

Varredura a Laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas

Airborne Laser Scanner technology for estimating dendrometric variables

Daniele Felix Zandoná¹, Christel Lingnau², Nelson Y. Nakajima²**Resumo**

Este trabalho propõe uma metodologia para estimativa de variáveis dendrométricas a partir de dados adquiridos com um sistema LSA – Laser Scanner Aerotransportado, para uma área de plantio de *Pinus* localizada na Estação Experimental do Canguiri, de propriedade da Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais, PR. A aquisição de dados de Laser Scanner Aerotransportado (LSA), sistemas baseados na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), constituem ferramenta promissora para determinação de estruturas horizontais e verticais da floresta, estimativas de biomassa florestal e quantificação de carbono. As variáveis dendrométricas, neste caso, foram obtidas por meio do processamento e interpretação dos dados LIDAR, as quais são: a altura individual, área e diâmetro de copa. A extração dessas variáveis foi realizada através de algoritmos para individualização das árvores e delimitação automática das copas, implementados em ambiente de geoprocessamento. Através das características dendrométricas extraídas, como altura total e área de copa, foram estabelecidas correlações e ajustados modelos de regressão para estimar o Diâmetro a Altura do Peito (DAP), por ser uma variável de alta correlação com volume e pela facilidade de ser obtida em campo.

Palavras-chave: LIDAR, Individualização de árvores, Estimativa de variáveis dendrométricas

Abstract

This work presents a methodology for dendrometric variables estimation from data acquired by the ALS (Airborne Laser Scanner) system, Optech ALTM 2050 (Airborne Laser Terrain Mapper). Data are from a *Pinus* forest located at Canguiri Experimental Station, owned by Federal University of Paraná (Pinhais Municipality, PR). The data acquisition through Airborne Laser Scanning – ALS systems, based on LIDAR technology (Light Detection and Ranging), is a promising tool for obtaining vertical and horizontal forest structures, forest biomass estimate and carbon quantification. The dendrometric variables in this work were estimated from LIDAR data, such as: individual height, area and crown diameter. The variables were determined through tree individualization and automatic crown detection, implemented in a GIS (Geographic Information System). From the dendrometric characteristics extracted, such as tree height and crown area, it was possible to determine correlations and regression-adjusted models for estimation of DAP, which is a variable with high correlation with the volume and is easy to be extracted in the field.

Keywords: LIDAR, Tree detection, Dendrometric variables estimating

INTRODUÇÃO

A administração dos recursos florestais, tanto no que se refere ao seu uso econômico, quanto à conservação, requer alta confiabilidade e acurácia das informações espaciais como altura das árvores, densidade e volume do talhão, entre outras. Como a obtenção destas variáveis em campo consome tempo e recursos e, em alguns casos, torna-se inviável pelas dificuldades de acesso, a fotointerpretação e a fotogrametria tem sido extensivamente utilizadas. No entanto, o alto custo de aquisição e interpretação de

fotografias aéreas motivou o estudo de métodos alternativos de sensoriamento remoto. Após décadas de esforços envolvendo o desenvolvimento de novos sensores e metodologias para o processamento de imagens multiespectrais, não houve sucesso considerável em prover medições confiáveis a respeito das características tridimensionais de árvores individuais.

O acesso mais facilitado à informação cria um novo desafio para técnicos e engenheiros: dominar o conhecimento de novos métodos de aquisição de dados e manipular estas informações de modo a gerar resultados confiáveis.

¹Mestre, Pesquisadora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC – do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná - BR 116 - km 98 - Jardins das Américas - Caixa Postal 19.067 – Curitiba, PR - 81531-980 – E-mail: daniele@lactec.org.br

²Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná – Av. Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico – Curitiba, PR - 80210-170 – E-mail: lingnau@ufpr.br; nelson.nakajima@ufpr.br

Os sistemas a laser aerotransportados, baseados na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), permitem a obtenção de informações tridimensionais a cerca da superfície terrestre com alta precisão (POPESCU, 2002). A tecnologia LIDAR utiliza a energia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para medir distância de objetos a um determinado alvo.

Os trabalhos aqui citados indicam que é possível a extração de variáveis dendrométricas como: altura individual e diâmetro de copa a partir dos dados LIDAR, e com isso obter um ganho na precisão das estimativas de volume e biomassa florestal.

Quando se avalia o povoamento florestal sob o ponto de vista de manejo, torna-se necessário conhecer quanto, quando, onde e como será manejado. Através dos dados LIDAR integrados com Sistemas de Informações Geográficas torna-se possível não somente calcular o volume individual da árvore, como também visualizar sua distribuição espacial em todo o povoamento. Estas informações poderão ser utilizadas em modelos de prognose da produção, além de fornecer parâmetros para avaliações sobre o crescimento da vegetação, mapeamento de sítios florestais e estudos de melhoramento de espécies.

Para aplicações em inventário florestal, pode ser citado o trabalho conduzido pela SPENCER B. GROSS INC. (1999), com a finalidade de avaliar a possibilidade de se construir modelos de regressão para estimar características individuais das árvores. Nesse estudo, foram instaladas parcelas em campo, onde foram tomadas as alturas utilizando instrumentos como: *Impulse Laser Rangefinder*, Barr e dendrômetro óptico. Também se mensurou o DAP (diâmetro a altura do peito) e o diâmetro de copa, sendo este tomado em quatro direções. Para o cálculo do volume real foram utilizadas tabelas de volume já definidas para a área que, no referido trabalho, era coberta por florestas de *Douglas fir*. Para comparação dos resultados, os dados medidos em campo foram relacionados aos dados LIDAR. Os valores de altura foram determinados considerando como o ponto mais alto acima do solo em cada copa. Estas foram delineadas manualmente, utilizando como base um mapa de isolinhas equidistantes de 0,5m. Os resultados reportam uma acurácia na estimativa do volume de 91%. As variáveis independentes utilizadas no modelo foram a altura e o diâmetro de copa.

Em relação à detecção automática das copas, o algoritmo mais conhecido para esta finalidade foi desenvolvido pelo Serviço Florestal Canadense (GOUGEON, 1998), podendo-se citar ainda POLLOCK (1998) e LARSEN (1998). ANDERSEN *et al.* (2001) desenvolveram um algoritmo para individualização de árvores através de análise morfológica. Os resultados mostraram-se eficientes quando comparados com fotografias aéreas na escala 1: 3.000. Neste caso, os resultados não foram confrontados com dados de campo. POULIOT *et al.* (2002) apresentaram metodologia para delimitação automática de copas em florestas de coníferas em regeneração, utilizando além de dados LIDAR, câmera digital de alta resolução.

Outras abordagens foram avaliadas para a individualização das árvores, como a segmentação multiresolução hierárquica. AARDT e WYNNE (2006) exploraram esta técnica em florestas de coníferas e folhosas, atingindo uma acurácia de 66% para as coníferas e 56% para as folhosas na modelagem do volume. Para a discriminação entre essas duas classes (coníferas e folhosas), realizou-se uma classificação orientada a objeto que apresentou acurácia de 89%. Tratando da modelagem do volume, pode-se acrescentar o trabalho desenvolvido por MALTAMO *et al.* (2006), com avaliações entre modelos de volume com diferentes variáveis independentes derivadas dos dados LIDAR. Esse trabalho também apresenta uma simulação de redução da densidade de pontos LIDAR, fato este que, segundo os autores, não acarretou perda de precisão nas estimativas volumétricas. Se o número de pulsos laser variarem de 3 a 5 pontos/m² (ou acima) torna-se possível o reconhecimento de árvores individuais (BRANDTBERG, 1998; HYPPA e INKENEN, 1999; PERSSON *et al.*, 2002; POPESCU, 2002; LECKIE *et al.*, 2003).

Estudos compararam alturas derivadas pelos dados LIDAR e medições em campo (NAESSET, 1997a; NAESSET, 1997b; MAGNUSSEN e BOUTDEWYN, 1998; MAGNUSSEN *et al.*, 1999). Algumas pesquisas mostram que em florestas com cobertura de moderada a densa, os sistemas LIDAR apresentam uma tendência a subestimar a altura (NILSSON, 1996; NAESSET, 1997a). Foi observado que a diminuição de frequência de retornos provenientes diretamente do terreno pode degradar os valores derivados para altura (POPESCU, 2002). YOUNG *et al.* (2000) estimaram a altura de um povoamento de *Pinus taeda*. Técnicas de filtragem local e análises em bloco foram utiliza-

das para encontrar o centro geométrico de cada bloco nos dados LIDAR e estes foram assumidos como sendo o topo das árvores. As alturas foram obtidas através da subtração dos modelos interpolados do primeiro e último retorno do pulso. Variações deste método estão presentes em alguns dos trabalhos já mencionados. Os resultados indicam que os dados LIDAR podem produzir boas estimativas de parâmetros biofísicos de um povoamento florestal e estes podem ser utilizados para prever volume ou biomassa.

Este trabalho apresenta uma metodologia para extração de variáveis dendrométricas a partir de dados provenientes de Sensor Laser Aerotransportado, bem como técnicas de processamento de dados e algoritmos específicos para aquisição automática de variáveis como: altura individual e área de copa. Estas variáveis foram utilizadas como variáveis independentes em modelos volumétricos, tendo sua eficiência analisada estatisticamente.

Os objetivos deste trabalho foram: realizar estratificação da vegetação com base nos dados LIDAR e informações provenientes de inventário florestal para alocação das parcelas em campo; validar o algoritmo para individualização das árvores no povoamento e mapeamento de copas; utilizar as variáveis derivadas dos dados LIDAR, como altura total e área de copa, para estimativa do diâmetro a altura do peito (DAP) tendo como valores de referência dados de inventário florestal e medições em campo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido em uma área teste, localizada na Fazenda Experimental do Canguiri, da Universidade Federal do Paraná, município de Pinhais, no estado do Paraná (Figura 1). A área teste consiste de um plantio de *Pinus* sp. de 40 anos de idade, a qual ocupa uma área de 28,9 ha, delimitada pelas coordenadas UTM Fuso 22, datum SAD - 69 (7.191.477m, 688.311m; 7.191.053m, 688.367m; 7.191.053m, 687.438m; 7.191.477m, 687.438m).

Dados LIDAR

Os sistemas LIDAR são considerados sensores ativos, sendo similares ópticos ao RADAR (*Radio Detection and Ranging*). O princípio de funcionamento consiste na emissão de feixe laser em direção à superfície terrestre, onde estes são refletidos pelos obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor. Para cada feixe emitido é registrado o tempo de percurso aeronave - obstáculo - aeronave, permitindo ao sistema realizar o cálculo da distância. Utilizando unidades de medições auxiliares, como o GPS (*Global Positioning System*) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*), que registram a posição e a atitude (rotações) da aeronave durante o vôo, é possível definir a posição tridimensional de pontos na superfície numa fase de pós-processamento.

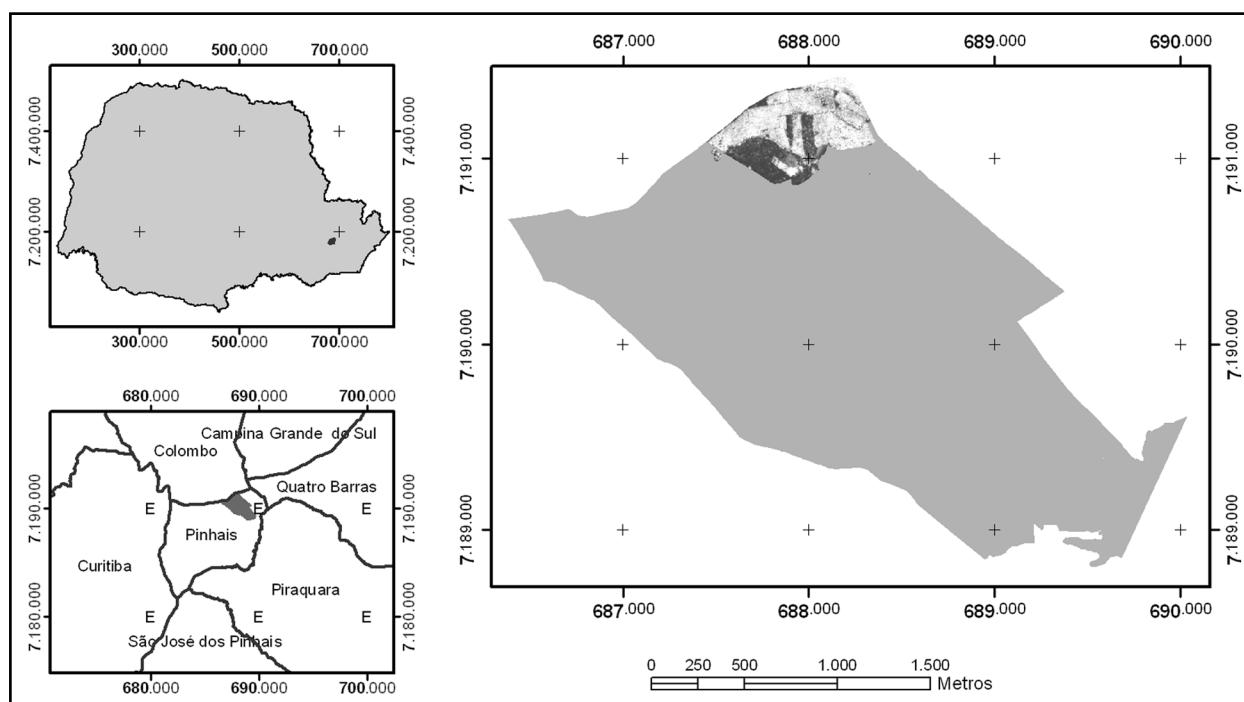
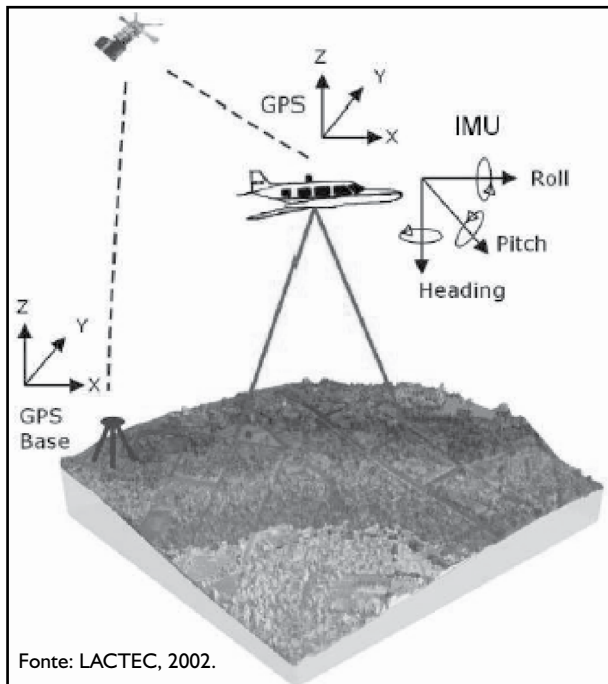


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.
Figure 1. Study site.

A Figura 2 apresenta de forma esquemática os componentes do sistema.



Fonte: LACTEC, 2002.

Figura 2. Componentes do sistema.
Figure 2. System components.

Além das informações descritas, o sistema armazena, para cada ponto mapeado, o valor de reflectância dos materiais alvo. Esses atributos podem ser utilizados para a geração de imagens e mapas temáticos, contribuindo para a identificação e restituição de feições no terreno. É possível, através dessas informações, gerar ortomagens de intensidade e de hipsometria (intensidade combinada com informação altimétrica).

Devido a essas características, esta tecnologia apresenta-se como uma ferramenta proeminente para aquisição de dados topográficos tridimensionais com alta precisão. Em áreas florestais, torna-se possível conhecer a estrutura da vegetação e derivar informações importantes a respeito da cobertura vegetal.

Os dados do projeto foram adquiridos através de um sistema a Laser aerotransportado ALTM 2050 - *Airborne Laser Terrain Mapper*, pelo Lactec - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, para atender ao propósito deste projeto de pesquisa. Os parâmetros do voo e as especificações técnicas do sistema estão apresentados na Tabela 1.

Dados de campo

Para validação da metodologia foram utilizadas as informações disponíveis do Inventário Florestal (SANQUETTA, 2004) além do levantamento de novas parcelas em campo. Os critérios para alocar as

parcelas em campo basearam-se na combinação da classe diamétrica, hipsométrica e densidade (árvores/ha). O número de árvores por hectare foi o parâmetro de maior peso, pois interfere diretamente na precisão da estimativa de altura através dos dados LIDAR. As combinações das classes diamétricas e hipsométricas na estratificação foram incorporadas, no entanto, com um peso menor. Assim, todas as possíveis variações que possam interagir na estimativa hipsométrica ou ainda no mapeamento de copas das árvores puderam ser avaliadas.

Tabela 1. Especificações do voo.
Table 1. Flight settings.

Data do levantamento	15.08.2005
Altura de voo	1200 m
Velocidade de voo	150 km/h
Ângulo de varredura total	15°
Frequência de perfilamento	58.7 Hz
Diâmetro do feixe	0,27 cm
Comprimento de onda do feixe	1024 nm
Precisões	≤ 50 cm na planimetria e ≤ 15 cm na altimetria
Sistema LIDAR	Optech ALTM 2050

Para a determinação precisa das amostras em campo utilizaram-se dois receptores geodésicos (LEICA - System 500, modelo SR-530) e uma estação total. Todas as árvores de cada unidade amostral tiveram suas coordenadas adquiridas com precisão centimétrica, garantindo a correspondência entre as árvores medidas em campo e as identificadas pelos dados LIDAR. Foram instaladas nove parcelas (Figura 3), distribuídas nas cinco classes de densidade, totalizando 186 árvores, para as quais foram medidas além das coordenadas, a circunferência a altura do peito (CAP) e a altura total com o hipsômetro de Haga.

Processamento dos dados LIDAR

Após a coleta dos dados, estes foram submetidos ao processamento, combinando as informações de GPS da aeronave, IMU, GPS de solo e dados LIDAR (ângulos e distâncias). Os dados processados foram classificados em Modelos Digitais de Terreno - MDT e Modelos Digitais de Elevação - MDE. A alta densidade de pontos por unidade de área permitiu uma alta resolução espacial destes modelos, neste caso, utilizou-se tamanho de célula, ou "pixel", equivalente a 20 cm.

Com a subtração algébrica dos modelos (MDE - MDT) obtêm-se o Modelo Digital de Alturas - MDA, o qual é utilizado como dado de entrada para o algoritmo de delimitação de copas. O fluxograma apresentado na Figura 4 ilustra os processos acima descritos.

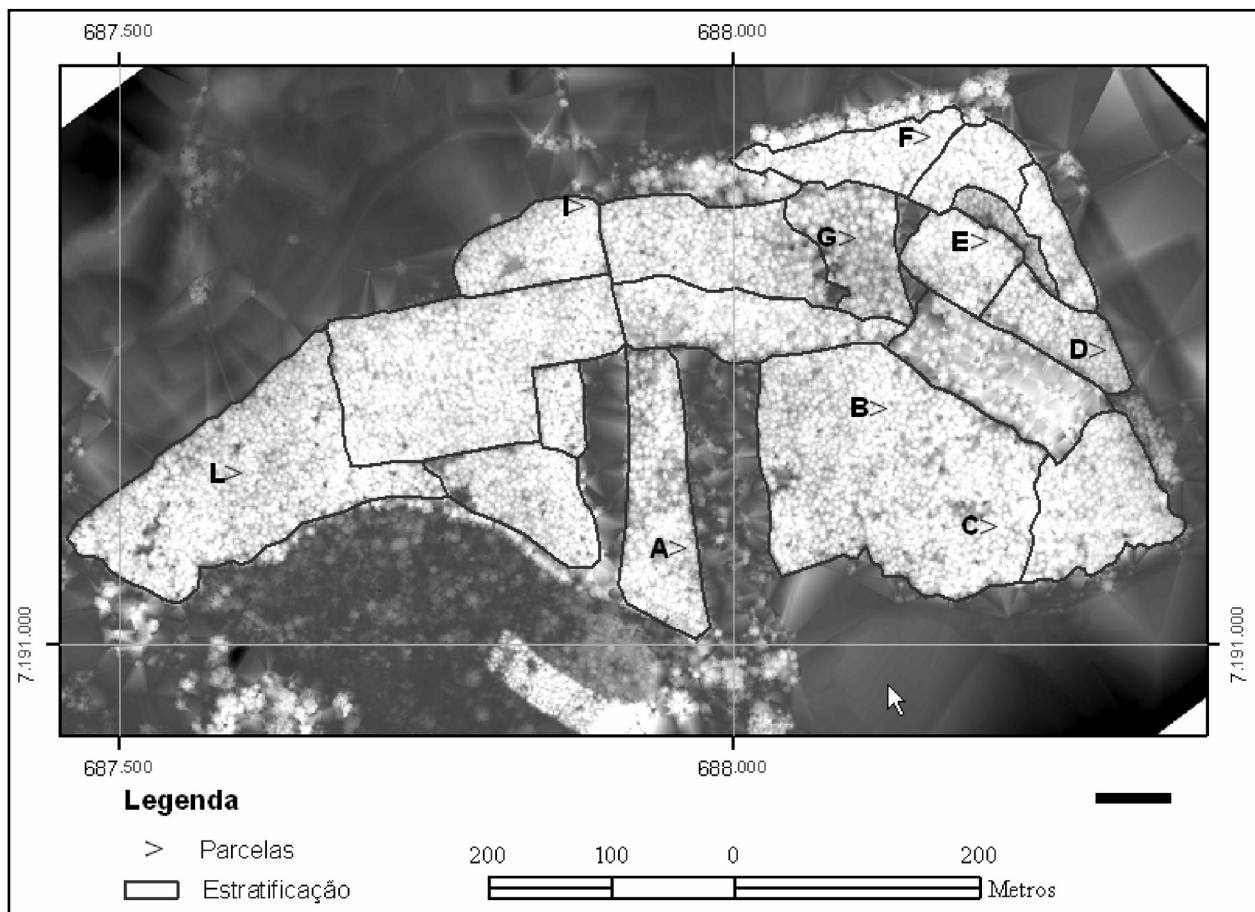


Figura 3. Localização das parcelas em campo por estrato florestal.
Figure 3. Samples field location by forest stratification.

Algoritmos para extração das variáveis dendrométricas

A questão fundamental deste trabalho foi testar a extração de variáveis dendrométricas a partir dos dados LIDAR para estimativas volumétricas. Com o advento dos sistemas comerciais, houve um aumento significativo de estudos empíricos e análises de algoritmos e metodologias que pode ser observado entre os anos de 1999 e 2004 (TIEDE *et al.* 2005).

Os algoritmos que serão detalhados nos itens seguintes, foram implementados no software ArcGIS 9.0 (ESRI) utilizando a linguagem *Visual Basic for Application* - VBA. A escolha adotada no projeto foi pelo desenvolvimento dos algoritmos utilizando *software* de geoprocessamento, uma vez que grande parte das empresas do setor florestal já utiliza esta tecnologia. Deste modo, toda a base de dados e resultados gerados a partir dos dados LIDAR poderá ser utilizada diretamente em um SIG.

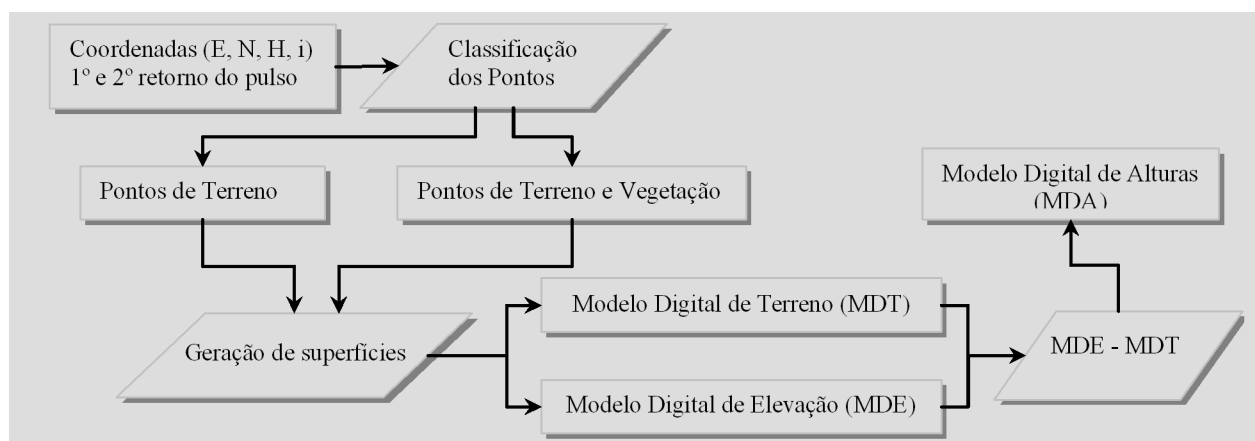


Figura 4. Fluxograma de pós-processamento dos dados LIDAR.
Figure 4. Fluxogram of post-processing LIDAR data.

Reconhecimento e individualização das árvores

Este procedimento é realizado tendo como parâmetros de entrada os dados referentes ao primeiro retorno (coordenadas), que correspondem às reflexões dos topos dos objetos. Para a obtenção da informação de altura, os pontos mapeados são rebatidos no MDA (Modelo Digital de Alturas).

A individualização das árvores foi feita por meio de um algoritmo de máximas locais, que realiza uma pesquisa espacial na nuvem de pontos (Figura 5). Cada ponto, por sua vez, é analisado para uma vizinhança definida em função de um raio de busca variável. Os valores dos máximos locais identificados para cada vizinhança são considerados como topos das árvores.

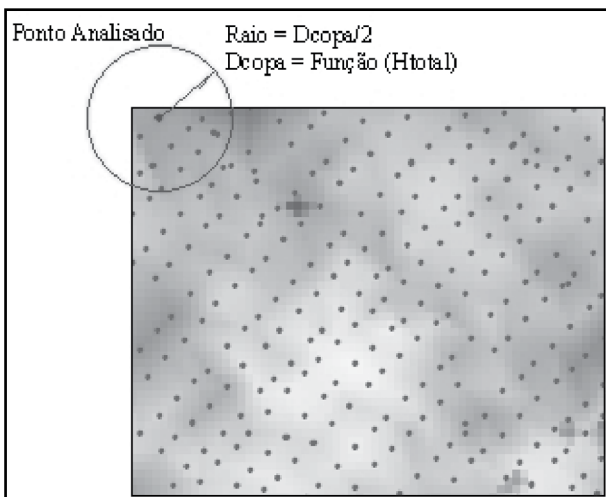


Figura 5. Resultado do algoritmo de individualização das árvores.

Figure 5. Tree detection algorithm results.

A definição do raio de busca é baseada no modelo de regressão (KINI e POPESCU, 2004) que relaciona a variável diâmetro de copa e a altura total individual. O raio de busca equivale a $D_{copa} / 2$.

$$D_{copa} = a + bH_{total}$$

Onde:

D_{copa} = Diâmetro de Copa (m);

H_{total} = Altura Total (m).

Para alimentar esse modelo e obter os valores de diâmetro de copa, utilizou-se uma ortofoto da região de julho de 2004, na escala de 1:10.000. Foram delineadas manualmente 90 árvores distribuídas aleatoriamente em toda a área de estudo. O valor de altura para todas as árvores delineadas foi obtida pelo Modelo Digital de Alturas derivado dos dados LIDAR.

Com base nos dados amostrados, definiram-se os seguintes coeficientes para o modelo de re-

gressão: $a = -0,092187$; $b = 0,125032$ ($R^2_{aj} = 0,40$). Deste modo, o algoritmo estima o diâmetro de copa a partir do valor de altura, com base nos coeficientes ajustados. Este diâmetro de copa é utilizado apenas como raio de busca para o algoritmo de individualização das árvores e não para a estimativa efetiva do diâmetro de copa.

Este algoritmo tende a consumir tempo significativo de processamento, em função do grande volume de dados gerados pelo LIDAR. Existem algumas técnicas para minimizar o tempo computacional que podem ser consideradas, como a filtragem prévia dos dados e a desconsideração de pontos abaixo de uma determinada altura.

Delimitação das copas das árvores

Este processo utiliza o produto do algoritmo de individualização de árvores, que corresponde a um arquivo vetorial (pontos) com a informação da localização do topo das árvores, bem como o MDA - Modelo Digital de Alturas. Os topos das árvores são utilizados como pontos-sementes em um algoritmo de crescimento de regiões (adaptado de TIEDE *et al.* 2005).

Para cada ponto identificado como sendo uma árvore, o algoritmo realiza uma busca no MDA nas oito direções (N, NO, O, SO, S, SE, E e NE). O MDA corresponde a um arquivo do tipo raster (matricial), e cada direção a uma célula retangular que armazena como atributo o valor de altura. Cada célula vizinha é comparada em relação ao topo da árvore e as células, cujos valores de altura forem menores que o topo da árvore, são incluídas como pertencentes à copa (Figura 6).

Para o algoritmo foram estabelecidos três critérios de parada, de modo a evitar inconsistências na geração das copas. Os critérios foram definidos através de análise visual preliminar dos dados LIDAR, os quais são: consideram-se como copa, células cujo valor da altura for maior ou igual a 10 metros; as células cujos valores de altura sejam menores ou iguais a 85% da altura total serão ignoradas; diâmetro de copa máximo deverá ser menor ou igual a 5 metros.

O procedimento é repetido enquanto as condições forem satisfeitas e todas as copas delineadas. O tempo de processamento tende a ser elevado em função do tamanho da célula do raster, neste caso de 20 cm, e do número de árvores identificadas. Embora este seja um aspecto relevante, não foi objeto desta pesquisa a avaliação e otimização dos recursos computacionais.

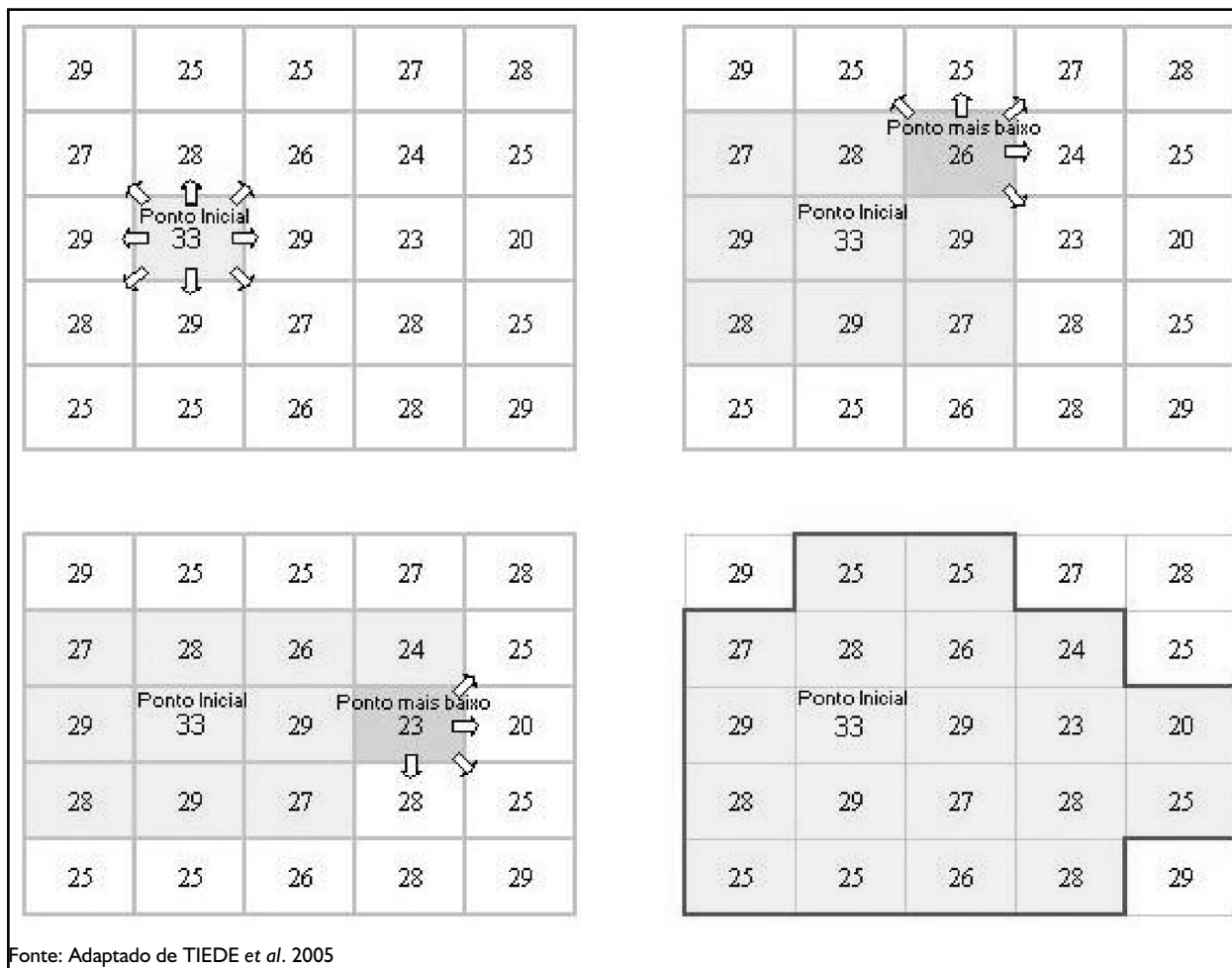
Para a geração das copas, utilizou-se um filtro

de moda retangular (3 x 2), com o objetivo de suavizar a imagem raster, evitando a formação de picos e depressões dentro de uma mesma copa e, neste caso, causando erros na delimitação automática. Estas variações (picos ou depressões) ocorrem em função da alta resolução espacial dos dados, fazendo com que pequenas diferenças de elevação possam ser percebidas.

RESULTADOS

Individualização das árvores

As árvores identificadas automaticamente através do algoritmo de individualização de copas foram comparadas àquelas mensuradas em campo. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.



Fonte: Adaptado de TIEDE et al. 2005

Figura 6. Delimitação das copas das árvores.

Figure 6. Crown delimitation.

Tabela 2. Resultado do algoritmo de individualização das árvores.

Table 2. Tree detection results.

Parcela	Árvores Medidas em Campo		Árvores Individualizadas pelo Algoritmo		Acertos (%)	
	Total	Dominantes	Total	Dominantes	Total	Dominantes
A	16	13	14	12	87,5	92,3
B	21	10	18	9	85,7	90,0
C	18	9	17	9	94,4	100,0
D	26	13	18	12	66,7	92,3
E	20	12	15	11	75,0	91,7
F	15	9	15	9	100,0	100,0
G	10	9	10	9	100,0	100,0
I	32	13	22	13	68,7	100,0
L	27	11	25	11	92,6	100,0
Total	186	99	154	95	82,8	95,9

Nota 1: O total de acerto foi calculado considerando todas as árvores (dominantes, co-dominantes e dominadas) e considerando somente as dominantes.

Nota 2: A parcela H não foi incluída nas análises por ter sido alocada em uma área que sofreu intervenções após o levantamento LIDAR.

Considerando-se todas as parcelas medidas em campo, obteve-se um percentual de acerto de 82,8% incluindo dominantes, co-dominantes e dominadas. Referindo-se somente às dominantes, o percentual de acerto foi de 95,9%. Observa-se que para as parcelas "D", "E" e "I" o algoritmo obteve desempenho inferior, sobretudo quando foram avaliadas todas as árvores. Estas parcelas estão em áreas mais densas, fato este que exerce influência direta na penetração dos feixes Laser no terreno, como já mencionado na revisão de literatura. A identificação das árvores pode ser observada na Figura 7.

Estimativa da variável Altura

Realizou-se a comparação entre as alturas mensuradas em campo e as alturas extraídas dos dados LIDAR. Por questões jurídicas na área, não foi possível a derrubada das árvores para realização de cubagem rigorosa e obtenção das alturas reais, portanto a Tabela 3 apresenta uma comparação relativa entre os métodos de mensuração em campo e através dos dados LIDAR. O resíduo médio foi calculado a partir da diferença entre o valor de cada altura obtida em campo e através dos dados LIDAR, para cada parcela e calculado o valor médio.

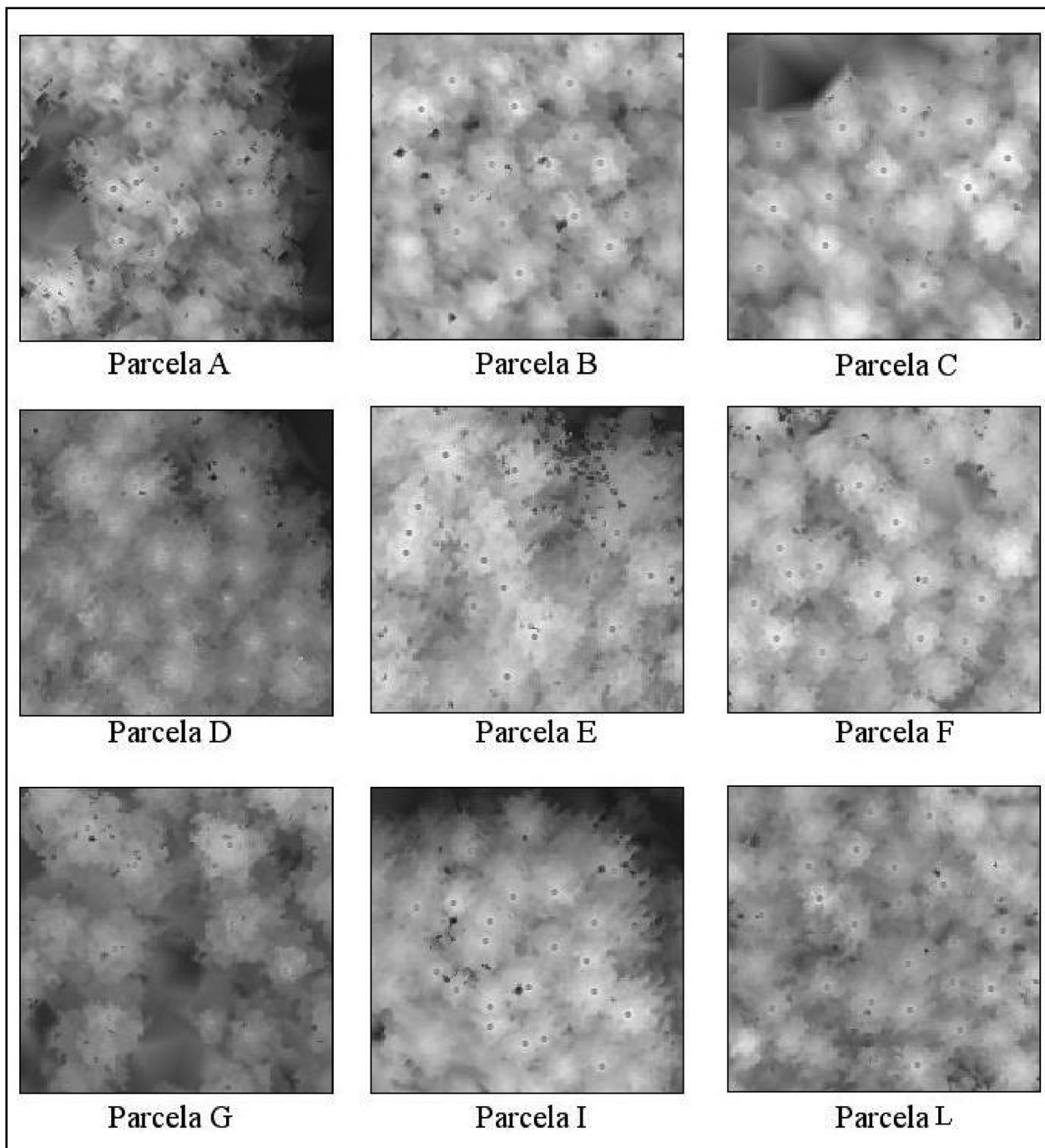


Figura 7. Individualização das árvores.
Figure 7. Tree detection.

Tabela 3. Comparação entre altura medida em campo e extraída dos dados LIDAR.

Table 3. Comparison between field tree height and LIDAR tree height.

Parcela	Altura Média (M)		Resíduos (%)
	Campo	LIDAR	Médio
A	33,87	30,99	7,95
B	34,09	32,66	4,19
C	35,83	32,95	6,92
D	28,15	28,97	0,10
E	32,40	32,08	5,84
F	33,80	32,90	4,17
G	32,00	29,16	8,88
I	31,56	31,78	3,96
L	31,14	30,32	3,75

Observa-se que a média dos valores de altura por parcela medidos em campo são maiores que os estimados pelos dados LIDAR. Esta tendência dos dados LIDAR de subestimar as alturas já foi identificada em outros trabalhos (FRIEDLAENDER e KOCH, 2000; NILSSON, 1996; NAESSET, 1997a). Porém, neste caso, não é possível avaliar a magnitude real absoluta do erro das estimativas de altura, em função da possibilidade de erros advindos da medição com o hipsômetro de Haga.

Delimitação das copas das árvores

Os resultados obtidos foram comparados visualmente através de ortofotos e dos dados LIDAR (Modelo Digital de Alturas) e apresentaram um bom ajuste. Não se realizaram medições das copas em campo em função das dificuldades operacionais de obtenção desta variável. A Figura 8 apresenta o resultado da delimitação das copas das árvores para as parcelas mensuradas.

Estimativa de DAP a partir do diâmetro de copa

Uma das características da tecnologia LIDAR é a obtenção de informações acerca da estrutura das copas das árvores e a mensuração precisa da altura. Grande parte do esforço desta pesquisa foi, justamente, o desenvolvimento de metodologias para extração de variáveis dendrométricas, que apresentassem alta correlação com o volume individual.

Partindo-se da premissa que o DAP é a variável que melhor explica o volume e que esta variável não pode ser obtida diretamente dos dados LIDAR, foram ajustados modelos para estimar o DAP em função de variáveis possíveis de serem obtidas pelo LIDAR, como a área de copa e a altura total.

Utilizando como variáveis independentes as informações derivadas dos dados LIDAR, tem-se que:

$$DAP' = f(\text{AreaCopa}, H_{\text{laser}})$$

Onde:

DAP' = DAP estimado

AreaCopa = área de copa

H_{laser} = altura total

Os modelos relacionando a variável DAP medida em campo foram ajustados com as variáveis: Área de Copa, H_{laser} e transformações destas (aplicação de logaritmo, elevação da variável ao quadrado, ou ao cubo e produto cruzado). Com auxílio do software *Statgraphics*, foram selecionados os conjuntos de variáveis mais significativos determinados através da análise de variância.

Quando se realizou o ajuste global, considerando todas as árvores mensuradas, observaram-se árvores com valores discrepantes (*outliers*). Esses valores fizeram com que o modelo global não se ajustasse adequadamente ao conjunto de dados, optando-se pelo ajuste dos modelos por estrato. Estes estratos foram definidos por meio de interpretação das imagens (ortofoto e MDA) e este procedimento mostrou-se necessário em função da heterogeneidade do plantio, sobretudo em relação à densidade do povoamento.

A Tabela 4 apresenta as equações ajustadas por parcela e os parâmetros estatísticos calculados para cada modelo: Coeficiente de Determinação ajustado (R^2_{aj}) e Erro Padrão da Estimativa percentual (S_{yx} %), recalculado quando necessário.

Observa-se que os resíduos estão bem distribuídos para toda a amplitude de DAP. A análise dos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 4 mostra valores de R^2_{aj} superiores a 0,67 para todas as parcelas, exceto B e C que apresentaram IA (Índice de Schlaegal) igual a 0,43. O erro padrão da estimativa foi inferior a 10% para todas as parcelas, exceto para a parcela E, que apresentou erro igual a 12,53%.

As Parcelas B e C apresentaram valores baixos para o R^2_{aj} e IA, entretanto o erro ficou abaixo de 10%. Isso ocorreu em função dos valores estimados estarem muito próximos dos valores médios, dada à pequena variabilidade na amplitude dos valores de DAP, como pode ser observado graficamente na Figura 9. Para a garantia da eficiência do modelo ajustado para este estrato, os dados coletados de DAP deveriam ser mais abrangentes.

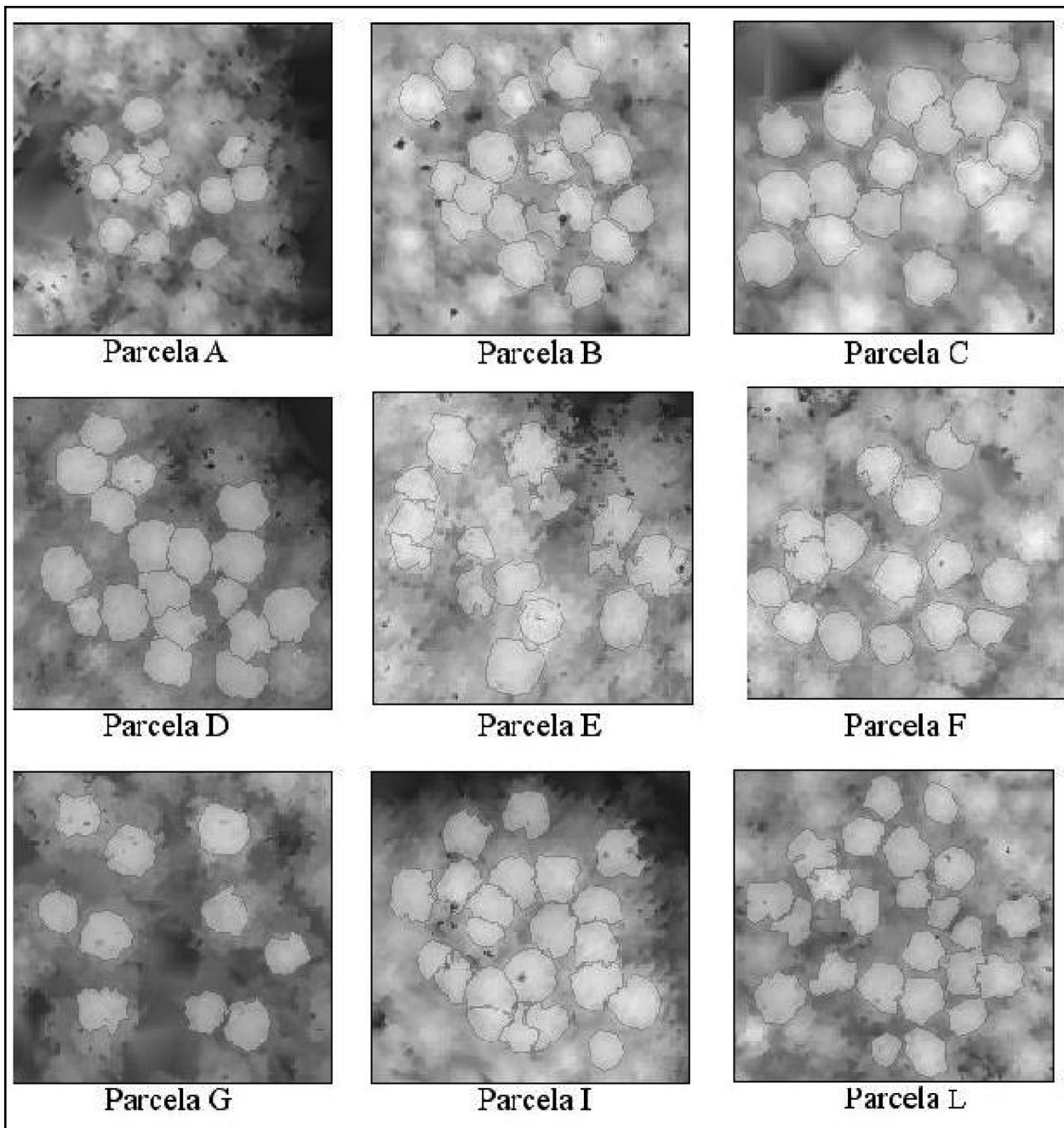


Figura 8. Delimitação das copas das árvores por meio da tecnologia LIDAR.
Figure 8. Crown delimitation.

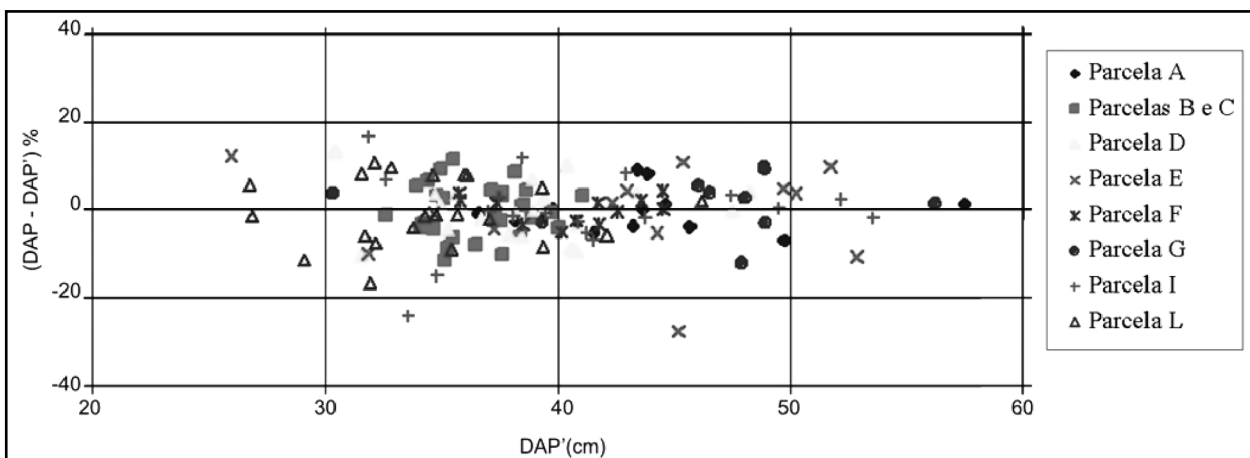


Figura 9. Análise gráfica dos resíduos de regressão.
Figure 9. Regression residuals analysis.

Tabela 4. Parâmetros ajustados para estimativa de DAP.
Table 4. Adjusted parameters for estimating DBH.

Parcela	Parâmetros Estimados	R^2_{aj}	S_{yx} %	Parcela	Parâmetros Estimados	R^2_{aj}	S_{yx} %		
A	Constante (b_0)	-23891.900	0.73	6.96	F	Constante (b_0)	3052.090		
	HLaser	101.733				AreaCopa	307.289		
	AreaCopa	-207.278				InAreaCopa	-2417.410		
	InHLaser	-3064.300				AreaCopa ²	-4.789		
	InAreaCopa	7933.920			G	Constante (b_0)	-8429.040	0.73	8.51
1/InAreaCopa	34986.400	HLaser	-304.071						
Constante (b_0)	-1909.960	InHLaser	4478.950						
B,C	HLaser	14.027	0.43	6.13	HLaser ²	2.579			
	1/InHLaser	5175.770			I	Constante (b_0)	7420.440	0.73	8.71
	AreaCopa ²	0.016				HLaser	109.567		
D	Constante (b_0)	-49079.500	0.73	6.49	AreaCopa	-150.235			
	HLaser	-2045.680			InHLaser	-3400.080			
	InHLaser	27461.300			InAreaCopa	-1990.920			
	InAreaCopa	15.155			AreaCopa ^{1/2}	2205.920			
E	HLaser ²	18.942	0.67	12.53	L	Constante (b_0)	34573.900		
	Constante (b_0)	114.423				HLaser	106.670		
	AreaCopa	43.323				AreaCopa	16.520		
	HLaser ²	0.082				InAreaCopa	-116.770		
	InAreaCopa	-210.825				InHLaser	-6989.830		
AreaCopa ²	-1.040	1/InHLaser	-46449.900						
					1/InAreaCopa	-240.270			

R^2_{aj} = Coeficiente de Determinação ajustado; S_{yx} % = Erro Padrão da Estimativa percentual.
 HLaser = Altura das árvores obtida via dados LIDAR; AreaCopa = Área de copa obtida via dados LIDAR.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram que, com a tecnologia LIDAR é possível a identificação de árvores individuais com alta precisão, sobretudo as árvores que se encontram no dossel superior (dominantes e co-dominantes), onde o acerto médio incluindo todas as árvores foi de 82,8%. Observou-se também que o fator densidade do povoamento interfere na eficiência do algoritmo, fato este já observado em outros trabalhos relatados na revisão de literatura.

Este estudo, embora inicial, mostrou a viabilidade técnica da utilização da tecnologia LIDAR para estimativa de variáveis dendrométricas. Os resultados preliminares são promissores, no entanto, novos estudos devem ser incentivados para o aprimoramento da metodologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, pelo suporte técnico e financeiro a este projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARDT, J.A.N.; WYNNE, R.H. A multi-resolution approach to forest segmentation as a precursor to estimation of volume and biomass by species. Blacksburg: ASPRS, 2006. 241p.
- ANDERSEN, H.; REUTEBUCH, S.E.; SCHREUDER, G.F. Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LiDAR-based canopy surface model. In: INTERNATIONAL PRECISION COOPERATIVE SYMPOSIUM, 1, Washington, 2001. **Proceedings...** Washington, 2001.
- BRANDTBERG, T. Algorithms for structure-and contour-based tree species classification using digital image analysis. In: HILL, D.A.; LECKIE, D.G. (Eds.) **Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery of Forestry.** Victoria: Pacific Forestry Centre, 1998. p.199-207.
- FRIEDLAENDER, H.; KOCH, B. First experience in the application of laser scanner data for the assessment of vertical and horizontal forest structures. Amsterdam: IAPRS, 2000. v.33.

- GOUGEON, F. Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and a rule-based system. In: INTERNATIONAL FORUM ON AUTOMATED INTERPRETATION OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL IMAGERY FOR FORESTRY, 1998, Victoria. **Proceedings...** Victoria: Pacific Forestry Centre, 1998.
- HYPPA, J.; INKINEN, M. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. **Photogrammetric Journal of Finland**, Helsinki, v.16, p.27-42, 1999.
- KINI, A.; POPESCU, S.C. TreeVaW: a versatile tool for analyzing forest canopy LiDAR data: a preview with an eye towards future. In: ASPRS 2004 Fall Conference, 2004, Kansas City. **Proceedings...** CD-ROM.
- LARSEN, M. Finding an optional match window for spruce top detection based on an optical tree model. In: INTERNATIONAL FORUM ON AUTOMATED INTERPRETATION OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL IMAGERY FOR FORESTRY, 1998, Victoria. **Proceedings...** Victoria: Pacific Forestry Centre, 1998.
- LECKIE, D.L.; GOUGEON, F.; HILL, D.; QUINN, R.; ARMSTRONG, L. Combined high-density LiDAR and multispectral imagery for individual tree crown analysis. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.29, p.633-649, 2003.
- MAGNUSSEN, S.; BOUDEWYN, P. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.28, p.1016-1031, 1998.
- MAGNUSSEN, S.; EGGERMONT, P.; LARICCIA, V. N. Recovering tree heights from airborne laser scanner data. **Forest Science**, Bethesda, v.45, n.3, p.407-422, 1999.
- MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PACKALÉN, P.; HYYPPÄ, J. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. **Forestry**, Oxford, v.79, n.2, p.217-229, 2006.
- NAESSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.52, p.49-56, 1997a.
- NAESSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.246-253, 1997b.
- NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.56, p.1-7, 1996.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J.; SÖDERMAN, U. Detecting and measuring individual tree using an airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v.68, p.925-932, 2002.
- POLLOCK, R. Individual tree recognition based on a synthetic tree crown image model. In: HILL, D.A.; LECKIE, D.G. (Eds.) **Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry**. Victoria: Pacific Forestry Centre, 1998. p.25-34.
- POPESCU, S.C. **Estimating plot-level forest biophysical parameters using small-footprint airborne LiDAR measurements**. 2002. 115p. Tese (Doutorado em Floresta) - Virginia Tech. Department of Forestry, Blacksburg, 2002.
- POULIOT, D.A.; KING, D.J.; BELL, F.W.; PITT, D.G. Automated tree crown detection in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.82, p.322-334, 2002.
- SANQUETTA, C.R. **Inventário florestal de povoamento de Pinus sp. na região de Pinhais, PR: relatório técnico**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004.
- SPENCER B. GROSS INC. **Final report: can small-footprint LIDAR be used to predict individual tree characteristics?** Mississippi, 1999. (Relatório Técnico).
- TIEDE, D.; HOCHLEITNER, G.; BLASCHKE, T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: Stilla, U.; Rottensteiner, F.; Hinz, S. (Eds) **3D city models, road databases, and traffic monitoring: concepts, algorithms, and evaluation**. Vienna: IAPRS, 2005.
- YOUNG, B.; EVANS D.L.; PARKER, R.C. Methods for comparison of LIDAR and field measurements of loblolly pine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2, 2000, Lake Buena Vista. **Proceedings...** Lake Buena Vista, 2000.

Recebido em 20/11/2007

Aceito para publicação em 05/02/2009