



**Estimativas das Alterações na Biomassa Florestal Utilizando LiDAR em
Área de Manejo Florestal Sustentável na Amazônia Sul-Occidental**
Estimates of Changes in Forest Biomass Using LiDAR in the Area of
Sustainable Forest Management in the South-Western Amazon

Leilson Ferreira Gomes¹; Ricardo Seixas Brites¹; Charton
Jahn Locks² & Rosiane Rezende dos Anjos³

¹Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências
Aplicadas e Geodinâmica, Via L3 Norte, 70910-900, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil

²Serviço Florestal Brasileiro, Via L4 Norte, 70818-900, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil

³Faculdade Educacional da Lapa, Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental e
Sustentabilidade, Rua Rio de Janeiro 441, 30160-040, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil

E-mails: leilsonferreiragomes@gmail.com; brites.ricardo@gmail.com; chartonjlocks@gmail.com; rrezende.anjos@gmail.com

Recebido em: 31/10/2019 Aprovado em: 22/04/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_260_268

Resumo

As estimativas de estoques de biomassa e carbono associadas com a Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REDD) requerem confiabilidade e acurácia das informações. Como a obtenção das variáveis em campo consome tempo e recursos e, em alguns casos, torna-se inviável pelas dificuldades de acesso, o estudo de métodos alternativos têm possibilitado extrair informações de áreas florestais de forma confiável. Os sistemas a laser aerotransportados, baseados na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), permitem a obtenção de informações tridimensionais acerca da superfície terrestre com alta precisão. O objetivo deste estudo foi testar o uso de dados LiDAR para estimar as alterações na cobertura do dossel e AGB, associadas à exploração florestal na Amazônia Sul-Occidental Brasileira. Os sobrevoos ocorreram em 2013, 2014 e 2015, antes e após a exploração, juntos com coletas de dados em campo em dez parcelas permanentes onde a medição do diâmetro de todos os indivíduos com $DAP \geq 10$ cm a 1,30 m do solo. Um modelo de regressão para estimar as alterações na AGB foi desenvolvido a partir dos dados LiDAR e dados de campo. Uma simples diferenciação das coberturas do dossel, antes e após a exploração, identificou áreas onde o dossel com mais de 10 m de altura foi removido. A redução média de AGB foi de $21,36 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (8,9%). Já a redução na cobertura do dossel, foi estimada em 0,08 ha (8,2%). O modelo pode ser considerado satisfatório, visto que apresentou bons resultados estatísticos como R_{aj}^2 de 0,74, RMSE de $21,10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e teste de significância F de 27,19. Este trabalho demonstra o potencial do LiDAR para quantificação de mudanças estruturais do dossel em florestas tropicais exploradas. Esses resultados indicam que o LiDAR pode ser uma ferramenta valiosa para sistemas de monitoramento de carbono relacionados a REDD e pode fornecer um meio de quantificar mudanças no carbono acima do solo atribuíveis a atividades de exploração madeireira. Devido às dificuldades associadas ao trabalho de campo em áreas remotas, é admissível que as remediações sejam obtidas com dados LiDAR, para fins de monitoramento das alterações da AGB.

Palavras-chave: Cobertura do Dossel; Monitoramento de Florestas Tropicais; Sistema a Laser Aerotransportado

Abstract

Estimates of biomass and carbon stocks associated with Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD) require information reliability and accuracy. Since obtaining the variables in the field consumes time and resources and, in some cases, is not feasible due to access difficulties, the study of alternative methods has made it possible to extract information from forest areas reliably. The airborne laser systems, based on LiDAR (Light Detection and Ranging) technology, allow obtaining three-dimensional information about the earth's surface with high precision. The objective of this study was to test the use of LiDAR data to estimate changes in canopy cover and AGB, associated with forest in the Brazilian South-Western Amazon. Overflying occurred in 2013, 2014 and 2015, before and after the exploration, together with field data collection in ten permanent plots where measurement of the diameter of all individuals with DBH ≥ 10 cm at 1.30 m above the ground was carried out. A regression model to estimate changes in AGB was developed from the LiDAR data and field data. A simple differentiation of the canopy covers, before and after the exploration, identified areas where the canopy with more than 10 m of height was removed. The mean reduction in AGB was 21.36 Mg.ha⁻¹ (8.9%). The reduction in canopy cover was estimated at 0.08 ha (8.2%). The model can be considered satisfactory, since it presented good statistical results as R_{aj}^2 of 0.74, RMSE of 21.10 Mg.ha⁻¹ and test of significance F of 27.19. This work demonstrates the potential of LiDAR for quantification of canopy structural changes in tropical forests. These results indicate that LiDAR can be a valuable tool for REDD-related carbon monitoring systems and may provide a means of quantifying changes in above-ground carbon attributable to logging activities. Due to the difficulties associated with field work in remote areas, it is acceptable that the remeasurements be obtained with from LiDAR data, for the purposes of monitoring AGB changes.

Keywords: *Canopy Cover; Monitoring of Tropical Forests; Airborne Laser System*

1 Introdução

Informações de alta qualidade que descrevem a estrutura da floresta são necessárias para melhorar as estimativas de estoques de biomassa e carbono associadas com a Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REDD) nas florestas nativas na Amazônia (Sheng *et al.*, 2018).

A administração e monitoramento dos ecossistemas florestais requer alta confiabilidade e acurácia das informações. Porém, a amostragem de campo de áreas florestais exploradas é cara e de difícil acesso na Amazônia (d'Oliveira *et al.*, 2012) e, por isso, tem-se poucos dados sobre as perdas de carbono causadas pela exploração madeireira e, como tal, uma grande incerteza quanto à potencial mitigação de carbono para REDD por meio do manejo da exploração seletiva de madeira tropical.

As alterações no fluxo de carbono, causadas pela extração seletiva de madeira, dependem dos estoques originais de carbono na biomassa florestal, da intensidade da exploração madeireira, da qualidade do manejo madeireiro e da taxa de regeneração após a exploração de madeira.

Como a obtenção destas variáveis em campo consome tempo e recursos e, em alguns casos, torna-se inviável pelas dificuldades de acesso na Amazônia, o estudo de métodos alternativos de sensoriamento remoto têm possibilitado extrair informações de áreas florestais de forma confiável (d'Oliveira *et al.*, 2014), como os sistemas a laser aerotransportados, baseados na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

Os sistemas LiDAR permitem a obtenção de informações tridimensionais acerca da superfície terrestre com alta precisão (Locks & Matricardi, 2019). O LiDAR é uma tecnologia de Sensoriamento Remoto ativo que utiliza o princípio de medição de tempo de retorno do pulso para medir o alcance ou a distância de um objeto (White *et al.*, 2013).

Weishampel *et al.* (2012), compararam as estimativas LiDAR de clareiras do dossel com as estimativas de desmatamento do Landsat para a Caracol Archaeological Research, em Belize, e concluíram que o LiDAR pode ser usado como uma ferramenta para monitorar alterações de dossel em áreas afetadas pela extração seletiva de madeira.

Muitos outros estudos apontam que os sistema LiDAR aerotransportado pode ser usado para estimar os parâmetros estruturais em tipos de florestas que variam de boreais a tropicais (por exemplo, Li *et al.*, 2008; Næsset & Gobakken, 2008; Gonzalez *et al.*, 2010; Koch, 2010; Beets *et al.*, 2011; Næsset, 2011; Asner *et al.*, 2012; d'Oliveira *et al.*, 2012; Gobakken *et al.*, 2012; Hudak *et al.*, 2012; Nyström *et al.*, 2012). Por outro lado, há poucos estudos sobre a estimativa das mudanças da biomassa em florestas tropicais (Andersen *et al.*, 2011; Andersen *et al.*, 2013; Meyer *et al.*, 2013).

O objetivo do estudo foi verificar como os dados LiDAR adquiridos, antes e após a exploração madeireira, podem ser usados para quantificar mudanças na cobertura do dossel e AGB, em áreas afetadas pelo manejo florestal e demonstrar como uma abordagem baseada no modelo de regressão com dados LiDAR pode ser usado para estimar as mudanças na AGB, associada à exploração madeireira, em áreas de manejo florestal na Amazônia.

2 Material e Métodos

2.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado na Floresta Nacional do Jamari (Flona do Jamari), localizada no estado de Rondônia, entre os municípios de Itapuã do Oeste, Cujubim e Candéias do Jamari (S 09° 00' 00" a 09° 30' 00" e W 62° 44' 05" a 63° 16' 54") (Figura 1). Criada em 25 de setembro de 1984, a Flona do Jamari possui uma área aproximada de 220 mil hectares, dos quais 96 mil foram destinados à concessão florestal, em 2008, divididos em três Unidades de Manejo Florestal (UMF). No mês de setembro de 2010 foi iniciada a exploração nas primeiras Unidades de Produção Anual (UPA) (SFB, 2018).

Segundo a classificação fisionômico-ecológica do IBGE (2012), prevalece na Flona do Jamari a Floresta Ombrófila Densa com porções de Floresta Ombrófila Aberta, que podem se apresentar com predominância de palmeiras ou com cipós. Possui clima Tropical Chuvoso do tipo Aw (Köppen), com período seco bem definido na estação do inverno, precipitação média anual entre 2.200 a 2.600 mm, e temperatura média anual de 25°C.

As UPAs foram mecanicamente exploradas, com uso de trator florestal, tratamentos silviculturais e técnicas de manejo florestal de impacto reduzido (microzoneamento, planejamento da exploração, seleção de espécies e corte direcionado das árvores) foram aplicados à floresta.

A intensidade de exploração média para toda Flona foi de $14,8 \pm 3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. O volume explorado é consideravelmente inferior ao máximo permitido para um ciclo de corte de 30 anos, que é de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

2.2 Coleta e processamento dos dados

2.2.1 Dados de campo

Os dados de campo foram extraídos do conjunto de parcelas permanentes, instaladas e medidas, pelos concessionários do SFB (Serviço Florestal Brasileiro). Foram selecionadas apenas as parcelas permanentes que possuíam sobreposição com a cobertura de dados LiDAR disponível, para cada medição. No total foram consideradas 10 parcelas permanentes localizadas nas UMF's I e III, da Flona do Jamari, sendo que todas as parcelas foram medidas antes e após a exploração florestal. Nestas parcelas, todas as árvores com DAP ≥ 10 cm foram botanicamente identificadas, plaqueteadas e medidos os diâmetros a 1,3 m do solo. Adotou-se a metodologia proposta no protocolo da REDEFLO (Rede de Monitoramento da Dinâmica de Florestas na Amazônia) (IBAMA, 2006), tanto para instalação como medição nas parcelas.

A biomassa acima do solo AGB (Mg) foi estimada para cada parcela usando uma equação alométrica desenvolvida para uma floresta semelhante no sul da Amazônia (Nogueira *et al.*, 2008) (Equação 1):

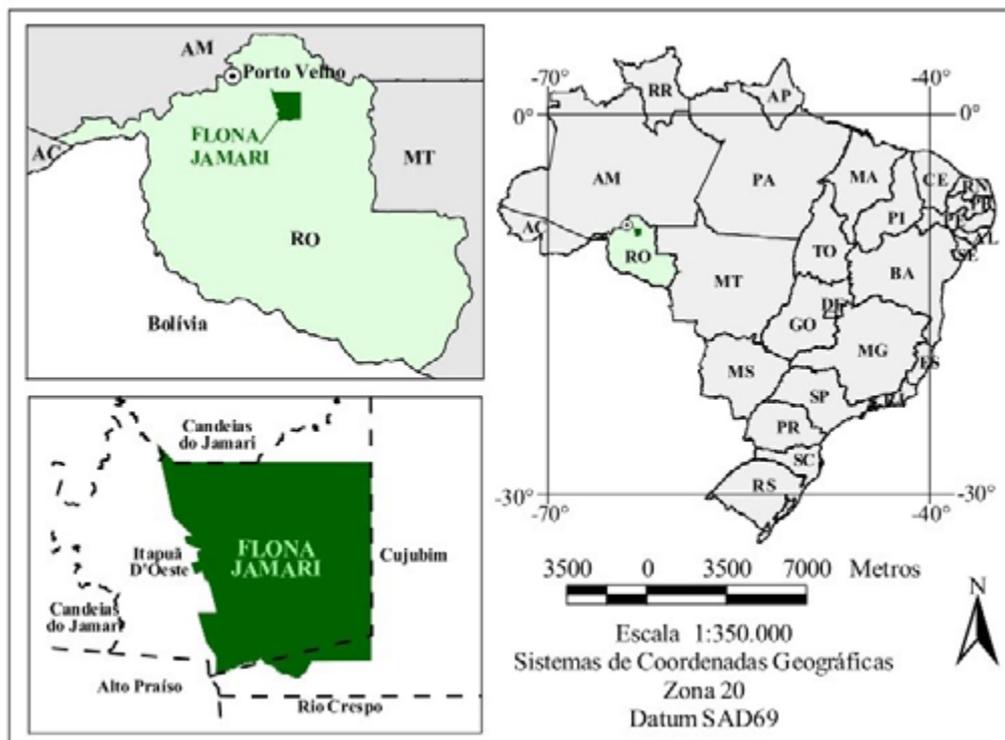


Figura 1 Mapa de localização da Floresta Nacional do Jamari, Rondônia.

$$AGB = \exp(-1,716 + 2,413 \cdot \ln(DAPP)) / 1000 \quad (1)$$

AGB é a biomassa fresca acima do solo (inclui casca, tronco, ramos, folhagens e matéria orgânica) (Mg.ha⁻¹); DAP = diâmetro a 1,30 m acima do solo.

2.2.2 Dados LiDAR

Os conjuntos de dados LiDAR, utilizados neste estudo, foram coletados nos anos de 2013, 2014 e 2015 (Tabela 1). Os dados foram disponibilizados na forma de nuvem de pontos, com extensão *.las e acompanhados do Modelo Digital do Terreno (MDT), com um metro de resolução espacial. A projeção e sistema de referência adotados foi UTM, fuso 20 S e Datum SIRGAS 2000.

2.2.3 Processamento LiDAR

O processamento das nuvens de pontos e dos modelos de terreno foi executado no pacote FUSION. Este sistema foi desenvolvido pelo Serviço Florestal Americano e é uma eficiente ferramenta que permite analisar e visualizar os dados de LiDAR (Mcgaughey, 2014). Os produtos do FUSION foram obtidos por meio da execução de linhas de comando no ambiente Disk Operating System (MS-DOS) e os modelos digitais produzidos foram manipulados no programa ArcGIS 10.1.

Os arquivos de MDT foram convertidos do formato *.grid para o formato *.ascii e em seguida, para o formato *.dtm, nativo do pacote FUSION. A altitude do terreno derivada do MDT foi subtraída de cada retorno para remover a influência da topografia sobre a altura da floresta (Locks & Matricardi, 2019).

Antes dos processamentos dos modelos, foi realizado o recorte dos dados localizados dentro das parcelas permanentes distribuídas nas áreas sobrevoadas pelo LiDAR. Para isso, os vértices das parcelas foram georreferenciados, em campo. Um polígono foi produzido a partir das coordenadas dos vértices para cada parcela no mesmo sistema de referência e projeção dos dados LiDAR.

Os arquivos *.shp gerados foram utilizados para executar os recortes das parcelas por meio do comando *Polyclipdata*. Após o recorte dos dados LiDAR, os arquivos *.las de cada parcela foram salvos individualmente. Maiores detalhes podem ser consultados em d'Oliveira *et al.* (2014).

2.3 Estimativa das alterações na cobertura do dossel

O Modelo de Superfície Nua (MSN) foi construído a partir do MDT, utilizando somente os pontos LiDAR que atingiram a superfície do solo. Então, primeiramente os pontos foram filtrados, com o comando *Groundfilter* do FUSION na base MS-DOS. Os parâmetros desse comando foram calibrados para a obtenção de resultados consistentes, ex: (*Groundfilter/wparam:2/gparam:-2/tolerance:0.1/iterations:10*), e um modelo de alta resolução (células de 1m x 1m). Com a grade de dados formada somente com os pontos que atingiram a superfície do solo, salvos na extensão *.las, foi possível gerar o MSN por meio do comando *Gridsurfacecreate*.

O Modelo de Altura do Dossel (MAD), foi gerado pelo comando *Canopyheightmodel* (CHM) do programa FUSION, adicionado do parâmetro *ground*, que faz a normalização das elevações da superfície tornando o terreno plano, a partir do MSN. As métricas MAD foram utilizadas em análises similares realizadas por Andersen *et al.* (2013) e d'Oliveira *et al.* (2014), na Floresta Estadual do Antimary no Estado do Acre. A partir desse modelo foi possível identificar e quantificar as áreas de clareiras e as coberturas vegetais do dossel, com dados LiDAR, coletados antes e após a exploração florestal em todas as parcelas permanentes envolvidas neste estudo.

De acordo com a Hunter *et al.* (2015), clareiras são áreas contíguas com altura inferior a 10 metros e área superior a 10 metros quadrados. A partir do MAD, foram identificadas as áreas de clareiras naturais, que já existiam antes da intervenção, e as clareiras após a exploração florestal e, em seguida, as áreas das clareiras de cada uma das amostras foram isoladas. Desta forma, o resultado foi a

Especificações	Coleta 2013	Coleta 2014	Coleta 2015
Sensor LiDAR	Optech, Orion	Trimble, Harrier 68i	LaserScan, Optech 3100
Mês da coleta	Set./Out.	Out.	Set./Out.
Altitude voo	850 m	500 m	700 m
Ângulo de escaneamento	11°	15°	15°
Frequência de escaneamento	67.5 kHz	360 kHz	55 kHz
Sobreposição lateral	65%	65%	70%
Densidade média de retornos	32,9 ppm ²	49,6 ppm ²	59,2 ppm ²
Custo (R\$)	42,00/ha	58,05/ha	47,50/ha

Tabela 1 Especificação técnica e custo das coletas de dados LiDAR.

cobertura remanescente do dossel com altura superior a 10 metros. As alterações nas áreas com altura de dossel maior que 10 metros foram calculadas e mapeadas, subtraindo as áreas naturais das áreas exploradas.

2.4 Modelos de regressão

2.4.1 Estimativa das alterações na biomassa (AGB)

A partir da AGB e cobertura do dossel, antes e após a exploração, foi construída uma planilha eletrônica associando as alterações nas AGB e na cobertura do dossel, de cada amostra, utilizando o programa MS EXCEL. As variáveis preditoras foram avaliadas quanto ao pressuposto de correlação, normalidade e homogeneidade de variâncias, pelos testes de Pearson, Mantel, Lilliefors, e pela análise gráfica dos resíduos. Em seguida, os modelos foram avaliados pelo desempenho dos parâmetros estatísticos da regressão e significância dos coeficientes do modelo usando o teste F (Box *et al.*, 2005).

Para evitar a seleção de modelos com indícios de multicolinearidade foi realizada a análise de significância dos coeficientes do modelo. O indício mais evidente da multicolinearidade é um elevado valor do coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), seguido de coeficientes do modelo não significativos estatisticamente (Valente *et al.*, 2011). O processamento e análise estatística dos dados foram realizados por meio do programa computacional R (R Development Core Team, 2018) e GENES (Cruz, 2013). Vale ressaltar que as florestas naturais, sobretudo as florestas tropicais, são heterogêneas e inequívocas, apresentando alta diversidade de espécies e de diferenciação de nichos populacionais. Desta forma, os resultados desta pesquisa podem apresentar elevados valores descritivos, como o erro padrão da média.

3 Resultados

3.1 Modelo de regressão para a estimativa da alteração na biomassa (AGB)

No Manejo Florestal Sustentável Madeireiro, as árvores selecionadas para colheita, são predominantemente do dossel da floresta, ou seja, árvores maiores (Andersen *et al.*, 2013). Os resultados desta pesquisa indicam que a estrutura de dossel mudou entre as coletas (antes e após a exploração), assim como visto por d'Oliveira *et al.* (2012), resultando numa redução tanto da biomassa como na cobertura do dossel, indicando uma forte correlação entre a área de clareiras decorrentes da exploração e a perda da biomassa florestal (Tabela 2).

A redução média de AGB foi de 21,36 Mg.ha⁻¹ (8,9% do AGB médio, antes da exploração) durante o tempo entre as aquisições dos dados. Andersen *et al.* (2013), em uma pesquisa similar com dados LiDAR, estimou uma redução total de 19,0 Mg.ha⁻¹ (8% do AGB médio) devido à extração seletiva de árvores na Floresta Estadual do Antimary, Acre. Além de uma redução na AGB associada à extração seletiva de madeira, é esperado um aumento na AGB para árvores remanescentes, devido ao crescimento ocorrido entre as aquisições. Isso pode ser notado nas áreas 3, 7, 8 e 9, onde os ganhos foram maiores que os danos de AGB.

Já a redução na cobertura do dossel, foi estimada em 0,08 ha (8,23% da cobertura média, antes da exploração). Os danos na cobertura do dossel, devido à exploração, por si só, são consideravelmente maiores do que as mudanças estimadas pelo LiDAR, porque as mudanças baseada em LiDAR é o agregado de todas as alterações na copa (crescimento, regeneração nas clareiras, mortalidade, mudanças sazonais e reduções devido a exploração seletiva de madeira). Neste sentido, esta pesquisa deixa claro que as estimativas são para as alterações na cobertura do dossel e AGB, não sendo possível discriminar com precisão o que são danos da exploração, o que são danos naturais e o que é regeneração.

Portanto, uma abordagem baseada em estimativas LiDAR foi usada para obter estimativas de precisão para as mudanças da AGB. Embora isso forneça uma indicação da precisão da mudança da AGB, os pressupostos subjacentes às abordagens baseadas em modelos de regressão são diferentes e os resultados não tem a mesma exatidão das coletas em campo. No entanto, devido às complexidades logísticas e aos altos custos associados ao trabalho de campo em áreas remotas, é provável que essa situação, em que as remedições são obtidas com dados LiDAR, e não com coletas em campo, sejam uma realidade no futuro.

Neste caso, a estimativa das alterações da AGB em áreas de manejo, baseada em um modelo de regressão, apresentado neste trabalho, fornecerá um meio para quantificar essas mudanças, ainda que sejam sob as suposições de uma estrutura baseada em um modelo. Em estudos futuros, recomendam-se novos voos em períodos regulares, simultaneamente com novas remensurações em campo, em cada parcela, para se obter uma série temporal, permitindo reduzir qualquer tendência associada ao uso de um modelo de regressão desenvolvido a partir de um curto período de avaliação.

3.2 Pressupostos para ajuste do modelo

O teste de Correlação de Pearson teve como medida de associação linear entre as duas variáveis aleatórias o valor de $r = 0,88$ (p -valor > 0,05) (Tabela 3), o que significa uma correlação positiva entre as duas variáveis, ou seja, quanto maior a alteração na cobertura do dossel, maior a alteração

na biomassa. O mesmo vale para o teste de Mantel, que foi significativo a 5% de probabilidade.

O atendimento à pressuposição de normalidade dos dados é importante na análise dos resíduos de equações ajustadas (Lilliefors, 1967). Nesta pesquisa optou-se pelo teste de Lilliefors para verificar essa pressuposição.

A maior diferença entre as distribuições acumuladas foi de 0,2061 para biomassa e 0,1942 para cobertura. O valor tabelado para a definição do ponto crítico, considerando um nível de significância de 5% é 0,258. Como as distâncias máximas são menores do que o valor tabelado, aceita-se

a hipótese H_0 , pelo teste de Lilliefors, ou seja, os dados seguem a distribuição normal.

3.3 Ajuste do modelo

Um modelo de regressão linear foi gerado a partir da AGB coletada em campo (variável dependente 'Y') e a cobertura do dossel (variável independente 'X') estimado com dados LiDAR. Na Tabela 4 é apresentado o resumo do desempenho estatístico e da análise de significância dos coeficientes do modelo.

Área	Antes da Exploração		Após a Exploração		Alteração	
	Cobertura	AGB	Cobertura	AGB	Cobertura	AGB
1	0,9976	298,5714	0,832	283,1557	-0,1656	-15,4157
2	0,8588	424,3098	0,842	396,8217	-0,0168	-27,4880
3	0,986	219,2889	1,0024	227,4452	0,0164	8,1563
4	0,9576	144,8585	0,854	127,6677	-0,1036	-17,1907
5	0,9528	146,7551	0,9196	121,8948	-0,0332	-24,8603
6	1,026	264,7862	0,9552	246,2919	-0,0708	-18,4943
7	0,9604	182,1867	0,8848	201,5839	-0,0756	19,3972
8	0,9592	166,5839	0,9484	167,5929	-0,0108	1,0090
9	0,9972	201,4134	0,9926	208,9021	-0,0046	7,4887
10	1,008	341,9235	0,649	195,7657	-0,359	-146,1578
Média ± Erro Padrão	0,97 ± 0,02	239,07 ± 29,21	0,89 ± 0,03	217,71 ± 25,36	-0,08 ± 0,04	-21,36 ± 14,74

Tabela 2 Estimativas e variações na Cobertura do dossel (ha) e na AGB (Mg.ha⁻¹).

Variáveis	Correlação	Probabilidade (%)	R-crítico (1%)		R-crítico (5%)	
Biomassa x Cobertura	0,88**	0,09088	-0,4372	0,8959*	-0,37391	0,83001

Tabela 3 Teste de correlação de Pearson e Mantel para as alterações ocorridas nas variáveis biomassa e cobertura do dossel. Onde ** *: Significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t e +: Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Mantel baseado em 5000 simulações.

FV	GL	SQ	QM	F	P-valor
REGRESSÃO	1	15141,41681	15141,41681	27,214229	0,080585
DESVIO	8	14451,02938	556,378673		
TOTAL	9	19592,44619			
Modelo*		R ² (%)		R ² (ajustado) (%)	
Y = 11,111+368,09507714X		77,26471207		74,42280108	
Variável	Coefficiente	Erro padrão	Valor t	P-valor	
Interseção	11,11	9,46	1,175	0,273940	
Cobertura	368,10	70,59	5,214	0,000808 ***	

Tabela 4 Resumo da estatística e da análise de significância dos coeficientes do modelo de regressão linear para alteração na biomassa. Códigos de significância: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 '.' 1; + Onde Y: Alteração da AGB (dependente), X: Alteração na cobertura do dossel (variável independente).

O modelo pode ser considerado satisfatório, visto que apresentou bons resultados estatísticos como R^2 de 0,77, R^2_{aj} de 0,74, RMSE de 21,10 $Mg.ha^{-1}$ e teste de significância F de 27,19. Considerando-se que o coeficiente da variável independente do modelo é significativo (p -valor $\leq 0,001$), a hipótese de multicolinearidade é rejeitada.

D'Oliveira *et al.* (2012), utilizando dados LiDAR, obteve modelo para predição da AGB da Floresta Estadual do

Antimary no Acre, com R^2 de 0,72 e RMSE 40,20 $Mg.ha^{-1}$. Andersen *et al.* (2013), também utilizando dados LiDAR na Floresta Estadual do Antimary, Acre, obteve modelo para predição da AGB com R^2 de 0,70 e RMSE 41,50 $Mg.ha^{-1}$.

A análise gráfica do ajuste do modelo (Figura 2) confirma que há correlação entre as variáveis analisadas. Baseado na análise do gráfico de resíduos (Figura 3) não é possível identificar tendência de super ou subestimativa ao

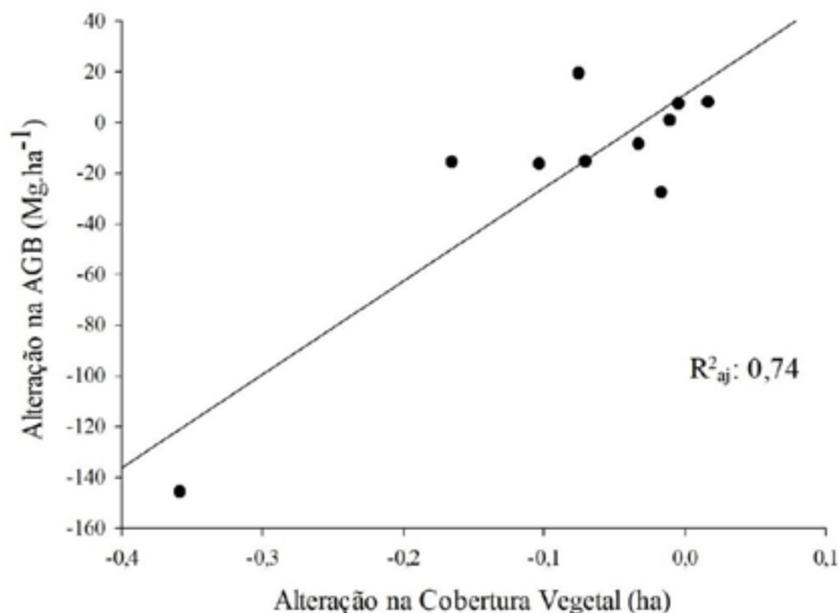


Figura 2 Correlação entre as alterações na cobertura do dossel (ha) e biomassa seca acima do solo (AGB) ($Mg.ha^{-1}$), em áreas de exploração florestal.

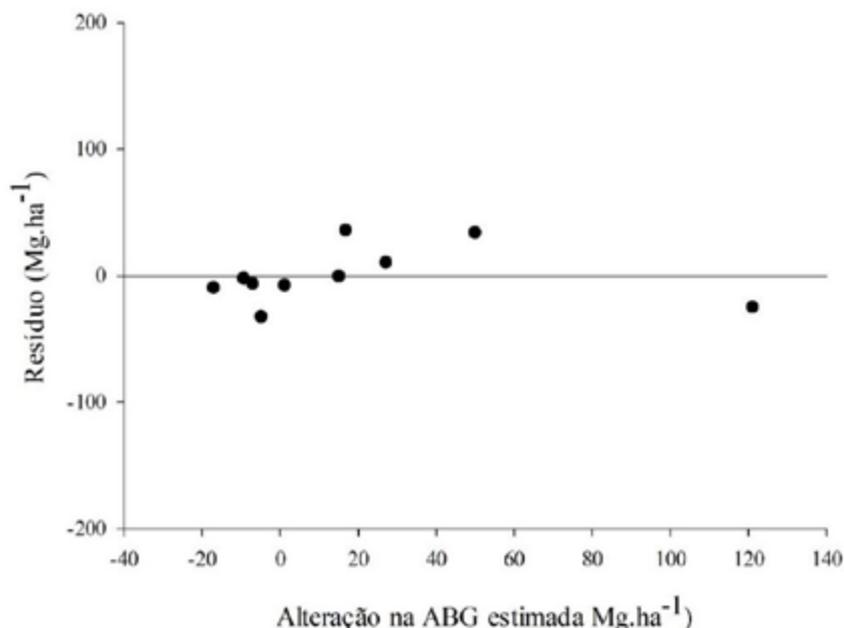


Figura 3 Distribuição gráfica dos resíduos do modelo de alteração da AGB.

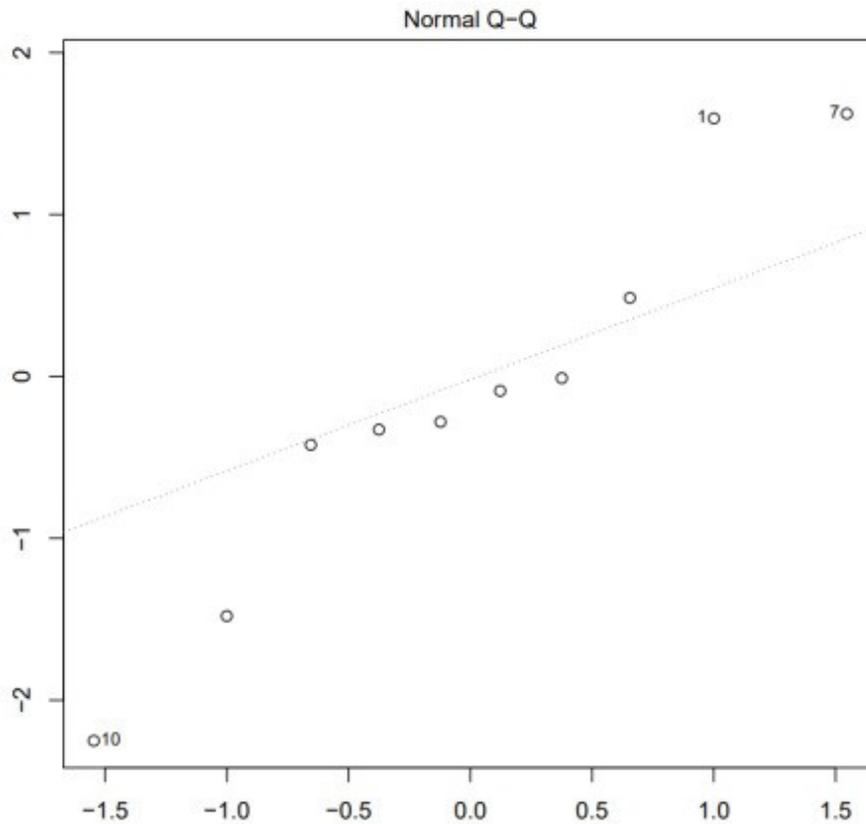


Figura 4 Distribuição da probabilidade normal para os dados de alteração de AGB.

longo da amplitude da mudança de biomassa, corroborando o pressuposto de que os erros são aleatórios, de média zero e variância equivalente.

A distribuição de probabilidade normal (Figura 4), corrobora o teste Lilliefors, onde não se rejeita a hipótese de normalidade dos dados, pois os valores dos resíduos se aproximam de uma linha reta quando plotados contra uma escala de probabilidade normal (Box *et al.*, 2005).

4 Conclusões

Este trabalho demonstra o potencial do LiDAR desenvolvido para quantificação de mudanças estruturais do dossel em florestas tropicais exploradas seletivamente. Esses resultados indicam que o LiDAR pode ser uma ferramenta valiosa para sistemas de monitoramento de carbono relacionados a REDD e pode fornecer um meio de quantificar mudanças no carbono acima do solo atribuíveis as atividades de exploração madeireira, mesmo sendo de baixa intensidade ($14,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), pois seriam mais difíceis de detectar usando outros tipos de análises (medições de campo, imagens de satélite, etc.). Em estudos futuros, recomendamos que os sobrevoos LiDAR e as medições de

campo permaneçam constantes. Isso fornecerá um maior nível de confiança nas previsões da AGB, e o modelo de regressão desenvolvido poderá ser aplicado sobre áreas de florestas semelhantes, ou da mesma área, (em dados de uma aquisição diferente). Devido às complexidades logísticas e aos altos custos associados ao trabalho de campo em áreas remotas, é admissível que as remeidições sejam obtidas com dados LiDAR, e não com coletas em campo, para fins de monitoramento das alterações da AGB.

5 Agradecimentos

Ao Serviço Florestal Brasileiro por fornecer os dados LiDAR e a CAPES pela Bolsa de Doutorado concedida.

6 Referências

Andersen, H.E.; Strunk, J.; Temesgen, H.; Atwood, D. & Winterberger, K. 2011. Using multi-level remote sensing and ground data to estimate forest biomass resources in remote regions: a case study in the boreal forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(6): 596-611.

- Andersen, H.E.; Reutebuch, S.E.; Mcgaughey, R.J.; d'Oliveira, M.V.N. & Keller, M. 2013. 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.; Hall J.S. & Van Breugel M. 2012. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia*, 168(4): 1147-1160.
- Beets, P.N.; Reutebuch, S.; Kimberley, M.; Oliver, G.; Pearce, S. & Mcgaughey, R. 2011. Leaf area index, biomass carbon and growth rate of radiata pine genetic types and relationships with LiDAR. *Forests*, 2(3): 637-659.
- Box, G.E.P.; Hunter, J.S. & Hunter, W.G. 2005. *Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation*. New Jersey, John Wiley & Sons, 655p.
- Cruz, C.D. 2013. GENES - A software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum*. 35(3): 271-276.
- D'Oliveira, M.V.N.; Figueiredo, E.O. & Papa, D.A. 2014. *Uso do LiDAR como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais*. Brasília, Embrapa, 132p.
- 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.
- Gobakken, T.; Næsset, E.; Nelson, R.; Bollandsås, O.M.; Gregoire, T.G. & Ståhl, G. 2012. Estimating biomass in Hedmark County, Norway using national forest inventory field plots and airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 123: 443-456.
- Gonzalez, P.; Asner, G.P.; Battles, J.J.; Lefsky, M.A.; Waring, K.M. & Palace, M. 2010. Forest carbon densities and uncertainties from LiDAR, QuickBird, and field measurements in California. *Remote Sensing of Environment*, 114: 1561-1575.
- Hudak, A.T.; Strand, E.K.; Vierling, L.A.; Byrne, J.C.; Eitel, J.U.H. & Martinuzzi, S. 2012. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. *Remote Sensing of Environment*, 123: 25-40.
- Hunter, M.O.; Keller, M.; Morton, D.C.; Cook, B.; Lefsky, M.; Ducey, M.; Saleska, S.; Oliveira Jr., R.C. & Schiatti, J. 2015. Structural Dynamics of Tropical Moist Forest Gaps. *PLoS One*, 10: 1-19.
- IBAMA. 2006. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Diretrizes Simplificadas para Instalação e Medição de Parcelas Permanentes em Ovelha errante Florestas Naturais da Amazônia Brasileira*. Brasília, Organização Grupo Inter-Institucional de Monitoramento da Dinâmica de Crescimento de Florestas na Amazônia Brasileira, 69p.
- IBGE. 2012. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. Rio de Janeiro, IBGE, 271p.
- Lilliefors, H. 1967. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown, *Journal of the American Statistical Association*, 62: 399-402.
- Li, Y.; Andersen, H.E. & Mcgaughey, R. 2008. A comparison of statistical methods for estimating forest biomass from light detection and ranging. *Western Journal of Applied Forestry*, 23(4): 223-231.
- Locks, C.J. & Matricardi, E.A.T. 2019. Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LIDAR. *Ciência Florestal*, 29(2): 481-495.
- Koch, B. 2010. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6): 581-590.
- Mcgaughey, R.J. 2014. *Fusion/LDV: Software for LiDAR data analysis and visualization*. Seattle, United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington, 179p.
- Meyer, V.; Saatchi, S.S.; Chave, J.; Dalling, J.; Bohlman, S. & Fricker, G.A. 2013. Detecting tropical forest biomass dynamics from repeated airborne Lidar measurements. *Biogeosciences Discussions*, 10: 1957-1992.
- Næsset, E. 2011. Estimating above-ground biomass in young forest with airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 32(2): 473-501.
- Næsset, E. & Gobakken, T. 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3079-3090.
- Nyström, M.; Holmgren, J. & Olsson, H. 2012. Prediction of tree biomass in the forest-tundra ecotone using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 123: 271-279.
- R Development Core Team. 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- SFB. 2018. Serviço Florestal Brasileiro. Concessões Florestais. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/florestas-sob-concessao?id=101>>. Acesso em: 17 jun. 2018.
- Sheng J.; Zhou, W. & de Sherbinin, A. 2018. Incerteza nas estimativas, incentivos e reduções de emissões em projetos de REDD+. *Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública*, 15: 22-25.
- Valente, M.D.R.; Queiroz, V.T.; Pinheiro, J.G. & Monteiro, L.A.S. 2011. Modelo de predição para o volume total de Quaruba (*Vochysia inundata* Ducke) via análise de fatores e regressão. *Revista Árvore*, 35(2): 307-317.
- White, J.C.; Wulder, M.A.; Varhola, A.; Vastaranta, M.; Coops, N.C.; Cook, B.D.; Pitt, D. & Woods, M. 2013. *A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using the area-based approach*. Information Report FI-X-10. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, Pacific Forestry Centre. Victoria, BC, 50p.
- Weishampel, J.F.; Hightower, J.N.; Chase, A.F. & Chase, D.Z. 2012. Use of airborne LiDAR to delineate canopy degradation and encroachment along the Guatemala-Belize border. *Tropical Conservation Science*, 5(1): 12-24.