

Correlação de altura de árvores dominantes e ajuste de equações volumétricas através de dados ALS em plantios homogêneos de *Eucalyptus* sp.

Alexandre Pansini Camargo¹
Daniel de Almeida Papa^{1,2}
Luiz Carlos Estraviz Rodriguez¹

¹ Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
Caixa Postal 09 - 13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil
alexandre.camargo@usp.br; lcer@usp.br

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Caixa Postal 321 – BR-364 - Km 14, Rio Branco - AC, Brasil
daniel.papa@embrapa.br

Abstract. The emergence of new remote sensing technologies and the availability of access to these data gives to researchers a good expectation of obtaining information with greater agility and quality. Forest biometry won significant ally with the use of data of Airborne Laser Scanning, especially on data quality and accuracy of the estimates generated. This work aims to evaluate volumetric models with variables exclusively of data clouds ALS and relate height percentiles metrics generated by the *cloudmetrics* tool of the software FUSION© with the average height of dominant trees in homogeneous stands of *Eucalyptus* sp. Were used 51 sample plots located in 527.9 ha of plantations in the city of São Miguel Arcanjo-SP that were related to height percentiles P80, P90, P95 and P99 and evaluated as to the values of the coefficient of determination (R^2), RMSE and rRMSE for distribution of dominant height average. For the volumetric prediction variables were used height percentiles Hvar, P25 and P90, adjusted models and compared the same criteria that the metrics of time. Volumetric models showed coefficients of determination of 0.94 and 0.93 0.93 0.91, for models 1, 2, 3 and 4, respectively. The correlations between percentiles and height presented R^2 of 0.97 for the settings with P80, P90 and P95, and 0.96 to P99. The variables selected for use in the models were appropriate and generate metrics consistent with the observed field data.

Palavras-chave: remote sensing, plantated forests, *Airborne Laser Scanning*, sensoriamento remoto, florestas plantadas, modelagem, LiDAR.

1. Introdução

Empresas florestais, órgãos governamentais e entidades de pesquisa que trabalhem com florestas nativas ou plantadas fazem uso do inventário florestal como método para obter informações confiáveis sobre o povoamento em questão. O inventário florestal, pode ser descrito então, como o conjunto de técnicas aplicadas para a obtenção das informações qualitativas e quantitativas acerca de uma floresta, seja ela plantada ou nativa, em que se faz uso da amostragem e análise de dados (Campos e Leite, 2013). Informações importantes são obtidas de medidas das árvores tomadas em campo como diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (Ht) e são utilizados em modelos estatísticos para a estimação de parâmetros biométricos, que são extrapolados para todo o povoamento. A avaliação da produtividade de povoamentos florestais em volume ou biomassa depende diretamente de variáveis dendrométricas (Araújo *et al.*, 2004) e a coleta de dados precisa ser rigorosa para a confiança das informações que serão originadas a partir delas. A dificuldade da coleta de dados em campo recai sobre a pequena fração de onde são coletadas as informações que servirão como base para alimentar os modelos estatísticos de predição.

Surgem então novas tecnologias que tem introduzido no setor florestal brasileiro novo método em quantificação e qualificação da biomassa florestal, como a ferramentas de escaneamento a laser embarcados em aeronaves, o *Airborne Laser Scanning*, ou ALS (Loch, 2002). O ALS tem potencial de explorar a mensuração de características de florestas nativas e plantadas que certamente trarão benefícios como agilidade no processo e maior precisão, no

entanto depende de aprimoramento das técnicas de avaliação, ajustes e testes sejam feitos com a ferramenta para que possa ser utilizada e extrair a informação confiável e adequada à realidade (Rodríguez *et al.*, 2010). No sentido de testar a aplicação da tecnologia ALS no ambiente florestal, a proposta deste trabalho é a de ajustar modelos volumétricos com variáveis originadas exclusivamente de nuvens de dados ALS obtidas sobre um povoamento de *Eucalyptus* no estado de São Paulo e comparar as informações de Média das alturas dominantes estimadas através do escaneamento ALS com os dados obtidos das parcelas de campo.

2. Metodologia do trabalho

O plantio florestal do gênero *Eucalyptus* sp. objeto desse estudo está localizado no município de São Miguel Arcanjo, no estado de São Paulo, em áreas onde houve sobrevoos com aeronave equipada com equipamento operando a tecnologia ALS que geram nuvens de pontos LiDAR, no ano de 2013. A área do estudo são 7 talhões comerciais que somam 527,9 ha de florestas plantadas e possuem 51 parcelas de inventário florestal com medidas de campo.

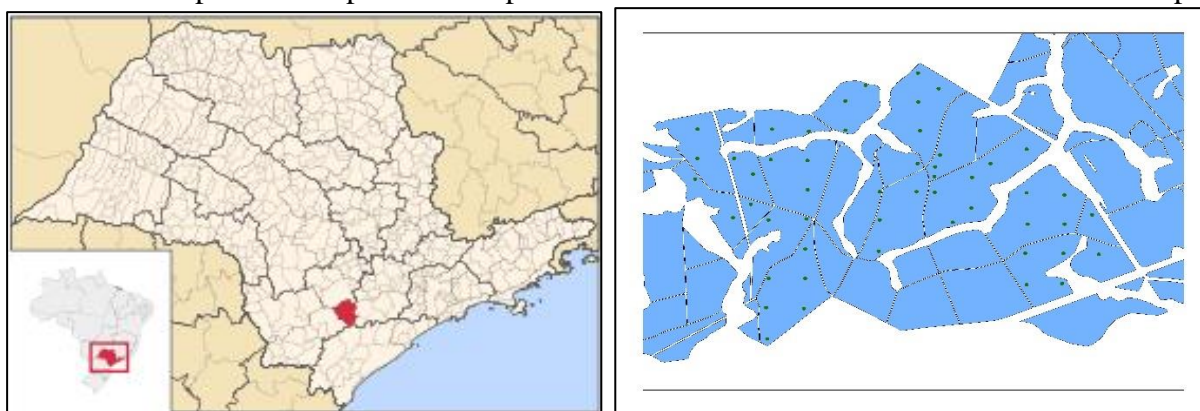


Figura 1 e 2. Localização do Município de São Miguel Arcanjo e das parcelas de inventário florestal dentro do plantio amostrado.

A análise do posicionamento das parcelas foi feita através de software de georreferenciamento (ArcGIS®). As coletas de dados de inventário foram contemporâneas à coleta de dados ALS de forma que sejam coerentes as comparações, calibração e validação dos dados. As parcelas de inventário utilizadas são de 400 m² em formato circular, georreferenciadas com equipamento GNSS em escala de precisão centimétrica. Em cada parcela foram coletadas as seguintes informações:

- Localização central (coordenada X e Y) da parcela circular;
- Número de identificação da parcela;
- Número da árvore;
- Diâmetro à altura do peito (DAP) em centímetros (medida a 1,3 m do solo);
- Altura total (H) em metros de 15 árvores da parcela;
- Altura total (Hd) em metros de 5 árvores dominantes da parcela;
- Dados qualitativos.

As informações coletadas em campo foram tabuladas em planilhas eletrônicas e calculadas as estimativas de área basal (AB), estimativas das alturas total (Ht) através das equações hipsométricas e volumes individuais de árvores através das equações alométricas. O Volume total com casca – VTCC - foi adotada como única variável dependente do modelo e o resultado utilizado para comparar entre os valores preditos e valores observados em campo. Para as métricas de altura média das árvores dominantes (MHDom) foram utilizadas a média de altura das 5 maiores árvores de cada parcela amostral como valor observado em campo.

Sobrevoos de escaneamento

O sobrevoos para coleta de dados LiDAR foi realizado com um avião modelo Cessna 206 no levantamento, com o uso do sistema inercial Applanix, modelo POS AV 150. Sensor LiDAR utilizado foi o Harrier 68i da Trimble, e obtendo os pontos com nuvem georreferenciada para o datum SIRGAS 2000 para o levantamento realizado sobre os talhões na região de São Miguel Arcanjo-SP (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição de dados do sobrevoos.

Características	Unidade	Descrição dos parâmetros
Densidade de pontos	retornos/m ²	10
Diâmetro do pulso no alvo	cm	15 a 30
Altura de voo	m	438
Velocidade de voo	km/h	198
Ângulo de escaneamento	graus	45
Frequência de escaneamento	kHz	70 a 80
Largura da faixa de varredura	m	363 m
Sobreposição lateral da faixa	%	30 a 50
Frequência de emissão do pulso a laser	kHz	400
Espaçamento entre os pontos do terreno	m	0,32
Datum horizontal	-	SIRGAS 2000
Datum vertical	-	Marégrafo de Imbituba-SC

Processamento dos dados

Os dados coletados passaram por uma etapa de pré-processamento através de softwares específicos para avaliação dos dados brutos, retiradas de ruídos e informações que não representem informações associadas em campo. As nuvens de pontos foram visualizadas na ferramenta *lasview* presente no software LASTools© v161029 (Isenburg, 2016) e obtidos o modelo digital de terreno (MDT) com a ferramenta *lasground*. Os pontos não classificados como modelo de terreno foram então normalizados com a ferramenta *lasheight* que calcula os novos valores de elevação dos pontos nas nuvens relativo ao modelo de terreno e não mais ao nível do Marégrafo de Imbituba-SC. As informações sobre a elevação dos pontos presente no conjunto de dados podem ser relacionadas diretamente com a altura das plantas encontradas no plantio florestal.

As métricas extraídas das nuvens de pontos são obtidas através do comando *cloudmetrics* do software FUSION© (McGaughey, 2015). As métricas sugeridas para utilizar nesse trabalho são baseadas em atributos de altura dos pontos no plano tridimensional gerado pela nuvem de pontos e relacionados ao solo (tabela 2).

Tabela 2. Métricas LiDAR geradas através da ferramenta *cloudmetrics* (FUSION©).

Categoria	Métricas LASER do aerolevanteamento	Símbolo
Altura	Todos os retornos acima de 2,00 metros	Hcima
	(Todos os retornos acima de 2,00 metros / todos os primeiros retornos) * 100	Prop
	Variância da altura	Hvar
	Média da altura	Hmed
	Percentil 25 da altura	P25
	Percentil 50 da altura	P50

Percentil 70 da altura	P70
Percentil 90 da altura	P90
Porcentagem de todos os retornos acima de 2,00 metros	Pct

A exploração de forma simples de como são geradas as medidas de classes de percentis de altura (P25, P50, P75, P90), média da altura (H_{med}), variância da altura (H_{var}) estão descritas a seguir:

Percentis

Classes de percentis de altura (P%)

$$(n - 1)p = i + f \quad (1)$$

Em que: n = número de observações; p = valor do percentil / 100;

Se o valor de f = 0, então:

$$P\% = x_{i+1} \quad (2)$$

Se o valor de f > 0, então:

$$P\% = x_{i+1} + f(x_{i+2} - x_{i+1}) \quad (3)$$

Médias

Média de altura (H_{med}):

$$H_{med} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n h_i \quad (4)$$

Onde: n = número de observações na nuvem de pontos; H_i = altura no ponto i .

Variância

Variância de altura (H_{var}):

$$H_{var} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (h_i - h_{med})^2 \quad (5)$$

Onde: n = número de observações na nuvem de pontos; H_i = altura no ponto i .

Modelagem

Para evitar a colinearidade entre as variáveis independentes que compõe os modelos volumétricos foi aplicado o teste do coeficiente de correlação de Pearson (p) e selecionadas as variáveis que possuíam valores de coeficientes entre -0,90 e 0,90. As variáveis que possuíam valores (p) abaixo de -0,90 ou superior a 0,90, foram consideradas colineares, ou seja, as duas não poderiam participar do modelo simultaneamente, devendo ser selecionada a que tem maior potencial preditiva no modelo.

Os modelos foram gerados através da técnica de regressão linear entre variáveis independentes selecionadas das métricas LiDAR da nuvem de pontos sobre 26 parcelas selecionadas aleatoriamente. Em seguida, os modelos ajustados foram usados na predição volumétrica de outras 25 parcelas e os valores foram comparados com os observados em medições de campo. Da comparação dos valores preditos e observados obteve-se os coeficientes de determinação (R^2) e os valores de raiz do erro quadrático médio (RMSE), os quais serão critérios para avaliação dos melhores modelos.

Estimativas de altura de árvores dominantes

A ferramenta *cloudmetrics* do software FUSION© (McGaughey, 2015) retorna número de pontos LiDAR observados em diferentes percentis de altura dos dados. As informações de média de altura das árvores dominantes obtidas de 51 parcelas de campo sobre as quais havia uma nuvem de pontos ALS associada foram correlacionadas linearmente com os percentis de altura P80, P90, P95 e P99. As melhores estimativas de correlação foram comparadas quanto ao coeficiente de determinação e RMSE.

3. Resultados e Discussão

Modelagem

A análise do coeficiente de correlação de Pearson foi realizada entre as 9 variáveis candidatas a compor o modelo de predição volumétrica (tabela 3).

Tabela 3. Resultados dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de LiDAR.

	Hacima	Hmed	Hvar	P25	P50	P75	P90	Pct	Prop
Hacima	1								
Hmed	0,2673	1							
Hvar	0,1288	0,6243	1						
P25	0,3147	0,8975	0,3340	1					
P50	0,2303	0,9822	0,7540	0,8231	1				
P75	0,2400	0,9680	0,7965	0,7856	0,9962	1			
P90	0,2506	0,9578	0,8158	0,7662	0,9907	0,9986	1		
Pct	0,1842	-0,3158	-0,6058	-0,1468	-0,4119	-0,4320	-0,4399	1	
Prop	0,3423	-0,2810	-0,3007	-0,2329	-0,3183	-0,3087	-0,2985	0,8743	1

As variáveis de percentil de altura tiveram alta correlação entre elas ($p > 0,90$) e com a Hmed, com exceção da P25. A variável Hvar, Hacima, Hmed, Pct e Prop não apresentaram alta correlação entre si e tampouco com outras variáveis de percentil de altura. Dentre essas variáveis, foram selecionadas a Hvar, P25 e P90 como variáveis de entrada (independente) para compor os modelos de predição volumétrica. Foram utilizadas diferentes combinações entre as variáveis para ajustar melhor resultado na predição de volume das parcelas em campo.

Definida as variáveis independentes do modelo, as métricas correspondentes extraídas das nuvens de pontos das parcelas selecionadas como calibração foram utilizadas na regressão linear para a geração de modelo.

Os modelos apresentaram bom ajuste ao conjunto de dados com coeficientes de determinação elevados e com níveis de RMSE e rRMSE aceitáveis. Independentemente de quais variáveis foram utilizadas na geração do modelo, os níveis de R^2 foram superiores a 0,90 (tabela 4).

Tabela 4. Modelos ajustados com as informações das parcelas de campo.

Nº	Variáveis	Equação volumétrica ajustada	R ²	RMSE	rRMSE (%)
1	Hvar, P25 e P90	VTCC = -63,3145+1,8663*Hvar + +6,3026*P25+5,7083*P90	0,93	31,40	11,30
2	Hvar e P25	VTCC = -11,3752+2,6537*Hvar + +9,1851*P25	0,91	36,45	13,12
3	Hvar e P90	VTCC = -137,001+0,4846*Hvar + +15,9692*P90	0,94	28,49	10,26
4	P25 e P90	VTCC = -168,715+0,2828*P25 + +17,9196*P90	0,93	31,37	11,30

O modelo 4 que envolve apenas P25 e P90 como variáveis independentes apresentou um coeficiente de determinação elevado e indica uma forte correlação entre as métricas extraídas dos dados LiDAR com predição volumétrica do plantio florestal. Na avaliação geral, o modelo que contém Hvar e P90 como variáveis independentes apresentaram r^2 de 0,94 e RMSE de 28,49 m. Em trabalho realizado em florestas plantadas, Silva (2014) modelou a biomassa de

experimento em floresta plantada na região de Avaré-SP e encontrou valores de estimativas mais precisas com o uso de métricas ALS do que com o uso de krigagem ordinária (RMSE = 5,5% em dados ALS, 12,7% com krigagem ordinária) utilizando variáveis de percentil 30 e parâmetro de forma da função Weibull.

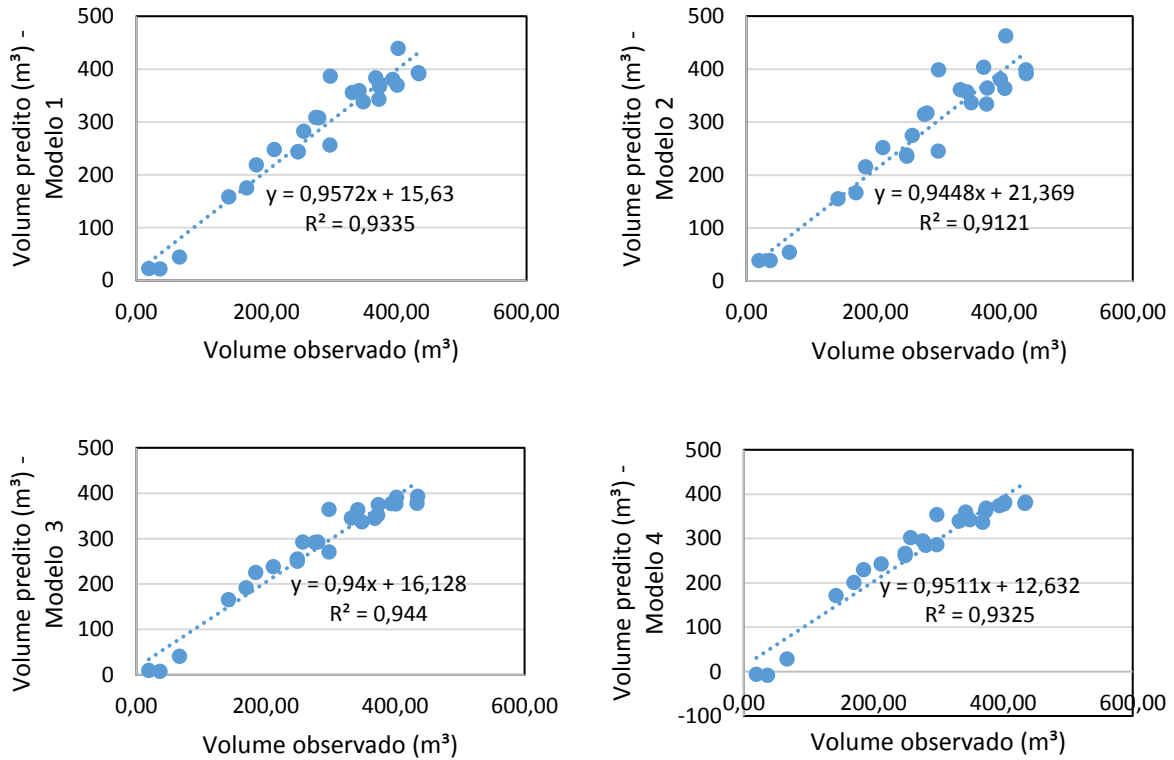


Figura 3, 4, 5 e 6. Gráfico da correlação entre os volumes de madeira (m³) predito e observado para cada parcela através do modelo 1, modelo 2, modelo 3 e modelo 4, respectivamente.

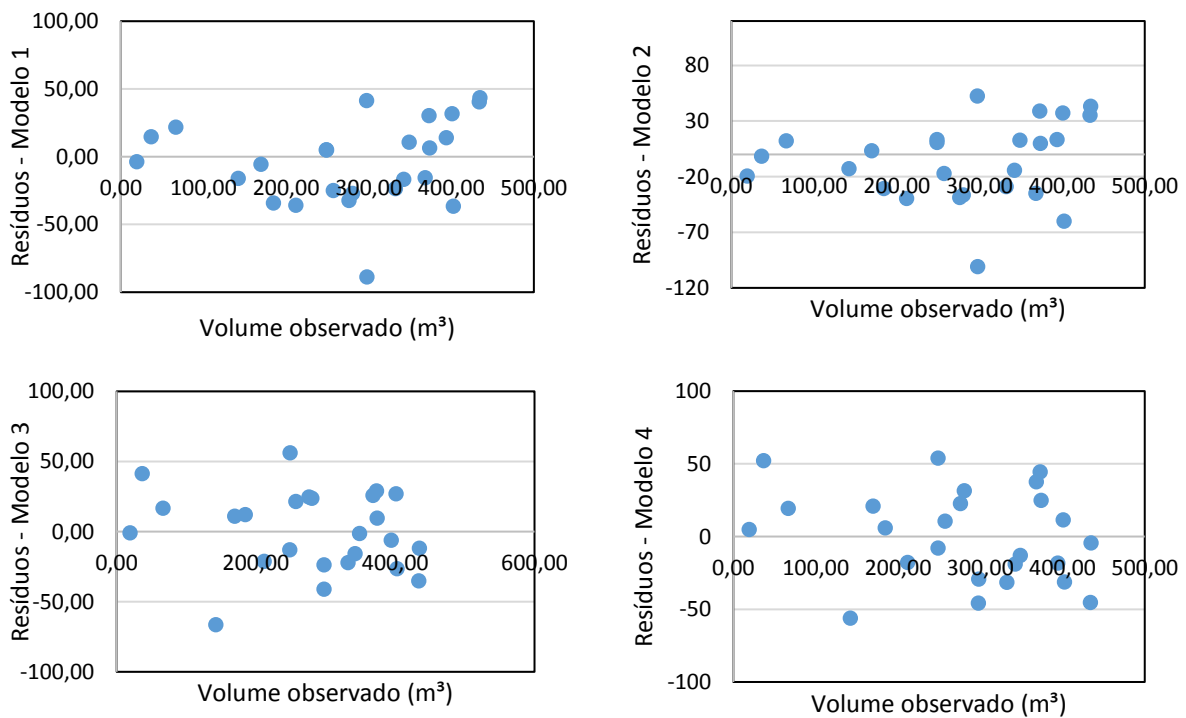


Figura 7, 8, 9 e 10. Gráfico da dispersão dos resíduos no gradiente crescente do volume de madeira (m³) predito para cada parcela através dos quatro modelos

Estimativas de altura de árvores dominantes

A correlação entre as médias de alturas das árvores dominantes encontradas nas parcelas amostradas e as médias de altura dos percentis foi positivo para as quatro métricas de percentil. Todos as correlações realizadas mostraram coeficiente de determinação altos, de certa forma esperados, uma vez que se trata de plantios são homogêneos (tabela 5). Dentre as correlações, a que apresentou o menor RMSE foi a variável P99, com valor de 1,34 e com rRMSE de 5,07%. Em trabalho realizado com povoamento de eucalipto, Laranja (2016) obteve resultados de RMSE entre 1,28 e 2,47 m e valores de rRMSE 4,96 a 9,56 %, coerente com valores obserdos nesse projeto.

Tabela 5. Equação de altura entre os percentis e Média de altura das Dominantes (MHDom)

Variáveis	Equação de relação ajustada	R ²	RMSE	rRMSE (%)
P80	MHDom = 1,1144 * P80 - 5,2372	0,97	2,59	9,80
P90	MHDom = 1,1048 * P90 - 4,3662	0,97	2,04	7,73
P95	MHDom = 1,0945 * P95 - 3,6515	0,97	1,69	6,41
P99	MHDom = 1,0680 * P99 - 2,2188	0,96	1,34	5,07

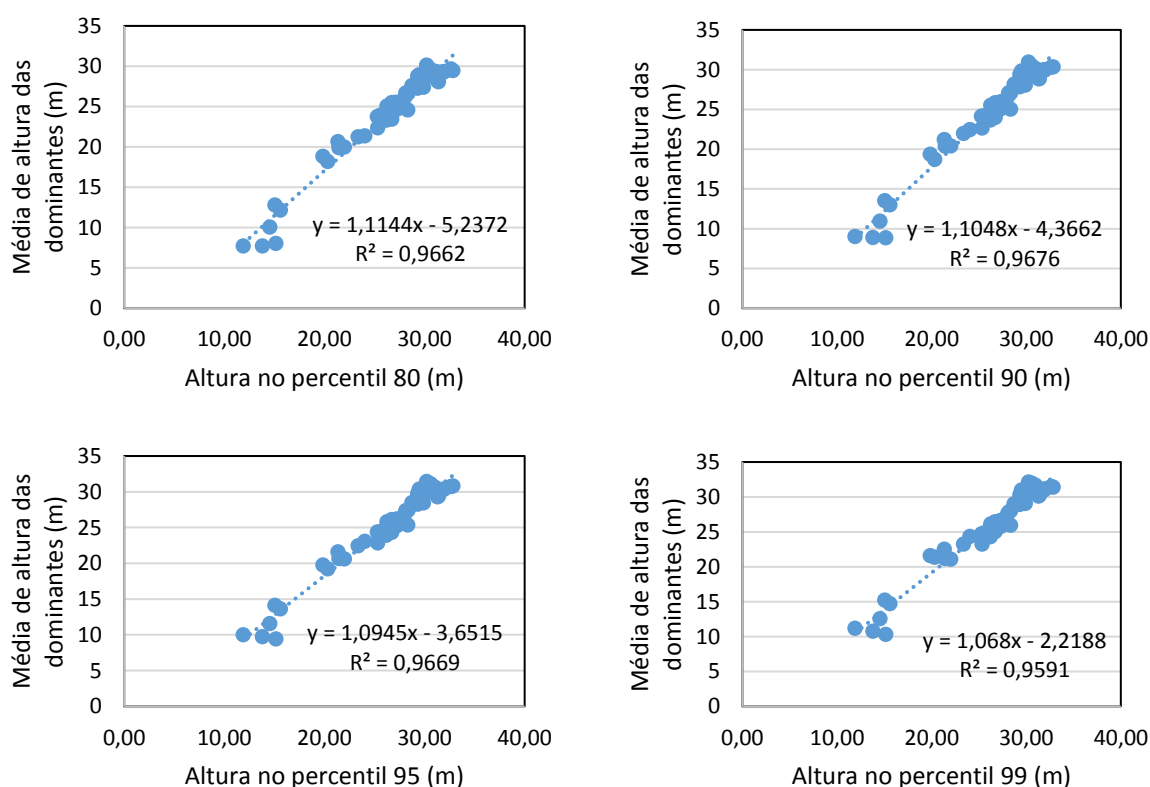


Figura 11, 12, 13 e 14. Gráfico da correlação entre os volumes de madeira (m³) predito e observado para as métricas de percentil P80, P90, P95 e P99.

4. Conclusões

A qualidade dos dados de campo de inventário florestal é muito importante para a fidelidade da associação entre as métricas calculadas e os valores observados em campo. O potencial de uso das informações de nuvens ALS é grande e o desafio está na seleção das métricas que melhor representam as informações presente nas parcelas de campo.

As variáveis selecionadas para a composição dos modelos foram adequadas e mostraram correlação positiva dos valores preditos com os valores de volume observados nas parcelas

amostrais. Informações mais detalhadas sobre o potencial do modelo nas gerações das métricas na predição volumétrica podem ser estudadas com amostras de diferentes unidades de manejo dentro de um mesmo plantio florestal e talhões florestais com idades diferentes que tragam amostras mais heterogêneas do campo.

Agradecimentos

Ao CNPq pelos recursos destinados ao financiamento do projeto e à empresa Suzano Papel e Celulose S/A pelo oferecimento dos dados de florestas plantadas e do sobrevoos LiDAR.

Referências Bibliográficas

Araújo, L. V. C. de; Leite, J. A. N.; Paes, J. B. Estimativa da Produção de Biomassa de Um Povoamento de Jurema-Preta (*Mimosa tenuiflora*) com cinco anos de idade. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 347–352, 2004.

Campos, J. C. C.; Leite, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 605 p.

Isenburg, M. **LASTOOLS v161029**, 2016. Disponível em: <<http://lastools.org>> Acesso em: 02 out. 2016.

Laranja, D. C. F. **Estudo de parâmetros populacionais de plantios clonais de *Eucalyptus* spp . a partir de nuvens de pontos obtidos com escaneamento a laser aerotransportado**. 2016. 137 p. (ESALQ-CDD 634.9734 L318e). Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2016.

Loch, R. E. N; Schäfer, A. G. Airborne laser scanning in the brazilian market. In: XXXV Congress of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Technical Commission VI, p 33-36., 2004, Istanbul, Turkey. **Anais...** Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm6/papers/675.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2016.

McGaughey, R. J. **FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization**, 2015. Disponível em: <<http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>> Acesso em: 12 dez. 2015.

Rodriguez, L. C. E.; Polizel, J. L.; Ferraz, S. F. D. B.; Zonete, M. F.; Ferreira, M. Z. Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp no Brasil. **Ambiência**, v. 6, n. March 2016, p. 67–80, 2010.

Silva, A. G. P. **Estimativa da biomassa de lenho em povoamentos de *Eucalyptus grandis* baseada em estatísticas do perfil de dossel geradas por escaneamento a laser aerotransportado**. 2014. 146 p. (ESALQ-CDD 634.9734 L318e). Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2014.