

Eric Bastos Gorgens<sup>1</sup>, Luiz Carlos Estraviz Rodriguez<sup>1</sup>, André Gracioso Peres da Silva<sup>1</sup>, Carlos Alberto Silva<sup>1</sup>

## IDENTIFICAÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS A PARTIR DE LEVANTAMENTOS LASER AEROTRANSPORTADO POR MEIO DE JANELA INVERSA

Palavras chave:  
LiDAR  
Máximo local  
Modelo digital de alturas

Histórico:  
Recebido 16/05/2012  
Aceito 26/08/2014

Keywords:  
LiDAR  
Local maximum  
Canopy height model

Correspondência:  
gorgens@usp.br

**RESUMO:** O ponto crucial do filtro de máximos locais é a definição do tamanho da janela. Este trabalho propõe que a janela de busca seja determinada por uma relação inversa à altura do modelo digital de alturas e testa a hipótese de que uma janela de busca, inversamente proporcional, terá melhor desempenho do que a janela de busca proporcional. A área de estudo está localizada na região sudeste do Estado de British Columbia, Canadá. A vegetação natural é do tipo boreal e caracteriza-se pela predominância de duas espécies *Picea engelmannii* Parry ex. Engelmann (píceas de Engelmann) e *Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt. (abeto subalpino). O relevo é do tipo ondulado a montanhoso com altitudes que variam de 650 a 2400 metros. Foram lançadas 62 parcelas de campo com 256 metros quadrados. Foi usado um levantamento laser aerotransportado de retornos discretos, com densidade de 2 pontos por metro quadrado e *small-footprint*. As estimativas foram comparadas aos valores observados em campo durante a medição das parcelas. O desempenho das janelas de busca foi avaliado quanto ao percentual de acertos e quanto ao desvio absoluto. O filtro de máximos locais subestimou o número de árvores por hectare, considerando tanto a janela de busca proporcional quanto a inversamente proporcional. A relação inversa para a determinação da dimensão da janela resultou em melhores resultados, especialmente para regiões com maior densidade de árvores.

## INDIVIDUAL TREE IDENTIFICATION IN AIRBORNE LASER DATA BY INVERSE SEARCH WINDOW

**ABSTRACT:** The local maximum filtering performance is highly dependent of the window size definition. This paper proposes that the window size should be determined by an inverse relationship to the canopy height model, and test the hypothesis that a window-size inversely proportional will have better performance than the window proportional to the canopy height model. The study area is located in the southeastern region of the State of British Columbia, Canada. The natural vegetation is the boreal type and is characterized by the dominance of two species *Picea engelmannii* Parry ex. Engelmann (Engelmann spruce) and *Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt. (sub-alpine fir). The relief is mountainous with altitudes ranging from 650-2400 meters. 62 plots with 256 square meters were measured in the field. The airborne LiDAR had discrete returns, 2 points per square meter density and small-footprint. The performance of the search windows was evaluated based on success percentage, absolute average error and also compared to the observed values of the field plots. The local maximum filter underestimated the number of trees per hectare for both window sizing methods. The use of the inverse proportional window size has resulted in superior results, particularly for regions with highest density of trees.

DOI:  
10.1590/01047760201521011535

<sup>1</sup> Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Piracicaba, São Paulo, Brasil

## INTRODUÇÃO

Os dados obtidos por um levantamento laser aerotransportado podem ser processados por meio de duas abordagens. O processamento em nível de povoamento relaciona as métricas extraídas das parcelas com atributos do povoamento como altura dominante, altura total, diâmetro médio, área basal e volume. , no processamento em nível de indivíduo, após a identificação das árvores, atributos do indivíduo como altura e diâmetro de copa são extraídos dos retornos laser e correlacionados com atributos dendrométricos medidos em campo (KAARTINEN et al., 2012). É possível ainda relacionar os valores médios dos atributos extraídos dos retornos laser em nível de indivíduo com os atributos em nível de parcela, como volume, altura dominante, área basal (VASTARANTA, 2012).

Diversos métodos para identificar e isolar árvores já foram descritos em literatura. Leckie (2003) aponta que as árvores poderiam ser identificadas pelo algoritmo de delimitação de vale.

Wang et al. (2004) apresentaram o método de análise morfológica para a detecção de copa. Assumindo que as copas das árvores seguem um padrão de forma conhecido, é possível realizar um procedimento de busca. Cada vez que o padrão é encontrado no modelo digital de alturas, um indivíduo é assinalado.

Ribas (2011) discutiu um método de identificação de árvores denominado de detecção de borda que leva em consideração aspectos de inclinação da superfície de alturas.

No entanto, o método mais comum é o filtro por máximos locais ou algoritmo LMF (*local maxima filtering*) (KE; QUACKENBUSH, 2011). A busca assume como premissa que o retorno mais alto de uma sequência de pulsos que atinjam uma mesma árvore é equivalente ao seu ápice (POPESCU et al., 2002). Dessa forma, ao se analisar um conjunto de pixels do modelo digital de alturas (MDA) delimitados pela janela de busca, e encontrar um ponto central mais alto do que os demais, é possível afirmar que foi identificado o ápice de uma árvore (OLIVEIRA et al., 2012).

O ponto crucial do algoritmo LMF é a definição do tamanho da janela de busca. Popescu et al. (2004) propôs um método para determinar a dimensão da janela de forma proporcional à altura do ponto central. Assume-se, assim, que quanto maior uma árvore representada no modelo digital de altura de copa, maior deverá ser a janela de busca para identificá-la.

Janelas muito grandes resultam com maior frequência em erros de omissão. Por outro lado, sendo a janela muito pequena, maior será o erro de comissão (KE; QUACKENBUSH, 2011).

Este trabalho propõe que a janela de busca seja determinada por uma relação inversa à altura do modelo digital de alturas, assumindo que a altura de uma árvore está relacionada ao sucesso desta, em relação a suas vizinhas na competição pelo fator luz (HOLBROOK; PUTZ, 1989; KING, 1990). Assim, nossa hipótese é de que uma janela de busca inversamente proporcional à altura do modelo digital de copa terá melhor desempenho do que a janela de busca proporcional.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na região sudeste do Estado de British Columbia, Canadá. A vegetação natural é do tipo boreal e caracteriza-se pela predominância de duas espécies: *Picea engelmannii* Parry ex. Engelm (píceas de Engelmann) e *Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt. (abeto subalpino) (COOPS et al., 2010). O relevo varia entre tipo ondulado e montanhoso, com altitude de 650 a 2400 metros.

Foram avaliadas 62 parcelas de campo com 256 metros quadrados, seguindo uma amostragem sistemática, com início aleatório. O número total de árvores nas parcelas de estudo variou de 3 a 39 árvores. O levantamento laser aerotransportado foi do tipo *small-footprint*, discreto, com densidade de 2 pontos por metro quadrado.

O modelo digital de terreno (MDT) foi criado com células de 2 x 2 metros, para as quais foi atribuído o valor médio da elevação dos retornos lasers correspondentes, classificados como solo. A nuvem laser foi, então, normalizada, descontando-se de cada retorno o nível do terreno.

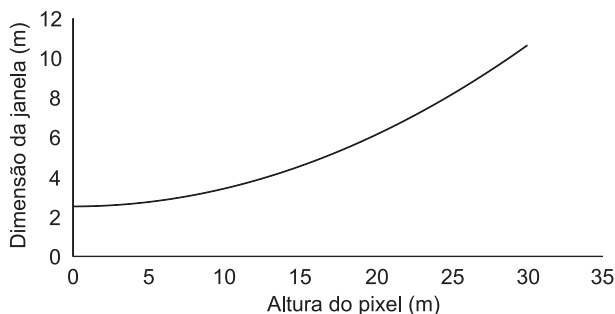
O modelo digital de alturas foi gerado com células de dimensão 0,9 x 0,9 metros, a partir da nuvem de pontos normalizada. O modelo digital de terreno é gerado com base nos pontos classificados como solo. Isso faz com que a quantidade de pontos disponíveis para a criação da superfície seja menor. Assim, uma resolução inferior (2 metros) foi adotada para o MDT.

Cada célula do grid recebe o valor máximo dos pontos da nuvem laser correspondentes à sua área. Um filtro de médias de 7 x 7 pixels foi usado para suavizar a superfície de alturas gerada, reduzindo o efeito de *outliers*, mas mantendo os limites dos objetos.

Popescu et al. (2004) sugerem que a janela de busca para floresta decidual mista de pinus seja definida com base na equação 1, sendo *janela* = janela de busca do algoritmo de máximo local (LMF) e *H* = à altura do modelo digital de alturas.

$$janela = 2,51503 + 0,00901 \cdot H^2 \quad [1]$$

Nessa equação, a dimensão da janela é diretamente proporcional à altura do modelo digital de alturas (Figura 1), uma vez que a janela de busca cresce em função do aumento da altura do pixel central (equação 1).

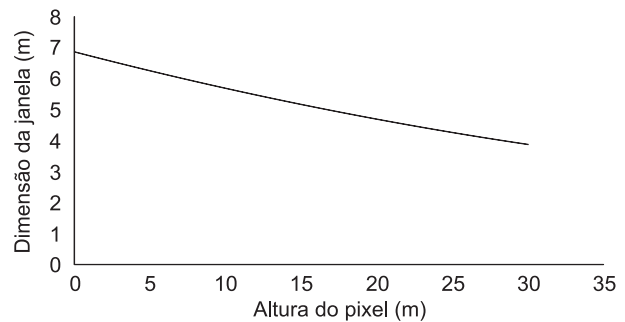


**FIGURA 1** Representação gráfica da equação proposta por Popescu et al. (2004) para determinação da janela, proporcional à altura do modelo digital de alturas.

**FIGURE 1** Graphical representation of the equation proposed by Popescu et al. (2004) for the determination of the window size, proportional to the digital canopy model height.

Propõe-se que seja usada uma relação inversa, em que a janela de busca seja inversamente proporcional à altura do pixel central da janela de busca. Traduzindo uma relação em que a janela de busca seja menor quando a altura da árvore seja maior, conforme a equação 2 (sendo *janela* = janela de busca do algoritmo de máximo local (LMF) e *H* = à altura do modelo digital de alturas). A equação foi determinada, a partir da premissa de que a janela deve variar de 3 a 7 metros dentro da amplitude de alturas encontradas na área de estudo (Figura 2).

$$janela = 6,8607 - 0,1266 \cdot H + 0,0009 \cdot H^2 \quad [2]$$



**FIGURA 2** Representação gráfica da equação proposta por este trabalho para determinação da janela, inversamente proporcional à altura do modelo digital de alturas.

**FIGURE 2** Graphical representation of the equation proposed by this study for the determination of the window size, proportionally inverse of digital canopy model height.

A estimativa realizada por cada um dos métodos será avaliada quanto ao percentual de acerto (equação 3) e quanto ao desvio absoluto (equação 4), sendo *estimado* = número de árvores obtido com aplicação da janela de busca, *observado* = quantidade medida em campo e *n* = número de parcelas.

$$\%acerto = \frac{\sum \left( \frac{estimado}{observado} \right)}{n} \cdot 100 \quad [3]$$

$$Desvio = \frac{\sum (estimado - observado)}{n} \quad [4]$$

Por meio de um teste-t foi testada a seguinte hipótese:  $H_0$ : O número de árvores estimado por um determinado método de janela variável é igual ao número de árvores observadas em campo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ambos os métodos de determinação de janela de busca apresentaram resultados estatisticamente diferentes das observações de campo (Tabela 1). Isso reforça a dificuldade que os métodos de identificação de árvores individuais baseados em janela de busca têm em extrair árvores (CULVENOR, 2002; LAMAR et al., 2005; POULIOT et al., 2002; WANG et al., 2004; WULDER et al., 2000).

**TABELA 1** Comparação entre os métodos de dimensionamento da janela de busca e os valores observados nas parcelas de campo.

**TABLE 1** Comparison between the search window sizing methods and the observed values in the field plots.

Comparação	N arv. médio observado	N arv. médio estimado	Estatística t	Valor p	Significância
Observado vs diretamente prop.	16,4	7,8	4,0836	0,00012	***
Observado vs inversa prop.	16,4	10,5	1,3594	0,01143	**

\*\*\* significativo a 1%. \*\* significativo a 5%.

\*\*\* means significance at 1% and \*\* means significance at 5%.

Os indicadores de desempenho evidenciam que a janela de busca inversamente proporcional apresentou resultados superiores ao modelo proposto por Popescu et al. (2004) que se baseia na busca por janela proporcional (Tabela 2). O percentual de acerto da busca, utilizando a janela inversamente proporcional, apresentou resultados comparáveis às melhores parametrizações encontradas por Wulder et al. (2000), após considerar informações espaciais como diâmetro de copa na determinação da melhor dimensão de janela.

Ambos os métodos subestimam o número médio de árvores. O método da janela proporcional apresentou uma tendência de -8,5 árvores ao passo que o método da janela inversamente proporcional apresentou tendência também negativa, mas menor, de 5,8 árvores.

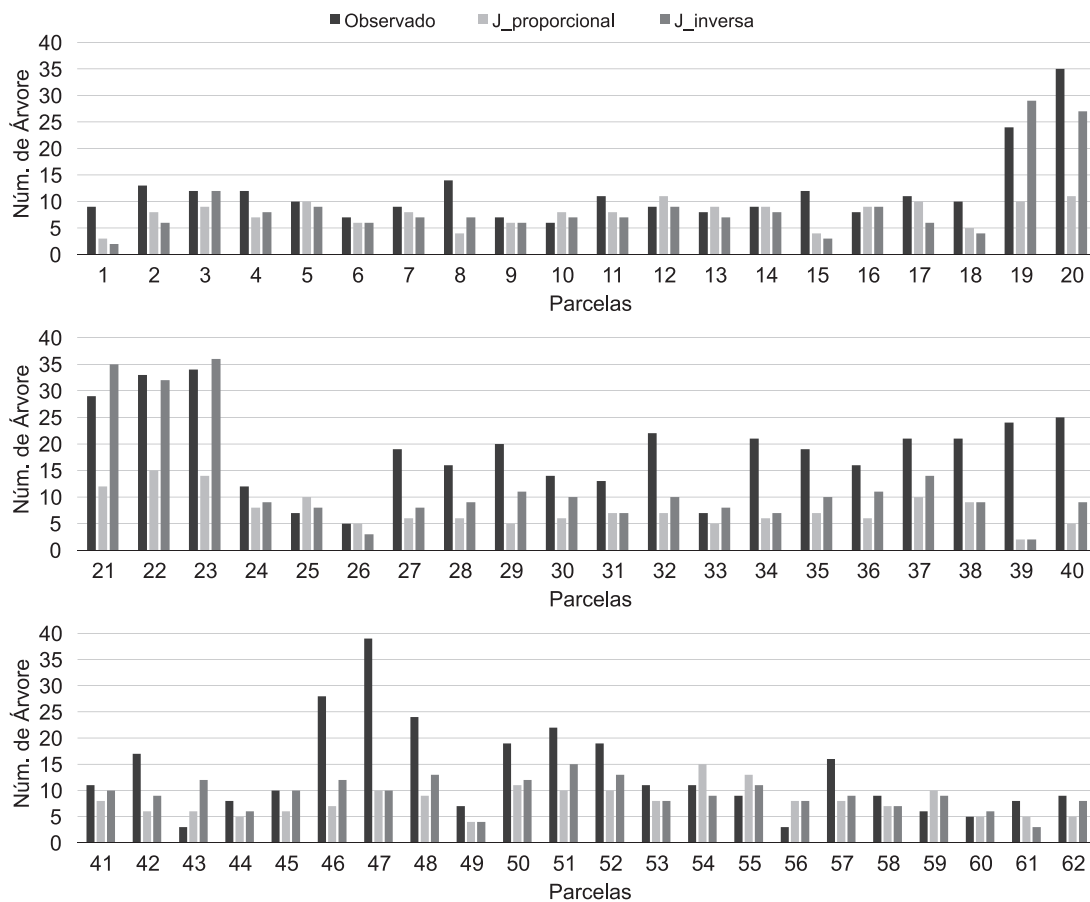
Os resultados individualizados para cada uma das 62 parcelas podem ser vistos na Figura 3. A maior subestimação de ambos os métodos, ocorreu na mesma parcela, obtendo um número total de árvores, 92% inferior ao observado (parcela 39, Figura 3). O método de determinação da janela de forma inversamente proporcional superestimou parcelas com baixo número de árvores (parcelas 43 e 56, Figura 3).

O uso de uma janela de busca proporcional apresentou melhores resultados em parcelas nas quais as árvores eram baixas e esparsas. Nos casos de maior adensamento de árvores, o algoritmo de janela inversa apresentou desempenho superior, com estimativas mais próximas dos valores reais (Figura 4).

**TABELA 2** Percentual de acerto e desvio absoluto médio para cada um dos métodos de dimensionamento da janela de busca.

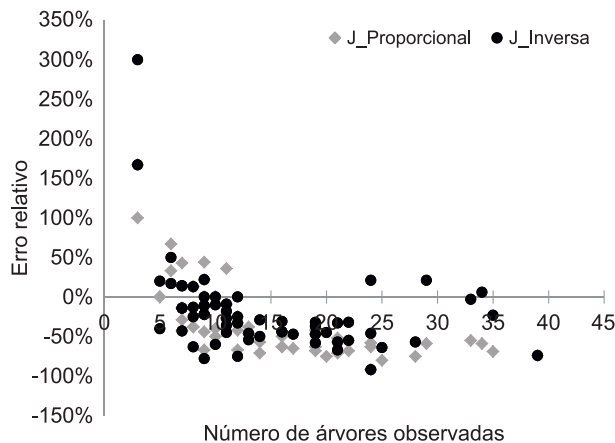
**TABLE 2** Success percentage and absolute error for each window sizing method.

Janela de busca	Percentual de acerto (%)	Desvio absoluto (n°arv)
Proporcional	70%	- 6,8
Inversamente proporcional	81%	- 4,5



**FIGURA 3** Desempenho dos métodos de dimensionamento da janela para as 62 parcelas da área de estudo, em que J\_inversa = Janela Inversamente Proporcional, J\_proporcional = Janela Proporcional, Observado = número de árvores observadas dentro das parcelas em campo.

**FIGURE 3** Performance of the window sizing method for 62 plots in the study area, where J\_inversa = inversely proportional window-size, J\_proporcional = proportional window-size, Observado = number of trees in each field plot.



**FIGURA 4** Desvio percentual na estimativa do número de árvores pelos métodos da janela proporcional (J\_Proportional) e da janela inversa (J\_Inversa) em função do número observado de árvores.

**FIGURE 4** Bias in the number of trees estimated by the window sizing methods (Inversely proportional – J\_Inversa and proportional – J\_Proportional) as function of the observed number of trees.

## CONCLUSÕES

O filtro de máximos locais subestimou o número de árvores por hectare, considerando tanto a janela de busca proporcional quanto a inversamente proporcional. O uso da relação inversa para o dimensionamento da janela apresentou resultado superior, especialmente para regiões com maior densidade de árvores.

A estimação do número de árvores baseados em levantamentos LiDAR continua sendo um desafio. Recomenda-se futuros estudos, utilizando métodos adaptativos que combinem diferentes métodos de dimensionamento de janelas.

## REFERÊNCIAS

COOPS, N. C.; HEMBER, R. A.; WARING, R. H. Assessing the impact of current and projected climates on Douglas-Fir productivity in British Columbia, Canada, using a process-based model (3-PG). **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 3, p. 511-524, Mar. 2010.

CULVENOR, D. S. TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 28, n. 1, p. 33-44, Feb. 2002.

HOLBROOK, N.; PUTZ, F. Influence of neighbors on tree form: effects of lateral shade and prevention of sway on the allometry of *Liquidambar styraciflua* (sweet gum). **American Journal of Botany**, Baltimore, v. 76, n. 12, p. 1740-1749, 1989.

KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; YU, X.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, H.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M.; HEIPKE, C.; HIRSCHMUGL, M.; MORSDORF, F.; NÆSSET, E.; PITKÄNEN, J.; POPESCU, S. C.; SOLBERG, S.; WOLF, B. M.; WU, J. C. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 4, p. 950-974, Mar. 2012.

KE, Y.; QUACKENBUSH, L. A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 32, n. 17, p. 4725-4747, 2011.

KING, D. A. The adaptive significance of tree height. **The American Naturalist**, Salem, v. 135, n. 6, p. 809-828, 1990.

LAMAR, W. R.; MCGRAW, J. B.; WARNER, T. A. Multitemporal censusing of a population of eastern hemlock (*Tsuga canadensis* L.) from remotely sensed imagery using an automated segmentation and reconciliation procedure. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 94, n. 1, p. 133-143, Jan. 2005.

LECKIE, D. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 85, n. 3, p. 355-369, May 2003.

OLIVEIRA, L. T. de; CARVALHO, L. M. T. de; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. de A.; ACERBI JUNIOR, F. W. Application of lidar to forest inventory for tree count in stands of eucalyptus sp. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 175-184, 2012.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 70, n. 5, p. 589-604, 2004.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 37, n. 1/3, p. 71-95, Dec. 2002.

POULIOT, D.; KING, D.; BELL, F.; PITT, D. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 82, n. 2/3, p. 322-334, Oct. 2002.

RIBAS, R. P. **Individualização de árvores em ambiente florestal nativo utilizando métodos de segmentação em modelos digitais produzidos a partir da tecnologia LIDAR**. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

VASTARANTA, M. **Forest mapping and monitoring using active 3D remote sensing**. 2012. 45 p. Dissertations (Master in Forestales) - University of Helsinki, Helsinki, 2012. Disponível em: <<http://www.metla.fi/dissertations/df144.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

WANG, L.; GONG, P.; BIGING, G. S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 3114, p. 351-358, Mar. 2004.

WULDER, M. A.; NIEMANN, K. O.; GOODENOUGH, D. G. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 73, p. 103-114, 2000.