

Comparação de modelos lidar para a estimativa de biomassa seca acima do solo de florestas com diferentes históricos de perturbação natural ou antrópica no Estado do Acre

Marcus Vinicio Neves d'Oliveira¹
Luis Claudio Olveira¹

¹ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA ACRE
Caixa Postal 321- 69.900-970 - Rio Branco – AC, Brasil.
marcus.oliveira@embrapa.br;
luis.oliveira@embrapa.br

Abstract: Lidar data has been largely used to produce estimative on biomass and timber stocks in tropical forests. A major problem is the lidar flights costs, and the exhaustive and expensive ground plot data acquisition necessary to calibrate lidar data metrics. The use of ground information from previously established plots and the generalization of existent models to structurally similar forests should be a way to minimize these costs. In this work we study six forest in Acre state with similar structure and different disturbance history covered by lidar flights and forest inventories. We investigate whether the use of plots with different sizes violate the null hypothesis of the variance equality of the lidar metrics and tested the use of a lidar general model to estimate the biomass on the studied sites. We generated regression models to estimate above ground biomass for each area and compared them to a general model elaborated with the ground and lidar information of all areas together. The results showed that the null hypotheses of the variance was not violated to the variable selected to compose the models and no significant differences were found among the local and general models suggesting that in the absence of forest inventories, when forest were structurally similar, a general lidar model can be used to assess biomass stocks.

Palavras chave: calibração de métricas; variância; teste de parâmetros; generalização de modelos

1. Introdução

Lidar tem sido largamente utilizado para estimar parâmetros florestais em florestas tropicais (ex. Drake et al., 2002; d'Oliveira et al., 2012; Andersen et al., 2014; Asner, 2014, Saat et al., 2007). Essa ferramenta também permite a estimativa de estoques de biomassa e carbono ao longo de um largo gradientes de uso da terra, tipologias florestais e perturbações naturais ou antrópicas (ex. Drake et al., 2002; Asner et al., 2011). Um forte limitante ao uso de dados lidar no manejo de florestas são os custos ainda altos desses levantamentos especialmente em regiões mais distantes dos grandes centros como o sudoeste da Amazônia Brasileira onde ainda não existem empresas fornecedores de serviços de aquisição de dados lidar.

No topo desses custos existe ainda a demanda por trabalhos de campo (inventários florestais) para a calibração dos dados lidar. Modelos produzidos para estimativa de parâmetros

estruturais de florestas, a partir de métricas de dados lidar podem produzir resultados significativamente diferentes quando extrapolados para florestas com características diferentes (ex. Drake et al., 2001). Essas diferenças podem ser produzidas pela utilização de equações alométricas diferentes para a estimativa de biomassa das parcelas ou por diferenças estruturais entre as florestas. A incorporação de parâmetros ecológicos como a relação altura-diâmetro das árvores e densidade da madeira podem diminuir de forma significativa o esforço de coleta de dados de campo para a calibração de dados lidar aerotransportados, por meio do uso de um modelo “universal” facilmente adaptável à diversas tipologias florestais (Asner et al., 2011).

Neste trabalho estudamos seis florestas no estado do Acre com estrutura similar e diferentes histórias de perturbações naturais ou antrópicas cobertas por voos lidar e inventários florestais. Investigamos se o uso de parcelas com tamanhos diferentes violou a hipótese nula da igualdade de variância das métricas do lidar e testamos o uso de um modelo geral lidar para estimar a biomassa nos locais estudados.

2. Material e Métodos

O estudo foi realizado em seis áreas de floresta no Estado do Acre localizadas na Reserva indígena Kaxinawa (Município de Feijó); Floresta Estadual do Antimary (Município de Bujari); PAD Humaita (Município de Porto Acre; Fazenda Bonal (Município de Senador Guiomar) e Embrapa Acre (Rio Branco) (Figura 1). As florestas amostradas são estruturalmente semelhantes, mas sofreram diferentes formas de perturbação. A área da RI Kaxinawa possui apenas pequenas áreas de floresta secundária formadas a partir da abertura de roçados. As duas áreas da FEA são unidades de produção anual, exploradas em 2010, 2011 e 2013. As áreas da Fazenda Bonal e Humaita foram queimadas dez anos antes do voo lidar (Sato, et al., 2016) e a área da Embrapa Acre, uma floresta na sua quase totalidade sem perturbação antrópica.

Os voos lidar ocorreram entre os anos de 2010 e 2015 seguindo especificações técnicas semelhantes, altitude em torno de 500 m acima do solo; taxa de varrimento de 70 Hz; densidade de pontos média de 5 pulsos m^2 (exceto a área da FEA 2010 onde a densidade foi de 25 pulsos / m^2).

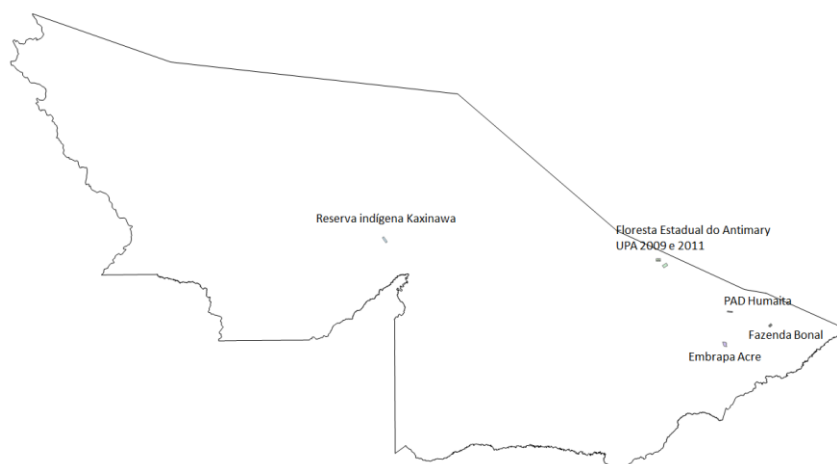


Figura 1. Mapa do Estado do Acre, mostrando a localização dos polígonos das áreas cobertas pelos voos lidar nas florestas estudadas.

Os modelos foram elaborados a partir de inventários florestais executados nas 6 áreas e das métricas das amostras lidar. Foram usadas parcelas de ¼ ha (FEA 2010 – N = 50, Bonal e Humaita – N = 10) e 1 ha (Embrapa Acre N=5; FEA 2011 – N = 10; Kaxinawa N = 12). Para compatibilizar as informações dos inventários florestais, nesse estudo foram consideradas apenas árvores com DAP igual ou superior a 35 cm. Para as estimativas de biomassa seca acima do solo (BSA) das árvores foi usada uma única equação desenvolvida para áreas de floresta aberta (Nogueira et al., 2008 - Eq. 1).

$$BSA = (EXP (-1,716+2.413 * Ln (DAP)) / 1000 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

BSA: Biomassa real da árvore cortada;

EXP: Exponencial;

Ln: Logaritmo neperiano;

DAP: Diâmetro a 1,30 m do solo.

Técnicas de regressão multilinear (SAS 9.2) foram aplicadas para desenvolver modelos relacionando dados derivados do lidar e dados de inventário florestal para biomassa seca acima do solo. O processamento dos dados Lidar foi feito com os softwares Fusion (McGaughey, 2014) e ArcGis 10.0. A partir dos dados brutos lidar foram criados: i. modelo digital do terreno (MDT); ii. modelo de altura de dossel (CHM); iii. modelo de biomassa seca acima do solo seguindo a metodologia sugerida por d'Oliveira et al, 2012 e 2014. As médias das estimativas de biomassa produzidas pelos modelos foram comparadas por análise de variância (ANOVA) e um modelo geral foi produzido para todas as áreas. A hipótese de igualdade da variância para às elevações extraídas em parcelas de tamanho 0,25 e 1,0 hectare foi testada através do teste t (PROC TTEST). A hipótese de inclinações iguais para as equações ajustadas entre os valores preditos na equação geral e as locais, foi testada através de análise de covariância e às diferenças

entre parâmetros através de teste de médias por quadrados mínimos usando o PROC MIXED do SAS 9.2.

3. Resultados e discussão

A análise de variância mostrou que apesar dos diferentes históricos de distúrbios naturais ou antrópicos, não existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos estoques de biomassa das áreas estudadas (Tabela 1). Uma explicação plausível é que a intensidade de corte praticada nas unidades de produção anual da floresta estadual do Antimary (FEA 2009 e 2011), entre 10-15 m³. ha⁻¹, aliada a aplicação de técnicas adequadas de planejamento e execução de operações florestais, não produziram alterações significativas na estrutura da floresta manejada. Nas áreas queimadas (Bonal e Humaita), aparentemente o fogo atingiu mais fortemente o sub-bosque sem afetar significativamente os estoques de biomassa das árvores de 35 cm de DAP e acima. Da mesma forma, as áreas com roçados abandonados da reserva indígena Kaxinawa representaram menos de 1% da área total voada pelo lidar e não foram amostradas pelo inventário. Finalmente o tempo decorrido (23 anos) entre o manejo aplicado à área de reserva florestal da Embrapa Acre e o voo e última avaliação das parcelas permanentes ali instaladas foi suficiente para a total recuperação da floresta.

A hipótese de igualdade da variância para às elevações extraídas em parcelas de tamanho 0,25 e 1,0 hectare testada através do teste t (PROC TTEST) resultou significativa apenas para a variável Elev_P01 (elevação média no primeiro percentil). Essa variável no entanto, normalmente não é utilizada nos modelos para predição de biomassa seca acima do solo por representar uma fração do sub-bosque da floresta não significativa para esse parâmetro (Tabela 2).

Todos modelos de regressão produzidos relacionando biomassa observada e métricas lidar, com exceção da área de floresta da Bonal, obtiveram valores de coeficiente de determinação ajustados (R²adj.) acima de 0,6 e relativamente baixo erro padrão da média (EP) (Tabela 3). Esse nível de significância das equações foi dentro do esperado e semelhante ao encontrado em outros estudos em florestas da região (d'Oliveira 2012, Andersen, 2014; Longo et al., 2016). Apesar do elevado coeficiente de correlação e baixo EP o modelo ajustado para a floresta da Embrapa Acre deve ser visto com reserva dado ao baixo número de parcelas (N = 5) utilizadas para calibração.

Tabela 1. Análise de variância para testar diferenças entre as médias de biomassa seca acima do solo (Mg. ha⁻¹) entre as parcelas dos inventários florestais nas áreas estudadas

Grupo	N	Soma	Média	Var.		
KXW	12	1835,04	152,92	5252,42		
FEA09	50	6661,43	133,23	4397,29		
FEA11	10	1807,70	180,77	3985,31		
BNL	10	1226,42	122,64	4124,66		
HMT	10	1155,61	115,56	2871,67		
CPAFAC	5	937,58	187,52	2300,52		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	41172,13	6	6862,0	1,62	0,15	2,2

Dentro dos grupos	381280,7	90	4236,5			
Total	422452,8	96				

Onde: BNL - Fazenda Bonal; CPAFAC - Embrapa Acre; FEA10 - FEA UPA 2009; FEA11 - FEA UPA 2011; HMT - PAD Humaita E KXW - RI Kaxinawa

Tabela 2 – Sumário da aplicação do Teste t para igualdade de variância entre parcelas de 0,25 e 1 ha utilizadas para variáveis derivada da elevação dos retornos extraídos de dados LIDAR. Apenas são apresentados resultados de variáveis que violaram a igualdade da variância e variáveis selecionadas para os modelos

Variável	N DF	Den. DF	F	p <	Variável	N DF	Den.	F	p <
ElevMean	24	71	1.13	0.6698	P_05	24	71	1.55	0.161
ElevVar	24	71	1.74	0.1279	P_70	24	71	1.41	0.350
ElevIQ	24	71	1.67	0.1611	P_75	24	71	1.57	0.219
ElevSkw	24	71	1.15	0.7273	P_95	24	71	1.08	0.859
P_01	24	71	2.35	0.006	P_99	24	71	1.16	0.614

Tabela 3. Modelos de regressão para biomassa seca acima do solo relacionando resultados de inventários florestais e métricas de amostras lidar elaborados para cada sítio e um modelo geral composto por todos os conjuntos de dados.

Área	Modelo de regressão	F	R ²	EP
CPAFAC	-299,8 + 18,94 x ElevP75	32,5	0,89	16,1
FEA09	2,7 + 4,07 x ElevVar - 16,91 x ElevIQ - 80,5 x ElevSkw + 6,54 x ElevP05	30,5	0,71	35,9
FEA11	-708,48 + ElevVar x (-2,71) + 64,42 x ElevIQ + 680,71 x ElevL4	9,9	0,75	31,7
Kaxinawa	-135,86 + 15,37 ElevMean	43,6	0,79	32,8
Bonal	-209 + 9,94 x ElevP99	7,5	0,42	49,0
Humaita	109,6 + 9,70 x ElevP75	71,6	0,89	18,0
Geral	-255,4 + 4,42 x ElevP70 + 8.88 x ElevP95	73,4	0,60	41,9

As métricas de elevação obtidas dos dados lidar representadas nos modelos são: ElevMean – média; ElevVar – variância; ElevIQ – média do interquartil; ElevSkw – assimetria da distribuição de frequência; ElevP01a P99 – média nos percentis (McGaughey, 2014).

A análise de covariância para testar a hipótese de inclinações iguais para as equações ajustadas entre os valores preditos pela equação geral e locais, não apresentou diferenças significativas ($p < 0,001$) para nenhuma das áreas estudadas (Figura 2). Valores de R²aj variaram de 0,63 a 0,94 portanto elevados mesmo na área da Fazenda Bonal onde com os dados da área o modelo não havia apresentado um bom ajuste.

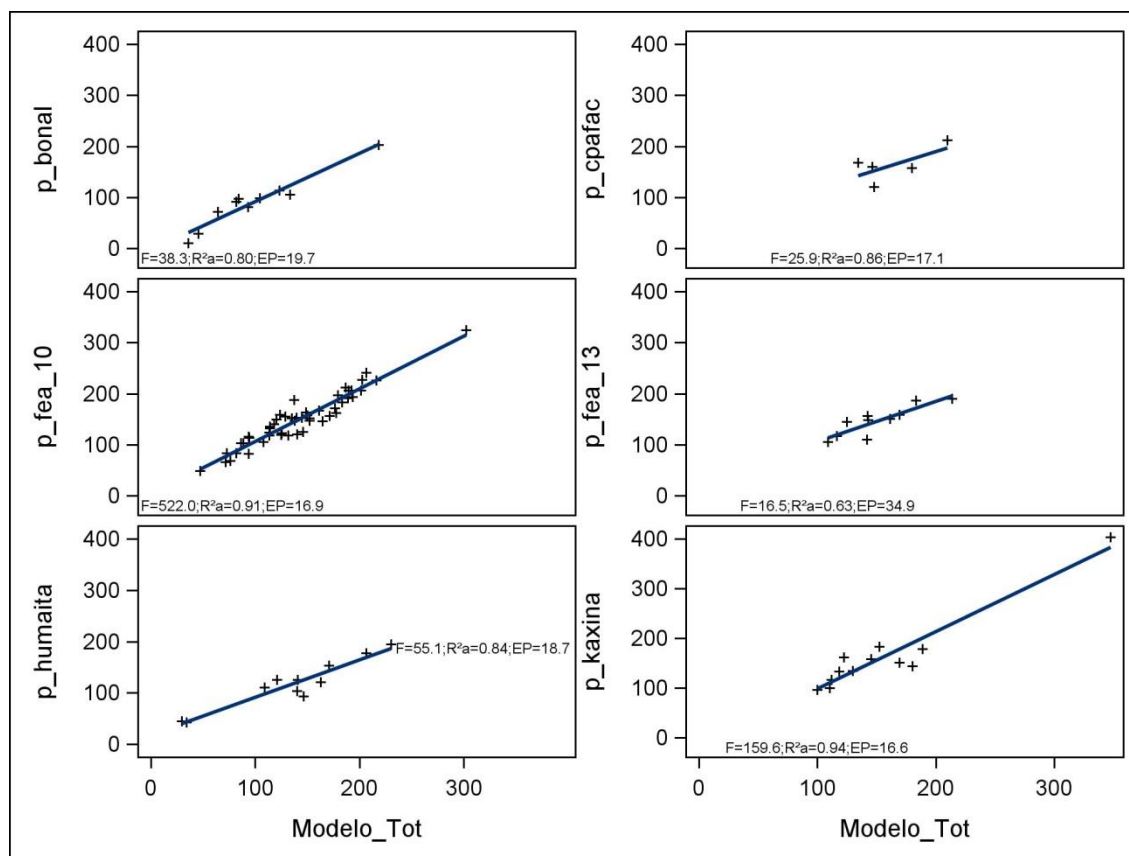


Figura 2 Comparação entre os modelos de regressão linear gerados para estimativa de biomassa seca acima do solo ($DAP \geq 35$ cm) para cada uma das áreas de estudo e o modelo geral (Modelo_tot) produzido com todas as informações de inventário florestal e lidar.

As estimativas de biomassa produzidas por meio do uso do modelo geral nas áreas estudadas foram consistentes com as estimativas produzidas pelas equações locais, sem diferença estatisticamente significativa entre as médias geradas pelos modelos local e geral (Tabela 4) e com exceção da área da Embrapa Acre, valores para R^2_{aj} e EP similares aos apresentados pelas equações produzidas pelos modelos locais (Figura 3). A discrepância entre observado e previsto no caso da Embrapa Acre, era esperado em função do pequeno número de amostras não foi suficiente para validar o modelo. De qualquer forma, os resultados demonstram que florestas estruturalmente semelhantes podem ter seus estoques de biomassa estimados com relativa precisão, sem calibração de campo por meio do uso de um modelo geral.

Tabela 4. Biomassa seca acima do solo média ($Mg\ ha^{-1}$) e erro padrão da média das parcelas dos inventários florestais ($DAP \geq 35$ cm) e estimados pelos modelos lidar desenvolvido com dados do próprio sítio (local) e geral.

	IF		Eq.Lidar Local		Eq. Lidar Geral		Anova	
	Média	EP	Média	EP	Média	EP	F	p
CPAFAC	187,5	21,4	188,4	34,7	163,6	13,7	1,0	0,34
FEA09	133,2	9,4	133,2	8,2	141,8	6,6	0,6	0,41
FEA11	180,8	20,0	180,8	18,2	150,6	10,2	2,1	0,16
Kaxinawa	152,9	20,9	152,5	18,9	156,3	20,7	0,0	0,90
Bonal	122,6	20,3	122,3	14,1	98,0	16,5	1,3	0,28
Humaita	115,6	16,9	115,4	15,8	134,9	20,7	0,5	0,46

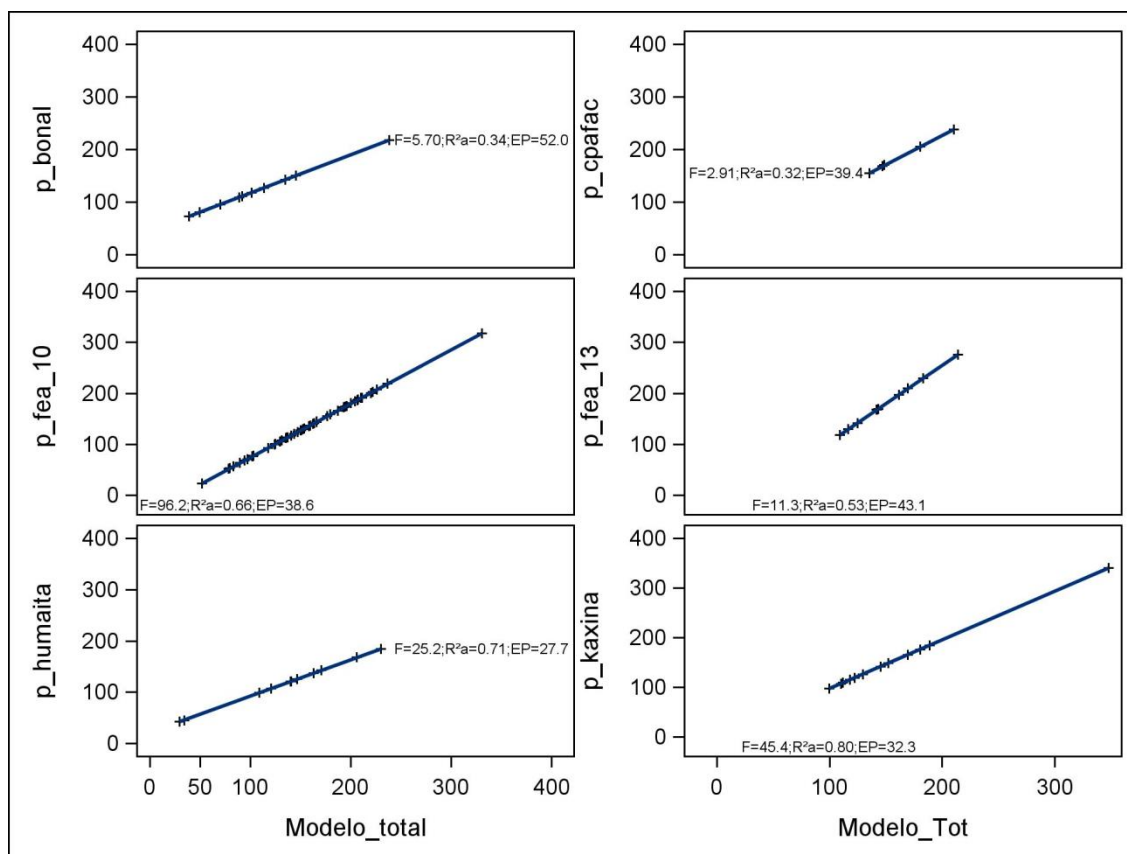


Figura 3. Aplicação do modelo geral de regressão para estimativa de biomassa seca (BSA – Mg. ha^{-1}) acima do solo relacionando biomassa observada (inventário florestal) e métricas de dados lidar em cada uma das áreas estudadas.

4. Conclusões

A utilização de parcelas com diferentes tamanhos não violou a hipótese nula da igualdade da variância para nenhuma das métricas selecionadas para os modelos de regressão para biomassa e os testes para a inclinação das equações ajustadas relacionando os valores preditos para biomassa da equação geral e locais, foi sempre não significativo ($p < 0,001$). Esses dois resultados permitem concluir que modelos de regressão relacionando dados de inventários florestal e métricas de dados lidar podem ser construídos com a utilização de parcelas de áreas diferentes e que esses modelos podem ser generalizados para florestas com estrutura semelhante onde não houver informação de campo.

Agradecimentos

Os dados LiDAR utilizados neste trabalho foram adquiridos pelo Projeto Paisagens sustentáveis uma parceria entre o Serviço Florestal Americano e a Embrapa

Referências bibliográficas:

Andersen, H; Reutebuch, S.E.; Mcgaughey, R.J.; d'oliveira, M.V.N.; Keller, Michael. 2014 Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat LIDAR flights. Remote Sensing of Environment, 151:157-165.

- Asner, G. P., Mascaro, J., Muller-Landau, H. C., Vieilledent, G., Vaudry, R., Rasamoelina, M., et al. (2011). A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-011-2165-z>.
- Asner, G. P., Powell, G. V. N., Mascaro, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., et al. (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 16738–16742.
- Drake, J. B., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Knox, R. G., Blair, J. B., Hofton, M. A., et al. (2002a). Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, 79, 305–319.
- Drake, J. B., Dubayah, R. O., Knox, R. G., Clark, D. B., & Blair, J. B. (2002b). Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 81, 378–392.
- Drake, J. B., Knox, R. G., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Condit, R., Blair, J. B., et al. (2003). Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forest using lidar remote sensing: Factors affecting the generality of relationships. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 147–159.
- D'Oliveira, M.V.N.; Reutebuch, S.E.; Mcgaughey, R.J.; Andersen, H.E. 2012. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning LIDAR in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 124: 479-491.
- Figueiredo, E.O; D'oliveira, M.V.N.; Braz, E.M.; Papa, D.A.; Fearnside, P.M. 2016. LIDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: Comparisons of ground-based and remotely sensed estimates. *Remote Sensing of Environment*, 187:281-293.
- Nogueira, E. M., Fearnside, P. M., Nelson, B. W., Barbosa, R. I., & Keizer, E. W. H. (2008). Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, 256(11), 1853–1867.
- Saatchi, S.S.; Houghto, R.A.; Alvala, R.C.S.; Soares, J.V.; Yu, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology* (2007) 13, 816–837.
- Sato, L.Y.; Gomes, V.C.F.; Shimabukuro, Y.E.; Keller, M.; Arai, E.; dos-Santos, M.N.; Brown, I.F.; Aragão, L.E.O.C. 2016. Post-Fire Changes in Forest Biomass Retrieved by Airborne LiDAR in Amazonia. *Remote sensing*, 8, 839.