



Uso de dados LiDAR na estimativa de variáveis biofísica na Amazônia, sob diferentes resoluções espaciais

Franciel Eduardo REX^{1*}, Ana Paula Dalla CORTE², Aline Bernarda DEBASTIANI¹,
Verônica Satomi KAZAMA¹, Carlos Roberto SANQUETTA²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

²Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

*E-mail: francielrexx@gmail.com

Recebido em março/2018; Aceito em maio/2018.

RESUMO: A Floresta Amazônica é conhecida pela sua diversidade e quantidade de carbono estocado na biomassa acima do solo (do inglês, Above-Ground Biomass-AGB), o que atrai grande interesse em quantificar estes recursos naturais. Devido às dificuldades de mensuração desses dados em campo, o sensoriamento remoto oferece oportunidade na quantificação destes parâmetros (biomassa e carbono), de forma rápida e com custos relativamente baixos. Porém, a resolução espacial desses dados pode afetar essa estimativa, como é o caso dos resultantes tamanhos de *pixels* possíveis de se obter com o processamento de dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*). No presente estudo, foram utilizados dados de *laser scanner* aerotransportado e de inventário florestal realizado na Floresta Nacional do Jamari, localizado em Rondônia. A partir destes dados, foram obtidos a AGB e Above-Ground Carbon (AGC) para sete diferentes tamanhos de *pixel* (10, 20, 30, 40, 50, 75 e 100 m) e avaliado seus efeitos nas estimativas de AGB e AGC. Não houve diferença significativas em nível de 95% de probabilidade entre as estimativas de AGB e AGC. Dados LiDAR apresentam grande potencial na obtenção de parâmetros como a AGB e AGC em floresta tropical, mesmo em diferentes resoluções espaciais.

Palavras-chave: Floresta tropical, *laser scanner*, carbono, biomassa.

Use of LiDAR data in the estimate of biophysical variables in the Amazon, under different spatial resolutions

ABSTRACT: The Amazon Rainforest is known for its diversity and quantity of carbon stored in above-ground biomass (from English, Above-Ground Biomass-AGB), that attracts great interest in quantifying these natural resources. Due to the difficulties of measuring these data in the field, remote sensing offers the opportunity to quantify these parameters (biomass and carbon), quickly and with relatively low costs. However, the spatial resolution of these data can affect this estimate, as is the case with the resulting possible pixel sizes to be obtained with Light Detection and Ranging (LiDAR) data processing. In the present study, were used data from airborne scanner laser and forest inventory realized in the Jamari National Forest, located in Rondônia. From these data, AGB and Above-Ground Carbon (AGC) were obtained for seven different pixel sizes (10, 20, 30, 40, 50, 75 and 100 m) and evaluated for their effects on AGB and AGC estimates. There was no significant difference at the 95% probability level between AGB and AGC estimates. LiDAR data present great potential in obtaining parameters such as AGB and AGC in tropical forest, even in different spatial resolutions.

Keywords: Rain forest, laser scanner, carbon, biomass.

1. INTRODUÇÃO

A quantificação da biomassa florestal é uma importante fase para o gerenciamento de serviços ecossistêmicos (Houghton et al., 2009), além de ser essencial na compreensão do ciclo do carbono e nos estudos sobre mudanças climáticas (BEER et al., 2010). A quantificação da biomassa também pode fornecer estimativa das emissões de dióxido de carbono na atmosfera devido ao desmatamento ou à queima (DEFRIES et al., 2002; BACCINI et al., 2012).

No entanto, existe a necessidade crescente do desenvolvimento de métodos precisos e eficazes para estimativas de *Above-Ground Biomass* (AGB), sendo que a única maneira de mensurá-la verdadeiramente é pelo método direto, em que implica cortar e pesar a massa total da árvore ou da parcela, resultando em alto custo, laborioso e que causa impacto negativo já que destrói as árvores e/ou compromete a estrutura da floresta. De acordo com Clark; Kellner (2012) a

quantificação de AGB pelos métodos diretos raramente é executada.

Dada as implicações das medidas diretas, as medidas indiretas se sobressaem, sendo umas delas obtida com o uso de sensoriamento remoto (SR). O uso do SR é uma forma para obter medidas de campo de forma rápida e precisa para grandes áreas (LU, 2006; COUTERON et al., 2012), o que viabiliza as estimativas para a Amazônia que é composta de extensas áreas, nas quais, muitas são de difícil acesso e intocáveis.

Uma das abordagens de detecção remota mais promissoras para estimar a AGB da floresta é a técnica que utiliza dados do *Light Detection and Ranging* (LiDAR). Os pulsos do laser do instrumento LiDAR podem penetrar no dossel da floresta fornecendo boas estimativas das alturas e estrutura do dossel da floresta, a partir da qual a AGB ao longo do perfil vertical e da cobertura do dossel pode ser estimado

(GOETZ; DUBAYAH, 2011). Vários estudos comprovaram a eficiência das estimativas resultantes da detecção com LiDAR (ANDERSEN et al., 2014; DEO et al., 2017). Nestes estudos foram utilizadas diferentes resoluções espaciais para as estimativas de AGB e de AGC. Entretanto, pouco se sabe sobre os efeitos do uso de diferentes resoluções espaciais nas estimativas de AGB e AGC, especialmente em áreas localizadas na Amazônia.

Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo avaliar as estimativas de AGB e AGC obtidas a partir de diferentes resoluções espaciais obtidas dos dados do levantamento com *laser scanner* aerotransportado na floresta nacional do Jamari, no estado de Rondônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área deste estudo envolveu aproximadamente 180 hectares de florestas inseridas dentro da Floresta Nacional (Flona) do Jamari, a qual se encontra em regime de concessão florestal do Serviço Florestal Brasileiro, localizada no norte do estado de Rondônia – Brasil (Figura 1).

A Floresta Nacional do Jamari faz parte de uma área contínua e constitui uma unidade de conservação federal de uso sustentável (SNUC, 2000). A Flona do Jamari possui cerca de 220.000 hectares, e inclui parte das bacias dos rios Jacundá, Jamari e Preto do Crespo. Esta unidade de conservação envolve amostras da flora características da Amazônia sul-ocidental, região submetida a altas taxas de desmatamento (PLANO DE MANEJO, 2005). De acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012) a classificação fisionômica-ecológica predominantemente é de Floresta Ombrófila Densa, com algumas porções de Floresta Ombrófila Aberta, com predominância de palmeiras ou com cipós.

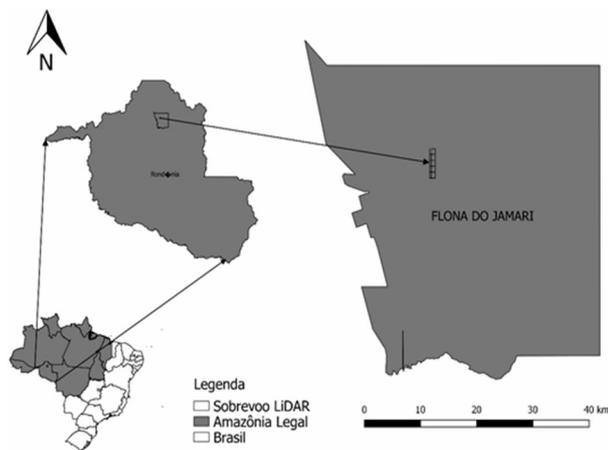


Figura 1. Localização da área de estudo dentro da Floresta Nacional do Jamari.

Figure 1. Spatial location of the study area within the Jamari National Forest.

2.2. Dados utilizados

Foram utilizados dados de *laser scanner* aerotransportado e de inventário florestal referentes ao ano de 2013, ambos obtidos no âmbito do projeto Paisagens Sustentáveis Brasil (EMBRAPA, 2018). As especificações do voo estão descritas na Tabela 1.

Os dados de inventário florestal utilizado neste trabalho foram coletados no mês de dezembro de 2013, sendo instaladas 4 parcelas de 50 x 50 m, totalizando 2.500 m² cada

parcela, com critérios de inclusão da parcela de todas as árvores com diâmetro à altura do peito (dap) ≥ 35 cm. Também foram alocadas dentro das parcelas, subparcelas de 5 x 50 m com critérios de inclusão da parcela de todas as árvores com dap ≥ 10 cm.

O conjunto de dados do inventário florestal da floresta nacional do Jamari teve como objetivo servir de calibração e validação dos dados LiDAR obtidos na mesma área. Para cada árvore foram registradas informações, tais como: nome comum, da família e da espécie, coordenadas UTM obtidas pelo uso de equipamento GNSS de navegação. Também foram calculadas as medidas de: densidade da madeira, área basal, biomassa acima do solo (CHAVE et al., 2005), altura comercial e total, raios cartesianos.

Tabela 1. Especificações usadas nos sobrevoos para a coleta das nuvens de pontos LiDAR de 2013.

Table 1. Overflight specifications used to acquire the LiDAR point clouds in 2013.

Especificações	2013
Data de aquisição	20/09/2013
Datum	UTM - Sirgas 2000
Sistema de coordenadas/projeção	20S
Média de densidade de retorno inicial/m ²	15,31 ppm ²
Altitude média do voo	853 m
Campo de visão	9,8 °
Frequência de varredura	67,5 Hz
Percentage of flightline overlap	65%

2.3. Processamento LIDAR

A nuvem de pontos foi processada com o auxílio do *software* Fusion versão 3.60 (MCGAUGHEY, 2016), a fim de obter a nuvem de pontos normalizada, processo no qual a influência da topografia é retirada. A metodologia de processamento foi constituída em: classificar os pontos do solo, baseado no algoritmo de filtragem, fundamentado em (KRAUS; PFEIFER, 1998), geração do Modelo Digital de Terreno (MDT), normalização das nuvens de pontos LiDAR, extração de parcelas obtidas em campo e por fim obtenção de métricas lidar das parcelas e em diferentes resoluções espaciais (tamanho de *pixel*). Foram testadas diferentes resoluções espaciais (tamanho de *pixel*) para obtenção das métricas LiDAR: 10, 20, 30, 40, 50 75 e 100 m. A Figura 2 ilustra o formato dos tamanhos de *pixels* gerados conforme as resoluções testadas.

2.4. Estimativa de AGB e AGC

Primeiramente foi aplicada a Equação 1, desenvolvida por Chave et al. (2005) para estimativa da AGB para os dados das parcelas obtidos a partir de inventário florestal, para posterior obtenção da relação com as estimativas utilizando dados LiDAR.

$$AGB = \rho * \exp(-1,499 + 2,148 * \ln(dap) + 0,207 * (\ln(dap))^2 - 0,0281 * (\ln(dap))^3) \quad (\text{Equação 1})$$

em que: AGB: é a biomassa acima do solo (kg); ρ : é a densidade da madeira (g.cm³) e dap: é diâmetro à altura do peito (1,30 m).

A equação desenvolvida por Chave et al. (2005), que tem como variáveis independentes o DAP que foi mensurado à altura do peito (1,30 m), e a densidade básica da madeira, que foi obtida através da equação desenvolvida por (CHAVE et al., 2009). Posteriormente, a partir da obtenção das métricas LiDAR dos diferentes tamanhos de *pixel* foram feitas as

estimativas da AGB para a área de estudo, utilizando a Equação 2 desenvolvida por D'Oliveira et al. (2012). Para a estimativa da AGC, foi considerado que as madeiras da Amazônia apresentam em torno de 46% e 52% da biomassa

seca na forma de carbono (FEARNSIDE, 2009). Desta forma, foi definido o valor de 48% para o presente estudo, conforme metodologia utilizada por Silva (2014).

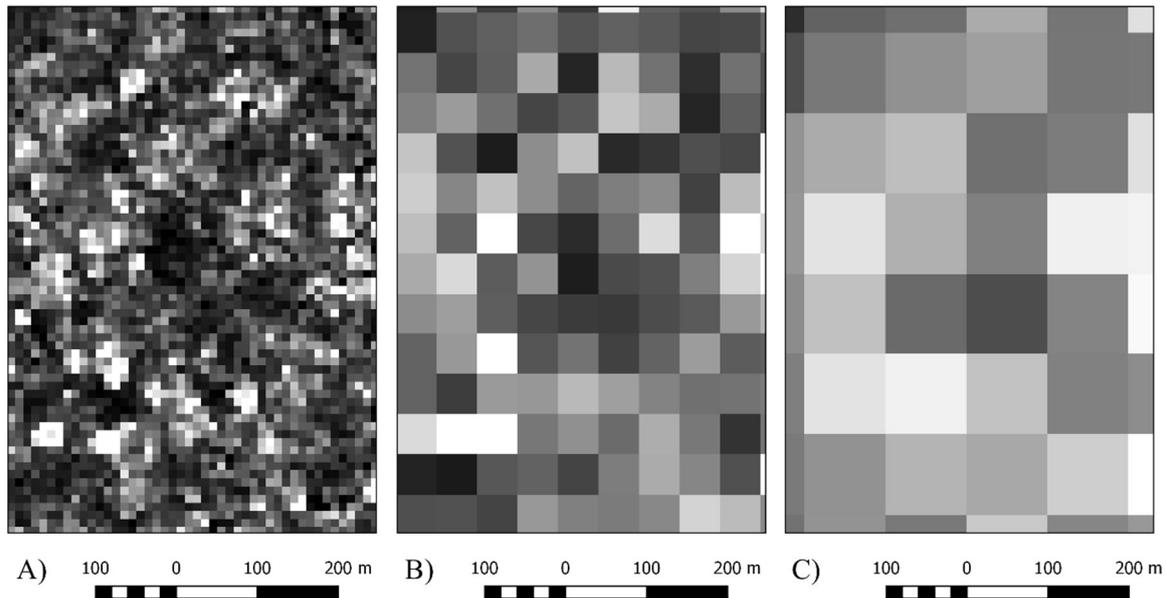


Figura 2. Diferentes resoluções espaciais testadas para as estimativas de AGB e AGC na Floresta Nacional do Jamari. A) *Pixel* de 10 m de tamanho; B) *Pixel* de 50 m de tamanho; e C) *Pixel* de 100 m de tamanho.

Figure 2. Different spatial resolutions tested for the AGB and AGC estimations in the Jamari National Forest. A) 10 m pixel size; B) 50 m pixel size; and C) 100 m pixel size.

$$AGB = (3,119 + 0,564 * P25 + 0,062 * Var)^2 + 1,74 \quad (\text{Equação 2})$$

$$AGC = AGB * [C] \quad (\text{Equação 3})$$

em que: AGB = representa a biomassa seca acima do solo ($Mg\ ha^{-1}$, árvores $DAP \geq 10\ cm$); P25 = equivale aos retornos do primeiro quartil ou 25% percentil; Var = variação da elevação; C = a concentração de carbono média da vegetação de florestas tropicais, estimada e definida em 48% para o presente estudo.

2.5. Avaliações estatísticas

As relações entre as estimativas geradas de AGB das parcelas foram avaliadas pelo coeficiente de determinação (R^2) e *root mean squared error* (RMSE). Enquanto que a AGB estimada via LiDAR de diferentes resoluções foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey, a 95% de probabilidade.

3. RESULTADOS

3.1. Veracidade das estimativas com LIDAR

O primeiro resultado obtido se refere à relação entre as estimativas de AGB das parcelas de inventário florestal *versus*

as estimativas das parcelas obtidas pelo processamento dos dados LiDAR. A relação obtida entre as estimativas de AGB das parcelas de inventário florestal *versus* as estimativas baseadas em dados do LiDAR, apresentaram um bom ajuste, com valor de coeficiente de determinação (R^2) de 0,8990 e RMSE de $24,57\ Mg\ ha^{-1}$.

Observou-se que os valores médios das estimativas geradas para o inventário florestal ($170,55 \pm 31,71\ Mg\ ha^{-1}$) foram menores do que o obtido para as estimativas de biomassa acima do solo utilizando dados LiDAR ($268,11 \pm 48,12\ Mg\ ha^{-1}$). Tal resultado indica que as estimativas de AGB do inventário florestal foram subestimadas pelas estimativas obtidas com LiDAR.

3.2. Estatística descritiva e análise dos resultados

Foram gerados diferentes cenários com múltiplos valores de resolução espacial (tamanho de *pixel*) para a estimativa de AGB e posteriormente de AGC. Na Tabela 2 e Figura 3 são demonstradas as diferenças dos valores obtidos em cada tamanho de *pixel*.

Tabela 2. Estatística descritiva da AGB para cada tamanho de *pixel* avaliado.

Table 2. Descriptive statistics of the AGB for each assessed pixel size.

Estatística	Resolução do <i>Pixel</i>						
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	75 m	100 m
Média ($Mg\ ha^{-1}$)	233,13	237,23	240,04	241,62	242,23	245,42	244,08
Mediana ($Mg\ ha^{-1}$)	211,69	220,86	228,17	228,45	233,52	239,82	241,55
Mínimo ($Mg\ ha^{-1}$)	21,61	28,97	31,06	34	37,47	39,38	43,6
Máximo ($Mg\ ha^{-1}$)	1.645,10	1.032,07	933,36	810,18	765,64	501,62	451,98
Curtose	6,91	6,08	5,6	6,17	4,95	1,24	1,62
Assimetria	1,77	1,7	1,54	1,6	1,29	0,42	0,17
CV (%)	54,49	45,97	38,89	35,72	32,15	24,7	23,24

O grau de concentração de valores da distribuição em torno do centro desta distribuição indica que a curtose é platicúrtica e assimétrica positiva para todos os tamanhos de *pixels* avaliados. Nota-se que o coeficiente de variação diminuiu na medida em que aumentava o tamanho do *pixel*, de 54,49% para o *pixel* de 10 m até 23,24% para o *pixel* de 100 m. Isto pode ser justificado pelo fato de que com uma maior resolução espacial, ou seja, tamanhos de *grids* menores (10 m) é possível captar uma maior amplitude de valores, diminuindo de acordo com a redução da resolução espacial.

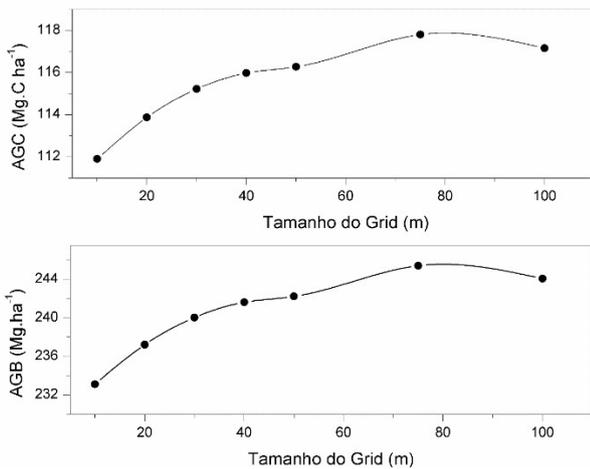


Figura 3. Comportamento médio de AGC e AGB para cada tamanho de *pixel* avaliado.

Figure 3. Average behavior of AGC and AGB for each assessed pixel size.

Como pode ser observado na Figura 3, as estimativas médias de AGB e de AGC da amostra LiDAR de floresta apresentaram valores médios próximos entre si, sendo observado o intervalo 233,12 – 245,41 Mg ha⁻¹ de AGB e 111,90 – 117,80 Mg C ha⁻¹ de AGC. Também pode ser observado aumento da estimativa com o aumento do tamanho do *pixel*. Foi observado ainda maior média dos parâmetros estimados com o uso de dados LiDAR em resolução espacial de 75 m, na qual foi estimado 245,45 Mg ha⁻¹ de AGB e de 117,80 Mg C ha⁻¹ de AGC na área de estudo.

Observou-se também que na sequência de maior valor de parâmetros estimados (AGB e AGC), com o tamanho de *pixel* de 75 m, houve decréscimo nas estimativas. Este resultado indica a saturação das estimativas com baixas resoluções, ou seja, tamanho maiores de *pixels*. Com relação as estimativas médias obtidas pelo processamento LiDAR das parcelas extraídas do inventário florestal, observou-se que as estimativas geradas para toda floresta se apresentam regulares e próximas, sendo que o uso dos dados LiDAR em tamanho de *pixel* de 75 metros apresentou a estimativa média mais próxima dos valores obtidos das parcelas.

De modo geral, não houve diferença significativas a nível de significância de 95% entre as estimativas de AGB e AGC. Desta forma, observou-se que em valores médios de AGB as estimativas retornam valores semelhantes.

O tamanho do *pixel* de 75 m apresentou o valor médio (245,41 Mg ha⁻¹) de AGB mais próximo da média estimada a partir de dados mensurados nas parcelas do inventário florestal (268,11 Mg ha⁻¹). Nesse sentido, este tamanho de *pixel* foi escolhido para representar a distribuição da AGB da amostra LiDAR de floresta. A Figura 4 ilustra a distribuição espacial dos valores encontrados de AGB para a floresta.

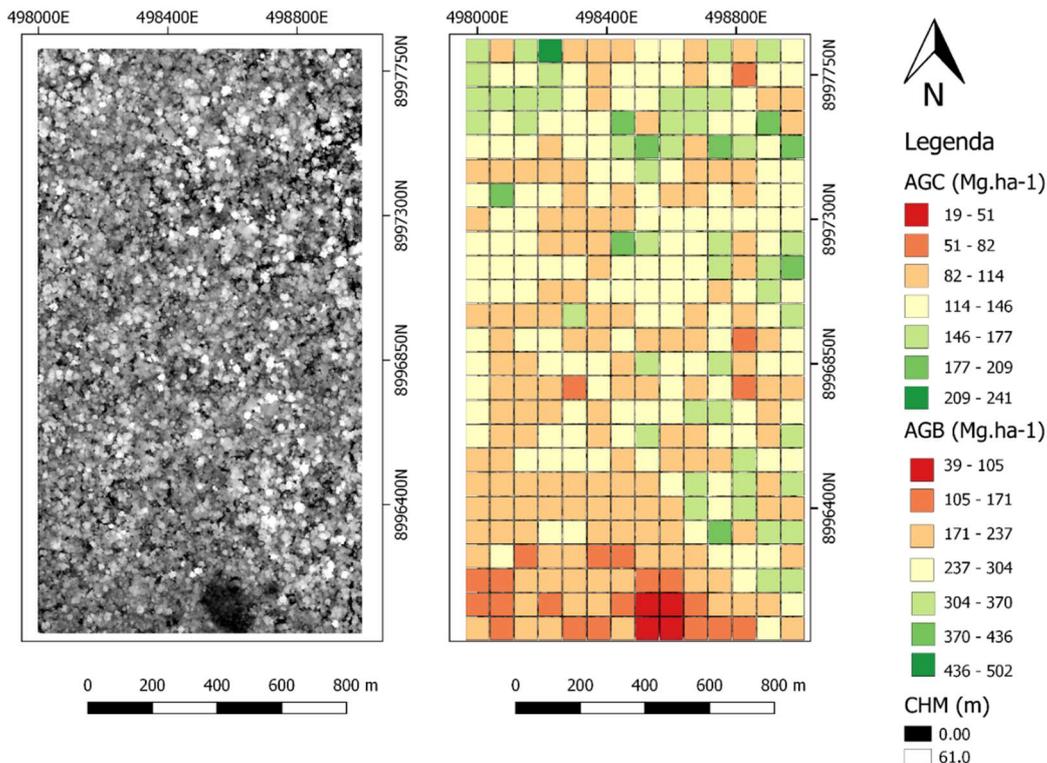


Figura 4. Distribuição espacial da AGB e AGC para a área de estudo.

Figure 4. Spatial distribution of AGB and AGC for the study area.

4. DISCUSSÃO

A partir das estimativas de AGB utilizando dados LiDAR e os dados de inventário, observou-se que os dados do LiDAR podem ser utilizados de forma muito eficaz para a quantificação destes parâmetros. Na literatura, podem ser encontrados bons resultados de ajustes utilizando dados de LiDAR para obtenção de parâmetros como a AGB e AGC.

Santana et al. (2016) apresentam resultados em que as estimativas de AGB utilizando dados LiDAR se aproximam dos valores das variáveis florestais fornecidos por Inventário Florestal. Além disso, dentre as variáveis analisadas por estes autores, a AGB foi a que apresentou maior R^2 . A relação obtida de AGB pelo LiDAR e dados de inventário florestal do presente trabalho apresentam resultado superior quando comparados aos encontrados em outros estudos em floresta tropical, como exemplo o de Phua et al. (2017) ($R^2 = 0,63$, $RMSE = 163,11 \text{ Mg ha}^{-1}$), na Malásia. Este resultado pode ter relação com a densidade de pulsos de 10,58 ppm² (pulsos por metro quadrado) utilizada pelo autores, uma vez que, neste estudo foi utilizado dados LiDAR com densidade de 15,31 ppm², que podem ter conferido a melhor caracterização da estimativa de AGB.

Os menores valores de AGB resultantes dos dados de inventário podem estar relacionados com o modo de coleta, que não considerada a biomassa dos indivíduos abaixo de 10 e 35 cm conforme a amostragem explicada anteriormente do inventário florestal. Sabe-se que em uma floresta nativa a distribuição diamétrica tem comportamento de um “J” invertido, isto é, quanto menor o diâmetro maior é a frequência das árvores. Assim, estes indivíduos arbóreos, de maior frequência que os indivíduos acima de 10 cm, foram desconsiderados da amostragem de campo e, portanto, interferiram na estimativa total da biomassa com base em dados de campo. Já na estimativa por dados LiDAR, todos os indivíduos são compreendidos na varredura. Conforme Andersen et al. (2005), os dados LiDAR captam medidas de todos os componentes do dossel, incluindo folhagem, ramos e caules.

O tamanho da parcela é um importante parâmetro em pesquisas florestais, pois tem potencial de atenuar ou de aumentar o impacto dos efeitos de borda (FRAZER et al., 2011). Assim, parcelas maiores mantêm um maior grau de sobreposição espacial (FLEWELLING, 2009), e exibem menos variância entre parcelas (ZEIDE, 1980), o que vem ao encontro dos resultados obtidos neste estudo.

Autores como Silva et al. (2017) encontram resultados em que as medições de LiDAR podem ser usadas para prever e mapear os estoques de AGC em plantações de eucalipto, com níveis adequados de precisão usando tamanho de célula de pixel de 5 m. Além disso, os autores encontraram resultados em que o tamanho do pixel variando de 5 a 20 m também não afetou significativamente a precisão de predição de AGC. Isso corrobora com os resultados encontrados neste estudo e complementa que o tamanho do pixel não interfere estatisticamente na precisão das estimativas, considerando que no presente estudo os valores testados compreenderam um intervalo de tamanho de pixel maior.

De acordo com Ruiz et al. (2014), que analisaram a influência do tamanho da parcela e da densidade de pontos de dados LiDAR nas estimativas de atributo da estrutura florestal, o tamanho da parcela tem um efeito maior do que a densidade de pontos LiDAR. Geralmente são necessárias áreas de

parcelas de no mínimo 500 - 600 m² para estimativas de biomassa. Além disso, tamanhos maiores das parcelas de campo não aumentam significativamente a precisão dos modelos para calibração de dados LiDAR, mas aumentam o custo do trabalho de campo.

Por fim, observou-se que os resultados encontrados desta pesquisa indicam que a tecnologia utilizada (LiDAR) se apresenta de grande potencial para a obtenção de informações em escalas maiores em relação aos métodos tradicionais (Inventário Florestal). Por meio da ANOVA e do teste de médias Tukey a 95% de probabilidade foi observado diferenças pouco significativas na média da AGB e AGC estimadas com base em dados de campo e de dados do LiDAR, assim o LiDAR se revela de grande potencial para estimativas desta variável.

5. CONCLUSÕES

Não foram observadas diferenças significativas à 95% de probabilidade nas estimativas de AGB e AGC obtidas por dados LiDAR nas diferentes resoluções testadas. Desta forma, para estudos que buscam realizar estimativas destes parâmetros, o tamanho do pixel não infere significativamente nos resultados.

Dados LiDAR apresentam grande potencial na obtenção de parâmetros como a AGB e AGC em floresta tropical, mesmo em diferentes resoluções espaciais (tamanho de pixel). A amplitude das diferenças médias não foi significante estatisticamente em nível de 95% de probabilidade, o que causa baixo impacto nas estimativas baseadas em LiDAR.

Os resultados deste estudo permitem uma maior confiança no uso de dados LiDAR para aplicações e estudos futuros. Trata-se de uma referência para a definição do tamanho de pixel necessário para aqueles que desejam comparar parâmetros biofísicos obtidos por diferentes resoluções espaciais para áreas de floresta tropical.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Projeto Paisagens Sustentáveis Brasil, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela permissão da utilização dos dados LiDAR para elaboração deste estudo. Dados adquiridos com apoio financeiro da Agência para o Desenvolvimento Internacional Norte Americana (USAID) e do Departamento de Estado Norte Americano (USDS) e com apoio técnico do Serviço Florestal Norte Americano (USFS). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), mediante a bolsa de estudos dos autores Pós-graduandos.

7. REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, H. E.; MCGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S.E. Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 4, p. 441-449, 2005. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.013>
- ANDERSEN, H.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; D'OLIVEIRA, MARCUS VINICIO NEVES; KELLER, M. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. **Remote Sensing of**

- Environment**, New York, v. 151, p. 157-165, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.049>
- BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; WALKER, W. S.; LAPORTE, N. T.; SUN, M.; SULLA-MENASHE, D.; HACKLER, J.; BECK, P. S. A.; DUBAYAH, R.; FRIEDL, M. A.; SAMANTA, S.; HOUGHTON, R. A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 182-185, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/nclimate1354>
- BEER, C.; REICHSTEIN, M.; TOMELLERI, E.; CIAIS, P.; JUNG, M.; CARVALHAIS, N.; RÖDENBECK, C.; ARAIN, M. A.; BALDOCCHI, D.; BONAN, G. B.; BONDEAU, A.; CESCATTI, A.; LASSLOP, G.; LINDROTH, A.; LOMAS, M.; LUYSSAERT, S.; MARGOLIS, H.; OLESON, K. W.; ROUPSARD, O.; VEENENDAAL, E.; VIOVY, N.; WILLIAMS, C.; WOODWARD, F. I.; PAPAIE, D. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. **Science**, Washington, v. 329, n. 5993, p. 834-838, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1126/science.1184984>
- CHAVE J; ANDALO C; BROWN S; CAIRNS MA; CHAMBERS JQ; EAMUS D; FOLSTER H; FROMARD F; HIGUCHI N; KIRA T; LESCURE JP; NELSON BW; OGAWA H; PUIG H; RIERA B; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, Berlin, v. 145, p. 87-99, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- CHAVE, J., COOMES, D., JANSEN, S., LEWIS, L.S., SWENSON, N. & ZANNE, A. Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, Oxford, v. 12, n. 4, p. 351-366, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- CLARK, D. B.; KELLNER, J. R. Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. **Journal of Vegetation Science**, Knivsta, v. 23, n. 6, p. 1191-1196, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01471.x>
- COUTERON, P.; BARBIER, N.; PROISY, C.; PE'LISSIER, R.; VINCENT, G. Linking remote-sensing information to tropical forest structure: The crucial role of modelling. **Earthzine**, v. 4, p. 1-4, 2012.
- DEFRIES, R. S.; HOUGHTON, R. A.; HANSEN, M. C.; FIELD, C. B.; SKOLE, D.; TOWNSHEND, J. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 99, n. 22, p. 14256-14261, 2002. DOI: <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.182560099>
- DEO, R.; RUSSELL, M.; DOMKE, G. Using Landsat Time-series and LiDAR to Inform Aboveground Forest Biomass Baselines in Northern Minnesota, USA. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 43, p. 28-47, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/07038992.2017.1259556>
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H. E. 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**, New York, v. 124, p. 479-491, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.014>
- FEARNSIDE, P. M. Roraima e o aquecimento global: balanço anual das emissões de gases do efeito estufa provenientes da mudança de uso da terra. In: Barbosa, R.I.; Ferreira E.J.; Castellon, E.G. (Eds.) **Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus: INPA, p. 337-359. 2009.
- FLEWELLING, J.W. **Plot size, shape, and co-registration error determine expected overlap**. Quebec City: International Union of Forest Research Organizations/Extending Forest Inventory and Monitoring Over Space and Time, 2009. 5 p.
- FRAZER, G.W.; MAGNUSSEN, S.; WULDER, M.A.; NIEMANN, K.O. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 2, p. 636-649. 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.008>
- GOETZ, S.; DUBAYAH, R. Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. **Carbon Management**, v. 2, n. 3, p. 231-244. 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.4155/cmt.11.18>
- HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 114, p. 1-13, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1029/2009JG000935>
- IBGE INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271 p.
- KRAUS K.; PFEIFER N. Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 53, n. 4, p. 193-203, 1998. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00009-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00009-4)
- LU, D. S. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 27, n. 7, p. 1297-1328. 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/01431160500486732>
- MCGAUGHEY, R. J. **FUSION / LDV: software para análise e visualização de dados LIDAR**. Seattle: WA, USFS, p. 11. 2016.
- PHUA, M. H.; JOHARI, S. A.; WONG, O. C.; IOKI, K.; MAHALI, M.; NILUS, R.; HASHIM, M. Synergistic use of Landsat 8 OLI image and airborne LiDAR data for above-ground biomass estimation in tropical lowland rainforests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 406, p. 163-171. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.007>
- PLANO DE MANEJO DA FLORESTA NACIONAL DO JAMARI. **Edições Ibama/MMA**. Brasília, 2005.
- EMBRAPA EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Projeto paisagens sustentáveis Brasil**. Disponível em: <https://www.paisagenslidar.cnptia.embrapa.br/webgis/> Acesso em: 15.fev.2018.
- RUIZ L.A.; HERMOSILLA T.; MAURO F.; GODINO M. Analysis of the Influence of Plot Size and LiDAR Density on Forest Structure Attribute Estimates. **Forests**, Basel, v.

- 5, n. 5, p. 936-951. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/f5050936>
- SANTANA, S. H. C. DE; SASTRES, L. F. S.; NAVARRO, S. H.; LAURENTINO, M. L. S. Análisis de labiomasa de fragmento de bosque por medio de productos LIDAR, em Cataluña - España. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 6, n. 5, p. 235-249, 2016.
- SILVA, C.A.; HUDAK, A.T.; KLAUBERG, C.; VIERLING, A.A.; GONZALE-BENECKE, C.; CARVALHO, S.O.C.; RODRIGUEZ, L.C.E.; CARDIL, A. Combined effect of pulse density and grid cell size on predicting and mapping aboveground carbon in fast-growing Eucalyptus forest plantation using airborne LiDAR data. **Carbon Balance and Management**, v. 12, n. 1, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1186/s13021-017-0081-1>
- SILVA, J. L. **Danos florestais e estimativa da redução no estoque de carbono em áreas de manejo florestal sob concessão pública: floresta nacional do Jamari-RO, Brasil**. 2014. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2014.
- SISTEMA NACIONAL DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO (SNUC). 2000. **Lei 9.985**. Edições Ibama/MMA, Brasília.
- ZEIDE, B. Plot size optimization. **Forest Science**, Bethesda, v. 26, n. 2, p. 251-257. 1980. <https://dx.doi.org/10.1093/forestscience/26.2.251>