

Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada

An estimate of biometric parameters in eucalyptus clone plantations in Southern Bahia: an application of the airborne laser scanning (ALS) technology

Matheus Felipe Zonete¹, Luiz Carlos Estraviz Rodriguez² e Petteri Packalén³

Resumo

A aplicação da tecnologia laser aerotransportada (ALS – airborne laser scanning) em inventários florestais tem mostrado grande potencial para melhorar a eficiência das atividades de planejamento florestal. Estimativas precisas, velocidade e relativamente baixa complexidade podem explicar os bons resultados em termos de eficiência. A evolução das tecnologias GPS e dos Sistemas de Medição Inercial (SMI), e o menor custo dos levantamentos quando essas tecnologias são aplicadas em estudos de grande escala, explica a disseminação de tecnologias ALS. A boa qualidade dos resultados pode ser expressa por estimativas para volumes e área basal com erro estimado abaixo do nível de 8,4%, dependendo da área amostrada, quantidade de pulsos por metro quadrado e de produzir certas estatísticas de inventário florestal para um plantio clonal de *Eucalyptus* spp com precisão igual ou superior a métodos convencionais. As estatísticas de interesse neste caso foram: volume, área basal, altura média e altura média das árvores dominantes. O voo para o levantamento ALS cobriu duas faixas de aproximadamente 2 por 20 km, nas quais nuvens de pontos foram amostradas em parcelas circulares de raio igual a 13 m. As parcelas foram amostradas em diferentes partes das faixas para cobrir diferentes idades dos talhões. Para as nuvens de pontos geradas pelo levantamento ALS calcularam-se: média geral das alturas, desvio padrão, cinco percentis (altura até a qual se acumulam 10%, 30%, 50%, 70% e 90% dos pontos acima do nível do solo na nuvem de pontos gerada pelo levantamento ALS), e densidade de pontos acima do nível do solo em cada percentil. As estatísticas ALS foram utilizadas em modelos de regressão para estimar diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume. Parcelas convencionais de inventário florestal geraram os dados reais. Para volume, uma avaliação exploratória envolvendo diferentes estatísticas ALS permitiu a definição das relações mais promissoras e testes de regressão de conhecidos modelos florestais biométricos. Os modelos baseados em estatísticas ALS que resultaram nos melhores ajustes utilizaram: o percentil 30% para estimar diâmetro médio ($R^2=0,88$ e $REQM=0,0004$); os percentis 10% e 90%, para estimar altura média ($R^2=0,94$ e $REQM=0,0003$), o percentil 90% para estimar altura dominante ($R^2=0,96$ e $REQM=0,0003$); o percentil 10% conjuntamente com altura média dos pontos ALS para estimar área basal ($R^2=0,92$ e $REQM=0,0016$); e idade e percentis 30% e 90% para estimar volume ($R^2=0,95$ e $REQM=0,002$). Já, dentre os modelos florestais biométricos testados, os melhores foram os de Schumacher modificado para idade e percentil 90%; Clutter modificado para idade, altura média dos pontos ALS e percentil 70%; e Buckman modificado para idade, altura média dos pontos ALS e percentil 10%.

Palavras-Chave: LiDAR, Laser aerotransportado, Inventário florestal, Modelo biométrico, Planejamento florestal

Abstract

The application of airborne laser scanning (ALS) technologies in forest inventories has shown great potential to improve the efficiency of forest planning activities. Precise estimates, fast assessment and relatively low complexity can explain the good results in terms of efficiency. The evolution of GPS and inertial measurement technologies, as well as the observed lower assessment costs when these technologies are applied to large scale studies, can explain the increasing dissemination of ALS technologies. The observed good quality of results can be expressed by estimates of volumes and basal area with estimated error below the level of 8.4%, depending on the size of sampled area, the quantity of laser pulses per square meter and the number of control plots. This paper analyzes the potential of an ALS assessment to produce certain forest inventory statistics in plantations of cloned *Eucalyptus* spp with precision equal of superior to conventional methods. The statistics of interest in this case were: volume, basal area, mean height and dominant trees

¹Engenheiro Florestal da Savcor Forest Group - E-mail: matheus.zonete@savcor.com

²Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo - Caixa Postal 09 - Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: luiz.estraviz@esalq.usp.br

³Senior Researcher at Faculty of Science and Forestry at University of Eastern Finland - P.O. Box 111 - FI 80101 Joensuu - Finland - E-mail: Petteri.Packalen@uef.fi

mean height. The ALS flight for data assessment covered two strips of approximately 2 by 20 Km, in which clouds of points were sampled in circular plots with a radius of 13 m. Plots were sampled in different parts of the strips to cover different stand ages. The clouds of points generated by the ALS assessment: overall height mean, standard error, five percentiles (height under which we can find 10%, 30%, 50%, 70% and 90% of the ALS points above ground level in the cloud), and density of points above ground level in each percentile were calculated. The ALS statistics were used in regression models to estimate mean diameter, mean height, mean height of dominant trees, basal area and volume. Conventional forest inventory sample plots provided real data. For volume, an exploratory assessment involving different combinations of ALS statistics allowed for the definition of the most promising relationships and fitting tests based on well known forest biometric models. The models based on ALS statistics that produced the best results involved: the 30% percentile to estimate mean diameter ($R^2=0,88$ and $MQE\%=0,0004$); the 10% and 90% percentiles to estimate mean height ($R^2=0,94$ and $MQE\%=0,0003$); the 90% percentile to estimate dominant height ($R^2=0,96$ and $MQE\%=0,0003$); the 10% percentile and mean height of ALS points to estimate basal area ($R^2=0,92$ and $MQE\%=0,0016$); and, to estimate volume, age and the 30% and 90% percentiles ($R^2=0,95$ $MQE\%=0,002$). Among the tested forest biometric models, the best fits were provided by the modified Schumacher using age and the 90% percentile, modified Clutter using age, mean height of ALS points and the 70% percentile, and modified Buckman using age, mean height of ALS points and the 10% percentile.

Keywords: LIDAR, Airborne laser scanning, Forest inventory, Biometric model, Forest planning

INTRODUO

A utilizao racional dos recursos florestais tem motivado o uso de dados de sensoriamento remoto não apenas como uma ferramenta de controle e fiscalizao, mas também como suporte aos inventários florestais, cujos resultados têm contribuído para estudos que vão desde emissões globais de carbono às análises quantitativas locais de biomassa madeireira. Desta forma, o desenvolvimento contínuo da tecnologia espacial, com a disponibilidade de imagens de distintas característics, aliado ao desenvolvimento de técnicas de extrao de informaes, tem permitido o acompanhamento contínuo das condies dos variados ecossistemas florestais, facilitando seus inventários (MACEDO, 2009).

Informaes confiáveis do crescimento e da produo dos povoamentos são essenciais para o planejamento das atividades de manejo florestal. Além da capacidade de estimar custos e receitas, a análise de diferentes estratégias de manejo florestal requer a estimativa do crescimento e da produo. Como as florestas constituem sistemas biológicos dinâmicos que estão continuamente mudando, os modelos de crescimento e produo são necessários para projetar essas mudanças e fornecer informaes relevantes para auxiliar nas tomadas de decisões.

Dessa forma, o Inventário Florestal pode ser considerado a base para o planejamento do uso dos recursos florestais. Através dele é possível a caracterizao de uma determinada área e o conhecimento quantitativo e qualitativo da cobertura florestal que a compõe. Dependendo da escala do inventário florestal, modernas técnicas

de sensoriamento remoto têm-se apresentado como alternativas capazes de substituir certas operaes de campo normalmente associadas com altos custos. Dentre essas técnicas, equipamentos baseados em emissões de laser são hoje cada vez mais acessíveis.

A primeira aplicao florestal de uma técnica denominada varredura com laser aerotransportado (do inglês Airborne LASER Scanning - ALS) teve sua aplicao registrada por Solodukhin *et al.* (1977, apud NSSET, 2004), que comparou estimativas fotogramtricas da altura das árvores com estimativas a laser encontrando raiz do erro quadrático médio de apenas 14 cm. Ainda segundo Nsset (2004), ao relatar a evoluo das aplicaes ALS nos países nórdicos, os primeiros estudos no Canadá e EUA parecem já na década seguinte com os trabalhos de Nelson *et al.* (1984), Aldred e Bonnor (1985) e Maclean e Krabill (1986).

A utilizao da tecnologia ALS em inventários florestais explora as característics da nuvem de pontos resultantes da interceptao dos feixes de laser registradas por um sensor que, com alta precisão, determina a altura dessas interceptaes em relao à superfície da terra. Hollaus *et al.* (2007), ao aplicar a tecnologia ALS para determinao do volume de toras em condies montanhosas de florestas alpinas, destaca a importância de se investigar modelos que mais adequadamente expressem os reais parâmetros geofísicos florestais a partir da nuvem de pontos gerada pelo ALS.

Vários estudos têm indicado que as variáveis florestais, tais como altura média, área basal e volume, podem ser preditas com boa precisão

usando-se dados de ALS (NÆSSET *et al.* 2004) e, por isso, essa técnica já vem sendo utilizada operacionalmente em inventários em nível de talhão. Com relação às características gerais dos talhões, tais como volume e área basal total, as estimativas resultam ainda melhores do que aquelas obtidas nos inventários convencionais em campo (NÆSSET, 2004).

Há duas principais abordagens para obtenção de informações florestais a partir da tecnologia ALS: uma que trabalha com a distribuição da altura do dossel (geralmente aplicada para baixa resolução de dados) e a abordagem baseada na árvore individual (normalmente aplicada para dados de alta resolução). Na abordagem da distribuição da altura do dossel, as características florestais de interesse são estimadas usando-se quantis e percentis da distribuição da altura do dossel, dada uma área fixa (NÆSSET, 2004) e algumas parcelas amostrais em campo para efeito de ajuste dos dados medidos. Em seguida, modelos de regressão são construídos para estimar as variáveis de interesse dos talhões (volume, área basal, altura média e diâmetro).

Em uma análise de vários estudos sobre ALS, Næsset (2007) verificaram que para variáveis como volume e área basal o erro percentual das estimativas geradas pelo ALS chega no máximo a 8,4%, dependendo da área amostrada, quantidade de pulsos por metro quadrado e do número de parcelas de controle.

Outros estudos, utilizando-se de equações empíricas que descrevem a relação entre a nuvem de pontos coletada por levantamentos ALS e as medições de campo, procuram obter estimativas para altura média, altura dominante, diâmetro médio, área basal, volume e densidade. Dentre esses estudos, destacam-se: Næsset (2002), Næsset (2004), Gobakken e Næsset (2009) e Hollaus *et al.* (2007).

Importante destacar também os resultados obtidos por Macedo (2009), que desenvolveu um algoritmo para a obtenção de variáveis dendrométricas em uma floresta de eucalipto clonal no município de Igaratá, SP. Dentre o percentual de acerto do algoritmo desenvolvido destacam-se: 96,48% para quantidade de árvores, 97,74% para altura, 116,55% para área de copa, 105,33% para DAP e 98,2% para volume.

No trabalho desenvolvido por Packalén (2006), que comparou estimativas de volume obtidas a partir de fotos aéreas com estimativas de levantamento ALS, a raiz do erro quadrático médio foi de apenas 5,89%.

A viabilidade técnica da aplicação da tecnologia ALS em florestas de *Pinus* spp para determinação de variáveis dendrométricas pode também ser demonstrada pelo trabalho de Zandoná (2006) na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná em Pinhais, PR. Nesse trabalho, a identificação de indivíduos ocorreu com alta precisão, sobretudo daqueles que se encontravam no dossel superior (dominantes e co-dominantes), onde o acerto médio foi de 82,8%. O mesmo trabalho revela boa predição da variável DAP em função da superfície da copa e altura, com valores percentuais mínimos e máximos da raiz do erro quadrático médio entre 3,44% e de 12,53%.

Além da viabilidade técnica da tecnologia ALS, o trabalho de Yu (2004) analisou o custo da varredura a laser, que se mostrou bastante rápido devido à automação das atividades, mas bastante dependente do tamanho e da forma da área de estudo. O custo médio nesse estudo variou entre 2 a 5 € por hectare, inferior aos custos do inventário florestal convencional em parcelas permanentes estimados em cerca de 100 € por hectare em florestas temperadas.

O trabalho e os resultados obtidos por Zonete (2009) constituem a base deste artigo. O tema principal é a utilização da tecnologia ALS como forma alternativa ao inventário florestal convencional, para a obtenção das variáveis de diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume em plantios clonais de *Eucalyptus* spp no sul do estado da Bahia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no sul do Estado da Bahia, uma das áreas comparativamente mais produtivas para o crescimento e formação de plantios de espécies do gênero *Eucalyptus*, e que conta atualmente com mais de 400 mil hectares plantados segundo dados da ABRAF (2009).

A área de estudo, dividida em duas faixas de 2km x 20km, está localizada entre os paralelos 16° e 17° de latitude sul e 39 e 39°30' de longitude oeste. O relevo nessa área não tem tanta influência no clima da região e pode ser caracterizado como suavemente ondulado, variando de 50 a 200m de altitude. Segundo a classificação de Köppen a região se enquadra o tipo climático Af, que significa clima tropical quente e úmido com cobertura de floresta, as temperaturas médias mensais são superiores a 18°C e não há um só mês com índice pluviométrico médio inferior a 60mm.

Levantamento e processamento dos dados de campo

A coleta dos dados de campo para efeito de ajuste dos modelos de interesse ocorreu entre 12 de agosto de 2008 e 15 de setembro 2008. No total foram utilizadas 188 parcelas circulares em 59 talhões, os quais foram plantados entre 1996 e 2006. Foram usadas parcelas circulares de 13 metros de raio, não sobrepostas. Essas parcelas foram alocadas previamente, mantendo-se a proporo mínima de quatro parcelas por talhão. A Tabela 1 resume as principais variáveis florestais observadas nessas parcelas amostrais.

A área média dos talhões medidos foi de 24,81ha, com desvio padrão de 15,78ha. Para a alocao do centro da parcela utilizou-se o GPS Trimble GeoXTR SBAS com correo em tempo real. Foram anotados: número da Parcela; Ponto X; Ponto Y; Número da árvore; Dados qualitativos; CAP (utilizando-se fita métrica); Altura em dm a cada sete árvores.

Esses dados foram transcritos das pranchetas de campos para planilhas eletrônicas, para serem processados, conforme os procedimentos: Determinao da relao entre DAP e Altura das árvores e posteriormente cálculo da altura das árvores, que não foram medidas e; Cálculo das seguintes variáveis: volume (V), calculado conforme equao biométrica padrão utilizada pela empresa com parâmetros β_i ajustados para cada talhão; área basal (G), através do somatório da área basal de todas as árvores da parcela, passando-se o resultado para hectare; altura dominante (Hdom), obtida pela média aritmética da altura das 100 árvores com maior diâmetro por hectare, segundo a definio de Assmann (1961); altura média (Hmean), calculada através da média de todas as alturas da parcela; diâmetro médio (Dm) calculado através da média de todos os diâmetros da parcela.

Dados de localizao dos talhões, idade, classe de idade, espécie, clone etc. foram obtidos a partir da base cadastral dos talhões sobrevoados, ou seja, esses dados foram fornecidos pela empresa durante a fase de realizao dos trabalhos.

Coleta e processamento de dados

Os dados do levantamento ALS foram coletados entre 5 e 9 de setembro de 2008, utilizando-se um avião bimotor Piper Seneca II, que apresenta boa estabilidade, além de oferecer tensão elétrica suficiente para alimentao do sistema.

A área sobrevoada compreendeu duas faixas de 2 x 20 km que se sobrepõem à área onde foram efetuados os levantamentos de campo, conforme descrito no item anterior. O aerolevantamento foi realizado pela empresa Geoide Topografia Especializada, e os dados do vôo foram: altura de vôo: 1.000m; velocidade da aeronave: 150km/h; diâmetro do feixe: 20cm; ângulo de varredura: 15°; largura de faixa: aproximadamente 727m; percentual de recobrimento 30%; frequênciam de varredura: 58,7Hz; intensidade de pontos: 1,5 pontos/m²; erro planimétrico: 0,5m (1,0 sigma); erro altimétrico: 0,15m (1,0 sigma); resoluo Espacial: 0,3m; tamanho do pixel: 0,23m; resoluo radiométrica: 12 bits; quantidade de retornos registrados: 1,5 (primeiro e último pulsos); frequênciam do pulso laser: 50.000 pulsos por segundo – 50kHz; frequênciam de varredura: Variável de 1Hz a 70Hz; ângulo de varredura: variável de 0° a 25°; divergênciam: 0,3 mrad (1/e) ou 0,8mrad (1/e); sistema de varredura – Z-Scan ou "zigue-zague"; sistema de referênciam utilizado: SAD 69, conforme definido pelo Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

O equipamento utilizado para coleta dos dados laser foi o modelo LiDAR ALTM 3100, fabricado pela empresa canadense Optech. Esse equipamento é atualmente um dos mais modernos para

Tabela 1. Valores médios e desvios observados nas parcelas amostrais de campo.
Table 1. Average values and deviations observed in the field plots.

Idade	N. Parc.	Volume		Área Basal		Altura Dom.		Altura Média		Diâmetro	
		Média	Desv.	Média	Desv.	Média	Desv.	Média	Desv.	Média	Desv.
Anos	n.	m ³ /ha	m ³ /ha	m ² /ha	m ² /ha	m	M	m	M	cm	Cm
2	4	152,59	14,97	13,75	1,29	22,78	0,20	22,03	0,19	15,72	0,60
3	20	145,04	14,17	14,09	0,87	22,02	0,66	21,06	0,53	14,97	0,52
4	4	247,51	7,08	19,35	0,58	27,63	0,27	26,03	0,31	17,14	0,55
5	23	248,20	23,28	19,52	1,34	27,42	1,65	25,91	1,14	17,12	0,64
6	24	352,39	34,83	24,37	2,15	33,90	0,84	30,68	0,97	19,21	0,93
7	9	388,10	16,57	26,33	1,15	34,76	0,48	31,57	0,54	19,94	0,54
8	32	389,44	20,08	25,65	1,05	35,52	1,61	31,62	0,70	19,99	0,55
9	26	442,75	67,22	28,39	3,24	36,26	1,54	32,41	1,95	20,47	1,39
10	37	503,06	82,06	31,67	3,67	36,74	1,17	33,46	1,60	22,06	1,09
12	13	580,07	43,16	31,08	2,13	38,66	1,32	33,92	0,97	21,28	0,88

levantamentos LASER, e sua frequência de pulsos, varia de 33 a 100kHz, esse é um dos principais fatores de sucesso na utilização desse equipamento.

Os dados coletados pelo equipamento Optech ALTM3100, foram pré-processados pelo software Optech REALM SURVEY SUITE 3.5, que auxilia na interpolação dos dados, devido à diferença na frequência de coleta entre GPS (1Hz), SMI (200Hz) e LASER (50kHz).

Em seguida realizou-se o processamento, a filtragem e a classificação dos dados, utilizando-se o software TERRA SCAN, que dispõem de diversos recursos de classificação de nuvens de pontos, e de visualização tridimensional, além de classificação e estratificação dos sinais interceptados pela vegetação e registrados pelo sistema.

A altura da copa das parcelas foi calculada a partir da diferença entre as coordenadas z dos hits e a elevação estimada do terreno. Todos os pontos acima de 2m foram associados à vegetação (Næsset, 2002). Foram calculados os quantís (pontos estabelecidos em intervalos regulares a partir da função distribuição acumulada, de uma variável aleatória, no caso altura dos pontos laser) correspondentes aos percentís 10, 30, 50, 70 e 90, designados como, f_{h10} , f_{h30} , f_{h50} , f_{h70} e f_{h90} também foram calculadas as densidades de copa correspondentes aos percentís 10, 30, 50, 70 e 90, designados como f_{p10} , f_{p30} , f_{p50} , f_{p70} e f_{p90} conforme modelo proposto por Næsset (2004). Além desses parâmetros, foram calculados também o desvio padrão (f_{hstd}), média (f_{havg}) e a proporção de pontos LASER que atingiram a vegetação acima de 2m (f_{hveg_2m}). Todas essas variáveis foram calculadas com base nas informações provenientes do primeiro pulso laser, e posteriormente utilizadas como variáveis independentes nas análises de regressão e nos modelos ajustados.

Construção de modelos e ajuste de modelos tradicionais

No nível de parcela, foram estimadas as seguintes variáveis convencionais de inventário: volume com casca do tronco, área basal, altura dominante, altura média e diâmetro médio. Os parâmetros fornecidos pela tecnologia ALS, ou seja, as diversas medidas de altura da copa diferenciadas em percentís, média e variância, foram usadas para ajustar os valores das variáveis de interesse. A idade do talhão, em anos, também foi utilizada como variável independente nos modelos analisados.

Numa primeira etapa exploratória dos dados, e de análise das possíveis relações biométricas, foram estudadas diferentes relações entre as variáveis disponíveis. O que se procurou nessa etapa foi identificar, dentre os parâmetros fornecidos pela tecnologia ALS, aqueles com maior potencial para substituir as variáveis florestais normalmente utilizadas em procedimentos de estimação dos parâmetros florestais quantitativos convencionais (volume, área basal etc.). Para isso, transformaram-se inicialmente todas as variáveis dependentes e independentes em logaritmo natural, quadrado, raiz e inverso.

Em seguida, utilizando-se o procedimento *stepwise* de regressão estatística, foram identificadas as variáveis que resultaram nas melhores relações estatísticas. Para tanto se utilizou um nível de significância máximo de probabilidade F superior a 0,25.

A segunda etapa, após a análise de regressão *stepwise*, envolveu o ajuste de modelos biométricos florestais para estimação de volume. Foram ajustados os modelos de Schumacher (1939), Schumacher e Hall (1933), Clutter (1963) e Buckman (1962).

Esses modelos foram ajustados pelo método de mínimos quadrados ordinários, buscando-se dentre as variáveis ALS identificadas na primeira etapa, aquelas que poderiam substituir as variáveis independentes convencionais dos modelos florestais clássicos.

A avaliação dos modelos ajustados considerou principalmente o desempenho dos seguintes parâmetros de regressão: coeficiente de determinação ajustado (R^2); raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM); coeficiente de correlação entre valores observados e estimados (R_{xy}); teste "F" de significância; e análise gráfica dos resíduos, para detectar possível tendência das estimativas.

RESULTADOS

A estimação de parâmetros florestais através da análise de regressão estatística envolvendo dados gerados pelo levantamento ALS mostrou bons resultados. Dentre as diversas relações testadas na análise, os melhores ajustes mostraram R^2 variando de 0,89 (para diâmetro) a 0,96 (para volume e altura). Esses resultados mostram-se superiores aos encontrados em trabalhos similares. Além do elevado R^2 , observaram-se também valores de REQM abaixo de 0,003 e, consequentemente, modelos com alta acuidade no seu potencial preditivo.

Análise exploratória das variáveis ALS

A avaliação da dependência entre variáveis estimadas em inventários florestais convencionais e as variáveis obtidas no levantamento ALS revelou relações específicas com bom nível de ajuste. A Tabela 2 lista as equações que apresentaram o melhor desempenho estatístico dentre as demais relações funcionais testadas.

Observa-se a predominância de percentís nas equações (identificadas pelas letras f_h) que, ao contrário das variáveis representando densidade de pontos ALS (identificadas por f_p), aparecem em todas as relações funcionais. É evidente também a boa correlação entre o percentil 90% representado pela variável f_{h90} e as variáveis convencionais altura média das árvores e altura das árvores dominantes. Esse resultado já era esperado, pois a variável f_{h90} é uma medida direta da altura acima da qual se encontram apenas 10% dos pontos ALS, ou seja, revela a altura dos pontos laser refletidos nas partes mais altas das copas.

Nota-se também a presença da variável idade (age) nas equações estimadas para área basal e volume, e a sua ausência nas demais equações. A idade, nesses casos, parece ponderar a capacidade preditiva dos percentís f_{h10} e f_{h30} associados com alturas baixas e, portanto, com dimensões diamétricas de copas e fustes das árvores.

Os parâmetros que caracterizam o desempenho estatístico, observado após o ajuste das equações resumidas na Tabela 2, são apresentados na Tabela 3. Todos os modelos avaliados resultaram em bons ajustes com excelente capacidade preditiva. O R^2 variou entre 0,88 e 0,96, todos os coeficientes se apresentam significativos com base nas respectivas estimativas do erro padrão, e os modelos mostraram-se bastante apropriados considerando-se o elevado valor da razão (QM do modelo)/QME.

A Figura 1 permite uma avaliação gráfica da capacidade de predição das variáveis ALS. Nesses gráficos, valores observados e estimados são dispostos nas ordenadas para uma avaliação visual da dispersão em torno da bissetriz que teoricamente seria formada se valores observados e valores estimados fossem iguais. Nota-se que essa dispersão é relativamente pequena, confirmando a elevada capacidade de predição das variáveis ALS.

Ajuste de equações convencionais de volume modificadas com variáveis ALS

A análise exploratória da seção anterior envolvendo os principais parâmetros florestais – diâmetro médio, altura média, altura dominante e área basal – permitiu identificar as variáveis ALS com maior potencial para se tornarem variáveis explicativas de volume. Nesta seção, analisa-se a

Tabela 2. Equações que mostraram o melhor desempenho estatístico para a estimativa de variáveis convencionais de inventário florestal a partir de variáveis ALS.

Table 2. Selected regression models that yielded the best statistical performance for the estimation of conventional forest inventory variables as a function of ALS variables.

Variável(Y)	Equação ¹
Diâmetro	$\sqrt{Dm} = \frac{2,71217}{(0,06677)} + \frac{0,04568}{(0,00129)} f_{h30} + \frac{17,78643}{(2,62387)} f_{p30}^{-1} + \varepsilon$
Altura Média	$\sqrt{Hm} = \frac{1,58637}{(0,1875)} + \frac{0,19740}{(0,01360)} f_{h90} + \frac{0,00045}{(0,00005)} f_{p10}^{0,2} - \frac{0,00252}{(0,00024)} f_{h90}^{0,2} + \varepsilon$
Altura Dominante	$\sqrt{Hdom} = -\frac{2,62267}{(0,12566)} + \frac{2,45770}{(0,12566)} \ln(f_{h90}) + \varepsilon$
Área Basal	$\sqrt{G} = -\frac{0,73037}{(0,32187)} + \frac{0,04068}{(0,00569)} f_{h10} + \frac{1,33223}{(0,14836)} \ln(f_{havg}) + \frac{0,26215}{(0,08805)} \ln(age) + \varepsilon$
Volume	$\ln(V) = -\frac{2,28032}{(0,95536)} + \frac{0,05185}{(0,00345)} f_{h30} + \frac{570,8012}{(89,31554)} f_{p90}^{-1} + \frac{0,26798}{(0,04716)} \ln(age) + \varepsilon$

¹O erro padrão da estimativa do coeficiente é mostrado entre parênteses

Tabela 3. Parâmetros estatísticos dos melhores ajustes obtidos após a estimação das variáveis convencionais de inventário florestal a partir de variáveis ALS.

Table 3. Statistical parameters of the best selected regression models for the estimation of conventional forest inventory variables as a function of ALS variables.

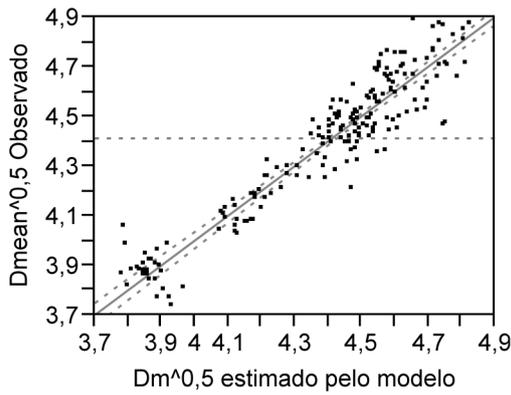
Variável	Média	R ² Adj.	REQM	QM do modelo	QME
Raiz do diâmetro médio	4,408	0,887	0,09157	6,08321	0,0084
Raiz da altura média	5,480	0,945	0,09267	9,19145	0,0086
Raiz da altura dominante	5,746	0,960	0,09484	40,0119	0,0090
Raiz da área basal	4,997	0,920	0,17422	21,7751	0,0304
Logaritmo do volume	5,872	0,956	0,08520	9,80879	0,0073

possibilidade de substituir as variáveis preditivas convencionais por variáveis ALS em quatro modelos biométricos florestais consagrados – Buckman, Clutter, Schumacher e Schumacher-Hall.

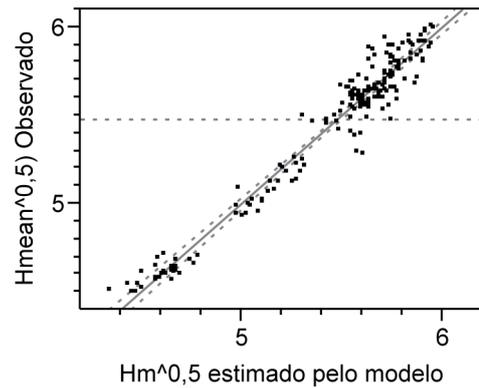
O modelo de Buckman, originalmente proposto para estimar incrementos na área basal (B), foi alterado para estimar volume e para tanto sofreu uma adaptação em sua versão original. A variável altura média dos pontos ALS (f_havg) ainda que isoladamente apresente baixo desem-

penho (R^2 de 0,36 e REQM de 0,047) para explicar índice de sítio (S), foi escolhida para integrar este modelo pelo seu aparente potencial para refletir produtividade geral da área. O percentil 10% apresentou bons resultados para expressar a área basal ($R^2=0,82$ e REQM=0,098). E assim o modelo de Buckman, incluindo idade (I), foi modificado da seguinte forma:

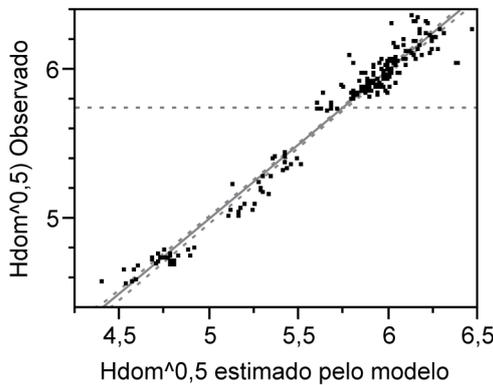
$$\begin{aligned} Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I + \beta_3 B + \varepsilon \Rightarrow \\ Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 f_h10 + \beta_2 I + \beta_3 f_havg + \varepsilon \quad (1) \end{aligned}$$



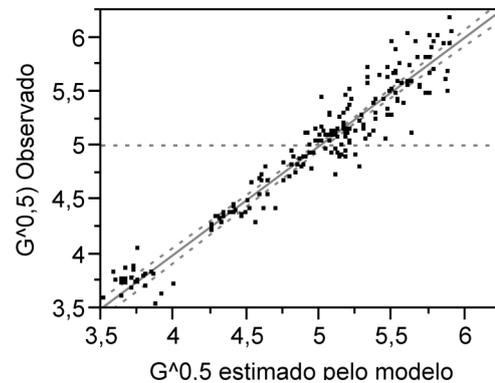
(a): Raiz quadrada do diâmetro médio ($cm^{0,5}$).
Square root of mean diameter ($cm^{0,5}$).



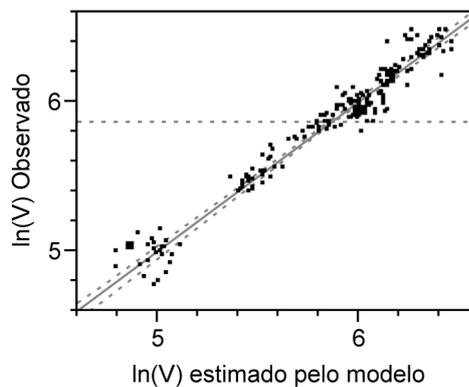
(b): Raiz quadrada da altura média ($cm^{0,5}$).
Square root of mean height. ($cm^{0,5}$).



(c): Altura dominante ($cm^{0,5}$).
Dominant height ($cm^{0,5}$).



(d): Raiz quadrada da área basal ($m^2)^{0,5}$.
Square root of basal area ($m^2)^{0,5}$.



(e): Logaritmo do volume ($\ln m^3$). Logarithm of volume ($\ln m^3$).

Figura 1. Valores observados vs. valores estimados pelas regressões estatísticas da fase exploratória das variáveis ALS.
Figure 1. Observed values vs. values estimated by statistical regressions of the exploratory phase of the ALS variables.

O modelo de Clutter, que associa volume com índice de sítio (S), área basal (B) e idade (I), é um dos modelos mais difundidos no Brasil. Neste caso, procurou-se dentre as variáveis ALS a de maior correlação com índice de sítio quando calculado pelo método da curva guia, conforme apresentado por Leite e Campos (2006). Pelas mesmas razões apresentadas para o modelo de Buckman, optou-se por escolher a altura média dos pontos ALS (f_havg) para substituir índice de sítio. O percentil 70% na sua forma raiz quadrada foi a que teve melhores resultados para expressar o logaritmo da área basal ($R^2=0,86$ e $REQM=0,045$). E o modelo de Clutter pôde então ser redefinido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I^l + \beta_3 \ln(B) + \varepsilon \Rightarrow \\ Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 f_havg + \beta_2 I^l + \beta_3 f_h70^{0,5} + \varepsilon \quad (2) \end{aligned}$$

O modelo de Schumacher enfatiza a importância da idade (I) para estimar volume e potencializa a capacidade preditiva dessa variável explorando a sua interação com a altura das árvores (Leite e Campos, 2006). Ao adaptá-lo às variáveis ALS, procurou-se aquela que demonstrasse maior correlação com a altura dominante ($Hdom$) das parcelas. No caso, essa forte relação foi observada com a forma logarítmica do percentil 90%. O modelo de Schumacher foi, portanto, modificado para assumir a seguinte forma:

$$\begin{aligned} Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 \ln(Hdom) + \beta_2 I^{0,5} + \varepsilon \Rightarrow \\ Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 \ln(f_h90) + \beta_2 I^{0,5} + \varepsilon \quad (3) \end{aligned}$$

Complementarmente, este trabalho considerou também o modelo Schumacher-Hall para estimação do volume de árvores individuais, que em geral é apresentado de duas formas, uma sendo função do logaritmo do diâmetro e do logaritmo da altura da árvore, e outra combinando o quadrado do diâmetro multiplicado pela altura da árvore. O que se procurou neste caso foi encontrar as variáveis ALS que exploram a capacidade preditiva deste modelo para volume por área, mantendo suas características originais. O variável logaritmo do diâmetro (DAP) mostrou boa correlação com o percentil 30% ($R^2=0,87$ e $REQM=0,054$). O logaritmo da altura da árvore (H) foi substituído pelo logaritmo do percentil 90% ($R^2=0,92$ e $REQM=0,035$). Já a variável logaritmo do diâmetro ao quadrado vezes altura apresentou boa correlação com o percentil 30% ($R^2=0,92$ e $REQM=0,0001$). Assim, as duas formas do modelo Schumacher-Hall foram modificadas e assumiram as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon \Rightarrow \\ Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 f_h30 + \beta_2 \ln(f_h90) + \varepsilon \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP^2 * H) + \varepsilon \Rightarrow \\ Ln(V) &= \beta_0 + \beta_1 f_h30^{++} + \varepsilon \quad (5) \end{aligned}$$

A Tabela 4 apresenta os resultados das regressões estatísticas envolvendo os modelos biométricos florestais representados pelas equações (1) a (5).

Tabela 4. Resultados da regressão estatística das equações biométricas usadas para estimar volume e ajustadas a partir das variáveis ALS.

Table 4. Statistical regression of the biometric equations used to estimate volume and those fitted from the ALS variables.

Modelo	Equação ¹
Buckman	$\ln(V) = \frac{5,16791}{(0,10428)} + \frac{0,02628}{(0,00301)} f_havg - \frac{2,54501}{(0,20605)} age^{-1} + \frac{0,01877}{(0,00291)} f_h10 + \varepsilon$ Vol. estimado (m ³ /ha)=354,80 R ² Adj.=0,952; REQM=0,089; QM modelo=9,767; QME=0,00794
Clutter	$\ln(V) = \frac{4,33313}{(0,29312)} + \frac{0,02750}{(0,00339)} f_havg - \frac{2,14376}{(0,30569)} age^{-1} + \frac{0,22087}{(0,05291)} f_h70^{0,5} + \varepsilon$ Vol. estimado (m ³ /ha) =354,78 R ² Adj.=0,946; REQM=0,094; QM modelo=9,709; QME=0,00889
Schumacher	$\ln(V) = \frac{0,68803}{(0,24704)} + \frac{1,25983}{(0,09836)} \ln(f_h90) + \frac{0,33119}{(0,03751)} age^{0,5} + \varepsilon$ Vol. estimado (m ³ /ha) =354,78 R ² Adj.=0,931; REQM=0,107; QM modelo=14,325; QME=0,0114
Schum.-Hall ¹	$\ln(V) = \frac{5,65085}{(0,68328)} + \frac{0,10040}{(0,00996)} f_h30 - \frac{0,75345}{(0,28068)} \ln(f_h90) + \varepsilon$ Vol. estimado (m ³ /ha) =354,80 R ² Adj.=0,936; REQM=0,102; QM modelo=14,412; QME=0,0105
Schum.-Hall ²	$\ln(V) = \frac{3,81978}{(0,04054)} + \frac{0,07393}{(0,00144)} f_h30 + \varepsilon$ Vol. estimado (m ³ /ha) = 354,80 R ² Adj.=0,934; REQM=0,104; QM modelo=28,748; QME=0,0108

¹O erro padrão da estimativa do coeficiente é mostrado entre parênteses

Todos os modelos avaliados resultaram em bons ajustes com excelente capacidade preditiva. O R^2 variou entre 0,93 e 0,96, todos os coeficientes se apresentam significativos com base nas respectivas estimativas do erro padrão, e os modelos mostraram-se bastante apropriados, considerando-se o elevado valor da razão (QM do modelo)/QME.

O bom ajuste e capacidade preditiva das duas versões do modelo Schumacher-Hall surpreende se considerado o fato de que esses modelos não incluem a idade como variável funcional. Aparentemente nesses casos, os aspectos dimen-

sionais da população são integralmente capturados pelo percentil 30% que incorpora simultaneamente a interação da idade e dos demais efeitos para expressar volume.

A Figura 2 complementa as análises com uma avaliação gráfica da capacidade de predição das variáveis ALS, dispondo conjuntamente os valores observados e estimados de cada modelo.

A relativamente baixa dispersão das estimativas em torno da linha que representaria os dados observados confirma a elevada capacidade de predição das variáveis ALS nos modelos testados para volume.

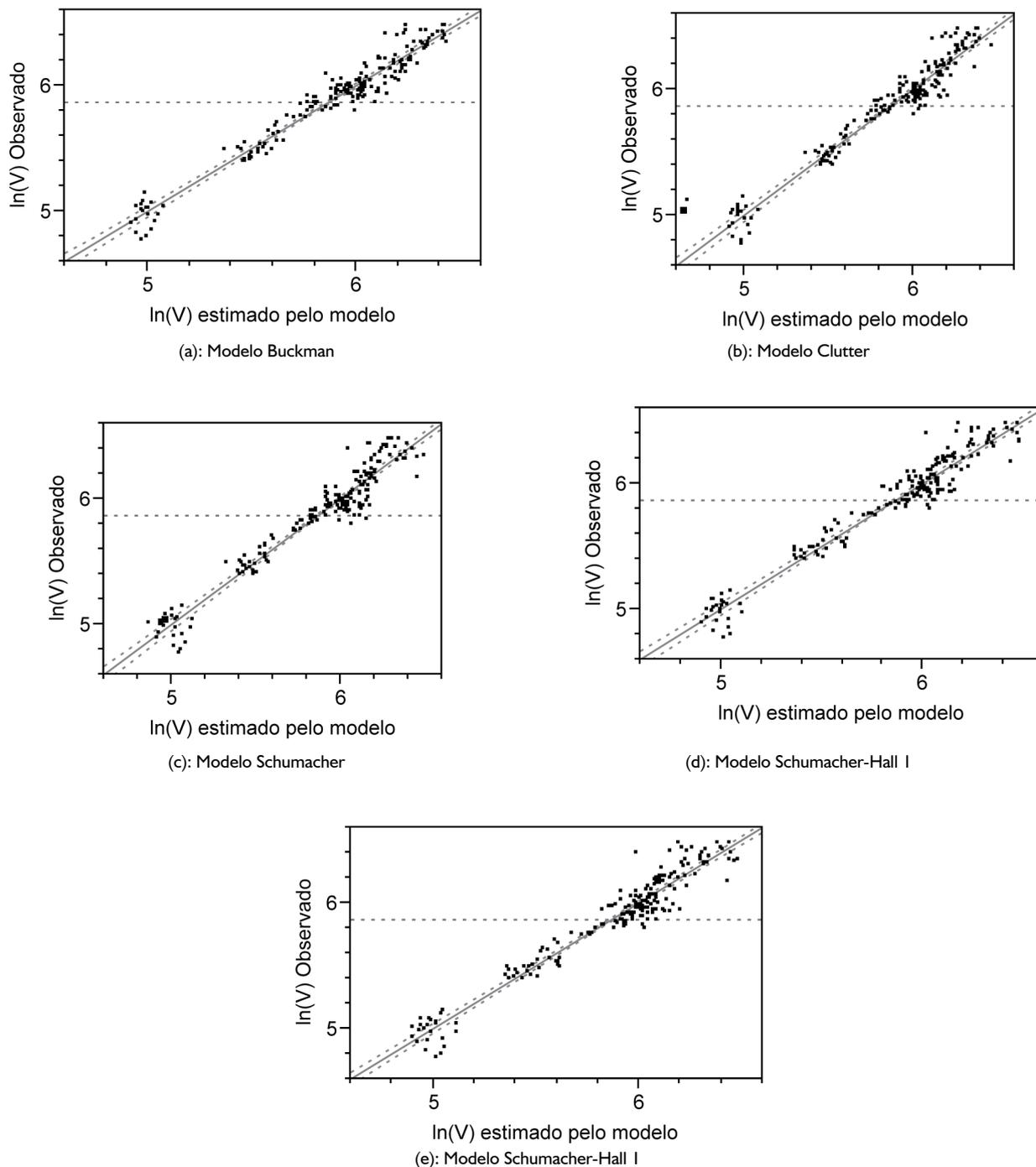


Figura 2. Valores observados vs. valores estimados pelas regressões estatísticas para volume (m^3/ha) em função das variáveis ALS.

Figure 2. Observed values vs. values estimated through the statistical regressions for volume (m^3/ha) in relation to ALS variables.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que o uso da tecnologia ALS gera observações com alta capacidade preditiva para as variáveis usualmente calculadas em atividades de inventário florestal e consideradas neste trabalho: diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume.

As variáveis ALS que ofereceram maior contribuição para estimar diâmetro médio envolveram idade e os percentís 10%, 30%, 50% e 90%. Para predição de alturas, o percentil 90% se mostra essencial, exigindo idade em apenas um modelo. Em termos de área basal, as variáveis ALS mais importantes envolvem idade, altura média dos pontos ALS e os percentís 10%, 30% e 50%.

Para volume, recomenda-se a utilização dos modelos convencionais já consagrados na área de biometria e inventário florestal. Todos os modelos apresentaram praticamente a mesma estimativa para volume médio. As duas versões do modelo Schumacher-Hall se mostraram bastante parcimoniosas, dispensando até a idade nas estimativas. Entretanto, seria prudente manter a variável idade e nesse caso o modelo de Schumacher clássico se mostra bastante eficiente e parcimonioso, ao considerar apenas a raiz quadrada da idade e o logaritmo do percentil 90% nas suas estimativas. O percentil 90% parece substituir perfeitamente o índice de sítio normalmente considerado nesse modelo.

Todavia, nos modelos de Buckman e Clutter, diferentes combinações das variáveis ALS foram usadas com relativo sucesso manter a coerência desses modelos. Os percentís 10% ou 70% parecem fazer uma boa combinação com a variável média geral da altura dos pontos ALS para gerar nesses modelos boas estimativas de volume.

Mais estudos ainda são necessários para explorar todo o potencial das variáveis ALS, mas certamente são muito fortes as evidências apresentadas neste trabalho de que para povoamentos florestais homogêneos, como os observados em plantios clonais de eucaliptos, as nuvens de pontos geradas por levantamentos ALS, quando classificadas em percentís, mostram-se perfeitas substitutas para as variáveis até convencionalmente usadas em atividades de inventário florestal.

Recomenda-se que, dando continuidade a este trabalho, que se estude a possibilidade de serem analisadas árvores individualmente e sua relação com a topografia do terreno em seu entorno. Para tanto novos algoritmos de processamento de dados seriam necessários para modelar a for-

ma como árvores individuais interagem entre si e com o relevo. Essa modelagem teria o potencial de trazer resultados ainda melhores em levantamentos com topografia acidentada e muito variável. Entretanto, essa linha de pesquisa exige avançados conhecimentos em modelagem espacial e algoritmos de computação capazes de processar grandes volumes de dados. Essas questões, entretanto, mostram-se cada vez menos restritivas dadas às tendências tecnológicas recentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Veracel, empreendimento florestal dos grupos Fibria e Stora Enso, por disponibilizar dados obtidos no âmbito do consórcio europeu WoodWisdom-Net em um de seus programas de pesquisa voltado para o desenvolvimento da tecnologia *airbone laser scanning*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. *Anuário estatístico da ABRAF*. Brasília, 2009. 21p.
- ALDRED, A.H.; BONNOR, G.M. Application of airborne laser to forest surveys. *Information Report PI-X*, ChalkRiver, n.51, p.1-62, 1985.
- ASSMANN, E. *Waldetragskunde*. Muenchen: Verlagsgessellschaft, 1961. 435p.
- BUCKMAN, R.E. Growth and yield of red pine in Minnesota. *USDA. Technical Bulletin*, Washington, n.1272, p.1-50, 1962.
- CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science*, Bethesda, v.9, n.3, p.354-371, 1963.
- GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. Assessing effects of positioning errors and sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne Laser scanner data. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v.39, p.1036-1052, 2009.
- HOLLAUS, M.; WAGNER, W.; MAIER, B.; SCHADAUER, K. Airborne lases scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors*, Basel, v.7, n.8, p.1559-1577, 2007.
- LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 2.ed. Viçosa: UFV, 2006. 407p.

- MACEDO, R.C. **Prognose madeireira de plantio clonal de *Eucalyptus* spp. através de dados derivados de LiDAR aerotransportado.** 2009. 133p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- MACLEAN, G.A.E.; KRABILL, W.B. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne lidar system. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.12, p.7-18, 1986.
- NÆSSET, E. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v.22, n.5, p.433–442, 2007.
- NÆSSET, E. Practical large-scale forest stand inventory using a smallfootprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v.19, n.2, p.164–179, 2004.
- NÆSSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.80, p.88–99, 2002.
- NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; HOLMGREN, J.; HYYPPÄ, H.; HYYPPÄ, J.; MALTAMO, M.; NILSSON, M.; OLSSON, H.; PERSSON, A; SÖDERMAN, U. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v.19, n.6, p.482-499, 2004.
- NELSON, R.; KRABILL, W.; MACLEAN, G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.15, p.201-212, 1984.
- PACKALÉN, P. **Using airborne laser scanning data and digital aerial photographs to estimate forest growing stock.** 2006. 30p. Licentiate thesis (Master in Forest Planning and Economics) - Faculty of Forestry, University of Joensuu, Joensuu, 2006.
- SCHUMACHER, F.X. A new growth curve and its application to timber: yield. **Journal of Forestry**, Washington, v.37, p.817-820, 1939.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, 1933.
- SOLODUKHIN, V.I.; ZUKOV, A.J.; MAZUGIN, I.N. Laser aerial profiling of a forest. **Lesnoe Khozyaistvo**, Leningrado, v.10, p.53-58, 1977.
- YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.90, p.451-462, 2004.
- ZANDONÁ, D.F. **Potencial do uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas.** 2006. 92p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- ZONETE, M.F. **Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus* sp. no sul da Bahia.** 2009. 95p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05082009-101346/>. Acesso em: 02 abr. 2009

Recebido em 02/04/2009

Aceito para publicação em 08/04/2010

