

Utilização da tecnologia LiDAR para estimação da biomassa florestal em povoamentos de *Eucalyptus* sp.

Carlos Alberto Silva¹
Carine Kaluberg¹
Andrew Hudak²
Robert Liebermann²
Samuel de Pádua Chaves e Carvalho³
Luiz Carlos Estraviz Rodriguez¹

¹ Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brazil
Carlos_engflorestal@yahoo.com.br
Carine_Klauberg@hotmail.com
lcer@usp.br

² Rocky Mountain Research Station RMRS – US Forest Service
Post office box- 83843 - Moscow - Idaho, USA
ahudak@fs.fed.us
rjl@mail.ru

³ Especialista em Inventário Florestal – Fibria Celulose S/A
Caixa postal 28. Capão Bonito/SP
Samuel.carvalho@fibria.com.br

Abstract. The LiDAR remote sensing was applied to above-ground biomass estimation in a *Eucalyptus* sp plantation. We used a multiple linear regression model from a suite of 87 predictor variables derived from discrete-return LIDAR data to create the biomass above-ground model. Of the 87 predictor variables, only five variables, related to percentiles of height and LiDAR intensity, were selected to model. The fitted model showed a coefficient of determination (r^2) of 0.91, Pearson's correlation (r) 0,97 and root mean square error (RMSE) of 5.22 m. In this work we conclude that LiDAR has good accuracy to biomass above-ground estimation in *Eucalyptus* sp plantations.

Palavras-chave: LiDAR, *Eucalyptu* sp, biomass

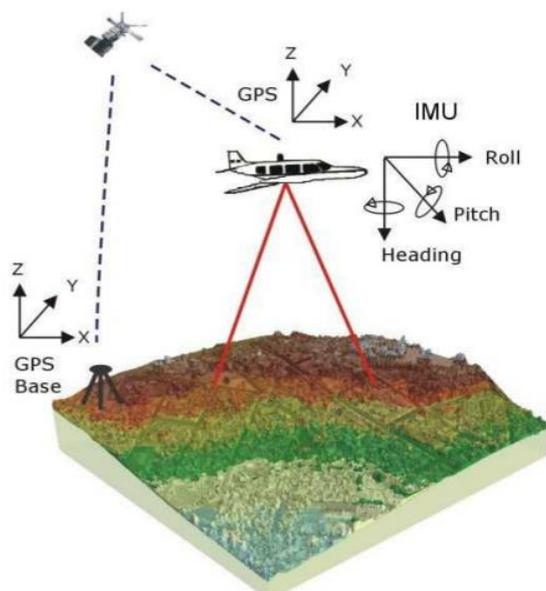
1. Introdução

Segundo anuário estatístico emitido pela Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF) o Brasil apresenta aproximadamente o 6.5 milhões de hectares correspondentes de florestas plantadas, sendo estas constituídas principalmente pelos gêneros *Eucalyptus* (74,8%) e *Pinus* (25,2) (ABRAF, 2011). O setor florestal brasileiro, principalmente influenciado pelos os povoamentos do gênero *Eucalyptus* que foram introduzidas no Brasil para fins de reflorestamento, hoje se tornou um setor de grande importância para a economia nacional, uma vez que essas florestas equiâneas são utilizadas para produção de papel, celulose e fins energéticos. Além da importância econômica, essas florestas tem se destacado no que diz respeito à preservação ambiental, principalmente por servirem de reservatórios de carbono e/ou sumidouros de gases do efeito estufa (CASTRO, 1996).

O inventário florestal, e em específico a quantificação da biomassa florestal (toda a biomassa existente na floresta ou apenas na sua fração arbórea (SANQUETTA, 2002)) é de fundamental importância para o planejamento e manutenção do setor no cenário atual. Atualmente as metodologias existentes para mensurar a biomassa florestal, têm sido limitadas devido a questões orçamentárias e temporais, inviabilizando a realização de um inventário completo dentro de um curto espaço de tempo. Por outro lado, algumas alternativas utilizando sensoriamento remoto têm sido discutidas e analisadas, e hoje já temos algumas metodologias eficientes que estão sendo aplicadas para o levantamento da biomassa florestal.

O sensoriamento remoto através da tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) tem se mostrado uma das alternativas eficientes atualmente para o inventário da biomassa florestal (Hudak *et al.*, (2012), Lim *et al.*, (2004), Næsset *et al.*, (2008). O Serviço Florestal Norte-Americano também vem aplicando a tecnologia LiDAR há alguns anos e obtendo bons resultados. Boa parte dessas experiências são relatadas em artigos publicados por Hudak, *et al.*, (2012) e Reutebuch *et al.*(2003)

McGaughey (2010) resume a tecnologia LiDAR aerotransportada como um conjunto de quatro instrumentos (Figura 1): a unidade de emissão e recebimento laser acoplada à aeronave; as unidades de posicionamento global (GPS) no avião e no chão; um sensor inercial (IMU) acoplado à unidade laser para medir roll, pitch e yaw (guinada, arfada e rolamento) e um computador para controlar o sistema e armazenar os dados. Na figura abaixo segue a ilustração do sistema LiDAR.



Fonte: McGaughey (2010)

Figura 1. Conjunto dos instrumentos que constitui um sistema LiDAR

O presente estudo fundamenta-se na hipótese que essas tecnologias geram uma correlação de precisão superior à obtida por outras metodologias florestais convencionalmente utilizadas para a quantificação da biomassa área florestal (BAF) em plantios de *Eucalyptus* sp. Por conseguinte, têm-se o objetivo do estudo avaliar o uso da tecnologia laser aerotransportada (ALS) do tipo LiDAR (“Ligth Detection and Ranging”) como ferramenta eficiente para estimacão a biomassa aérea floresta em um povoamento de *Eucalyptus* sp.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

O presente estudo é parte de um trabalho que esta sendo realizado em povoamentos comerciais de híbridos do gênero *Eucalyptus*, pertentecete a empresa Fibria Celulose S/A, localizados no Vale do Paraíba Paulista, com proximidades aos municípios de Jacareí, São Luiz do Paraitinga e Paraibuna no estado de São Paulo. O clima da região, segundo Koppen é do tipo Cwa, clima temperado húmido com inverno seco e verão quente (Cepagri, 2012). As temperaturas médias do ar oscilam entre 16.4°C no mês mais frio (julho) e 23.2°C em fevereiro, com umidade relativa média do ar em torno de 76%. A paisagem é composta por um relevo que de estende do suave ondulado ao forte ondulado ou montanhoso, podendo atingir declividade entre 3 a 45 %. Segundo Macedo (2009), os solos desta região são predominantemente do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo.

A área de estudo apresenta aproximadamente 84 ha, e está compreendida por um povoamento de *Eucalyptus* com 6 anos de idade. O plantio foi realizado em um espaçamento de 3x2 m, buscando atingir uma ocupação de área por planta de aproximadamente 6 m² e 1667 plantas por hectare.

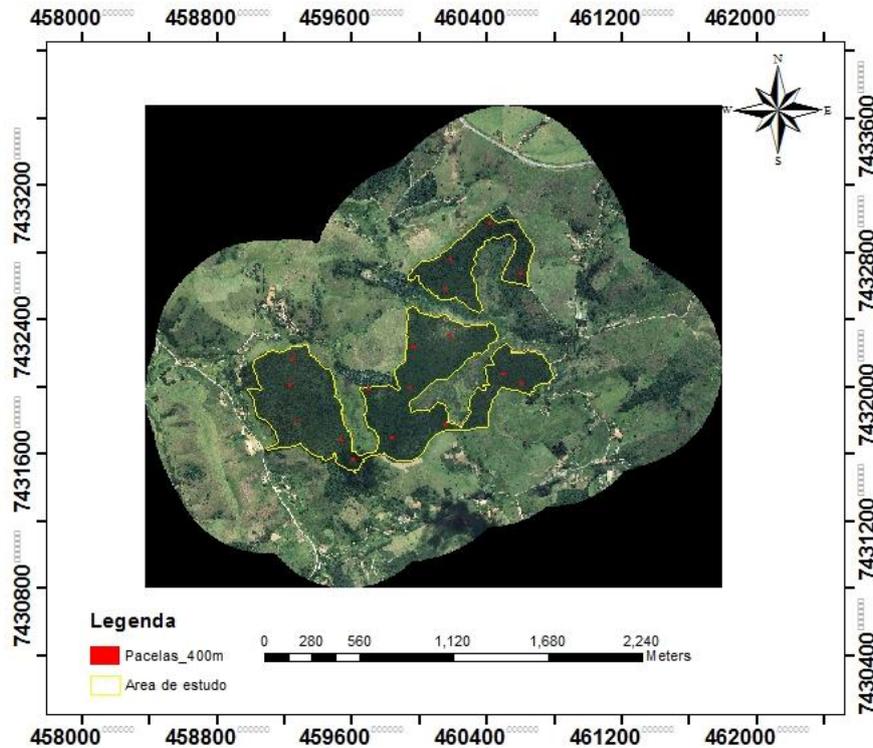


Figure 2. Localização da área de estudo. Município de São Luiz do Paraitinga

2.2 Coleta e processamento da biomassa em campo

Para o inventário de biomassa florestal, foram dispostas aleatoriamente 17 parcelas circulares de 400 m² (raio de 11.28 m) sendo que para cada parcela foram feitas medições coletando os dados de diâmetro a altura do peito (DAP) medida a 1.30 m do solo e altura total (H) de todas as árvores presentes nas parcelas. Foram também coletadas as coordenadas geográficas X e Y do centro das parcelas, com receptores geodésicos, modelo Trimble ProXRT garantindo precisão em escala centimétrica em torno de 10 cm no pós processamento. O sistema de projeção utilizado foi o UTM SIRGAS 2000. Para estimativa de biomassa (Mg ha⁻¹) (tronco, galhos, casca e folhas) em campo foi utilizado um modelo alométrico, tendo com variável dependente a biomassa área florestal (BAF) e como variável independente DAP. O modelo apresenta um R² ajustado de 0,95 e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 1.72. (Equação 1):

$$\ln(\text{BAF}) = 11.72431 + 2.33574 * \ln(\text{DAP}) \quad (1)$$

Onde,

$\ln(\text{BAF})$ corresponde o logaritmo da biomassa área florestal

$\ln(\text{DAP})$ corresponde o logaritmo do diâmetro a altura do peito.

2.3 Coleta e processamento de dados LiDAR

Os dados foram adquiridos através de um sistema a Laser Aerotransportado Riegl LMS – Q680I, embarcado em uma aeronave do modelo Piper Seneca II. Os dados referentes ao voo estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 1. Atributos inerentes aos dados de voo, equipamento a laser e resolução espacial a serem utilizadas na coleta dos dados LiDAR.

Atributos	Valores
Densidade de pulso laser	10 m ²
Resolução espacial	0.2m
Bandas	RGB
Resolução espectral	12bits
Velocidade	148km.h ⁻¹
Altura de voo	792m
Ângulo de varredura	60°
Precisão	0.5m (1.0 sigma)
Largura da faixa de cobertura	915m
Frequência de varredura	200Hz
Câmera	Z/I DMC
IMU/GPS	Applainix 510

Para o processamento dos dados LiDAR foi realizado utilizado o software FUSION versão 3.01, desenvolvido pelo Serviço Florestal Norte Americano. O FUSION é um software gratuito e disponível para download na pagina do [USDA Forest Service](http://www.usda.gov/forestservice) e as etapas do processamento porem ser vista na Figura 3, logo abaixo:

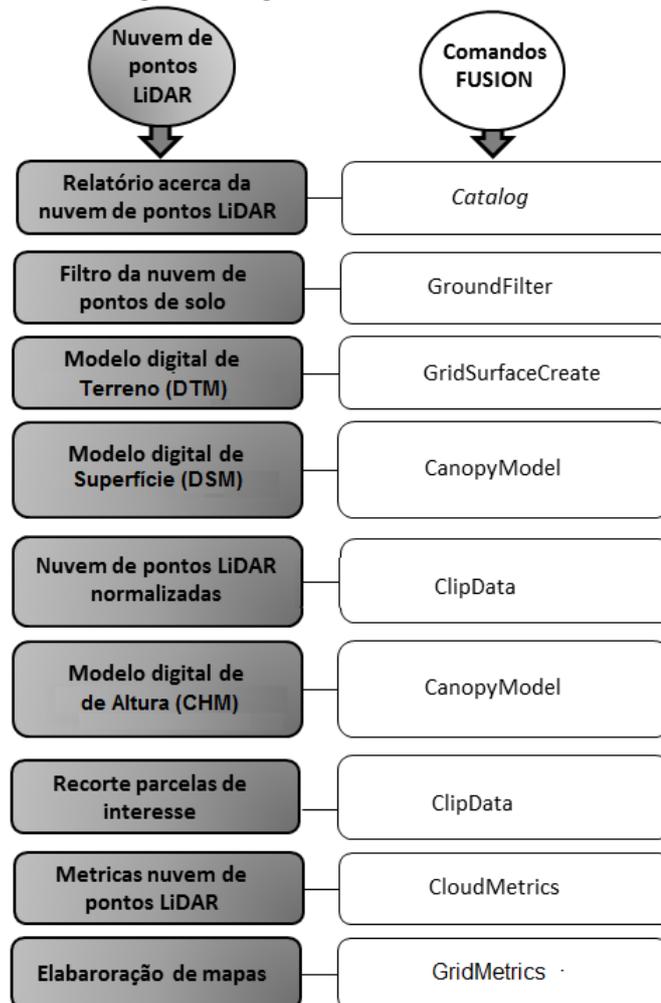


Figure 3. Etapas do processamento de dados LiDAR para estimação da biomassa área florestal (BAF). DTM, DSM e CHM, com resolução de 1m x 1m.

Tabela 2. Métricas nuvem de pontos LiDAR - FUSION software (McGaughey 2012)

Categoria	Variáveis
Retornos	Descrição do numero total de retornos Numero de retorno por classe de retorno
Métricas de Altura e Intensidade de pulso laser	Mínima, Máxima, Media, Mediana, Moda, Desvio Padrão, Variância, Coeficiente de variação, Distância interquartil, Assimetria, Curtose, AAD (desvio médio absoluto), L-momentos (L1, L2, L3, L4), L-momento de assimetria, L-momento de curtose e Percentis (1st, 5th, 10th, 20th, 25th, 30th, 40th, 50th, 60th, 70th, 75th, 80th, 90th, 95th, 99th)
Métricas de Densidade	Porcentagem de primeiro retorno acima da altura 2.5 m Porcentagem de primeiro e/ou todos os retornos acima da altura média Porcentagem de primeiro e/ou todos os retorno acima da moda de altura Porcentagem de todos os retornos acima da altura 2.5 m Numero de retornos acima da altura 2.5m/ total de primeiro retorno*100 Numero de retornos acima da média/ total de primeiro retorno*100 Numero de retornos acima da altura/ total de primeiro retorno*100

Para construção do modelo de biomassa aérea florestal foi usando o software “R Project for Statistical Computing” (R Development Core Team. 2004). As variáveis a serem inseridas no modelo foram selecionadas aplicando a função *regsubsets* (pacote *leaps* () em R), que realiza uma busca exaustiva para os melhores subconjuntos de variáveis independentes (LiDAR) para prever a variável dependente (biomassa) em uma regressão linear. Após a seleção das variáveis foi construído um modelo de regressão linear múltipla para prever a biomassa aérea florestal, e este foi avaliado pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj), correlação de Pearson (r) e a Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE).

3 Resultados e Discussão

3.1 Análise da BAF observada em campo

A BAF observada em campo apresentou uma média de $143 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ com desvio padrão de $21.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. A distribuição da BAF observada por parcela pode ser visualizada na figura 4.

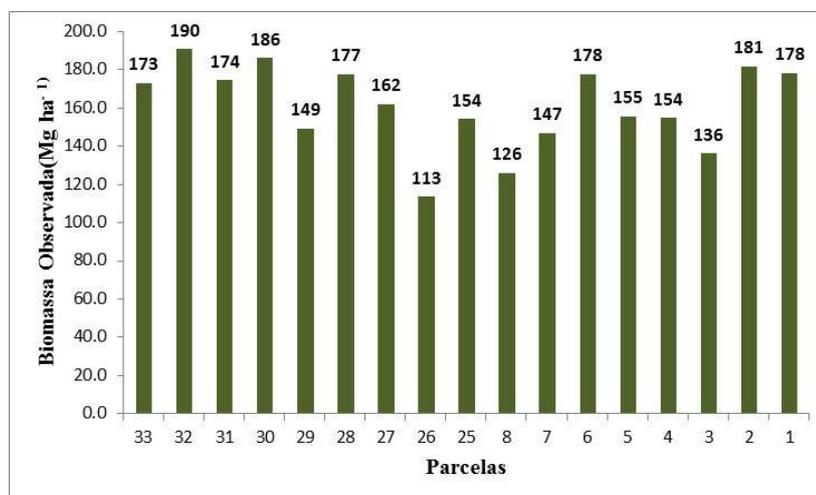


Figura 4. Boxplot das variáveis selecionadas para o modelo de BAF

O povoamento em questão apresentou um comportamento semelhante ao apresentado por Schumacher, (2012) quanto a produção de BAF.

3.2 Modelo ajustado para estimação da BAF

As variáveis pertencentes às classes de percentil de altura e intensidade de retorno LiDAR foram as que apresentam melhor performance para o modelo de biomassa área florestal (BAF). Na figura 5, através da análise boxplots, podem ser observado as principais estatísticas descritivas desses dois grupos.

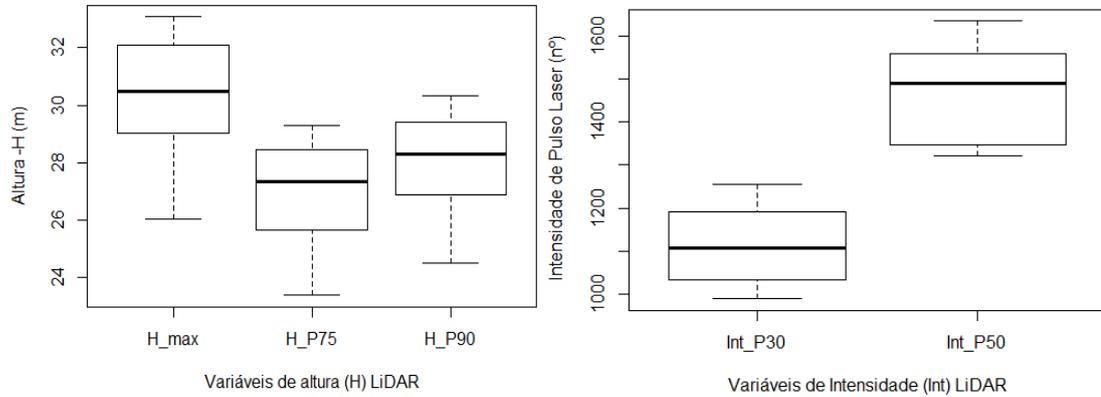


Figura 5. Boxplot das variáveis selecionadas para o modelo de BAF

Os resultados demonstraram o alto poder preditivo dos percentis de altura e intensidade gerados pelo levantamento LiDAR. Na composição do modelo de BAF, as variáveis preditoras apresentaram o mesmo peso em significância, sendo que para a classe de percentis de altura foram selecionadas três variáveis e na classe de percentis de intensidade foram selecionadas apenas duas variáveis, totalizando cinco variáveis preditoras. O modelo construído apresentou um coeficiente de determinação de 0.91, correlação de Pearson de 0,97 e raiz quadrada do erro quadrático médio de 5.22 m (tabela 3)

Tabela 3. Modelo ajustado para predição da BAF

Variáveis	Estimativa	SE	t valor	Pr(> t)	Sign	r ² ajd	r	RMSE
Intercepto	115.5	47.8	2.4	0.034107	*	0.91	0.97	5.22
H_Max	24.6	3.7	6.6	4.00E-05	***			
H_P75	29.5	4.4	6.8	3.08E-05	***			
H_P90	-45.7	7.6	-6.0	9.03E-05	***			
Int P30	-0.6	0.1	-6.7	3.36E-05	***			
Int P50	0.4	0.1	4.6	0.000728	***			

SE: Erro padrão; Sign: Significância: '***' 0.001, '*' 0.05.; r² ajd: Coeficiente de determinação ajustado; r: Correlação de Pearson; RMSE: Raiz quadrada do erro quadrático médio; h_max: Altura máxima; h_P75: Altura percentil 75 ; h_P90: Altura percentil 90, Int_P30: Intensidade percentil 30; Int_P50: Intensidade percentil 50.

Com relação aos percentis de altura, comportamento semelhante foi apresentado por Zonete (2010) para predição do volume, área basal e altura de um povoamento de *Eucalyptus* sp. no Estado da Bahia. Tanto os percentis em altura quanto o percentis em intensidade, tem se mostrado forte correlação para predição de métricas do inventário florestal. Tais resultados são relatados também em trabalhos publicados por Hudak, *et al.*, (2012), Hudak, *et al.*, (2006), Macedo, *et al.*, (2009) e Andersen, *et al.*, (2006).

3.3 Mapas produzidos

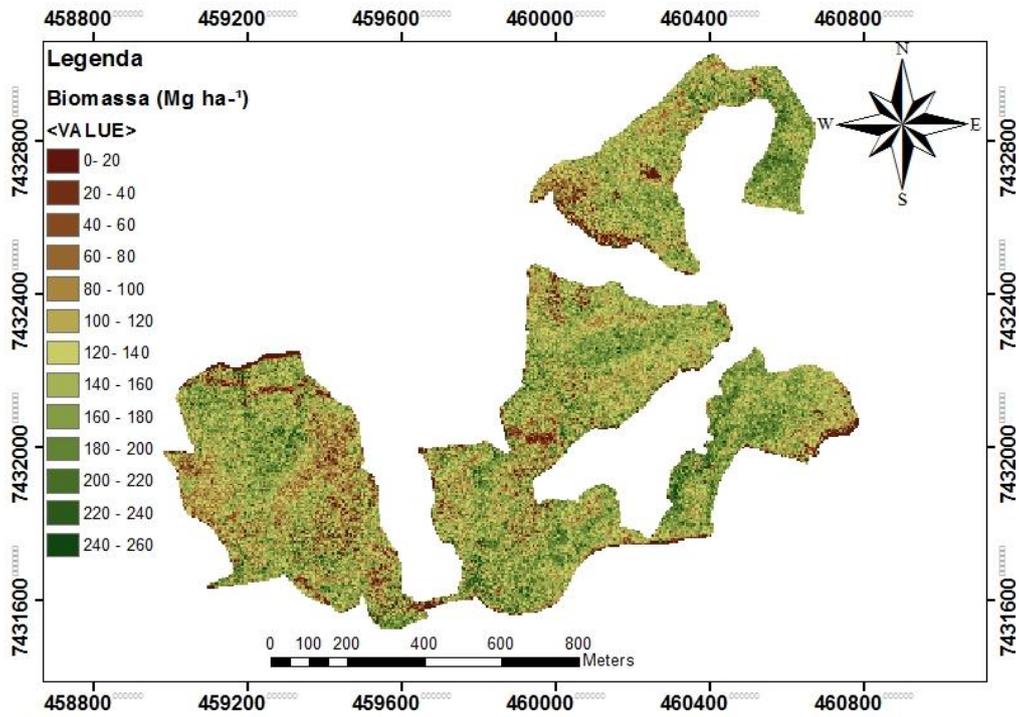


Figura 6. Mapa final da biomassa área florestal (BAF) distribuída na área de estudo

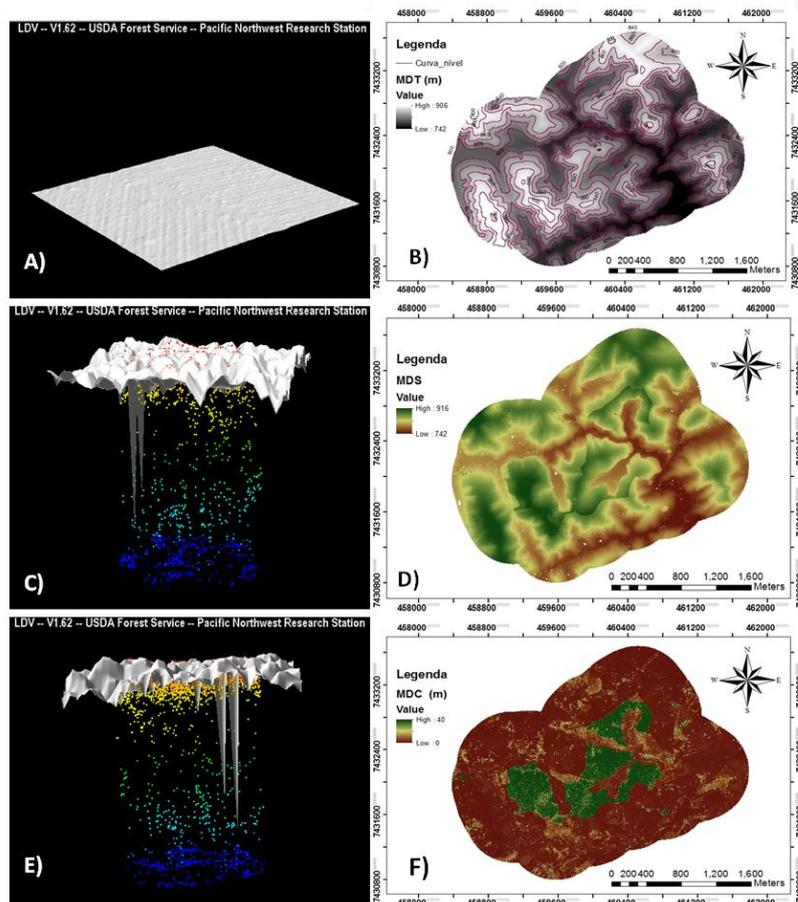


Figura 7. Produtos adicionais gerados pelo processamento da nuvem de pontos LiDAR. Modelo digital de Terreno (DTM) A) e B); Modelo digital de Superfície (DSM) C) e D) e Modelo digital de Altura (CHM) E) e F). A esquerda temos os produtos visualizados em 3D e a direita em 2D.

4 Conclusões

Os estudos ainda não conclusivos apresentados neste trabalho mostram que a estimação da biomassa aérea florestal em povoamentos clonais de eucaliptos pode ser obtida com aceitável precisão a partir de dados coletados com a tecnologia LiDAR. As análises serão ainda complementadas com a inclusão de novos sítios, espaçamentos e diferentes idades.

Agradecimentos

À Fibria Celulose S/A pela cessão dos dados aerotransportados LiDAR e dados de inventário para a realização desse estudo. A FAPESP pela bolsa concedida e ao Rocky Mountain Research Station RMRS/ US Forest Service em Moscow/Idaho-USA pelo apoio no processamento dos dados.

Referências Bibliográficas

- ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011. Brasília: ABRAF, 2012. 130p. Disponível em: <www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- Cepagri. Disponível em < http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_562.html > Acesso em 30 out.2012.
- Hudak, A. T.; Strand, Eva K.; Vierling, Lee A.; Byrne, John C.; Eitel, Jan U. H.; Martinuzzi, Sebastian; Falkowski, Michael J. 2012. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2232–2245. 2012.
- Hudak, A. T.; Crookston, Nicholas L.; Evans, Jeffrey S.; Falkowski, Michael K.; Smith, Alistair M.S.; Gessler, Paul E.; Morgan, Penelope. 2006. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return lidar and multispectral data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2), 126–138. 2012.
- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G., & Shugart, H. H. Surface LiDAR remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67, 83–98. 1999b.
- Lim, K. S., & Treitz, P. M. Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 558–570, 2004.
- Næsset, E., e Gobakken, T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3079–3090, 2008.
- Macedo, R. C. Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus* sp. através de laserscanner aerotransportado. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos: 2009
- Mcgaughey, R.J. FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization. United States Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Research Station, Seattle, 2010. 150p. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fsion/FUSION_manual.pdf>. Acesso em 20 out 2012
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. Available from <http://www.R-project.org>. 2004
- Reutebuch, S.E., Mcgaughey, R.J., Andersen, H.-E., Carson, W.W. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):527-535. 2003.
- Sanqueta, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). *As florestas e o carbono*. Curitiba: [s.n.], p. 119-140, 2012
- Woomer, P. L.; Palm, C. A. An approach to estimating carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *Commonwealth Forestry Review*, Oxford, v. 77, n.3, p. 181-190, 1998.
- Zonete, M. F.; Rodriguez, L. C. E.; Packalen, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 38, n.86, p. 225-235, 2010.