.

*Author for correspondence: iasmimlouriene@gmail.com

Received: 24 August 2016 / Accepted: 28 March 2017 / Published: 30 June 2017

Resumo

Através do Inventário Florestal obtêm-se importantes informações para manejar os recursos florestais. Considerando a elevada demanda de tempo e custos que ele requer, têm-se explorado a aplicação do LiDAR para obter o conhecimento da área. O objetivo deste estudo consistiu em detectar árvores individuais e avaliar a homogeneidade da floresta, baseando em estimativas de altura por meio de dados LiDAR aerotransportado. A área de estudo é um fragmento de floresta mista de coníferas, localizado em Sawtooth National Forest, Stanley - Idaho. A nuvem de pontos adquirida pelo LiDAR foi analisada, processada e por meio dela gerou-se um modelo de altura de copa (CHM) para a área. A partir deste, as árvores foram detectadas usando diferentes combinações de tamanhos de janelas de busca (TWS) e janelas de suavização de copa (SWS). A densidade das árvores foi estimada para as parcelas e para toda a área, utilizando as alturas das árvores obtidas. As árvores apresentaram uma suave heterogeneidade em altura. A melhor combinação para a área de estudo, foi TWS = 7 x 7 e SWS = 3 x 3. A metodologia aplicada foi eficiente e é promissora para otimizar o Inventário Florestal.

Palavras-chave: Altura, densidade de árvores, modelo de altura de copas, nuvem de pontos

Abstract

Forest Inventory provides important information for managing forestry resources. Considering that it demands a lot of time and expensive costs, the application of LiDAR has been explored to obtain features from a certain area. The aim of this study was to detect individual trees and to evaluate the forest's homogeneity based on height estimates from Airborne LiDAR data. The study area is a mixed conifer forest path, located in Sawtooth National Forest, Stanley- Idaho. The point cloud provided from LiDAR was analyzed, processed and throughout it, a Canopy Model (CHM) was generated. The trees were detected from the CHM using different filters of Tree Window Size (TWS) and Smoothing Window Size (SWS). Tree density was estimated for samples and for the entire study area using tree heights. The trees showed a smooth heterogeneity in height. The best filters for the present study was TWS = 7 x 7 and SWS = 3 x 3. The methodology applied was efficient and it is promising to optimize Forest Inventory.

Key words: Canopy model; Point cloud; height, tree density.

Introdução

O Inventário Florestal (IF) é uma ferramenta essencial para o conhecimento das características qualitativas e quantitativas de áreas florestais. É a base de informações para muitas áreas na Engenharia Florestal, tais como: o manejo, o planejamento, a colheita, entre outras (Scolforo e Mello 2006). Por isso espera-se que as técnicas de amostragem utilizadas pelo IF se apresentem sempre eficientes.

Entretanto, o IF é um recurso caro e demanda tempo. O LiDAR (do inglês, *Light Detection and Ranging*) é uma tecnologia que vem sendo usada em aplicações florestais em crescente frequência. De acordo com Silva et al. (2014), isto se deve a rápida disponibilização de dados altamente acurados. Da mesma forma, ele fornece informação espacialmente detalhada sobre os atributos florestais de toda a paisagem florestal. Means et al. (2000) acreditam que a estimativa de parâmetros de povoamentos requereria muito menos trabalho se fosse baseada em dados LiDAR, visto que ele permite detectar árvores em toda a área florestal em curto intervalo de tempo. O LiDAR e a fusão de imagem de satélite podem trazer significantes ganhos em caracterizar a estrutura tridimensional do dossel florestal (Hudak et al. 2002) e deve acelerar a transição de aplicações do LiDAR de interesses científicos para confiáveis implementos comerciais (Popescu et al. 2004). O dossel florestal pode ser estudado a nível individual e trabalhos feitos por Castro e Centeno (2005), Silva et al. (2016), Oliveira et al. (2012) e Ribas et al. (2011) revelam que os resultados podem ser obtidos com acurácia.

A detecção de árvores individuais de maneira automática é um ponto fundamental em estudos que têm o objetivo de extrair informações biométricas a nível de árvores. A localização das árvores possibilita a obtenção de certas variáveis de medida, como a altura (Giongo et al. 2010). Sendo esta, uma variável de difícil obtenção no campo, releva-se a importância de estudar métodos alternativos que busquem estimá-la. A análise de árvores individuais e da homogeneidade florestal, assim como o seu estudo, permite representar as condições de copa e/ou dossel para futuras análises estrutural e florística da vegetação. Consequentemente, é possível adequar ou desenvolver técnicas capazes de propiciar com bases ecológicas, o manejo silvicultural e o aproveitamento ordenado da vegetação. Com isso, pode-se criar e manter ótimos planos de manejo em florestas plantadas. Em áreas nativas, pretende-se minimizar os efeitos danosos provocados por profundas alterações ambientais e sugerir medidas de proteção.

O LiDAR viabiliza gerar um modelo de altura de copa (CHM – *Canopy Height Model*) que pode ser usado para a detecção individual de árvores, o delineamento de copas de árvores e subsequentemente a estimativa de atributos biométricos, como biomassa e volume. (Popescu et al. 2003; Popescu 2007; Falkowski et al. 2008; Falkowski et al. 2009; Vauhkonen et al. 2012; Hu et al. 2014; Duncanson et al. 2014; Duncanson et al. 2015; Kankare et al. 2015). Para a identificação individual de árvores, utiliza-se o algoritmo de máximos locais. Nele, janelas de busca fazem a detecção dos picos de altura de copa. A limitação deste algoritmo é a detecção de árvores que estejam abaixo do dossel florestal, onde se encontram os picos de altura. Para evitar que a sobreposição de árvores ocorra, requer-se que a área de estudo apresente vegetação aberta a fim de empregar corretamente o algoritmo. Esta é uma característica que pode

ser observada em talhões florestais, onde as árvores geralmente estão espacialmente bem definidas no território. Em vista disso, vale ressaltar que a detecção de árvores individuais pelo LiDAR pode ser aplicada por empresas, reduzindo custo e otimizando tempo. Isto posto, o objetivo deste estudo foi detectar árvores individuais em uma área florestal aberta composta por espécies de coníferas, por meio de dados LiDAR aerotransportado. Juntamente, será analisada a distribuição da altura florestal com base na altura extraída do CHM.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área localizada a 27 km a oeste de Stanley, Idaho (EUA). Situa-se em *Sawtooth National Forest*, onde é conduzido um principal estudo entre as conexões existentes entre complexos de redes hidrológicas e exportação de nutrientes. A floresta está a 3.660 m acima do nível do mar, e a elevação varia de 1900 a 2610 m de altitude. A área de estudo soma aproximadamente 705,96 ha. A temperatura anual é em média 32,7 °C e a floresta recebe menos de 38 cm de precipitação por ano. Quanto maior a elevação, maior o nível de precipitação. (Idaho Climate Summaries 2005). Em elevações mais baixas a composição da área é baseada por arbustos e vegetação rasteira. A floresta contém uma variedade de espécies sendo classificada como mista de coníferas, tais como: Lodgepole pine (*Pinus contorta*) forma aproximadamente uma floresta monotípica com vegetação esparsa sob a copa. Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) e Aspen (*Populus tremuloides*) também são encontradas ao longo da floresta, certos tipos de arvoretas também são encontrados no sub-bosque (Sawtooth National Forest 2012).

Coleta de dados LiDAR

Os dados LiDAR aerotransportado foram adquiridos gratuitamente através do site *Open Topography* (<http://www.opentopography.org/>). Este é um portal de dados que estão disponíveis para projetos referentes ao LiDAR. Atualmente é apoiado pela Fundação Nacional de Ciência dos Estados Unidos (NSF – *National Science Foundation*). O sistema inclui um GPS (*Global Positioning System*) geodésico de alta acurácia de inércia para medição de unidades e pulsos bastante precisos. Os dados foram coletados pelo NCALM (*National Center for Airborne Center Mapping*). A densidade de pontos, ou seja, o número de retornos recebido pelo sensor, por m², foi de 7,34 pontos/por m². O voo LiDAR foi conduzido em 9 de fevereiro de 2009. Os atributos do mesmo são descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos de voo LiDAR.

Atributos	Valores
Altitude de voo	600 m
Ângulo de varredura	20 °
Alcance das medidas de retorno do laser	Até 4
Densidade de pontos	7,34 pontos/m ²
Frequência de varredura	40 Hz
Frequência de repetição de pulsos	100 kHz
Largura da faixa de cobertura	366 m
Limitação do ângulo de varredura	3 °
Resolução Espacial	0,362 m
Resolução Espectral	12 bits
Precisão	0,5 m (1,0 sigma)
Velocidade	65 m/seg.

Processamento de dados LiDAR

O processamento foi realizado através dos softwares FUSION/LDV 3.42, criado pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos (McGaughey 2015), e o pacote rLiDAR desenvolvido por Silva et al. (2015) em R, versão 3.3.1 (R Development Core Team 2015). A visualização e análise da nuvem de pontos LiDAR foi feita pelo FUSION. Neste, a função *Catalog* criou uma descrição de importantes características do LiDAR em um relatório. Uma delas é o conjunto de limites máximo e mínimo para as coordenadas dos dados, necessário para a normalização dos dados. A fim de diferenciar os pontos coletados no solo e vegetação, aplicou-se um algoritmo fundamentado em Kraus e Pfeifer (1998). Assim, foi possível gerar um Modelo Digital de Terreno (DTM – *Digital Terrain Model*) através da função *GridSurfaceCreate*. Cada valor de elevação de um ponto foi subtraído pelo seu valor correspondente projetado no terreno (DTM), para criar o CHM via *CanopyModel*. Por fim, utilizou-se a ferramenta *CloudMetrics* para o cálculo da porcentagem de cobertura de copa (COV % - *Canopy cover Cover*) nas parcelas de interesse. A COV equivale ao número de primeiros retornos acima de 1,37 m em altura, dividido pelo número total de primeiros retornos, conforme Nilsson (1996).

Deteção de árvores individuais

A área de estudo foi amostrada por meio de 15 parcelas circulares de raio igual a 50 m. As parcelas foram distribuídas aleatoriamente, em áreas que apresentam floresta mais aberta. Tendo em vista que para estudo não se obteve dados de campo, o número de árvores referência foi manualmente contabilizado nas parcelas por meio do CHM. Em R, as árvores individuais foram detectadas utilizando o algoritmo de locais máximos implementado na função *FindTreesCHM* no pacote rLiDAR em R. O princípio consiste em varrer a área através de janelas de busca (TWS – *Tree Window Size*), com tamanho a ser definido. Haja vista que o topo da árvore é o fundamento da detecção, considerou-se aplicar a suavização do modelo de copa, que também varia em tamanho (SWS- *Smoothing Window Size*). A variação das janelas de busca foi determinada de acordo com o trabalho desenvolvido por Silva et al. (2016). Foram testados três tamanhos para TWS: 3 x 3, 5 x 5 e 7 x 7. Para cada um deles, foi combinado o modelo CHM sem suavização de copa (*NF – No filter*), e posteriormente a suavização do CHM foi gerada em janelas de tamanho cada tamanho 3 x 3 e 5 x 5. No total, foram obtidas nove combinações para as janelas de busca. A detecção automatizada foi feita na área toda para evitar o efeito de borda nas parcelas, e subsequente as árvores foram extraídas nas parcelas de interesse utilizando a ferramenta *clip* em ESRI ArcMap 10.4.1.

Análise estatística

Em cada combinação, foi contabilizado um número total de árvores por parcela. Com intuito de avaliar a acurácia da detecção automática do rLiDAR em comparação árvores de referência, foram calculadas a Diferença absoluta (DA) e relativa (DR). A análise produz resultados claros e diretos, como visto em outros trabalhos apresentados por Kettler (2001), Rizzi e Ruddorff (2005) e Ferreira (2013). Os cálculos foram executados da seguinte de acordo com as seguintes equações:

Diferença absoluta (DA, N) = N árvores detectadas - N árvores observadas

Diferença relativa (DR, %) = (N árvores detectadas - N árvores referência) / N° árvores observadas

Análise da altura florestal

Para a análise da altura florestal foram construídos dois histogramas. O primeiro, foi gerado a partir das alturas das árvores detectadas na melhor combinação para as parcelas, e o segundo gerado a partir das alturas das árvores detectadas na paisagem (área total em estudo). Dessa forma, é possível visualizar a distribuição da altura florestal na unidade amostral e população.

Resultados

O número de árvores detectadas automaticamente pela metodologia descrita neste trabalho está apresentado na Tabela 2. O N representa o número de árvores referência contabilizadas através do CHM. Observa-se que o número de árvores detectadas diminuiu conforme o tamanho da janela de busca aumentou. O número médio de árvores encontradas com o uso TWS de 3 x 3, 5 x 5 e 7 x 7 nas três variações de suavização de copa foi respectivamente: 1366, 1067 e 894. O

total de árvores referência encontradas nas parcelas amostrais foi de 919 árvores. Desta forma, o número de árvores detectadas com a TWS de 7 x 7 foi que mais se aproximou do número de árvores referência.

Os resultados para a diferença relativa são apresentados na Tabela 3. Os valores menores do que 10% estão sombreados em cinza. Na combinação TWS = 5 x 5 e suavização 5 x 5, duas parcelas atingiram exatidão, em que o número de árvores detectadas automaticamente pelo LiDAR foi o mesmo observado. Nota-se que, conforme o tamanho da janela de busca aumenta, a frequência de baixos valores de diferença relativas, também aumenta. A porcentagem da cobertura de copa (COV %) para cada parcela, é indicada em ambas as tabelas 2 e 3. A COV abrangeu valores de 31,82 a 65,74%, equilibrando em média de 46,86%. A cobertura de copa é considerada baixa na área, tendo em vista que Silva et al. (2016) classificaram alta COV% para medidas maiores que 70%.

Tabela 2. Árvores individuais detectadas no CHM por combinação de TWS e SWS em cada parcela amostral.

Parcelas	COV (%)	N observadas	TWS								
			3 x 3			5 x 5			7 x 7		
			SWS			SWS			SWS		
NF	3 x 3	5 x 5	NF	3 x 3	5 x 5	NF	3 x 3	5 x 5			
1	51,66	81	68	158	110	68	119	89	68	77	65
2	52,44	62	102	138	93	102	93	73	102	68	58
3	41,21	58	46	125	74	46	87	62	46	62	51
4	59,09	73	83	186	94	83	119	73	83	90	66
5	55,61	35	76	105	45	76	46	35	76	42	32
6	46,20	99	80	146	91	80	101	80	80	81	64
7	36,25	96	62	169	103	62	116	85	62	97	68
8	45,66	94	67	174	83	67	120	74	67	89	64
9	43,00	67	51	88	59	51	62	53	51	54	45
10	31,82	53	44	88	47	44	59	43	44	44	37
11	41,23	77	61	108	73	61	79	65	61	55	45
12	65,74	46	44	126	59	44	67	42	44	49	36
13	49,90	61	51	165	90	51	112	71	51	69	47
14	41,83	75	47	130	73	47	76	56	47	68	48
15	41,22	79	37	115	64	37	73	53	37	52	39

COV(%)= cobertura de copa

Tabela 3. Diferença relativa (%) para as nove combinações de TWS e SWS em cada parcela amostral.

Parcelas	COV (%)	TWS								
		3 x 3			5 x 5			7 x 7		
		SWS			SWS			SWS		
NF	3 x 3	5 x 5	NF	3 x 3	5 x 5	NF	3 x 3	5 x 5		
1	51,66	16,05	95,06	35,80	16,05	46,91	9,88	16,05	4,94	19,75
2	52,44	64,52	122,58	50,00	64,52	50,00	17,74	64,52	9,68	6,45
3	41,21	20,69	115,52	27,59	20,69	50,00	6,90	20,69	6,90	12,07
4	59,09	13,70	154,79	28,77	13,70	63,01	0,00	13,70	23,29	9,59
5	55,61	117,14	200,00	28,57	117,14	31,43	0,00	117,14	20,00	8,57
6	46,20	19,19	47,47	8,08	19,19	2,02	19,19	19,19	18,18	35,35
7	36,25	35,42	76,04	7,29	35,42	20,83	11,46	35,42	1,04	29,17
8	45,66	28,72	85,11	11,70	28,72	27,66	21,28	28,72	5,32	31,91
9	43,00	23,88	31,34	11,94	23,88	7,46	20,90	23,88	19,40	32,84
10	31,82	16,98	66,04	11,32	16,98	11,32	18,87	16,98	16,98	30,19
11	41,23	20,78	40,26	5,19	20,78	2,60	15,58	20,78	28,57	41,56
12	65,74	4,35	173,91	28,26	4,35	45,65	8,70	4,35	6,52	21,74
13	49,90	16,39	170,49	47,54	16,39	83,61	16,39	16,39	13,11	22,95
14	41,83	37,33	73,33	2,67	37,33	1,33	25,33	37,33	9,33	36,00
15	41,22	53,16	45,57	18,99	53,16	7,59	32,91	53,16	34,18	50,63
Média	46,86	32,55	99,84	21,58	32,55	23,84	15,01	32,55	14,50	25,92

A Figura 1 demonstra a detecção de árvores gerada pelo CHM, e o delineamento de árvores individuais em 3D, extraídos de uma parcela da floresta. A distribuição da altura das árvores detectadas foi descrita pelos histogramas da

Figura 2. Nas parcelas a altura média circunda em torno de 15 m (Fig. A1). Os indivíduos se distribuem aproximadamente no padrão Normal, entretanto há um pico de densidade a cerca de 2 m. Analisando a área total, observa-se que mais da

metade da população está contida nas classes de 2 a 16 m de altura (Fig. A2). Scolforo & Mello (1997) revelam que para a mesma população, parcelas menores exibem maior coeficiente de variação ou variabilidade relativa quando

comparadas com parcelas maiores. Como a área analisada pelas parcelas é menor, há maior variabilidade em altura do que quando se verifica toda a área.

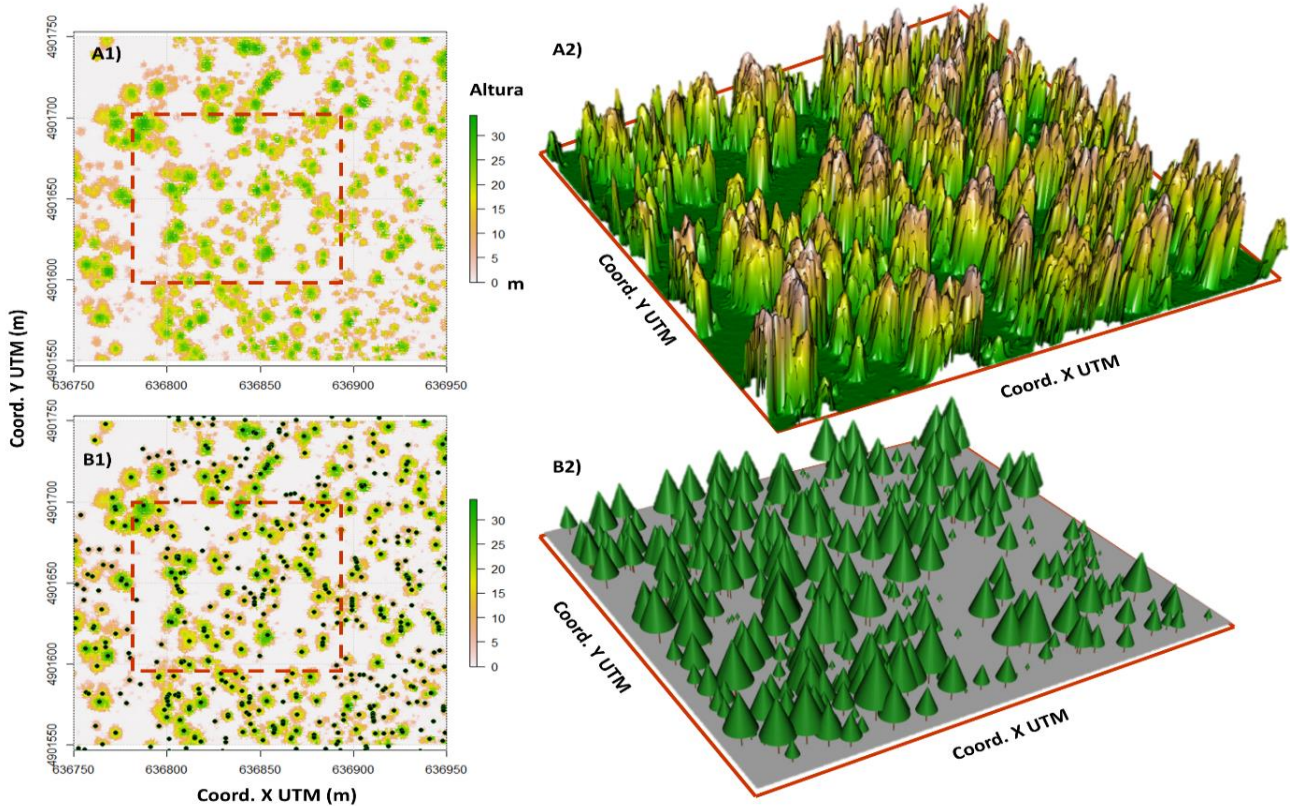


Figura 1. Representação da detecção das árvores individuais. A1) CHM em 2D, B1) CHM em 2D e árvores detectadas pelo rLiDAR, A2) Representação em 3D do CHM, B2) Delineamento de copas individuais em 3D.

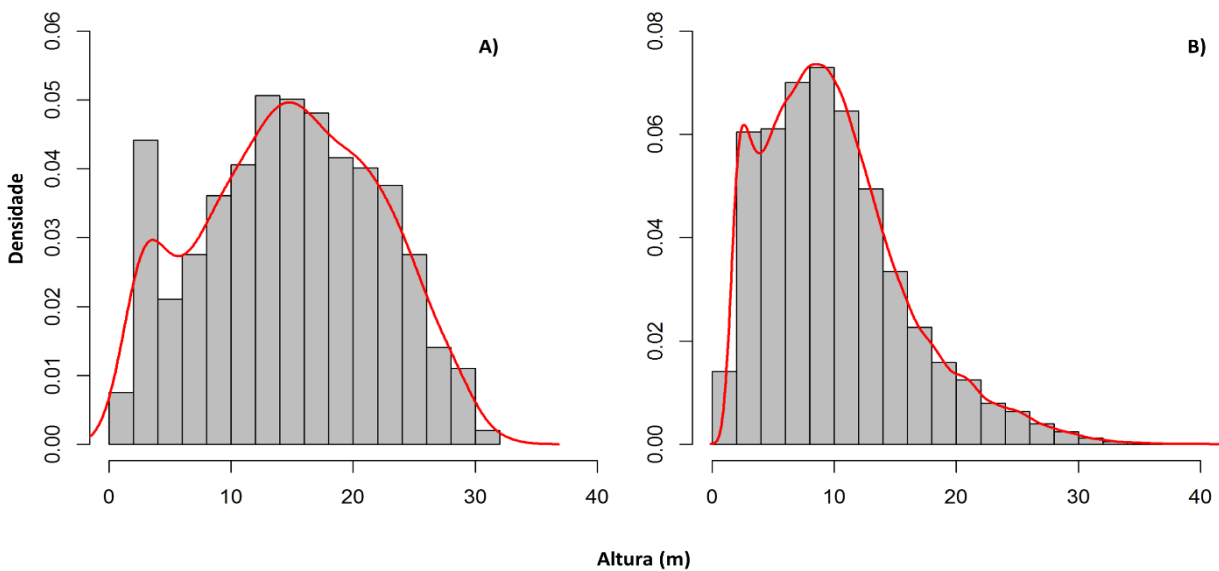


Figura 2. Distribuição da altura das árvores detectadas nas parcelas (A) e na área total (B). A curva teórica de distribuição (Normal) é representada pela linha vermelha.

Discussões

A detecção de árvores foi realizada para as nove combinações de janela e suavização de copa, e apresentou resultados coerentes. O estudo da heterogeneidade da floresta

foi demonstrado a partir da variável altura, e pode ser ilustrada pelas Figuras 2 A e B. O tempo empregado para o processamento e a análise de dados foi certamente menor do que o tempo que seria gasto para coleta de medidas no campo

e conseqüente processamento. A tecnologia LiDAR pode ser considerada como uma alternativa para reduzir o número de parcelas estabelecidas no campo para a coleta de dados do Inventário Florestal.

A combinação que apresentou a menor diferença relativa (DR) foi a de TWS = 7 x 7 e SWS = 3 x 3. Dentro dela, a parcela de maior acurácia (DR = 1%) foi a 7, e a pior (DR = 34%), a parcela 15. Ao avaliar a imagem gerada pelo CHM, notou-se que a parcela 7 possui árvores de diferentes tamanhos, esparsas entre si e com copas bem definidas. Em contraposto, as árvores da parcela 15 estão estruturadas em conglomerados; fator plausivelmente justificável ao baixo nível de acurácia na detecção nesta parcela.

A subestimativa pode estar relacionada com a grande densidade de árvores menores do que 20 m, como demonstrado na Figura 2 A, referente ao histograma das parcelas. Considerando que o algoritmo de máximos locais apenas detecta os picos das árvores, supõe-se que árvores menores tenham sido omitidas da detecção devido à sobreposição de copas. A superestimativa ocorreu com maior frequência onde não houve suavização de copa, e em suavização de tamanho de janela 3 x 3. Na primeira situação, é esperado que mais de um pico de uma única árvore foi detectado, uma vez que os ruídos não foram eliminados pela aplicação do algoritmo. Já para a SWS = 3 x 3, supõe-se que tenha ocorrido efeito de borda nas janelas, e portanto a mesma árvore pode ter sido detectada mais de uma vez. A existência de mais de uma espécie de conífera na floresta, foi ponderada como variável na acurácia da detecção de árvores. Leminih et al. (2004), demonstraram que diferentes espécies dispõem de distintos desenvolvimentos de copa.

Estudos realizados por Falkowski et al. (2008), demonstram que acurácia da detecção de árvores, diminui à medida que a cobertura de copa aumenta. Dentro da combinação de pior acurácia (TWS = 3 x 3 e SWS = 3 x 3), verifica-se que, os maiores valores COV %; 65,74, 59,09 e 55,61 % correspondem aos valores mais elevados de diferença relativa, sendo respectivamente igual a 173,91, 154,79 e 200%. Portanto, a detecção no presente estudo foi menos acurada em áreas onde há maior densidade de dossel florestal. A COV teve amplitude de 33,93% indicando que a floresta é caracterizada por uma suave heterogeneidade de copa. Em síntese a predição da localização de árvores é influenciada por diversas razões, como a densidade de árvores abaixo do dossel florestal, o tipo de vegetação, o tamanho das árvores e a densidade de cobertura copa, que acarreta a sobreposição das mesmas (Rahman et al. 2008).

A aquisição de dados LiDAR, ainda é cara, principalmente em áreas extensas. A obtenção de amostras de alta densidade, requerida para atingir precisão, demanda que o voo seja conduzido a baixa altitude, baixa velocidade de voo, menores ângulos de varredura e múltiplos voos (Lovell et al. 2005). O tempo de voo possui alto custo (Fournier et al. 2003). Ainda assim, estudos mostram que o Inventário Florestal com uso da tecnologia LiDAR é mais barato do que o convencional. Means et al. (2000) comparam os custos de métodos tradicionais, em contraposição aos métodos LiDAR. O autor indica que em uma área de aproximadamente 80 ha, é factível reduzir os custos em US\$15.000,00 por ano. Ao estimar o tempo, a metodologia LiDAR reduz em torno de quatro semanas de trabalho.

O delineamento de árvores individuais, visualizado na Figura 1 B, permite conhecer a distribuição espacial dos indivíduos na floresta. Além disso, a altura extraída do CHM, pode ser utilizada para a estimativa de diâmetro a altura do peito, altura total e comercial, área de copa (Kaartinen et al. 2012), área basal, biomassa e volume de árvores individuais (Popescu et al. 2004). A metodologia empregada neste estudo pode ser replicada. Os softwares utilizados são de acesso

livre e estão disponíveis para download gratuito. Ainda que a área do presente estudo tenha sido realizada nos Estados Unidos, espera-se que a metodologia seja aplicada em florestas brasileiras. Principalmente por empresas, onde os talhões são homogêneos e em plantações de *Pinus* no sul do Brasil.

Conclusão

Para o presente estudo, a melhor combinação de TWS e SWS obtida, foi respectivamente 7 x 7 e 3 x 3. Ressalva-se que, os tamanhos de filtro e condições para filtrar o CHM devem ser cuidadosamente testados e selecionados para diferentes tipos de floresta (Lindberg e Hollaus 2012). A fim de obter resultados mais acurados sobre os tamanhos de janela e suavização, sugere-se que sejam feitos mais estudos sobre a detecção e a aquisição de métricas de árvores individuais. Se possível, em plantios ou florestas naturais com espécies que apresentem crescimento de copa semelhante. A metodologia aplicada através do pacote rLiDAR e FUSION se mostraram eficientes e promissoras para a otimização do Inventário Florestal no campo. Espera-se que a metodologia seja reaplicada no Brasil, e que tecnologia LiDAR seja operacionalizada.

Referências

- Castro FC, Centeno TM (2005). Segmentação de imagens geradas por perfilamento a laser para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12. (SBSR), Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE. p. 737-744. ISBN 85-17-00018-8.
- Duncanson LI, Cook BD, Hurtt GC, and Dubayah RO (2014). An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 154: 378–386.
- Duncanson LI, Dubayah RO, Cook BD, Rosette J, and Parker G. (2015). The importance of spatial detail: Assessing the utility of individual crown information and scaling approaches for Lidar-based biomass density estimation. *Remote Sensing of Environment*, 168: 102–12.
- ESRI (2015) *ArcGIS Desktop and Spatial Analyst Extension: Release 10.4*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Falkowski MJ, Smith AMS, Gessler P, Hudak AT, Vierling LA and Evans, JS (2008). The influence of conifer forest canopy cover on the accuracy of two individual tree measurement algorithms using LiDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(2): S1–S13.
- Falkowski MJ, Evans JS, Martinuzzi S, Gessler PE, Hudak AT (2009). Characterizing forest succession with LiDAR data: An evaluation for the Inland Northwest, USA. *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 946–956.
- Ferreira RD, Leao JAD, Silva TSF, Renno CD, Novo EMLM, Barbosa CCF (2013). *Atualização e correção do delineamento de áreas alagáveis da bacia Amazônica*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. SP. 5863-5871.
- Fournier RA, Luther JE, Guindon L, Lambert MC, Piercy D, Hall RJ (2003). Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: Test cases in Newfoundland and Québec. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 1846–1863

- Giongo M, Koehler HS, Machado SA, Kirchner FF, Machetti M (2010) LiDAR: Princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, 63(30): 231-244.
- Hudak AT, Lefsky MA, Cohen WB, Berterretche M (2002). Integration of lidar and Landsat ETM₊ for estimating and mapping forest canopy height. *Remote Sens. Environ.*, 82: 397–416.
- Hu B, Li J, Jing L, Judah A. (2014). Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 145–155.
- Idaho Climate Summaries. Western Regional Climate Center. Obtido do original em 12 de Fevereiro de 2013. Armazenado em Maio 9, 2012. <<http://www.wrcc.dri.edu/cgi-bin/cliMAIN.pl?idstan>> .
- Kaartinen H, Hyypä J, Yu X, Vastaranta M, Hyypä H, Kukko A, Holopainen M, Heipke C, Hirschmugl M, Morsdorf F, Næsset E, Pitkänen J, Popescu S, Solberg S, Wolf BM, Wu JC (2012). An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing*, 4: 950–974.
- Kankare V, Liang X, Vastaranta M, Yu X, Holopainen M, Hyypä J (2015). Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of 905 Photogrammetry and Remote Sensing*, 108: 161–171.
- Kettler TA, Doran JW, Gilbert, TL (2001). Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses. *Soil Sci Soc Am J*, 65: 849–852.
- Hyypä J. 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108: 161–171.
- Lemenih M., Gidyew T., Teketay D. 2004. Effects of canopy cover and understory environment of tree plantations on richness, density and size of colonizing woody species in southern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 194: 1–10.
- Lindberg E, Hollaus, M (2012). Comparison of methods for estimation of stem volume, stem number and basal area from airborne laser scanning data in a hemi-boreal forest. *Remote Sensing*, 4(4): 1004–1023.
- Lovell JL, Jupp DLB, Newnham GJ, Coops NC, Culvenor DS (2005). Simulation study for finding optimal LiDAR acquisition parameters for forest height retrieval. *Forest Ecol. Manage.*, 214: 398–412.
- McGauchey, RJ (2015). *FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization*. Forest Service Pacific Northwest Research Station USDA, Seattle, <http://http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf> .
- Means JE, Acker SA, Fitt BJ, Renslow M, Emerson L, Hendrix CJ. 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66 (11): 1367-1371.
- Nilsson M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. *Remote Sensing of Environment*, 56: 1–7.
- Oliveira LT, Carvalho LMT, Ferreira MZ, Oliveira TCA, Acerbi Junior, FW (2012). Aplicação do LIDAR no inventário de florestas plantadas com Eucalyptus sp. para contagem de árvores. *Cerne*, Lavras, 18: 75-184.
- Popescu, SC (2007). Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR. *Biomass and Bioenergy*, 31(9): 646–655.
- Popescu, SC, Wynne RH, Nelson, RF (2003). Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5): 564–577.
- Popescu SC, RH Wynne, JA Scrivani (2004). Fusion of small footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, U.S.A., *Forest Science*, 50(4): 551–565.
- Rahman MZA, Gorte B (2008). Individual tree detection based on densities of high points of high resolution airborne data. In *GEOBIA - Pixels, Objects, Intelligence: GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century*, Alberta, Canada (ISPRS), 38: 350-355.
- R Core Team (2015). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <<http://www.R-project.org>>.
- Ribas RP (2011). *Individualização de árvores em ambiente florestal nativo usando métodos de segmentação em modelos digitais produzidos a partir da tecnologia LiDAR*. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 72p.
- Rizzi R, Rudorff BFT (2005). *Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de Imagens Landsat*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. SP. p. 226-234. ISSN 1808-0936.
- Sawtooth National Forest (2012) *Amended Forest Plan*. Recuperado em 13 de Outubro de 2012.
- Silva CA, Crookston NL, Hudak AT, Vierling, LA (2015). *rLiDAR: An R package for reading, processing and visualizing LiDAR (Light Detection and Ranging) data*, version 0.1 <<http://cran.rproject.org/web/packages/rLiDAR/index.html>>.
- Silva CA, Hudak AT, Vierling LA, Loudermilk EL, Brien JJ, Hiers JK, Jack SB, Benecke CG, Lee H, Falkowski MJ, Khosravipour A (2016). Imputation of Individual Longleaf Pine (*Pinus palustris* Mill.) Tree Attributes from Field and LiDAR Data. *Canadian Journal of remote Sensing*, 00:1-20. ISSN: 0703-8992.
- Scolforo JRS, Mello JM. *Inventário florestal* (1997). Lavras: UFPA/FAEPE. 341p.
- Vauhkonen J, Ene L, Gupta L, Heinzel L, Holmgren J, Pitkanen J, Solberg JPS (2012). Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85(1): 27–40.