



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Estimativa de Biomassa e Carbono Acima do Solo Usando Dados LiDAR Aerotransportados no Parque Natural Municipal de Castanhal, Pará

¹Madson Barbosa Martins; ²Eder Silva de Oliveira

¹Bacharel em engenharia florestal na Universidade do Estado do Pará – UEPA, 68.740- 600, Castanhal (PA), Brasil, madson.martins@aluno.uepa.br. ²Doutor em agronomia na Universidade Federal da Amazônia – UFRA, 66.077-830, Belém (PA), Brasil, ederso@uepa.br.

Artgo recebido em 04/06/2024 e aceito em 18/07/2025

RESUMO

Considerando o contexto de combate mudanças climáticas, compreender a dinâmica da biomassa nas florestas é imprescindível para monitoramento ambiental e de carbono, de modo a garantir a conservação dos ecossistemas e desenvolver estratégias visando reduzir emissões de gases do efeito estufa. Torna-se evidente a necessidade por métodos precisos e menos invasivo ao ambiente. Com isso, o objetivo deste estudo é quantificar a biomassa e carbono acima do solo, empregando a tecnologia LiDAR, no Parque Natural Municipal de Castanhal (PA). Para aquisição dos dados LiDAR foi utilizado o veículo aéreo não tripulado, Matrice 300 RTK, equipado com sensor Zenmuse L1, esses foram ingeridos no FUSION/LDV versão 4.50. A partir disso, foram gerados: Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo de Superfície do Dossel (MSD) e o Modelo de Altura do Dossel (MAD). Além disso, foram obtidos a estimativa de biomassa e carbono acima do solo (AGB e AGC) em diferentes resoluções espaciais. Assim, os modelos: DTM, CSM e CHM permitiram obter uma visão detalhada da estrutura tridimensional da floresta, fornecendo informações sobre a topografia, a distribuição horizontal e dimensão das copas, a identificação de clareiras e a determinação da altura do dossel. Quanto a estimativa de AGB e AGC, trouxe informações detalhadas da distribuição deles no parque e houve uma saturação dos dados na resolução espacial de 20 m. Pode-se concluir, que o LiDAR tem potencial para estimar AGB e AGC de forma precisa, que irão contribuir para a formulação de políticas públicas e estratégias de conservação ambiental no Parque de Castanhal.

Palavras-chave: Biomassa Florestal, Estoque de carbono, Sensoriamento Remoto, Veículo Aéreo Não Tripulado, Estrutura florestal.

Estimation of Above Ground Biomass and Carbon Using Airborne LiDAR Data in the Castanhal Municipal Natural Park, Pará.

ABSTRACT

Considering the context of combating climate change, understanding forest biomass dynamics is crucial for effective environmental and carbon monitoring, to ensure the conservation of ecosystems and to develop strategies aimed at reducing greenhouse gas emissions. It becomes evident the need for precise methods that are less invasive to the environment. Thus, the objective of this study is to quantify the biomass and carbon above ground, using LiDAR technology, in the Municipal Natural Park of Castanhal (PA). For the acquisition of LiDAR data, the unmanned aerial vehicle, Matrice 300 RTK equipped with the Zenmuse L1 sensor was used, this data was subsequently processed in FUSION/LDV version 4.50. Based on this, the digital terrain model (DTM), canopy surface model (CSM), and canopy height model (CHM) were generated. Additionally, estimates of above-ground biomass (AGB) and carbon (AGC) were obtained at different spatial resolutions. Thus, the models: DTM, CSM and CHM enabled a detailed view of the forest's three-dimensional structure, providing information on topography, the horizontal distribution and dimensions of the canopies, the identification of clearings, and the determination of canopy height. Regarding the estimation of AGB and AGC, detailed information about their distribution within the park was provided, with data saturation observed at a spatial resolution of 20 m. It can be concluded that LiDAR has the potential to accurately estimate AGB and AGC, which will contribute to the formulation of public policies and environmental conservation strategies in Castanhal Park.

Key-words: Forest Biomass, Carbon Stock, Remote Sensing, Unmanned Aerial Vehicle, Forest Structure.

Introdução

As florestas constituem o maior ecossistema terrestre responsável pela captura e armazenamento do carbono atmosférico (Freitas et al., 2020), através do processo de fotossíntese que resulta na fixação do dióxido de carbono (CO₂) nos tecidos da planta, sequestrando o carbono na atmosfera (Musthafa & Singh, 2022). No entanto, elas também representam um potencial fonte emissora de carbono na atmosfera quando desmatadas (Assis et al., 2020).

Diante disso, as florestas são importantes sumidouros de CO₂, já que essas representam cerca de 92% do reservatório de carbono da vegetação terrestre (Goldstein et al., 2020) e armazenam até 80% de toda a biomassa da Terra (Bar-On et al., 2018). Com isso, reduzir ações antrópicas, como desmatamentos e incêndios, e restaurar áreas degradadas, surge como ações para mitigar as alterações climáticas regionais e globais, de forma a garantir a resiliência das florestas frente a essa problemática (Souza, 2024).

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) destaca a conservação, o reflorestamento, o florestamento e o manejo florestal sustentável como estratégias para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente em ecossistemas ricos em carbono, como as florestas. A importância de tais medidas se torna ainda mais relevante quando se considera que, em 2019, aproximadamente 22% das emissões líquidas globais de GEE tiveram origem na agricultura, no uso de florestas e em outros usos da terra. Desse total, cerca da metade correspondeu ao CO₂, proveniente principalmente do desmatamento, o que mostra a necessidade de ações de preservação e recuperação de áreas florestais para conter os impactos das mudanças climáticas.

Para atender a esses esforços, é fundamental compreender a dinâmica florestal, e de acordo com Heinrich et al. (2021) e Guerreiro et al. (2021), a quantificação da biomassa florestal acima do solo (*Above Ground Biomass* - AGB) e o carbono acima do solo (*Above Ground Carbon* - AGC) são parâmetros fundamentais para entender esta dinâmica. No contexto das alterações climáticas, a quantificação destes parâmetros, permite uma compreensão abrangente da dinâmica florestal ao longo do tempo e do espaço. Esse entendimento é fundamental para embasar políticas ambientais, facilitar a implementação de acordos internacionais e fortalecer protocolos específicos à redução das emissões de gases de efeito estufa

(GEE) (Silva et al., 2017; Nguyen et al., 2020).

Assim, a quantificação precisa da AGB e AGC são cruciais para compreender as trocas de carbono e alcançar os objetivos de muitas iniciativas internacionais e nacionais relacionadas com a conservação e gestão florestal, alterações climáticas e desenvolvimento sustentável (Herold et al., 2019; Ni-Meister et al., 2022). Além de entender o impacto relativo do uso da terra nas mudanças climáticas, pois a estrutura florestal é um fator importante para a determinação da biomassa florestal (Borsah et al., 2023; Fischer et al., 2019).

Para as quantificações de AGB e AGC utilizam-se métodos diretos e indiretos (Watzlawick et al., 2009). Os métodos diretos exigem que árvore seja colhida e os seus componentes são fragmentados e pesados (Du et al., 2023). Apesar desse método produzir resultados altamente precisos quando realizado de forma cuidadosa, a sua natureza é altamente destrutiva (Goldbergs et al., 2018). Além disso, a aplicação dessa técnica em áreas extensas é dispendiosa e ineficiente, devido ao custo e tempo (Loh et al., 2022).

Enquanto os métodos indiretos envolvem o uso de equações alométricas, com a estimativa de AGB e AGC por meio de variáveis independentes obtidas em campo e a utilização de atributos obtidos por meio de técnicas de sensoriamento remoto (Watzlawick et al., 2009). Dentre essas técnicas, o LiDAR vem se destacando, como uma abordagem tecnológica promissora, pois esta tornou-se uma ferramenta viável para estimar os atributos florestais, como AGB, AGC, altura e diâmetro das copas (Barros et al., 2023; Rex et al., 2018a; Zhao et al., 2018).

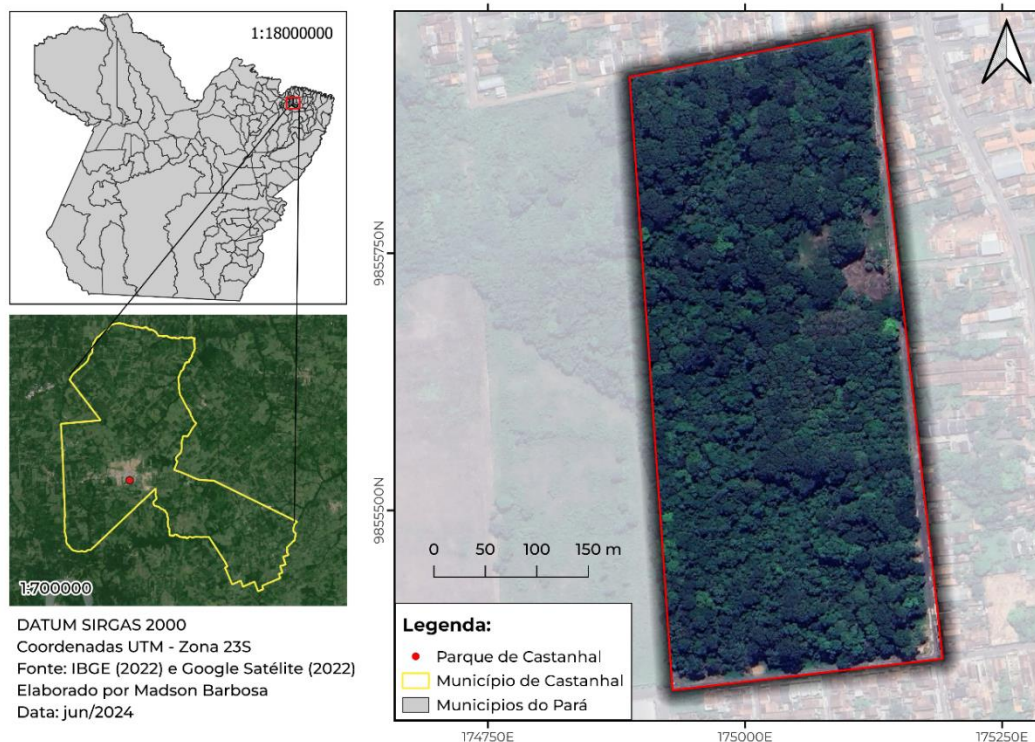
O LiDAR constitui um sistema ativo para medição massiva de posição remota, consiste num sensor de varredura a laser, na região espectral infravermelha, no qual emite pulsos capazes de penetrar uma densa cobertura florestal até o solo e registra retornos contra a superfície (Loh et al., 2022; Torre-Tojal et al., 2022). Em que permite a obtenção de informações em três dimensões acerca da superfície terrestre com alta precisão, resultando numa nuvem de pontos com as coordenadas X, Y e Z (Locks & Matricardi, 2019).

Comparado aos métodos tradicionais de levantamento em campo, o LiDAR oferece vantagens substanciais, como monitoramento em larga escala, ciclo curto, sustentabilidade, grande quantidade de informações e desempenho de alto custo (Tian et al. 2022). Estudos anteriores

demonstraram a capacidade e a eficiência da tecnologia LiDAR para quantificar a biomassa e carbono acima do solo nas florestas (Debastiani et al., 2019; Gomes et al., 2020; Musthafa & Singh, 2022; Ni-Meister et al., 2022; Rex et al. 2018a; Schick et al., 2023).

acidentes geográficos, e apresenta uma altitude média de 33 m (FAPESPA, 2022).

O parque apresenta uma área de 15,225 ha, em espaço urbano, sendo contornada pelas vias: Rua Padre Salvador Traccaioli, Passagem do Arame, Passagem São João e por uma propriedade



Dessa forma, o objetivo deste estudo é quantificar a biomassa e o carbono acima do solo presente no Parque Natural Municipal de Castanhal (PNMC), empregando o LiDAR. Por conseguinte, realizar o mapeamento da distribuição de AGB e AGC em diferentes resoluções espaciais.

Material e métodos

Área de Estudo

O estudo foi realizado no Parque Natural Municipal de Castanhal (PNMC), localizado no Bairro Cariri, nas coordenadas 1°18'15.94"S e 47°55'11.89"O, na cidade de Castanhal – PA (Figura 1), este município está inserido na mesorregião Metropolitana de Belém e está a aproximadamente 68 km de distância da capital paraense (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas [FAPESPA], 2022).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Am com média anual de temperatura de 26°C, máxima e mínima de 28 e 22°C respectivamente, os valores de umidade relativa do ar que variam entre 95 e 79% e média anual de precipitação em torno de 2500 mm (Alvares et al. 2013; Vieira et al., 2020). A topografia do município não conta com expressivos

particular que se estende pela Avenida Maximino Porpino.

Esta área foi criada pela Lei Municipal nº 020 de 30 de maio de 2018, constituindo-se uma Unidade de Conservação da Natureza (UC) do grupo de Proteção Integral (PI), com objetivo de preservar as nascentes, conservar e proteger algumas espécies encontradas na área como Castanheiras (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), Sumaúma (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn) e Pau Brasil (*Paubrasilia echinata* (Lam) E.Ga. et al.), além da manutenção do microclima, da promoção da educação ambiental e do desenvolvimento sustentável para a comunidade do entorno do parque.

Trata-se de um fragmento de floresta ombrófila densa com diferentes fitofisionomias, que possui uma rica biodiversidade distribuída entre floresta de terra firme e de várzea, capoeira e floresta plantada, contendo inclusive espécies ameaçadas de extinção, como a Castanheira e a Sumaúma, além de espécies como o Pau-Brasil, nativo da Mata Atlântica, o Mogno Brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) e o Pau Amarelo (*Euxylophora paraenses* Huber) (Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade

[IDEFLOR-Bio], 2018).

Com base neste aspecto, o Parque de Castanhal é dotada de uma significativa biodiversidade de flora, apresentando 163 espécies,

dos quais 10 *spp* estão presentes em listas de espécies ameaçadas de extinção a níveis estadual, nacional e internacional (Avelar et al., 2023).

Figura 1. Mapa de localização do Parque Natural Municipal de Castanhal (PNMC), Pará.

Aquisição dos Dados LiDAR

Os dados LiDAR foram coletados no dia 24 de novembro de 2023, por meio do veículo aéreo não-tripulado (VANT), denominado Multirrotor DJI Matrice 300, este acoplado ao sensor Zenmuse L1 (Figura 2), e mais o GNSS, RTK - Mobile 2 DJI (GPS; Glonass; Galileo; BeiDou), para obter informações de navegação combinadas de alta precisão, como posição, velocidade e altitude (Tian et al., 2022).

Estes são equipamentos da fabricante de

drones DJI Enterprise e foram cedidos pelo Laboratório de Qualidade de Águas da Amazônia da Universidade do Estado do Pará (UEPA).

Para realização do sobrevoo foi necessário um Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) e uma Unidade de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit* - IMU), para integrar as informações, a fim de obter um posicionamento preciso dos dados (Torre-Tojal et al., 2022). As especificações do voo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. As especificações do voo usado para coleta dos dados LiDAR no PNMC.

Especificações	
Datum	UTM-WGS 1984
Sistema de coordenadas	UTM zona 23 S
Área sobrevoada	30,6 ha
Tempo de voo	16 min 34 s
Resolução	1280 x 960 pixels
<i>Ground Sample Distance</i>	2,73 cm/pixel
Comprimento de onda laser	905 nm
Altitude média do voo	100 m
Velocidade média do voo	40 km/h
Ângulo de visão	90° (NADIR)
Frequência de varredura	144 Hz
<i>Percentage of flightline overlap</i>	70%

Processamento da Nuvem de Pontos LiDAR

A nuvem de pontos LiDAR foi processada no software FUSION/LDV versão 4.5, desenvolvido e disponibilizado pela *Pacific Northwest Research Station* e pelo *USDA Forest Service*, com intuito de visualizar, manipular e analisar dados LiDAR (Mcgaughey, 2023), de forma a filtrar e gerenciar uma nuvem de pontos. Além disso, foi utilizado o software Notepad++ versão 8.6, para escrever as sintaxes de processamento do FUSION.

Este software produz inúmeras variáveis métricas que vêm sendo comumente aplicadas no estudo de estimativa de biomassa. Assim, o processamento dos dados LiDAR no Fusion, foi realizado conforme descrito por Silva et al. (2017) e Santana et al. (2021), foi constituído, inicialmente, por gerar um resumo descritivo das informações, nos formatos “.txt” e “.html”, usando a função *Catalog*.

Após essa etapa, foi utilizada o comando *PolyClipdata*, para recortar a nuvem de pontos LiDAR com base no arquivo *shapefile* da área de estudo, pois na aquisição dos dados, a área sobrevoada pelo VANT foi superior a do Parque de Castanhal, visando minimizar o efeito de borda.

Posteriormente, foi realizado a classificação dos pontos, baseado no algoritmo de filtragem, *Groundfilterer*, fundamentada no estudo de Kraus e Pfeifer (1998), com intuito de separar as informações relacionadas ao solo da vegetação, que consiste em atribuir valor zero de altura para os pontos de solo e valor de altura para os demais, tendo o solo, como referência (Sanchez et al., 2023).

A partir dos pontos classificados como terrestres, foi gerado o Modelo Digital de Terreno (*Digital Terrain Model* - DTM), usando a função *GridSurfaceCreate*. Após isso, foi criado o modelo de superfície de dossel, denominado *Canopy*

Surface Model (CSM), usando a função *Canopy Model*.

Além disso, foi estabelecido o modelo de altura do dossel (*Canopy Height Model* - CHM), utilizando o comando anterior, mas acrescentando o parâmetro *ground* (Utilização do arquivo DTM, como referência), no qual esse tem como base a subtração entre os dois modelos anteriores, resultando em uma nuvem de pontos normalizada (Torre-Tojal et al., 2022), em que CHM ilustra a altura das árvores a partir do nível do solo (Schick et al., 2023). E os modelos DTM, CSM e CHM, foram convertidos do formato “dtm” para “ascii”, com a função *Dtm2Ascii*, para receber a sequência no processamento de dados no software Qgis.

Para a etapa de normalização da nuvem de pontos LiDAR foi adotado uma altura mínima de 2

m acima do solo, processo pelo qual a influência da topografia é removida (Rex et al., 2018a).

As variáveis métricas LiDAR contidas na nuvem de pontos foram extraídas no formato “csv”, por meio da ferramenta *GridMetrics*, que segmentou a nuvem e calculou as métricas correspondentes para os pontos dentro de cada célula (McGaughey, 2023). As informações da nuvem de pontos foram divididas em dados de elevação e de intensidade dos retornos do sensor, permitindo assim estimar a biomassa acima do solo e o estoque de carbono (Santana et al., 2021).

A Figura 2 apresenta o fluxograma dos procedimentos adotados no processamento da nuvem de pontos LiDAR no software FUSION/LDV versão 4.5.

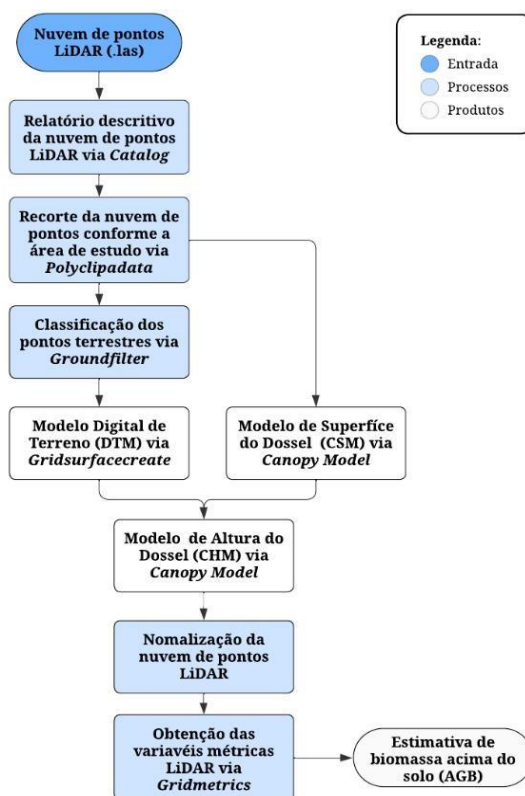


Figura 2. Procedimentos executados no processamento da nuvem de pontos LiDAR no FUSION/LDV.

Estimativa de Biomassa Acima do Solo

A biomassa acima do solo (*Above Ground Biomass* - AGB), em Mg.ha⁻¹, no Parque de Castanhal, foi calculada a partir da obtenção das métricas LiDAR no *Gridmetrics*, por meio da aplicação do modelo de regressão desenvolvido por D'Oliveira et al. (2012), mostrada na Equação 1. Em que seleciona duas variáveis métricas explicativas LiDAR, P25 e VAR.

$$AGB = (3,119 + 0,564 P25 + 0,062 VAR)^2 + 1,74 \quad (1)$$

Em que:

AGB é a biomassa acima do solo na área em Mg.ha⁻¹;

P25 é a elevação média dos retornos no primeiro quartil das amostras LiDAR;

VAR é a variância da elevação dos

retornos dos pontos.

Inicialmente, o arquivo no formato “csv”, produzido pelo *Gridmetrics*, foi convertido para “ascii”, por meio do comando *Csv2Grid* do Fusion (Mcgaughey, 2023).

E para cada variável independente contida no modelo de regressão, foi feito um arquivo no formato “ascii”. Posteriormente, estes arquivos foram exportados para software *Qgis* versão 3.28.9, para estimar AGB do parque, usando a ferramenta, *raster calculator*, em diferentes resoluções espaciais, por fim, fez-se uma estatística descritiva.

Estimativa de Carbono Acima Solo

Resultados e discussões

Informações da Cobertura de Dados LiDAR

Com a função *Catalog* do software Fusion, foi gerado um resumo descritivo das características

Para estimativa de carbono acima do solo (*Above Ground Carbon* - AGC) no Parque de Castanhal, foi considerado que as madeiras do amazônicas possuem, em média, 50% da biomassa seca na forma de carbono (Fearnside, 1997).

Desse modo, a quantificação de AGC é dada pela Equação 2:

$$AGB = AGC * C\% \quad (2)$$

Em que: AGC é o estoque de carbono acima do solo, em Mg.ha⁻¹;

C% é a concentração de carbono média da vegetação em florestas tropicais.

da nuvem de pontos LiDAR obtidas no sobrevoo, que estão descritas na Tabela 2. Este comando caracteriza os dados LiDAR, como a qualidade interna, a integridade da cobertura de dados e retorno ou densidade de pulso (Mcgaughey, 2023).

Tabela 2. Relatório da cobertura de dados LiDAR.

Relatório da cobertura de dados LiDAR	
X Mínimo	174686,98 m
X Máximo	1752192,12 m
Y Mínimo	9855155,88 m
Y Máximo	9856111,85 m
Elevação mínima	-12,92 m
Elevação máxima	95,52 m
Total de retornos	156.480.521 pts
Densidade nominal de retornos	278,84 pts/m ²

Modelo Digital de Terreno

Através da filtragem de pontos classificados como terrestres, foi produzido o modelo digital de terreno (*Digital Terrain Model – DTM*), numa resolução de 1 m, conforme a Figura 3, em que a área apresentou uma elevação que varia entre 0,0003 e 11,07 m.

Por meio da tonalidade das cores, foi observado que a porção sudeste compreende a área mais elevada. Este modelo representa as informações topográficas do parque, possibilitando identificar as variações de elevação, declive e áreas planas, corpos d'água e entre outras.

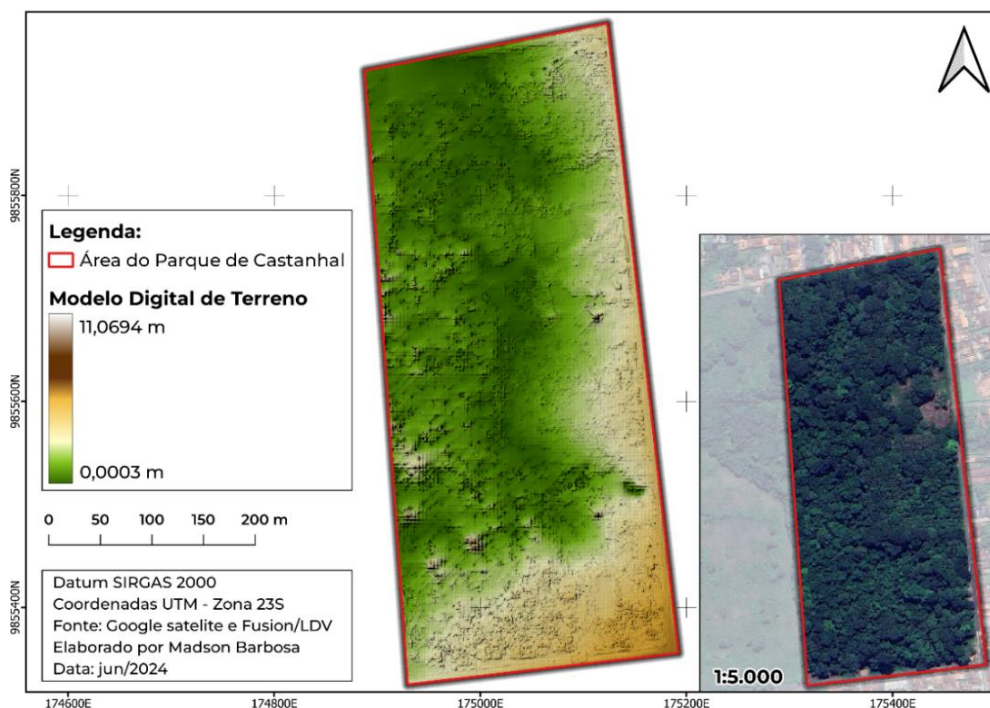


Figura 3. Modelo Digital de Terreno do Parque de Castanhal, Pará.

Esses dados topográficos são importantes para vários estudos ambientais, já que o relevo desempenha um papel essencial em diversas características, aspectos e processos ambientais, incluindo aqueles relacionados à hidrologia, erosão e transporte de sedimentos, ciclagem de nutrientes, riqueza e distribuição de espécies (Mukherjee et al., 2013).

Sendo assim, o DTM representa a superfície nua do solo desprovida de qualquer vegetação ou estruturas feitas pelo homem (Torre-Tojal et al., 2022).

No entanto, o mapeamento da superfície de terreno em áreas florestais é uma necessidade para geociências, principalmente em regiões tropicais, pelo fato que o acesso via terreno é complexo e a presença de cobertura de nuvens ao longo do ano (Caldeira et al., 2023).

Diante disso, o LiDAR vem como uma abordagem proeminente para gerar DTM em alta resolução, em áreas florestais. Pois o LiDAR é uma das poucas fontes que permite fazer a coleta de dados terrestres, de forma precisa, para geração do DTM, em terrenos cobertos por vegetação florestal, em função da capacidade de cruzar a copa e atingir

ao nível do solo (Maguya et al., 2013; Căţeanu & Ciobotaru, 2021).

Com isso, o presente estudo tem intuito de demonstrar a eficiência da tecnologia LiDAR na geração do modelo digital de terreno de alta resolução espacial, no Parque de Castanhal. Assim, a obtenção de modelos digitais precisos é fundamental para o planejamento de atividades no parque, tais como a criação de trilhas ecológicas para o turismo ecológico, o desenvolvimento de pesquisas técnicas-científica e a gestão dos recursos hídricos, como a preservação das nascentes presente no parque.

Pois o Parque de Castanhal trata-se de uma UC de Proteção Integral, que se propõe a preservar integralmente o ecossistema, com intuito de proteger o equilíbrio natural, a diversidade ecológica e os processos ecológicos naturais, sendo permitido apenas a utilização para fins de científicos e educacionais (Teixeira et al., 2022).

Modelo de Superfície de Dossel

Com a aplicação do comando *CanopyModel* do software Fusion, foi gerado um modelo de superfície do dossel (*Canopy Surface*

Model - CSM), numa resolução de 1 m, conforme a Figura 4, no qual varia entre 0,007 e 41,8 m.

Com base nisso, é possível observar a distribuição espacial horizontalmente das copas das árvores na área de estudo, a densidade da copa

e a heterogeneidade da estrutura das copas dentro do parque pela gradação de cores. Por conseguinte, este modelo mostra a dimensão da copa das árvores e a presença de algumas clareiras no parque, ou seja, áreas que não há cobertura florestal.

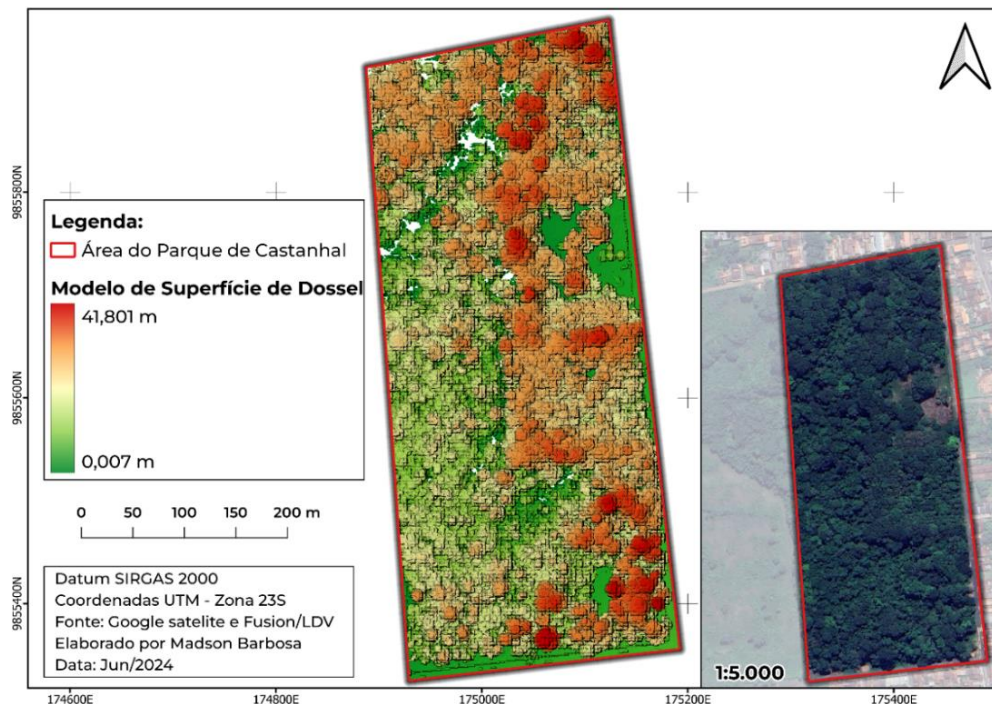


Figura 4. Modelo de superfície de Dossel do Parque de Castanhal, Pará.

Ao se considerar somente a elevação contida no CSM de uma área florestal, esta informação será correspondente ao topo dossel. Pois o CSM representa o topo da superfície da Terra, isso inclui árvores, edifícios e outros objetos que ficam no solo, logo fornece o topo da copa em áreas florestadas (Torre-Tojal et al., 2022).

Com isso, esse modelo trata dos primeiros obstáculos a serem atingidos pela varredura a laser aerotransportada, sendo fundamental para compreender a estrutura da vegetação, assim o CSM demonstra a representação dos dosséis em aglomerados de árvores (Caldeira et al., 2023). Desse modo, o estudo tem o intuito de representar o CSM do parque, em alta resolução espacial, utilizando dados LiDAR aerotransportados.

Segundo Khosravipour et al. (2016), a diminuição da resolução espacial, influencia no CSM, de modo a não apresentar detalhes suficientes para representar árvores de porte menores, resultando em erros de omissão, ou seja, as copas dessas árvores não são detectadas pela varredura a laser. Os mesmos autores afirmam que CSM em alta resolução tem sido usado em abordagens de detecção de árvores individuais, através dos pontos considerados máximos, no qual

serve como referência da posição correspondente às copas das árvores.

Como apontado por Boa Morte et al. (2020), o modelo de superfície de dossel é uma importante camada raster métrica do dossel, que em alguns casos, é um dado tão relevante quanto as imagens em infravermelho próximo (*Near Infrared - NIR*), pois permite diferenciar as estruturas florestais, por meio da altura da vegetação.

Já que esse atributos arbóreo é importante para caracterizar os povoamentos florestais, estimar o volume de madeira e analisar a estrutura do dossel. Pois as variações na estrutura da copa demonstram os diferentes tipos de floresta e distúrbios florestais ocorridos numa área, como a presença de clareiras (Yin et al., 2023).

Modelo de Altura de Dossel

Através do comando *CanopyModel* do software Fusion, alinhado com parâmetro *ground*, para normalizar a nuvem de pontos, foi produzido o modelo de altura do dossel (*Canopy Height Model - CHM*), conforme a Figura 5, numa resolução de 1 m, que varia entre 0 e 38 m.

Com base nisso, foi observado que as árvores de porte alto estão representadas pela

coloração avermelhada, que predomina nas porções nordeste e sudeste do Parque, essas áreas

são compostas principalmente pela espécie *Bertholletia excelsa* (Castanheira-do-Pará)..

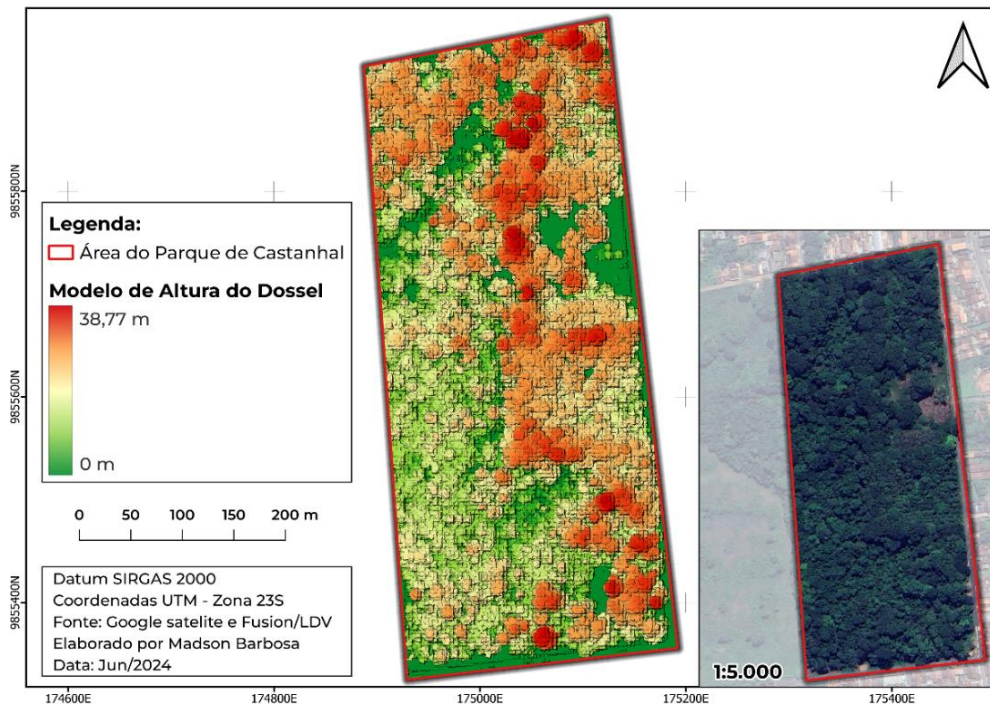


Figura 5. Modelo de Altura do Dossel do Parque de Castanhal, Pará.

Neste modelo destaca as variações altimétricas da copa das árvores, no qual permite fazer uma estimativa precisa da altura da vegetação, sendo capaz de identificar áreas de clareiras, e permite distinguir os diferentes estratos arbóreos e estágios de regeneração presente no Parque de Castanhal.

De acordo com Schick et al. (2023), esse modelo ilustra a altura das copas de árvores individuais, a partir do nível do solo, e a partir disso, é possível fazer comparações temporais, sendo capaz de identificar as alterações ocorridas numa floresta.

Além de que altura do dossel tornou-se uma das principais características da estrutura vertical para medir os estoques globais de carbono nas florestas (Wang et al., 2023).

Este modelo não apresenta o valor de elevação, mas sim, a altura ou distância entre o solo e a copa das árvores, já que o CHM é resultado da diferença entre o DTM (Superfície) e CSM (Topo do dossel). Desse modo, o sucesso na predição das alturas está associado à qualidade dos modelos: DTM e CSM.

Por conseguinte, esse modelo demonstra a estrutura vertical de vegetação, no qual permite compreender a estrutura da floresta e assim classificá-la em diferentes fisionomias ou estratos (Sanchez et al., 2023). No estudo de Bervegliet et

al. (2019), classificaram o dossel de uma floresta tropical na Mata Atlântica, em três classes de altura: baixo, médio e alto, com base no CHM, através de uma análise multitemporal, permitindo encontrar áreas em estágio de regeneração.

Pois a altura das árvores é um dos critérios utilizados, para distinguir os diferentes estágios sucessionais num povoamento florestal, assim como disposto na Resolução CONAMA nº33 de 7 de dezembro de 1994, que estabelece definições e parâmetros mensuráveis para análise de sucessão para bioma Mata Atlântica.

No contexto amazônico, tem-se a classificação dos estágios sucessionais da vegetação secundária na Amazônia Oriental proposta por Salomão et al. (2012), em que este categorizou em inicial, intermediário e avançado, e esses estágios possuem características arbóreas definidas, no qual permite identificar o estágio sucessional que se encontra o povoamento florestal.

Desse modo, o estudo tem por objetivo demonstrar a eficiência da tecnologia LiDAR, em estimar a altura das árvores do Parque de Castanhal. Dada a dificuldade em determinar esse atributo arbóreo no campo, especialmente em florestas de dossel altamente densas.

Pois a estimativa da altura depende da visualização do topo, fazendo-se o uso de técnicas

visuais e/ou cálculos geométricos (Boa Morte et al., 2020). Diante disso, o LiDAR vem surgindo como uma técnica de sensoriamento promissora, para estimar a altura dos indivíduos arbóreos, de forma precisa, em áreas com copas densas.

Recentemente, houve uma descoberta de um Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) de 88,5 m na Bacia Amazônica, usando a tecnologia *Light Detection and Range*, esta árvore foi encontrada na Unidade de Conservação Estadual de Uso Sustentável Floresta Estadual do Paru (Flota do Paru) (Gorgens et al., 2019).

Além do mais, este modelo permite distinguir uma espécie de um povoamento florestal, como no estudo de Rex et al. (2018b), que identificaram as copas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) pelo modelo de altura de dossel, aplicando filtros de suavização, com intuito de ressaltar as copas dessa espécie e reduzir a probabilidade de serem falsamente identificados. Da mesma forma que a copa dos indivíduos da *B. excelsa* se

sobressaem sobre as demais espécies presente no PNMC.

Estimativa de Biomassa Acima do Solo

De acordo com equação de D'Oliveira et al. (2012), foram obtidos diferentes cenários em cada resolução espacial analisada para estimativa de AGB no Parque de Castanhal, essas são apresentadas na Tabela 3.

Além disso, pode-se observar que o coeficiente de variação (CV%) diminui conforme o aumento da resolução espacial, de 85,49% para de 1 m até 71,28% para de 25 m.

Isto foi notado por Rex et al. (2018a), em que CV% variou de 54,49% até 23,24%, do pixel de 10 m para o 100 m, isso é justificado pelo fato de que com uma alta resolução, ou seja, tamanho de pixel menores, é possível captar uma maior amplitude de valores, indicando uma maior variabilidade das informações em relação à média.

Tabela 3. Estatística descritiva de AGB para cada resolução espacial.

Resolução espacial (m)	Média (Mg.ha ⁻¹)	Mediana (Mg.ha ⁻¹)	Mínima (Mg.ha ⁻¹)	Máximo (Mg.ha ⁻¹)	Desvio Padrão	CV (%)
1	204,13	159,57	1,74	1.566,53	174,52	85,49
5	209,73	163,73	1,74	1.115,62	173,16	82,56
10	210,68	167,03	1,78	920,07	167,08	79,30
15	212,14	168,49	4,33	919,68	163,55	77,09
20	210,25	165,15	3,75	749,16	154,95	73,69
25	206,07	172,06	8,80	654,81	146,89	71,28

Como pode ser observado na Figura 6, as estimativas médias de AGB do Parque de Castanhal apresentaram valores médios próximos entre si, sendo mostrado o intervalo de 204,13 a 212,14 Mg.ha⁻¹.

Além do mais, teve uma crescente das estimativas médias de AGB, com o aumento da resolução espacial, no entanto, no tamanho de pixel

de 20 m, houve um decréscimo nas estimativas, que foi de 212,14 para 210,25 Mg.ha⁻¹.

Isto indica a saturação das estimativas em baixas resoluções, ou seja, tamanho de pixels maiores (Rex et al., 2018a), ou seja, houve uma limitação na capacidade de capturar informações detalhadas, levando a estimativas menos precisas.

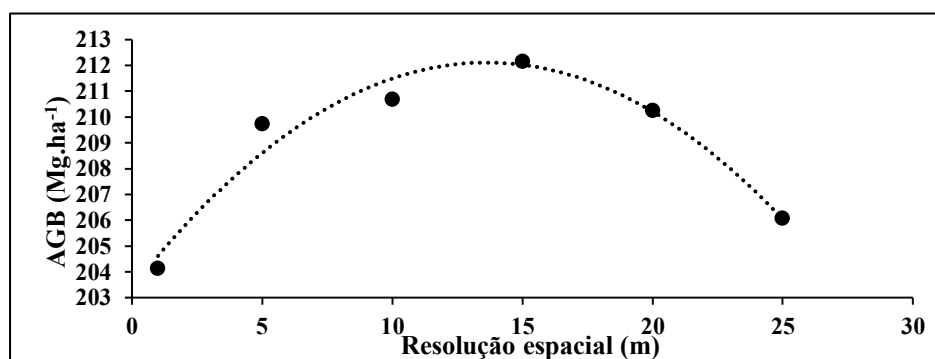


Figura 6. Comportamento médio de AGB para cada resolução espacial.

Na Figura 7 demonstra a distribuição espacial de AGB no parque em diferentes resoluções espaciais selecionadas, no qual as áreas de alto conteúdo de biomassa são representadas pela coloração avermelhada. Essas

áreas se concentram nas porções nordeste e sudeste e parte central da área de estudo, no qual estes resultados estão estreitamente relacionados aos indivíduos de alto porte observados no CHM e ao estágio sucessional avançado.

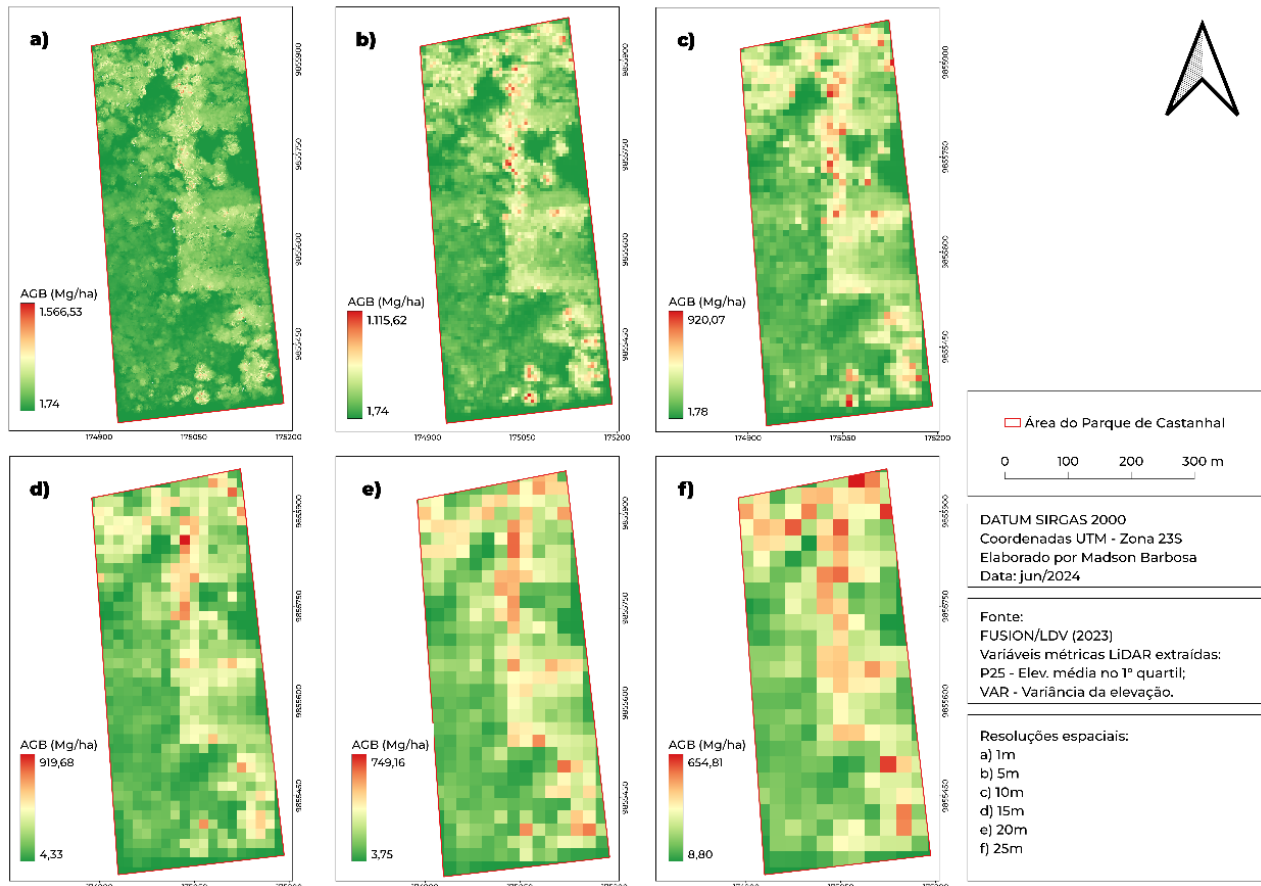


Figura 7. Distribuição espacial de AGB no Parque de Castanhal, Pará.

Assim como no estudo de Araújo et al. (2020), em que analisaram o estoque de biomassa por estágio sucessional, e notaram que as áreas que apresentavam vegetação em estágio sucessional inicial/médio e médio estocaram mais biomassa que as áreas em estágio inicial.

Isso corrobora com os resultados encontrados neste estudo, em que alta concentração de biomassa no Parque de Castanhal encontraram-se nas áreas em estágios de sucessão avançado, com base na classificação de Salomão et al. (2012), compostas predominantemente, por espécies de grande porte, como a *Bertholletia excelsa*.

Este fato foi observado num estudo, em que observaram a espécie *Inga capitata* Desv, apesar de ter menor abundância, apresentou a maior quantidade de biomassa (30,37 Mg), em relação à outras espécies, devido esta possui mais indivíduos de grande porte na área. (Pimentel et al., 2024).

Pois já que a variação da biomassa nas florestas decorre pelas diferenças em relação à composição florística, à densidade de indivíduos, à distribuição diamétrica, bem como os diferentes estágios de regeneração (Watzlawick & Garcia, 2021).

Estimativa de Carbono Acima do Solo

Com base na concentração média de carbono proposta por Fearnside (1997), foram analisados os diferentes panoramas de distribuição de AGC no Parque de Castanhal, para cada resolução espacial observada. Assim como observado na Tabela 3, no levantamento de AGC foi possível perceber o mesmo comportamento do coeficiente de variação (CV%).

Além disso, o comportamento médio das estimativas médias de AGC do Parque de Castanhal mostraram valores próximos, que ficaram no intervalo de 102,06 a 106,06 Mg.ha⁻¹

Assim como nas estimativas médias de AGB, nas de AGC em relação ao tamanho do pixel foi visto uma crescente das estimativas, entretanto, houve uma diminuição na resolução de 15 m para 20 m, de 106,06 para 105,12 Mg.ha⁻¹.

A Figura 8 ilustra a distribuição espacial de AGC no Parque de Castanhal, em distintas resoluções espaciais analisadas, no qual as áreas de alto estoque de carbono são representadas pela coloração avermelhada, nos quais se estendem da porção nordeste ao sudeste, estes resultados estão intrinsecamente relacionados aos indivíduos de alto porte e ao estágio sucessional.

Pois as inúmeras tipologias de florestas existentes armazenam diferentes quantidades de

carbono em sua biomassa, devido aos estágios de sucessão, à idade, ao regime de manejo e à composição de espécies (Watzlawick & Garcia, 2021).

Estudos já demonstraram que existe uma interação entre os estágios sucessionais e o estoque de carbono, onde a vegetação de estágio avançado apresentou maior capacidade de absorção de carbono, em comparação a de estágio iniciais. Assim como observado por Araújo et al. (2020), em que o estoque médio de carbono foi de 61,40 tC/ha para as áreas com vegetação em estágio médio, e 6,54 tC/ha para as áreas em estágio inicial.

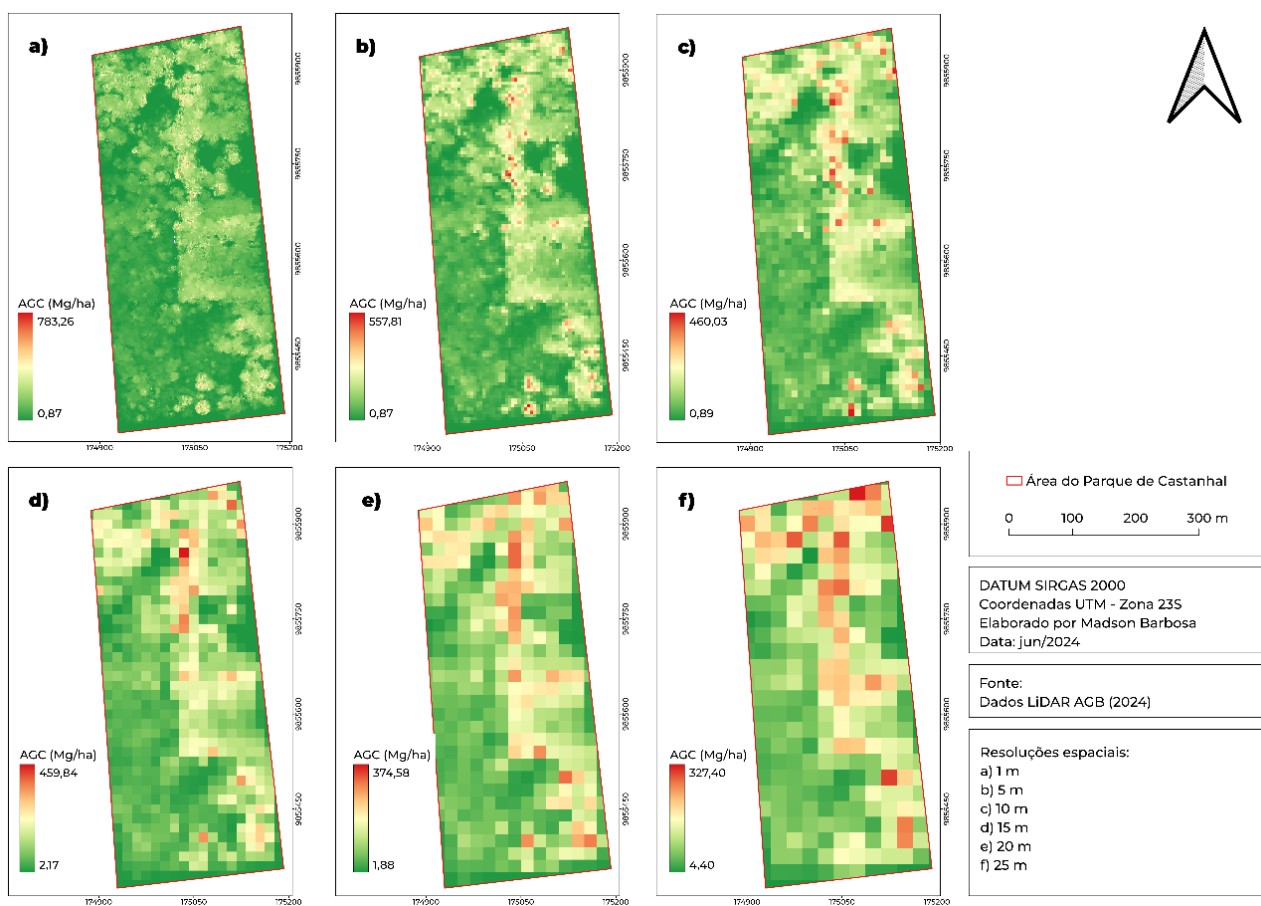


Figura 8. Distribuição espacial de AGC no Parque de Castanhal, Pará.

Isso corrobora com os resultados encontrados no parque, em que a alta concentração de AGC foi visto em áreas formadas por indivíduos arbóreos de alto porte, de acordo com CHM, e essas se encontram em estágios avançados de sucessão, com base na classificação proposta por Salomão et al. (2012).

Conforme os estudos de Sanquetta et al.(2014) e Silva et al. (2023), apontam que quanto maior o porte das árvores e mais velhas, maior será seu estoque de carbono individual, desde que a árvore não tenha chegado em sua senescência, fase no qual há a estabilidade da sua produção.

Isso contribui para os resultados neste estudo e complementa que espécies de grande porte, como *Bertholletia Excelsa*, contribuem para

o alto estoque de carbono dentro do Parque de Castanhal. Isto denota a importância dessa espécie para realização do serviço ecossistêmico de captura de CO₂ da atmosfera.

Esse alto estoque de carbono é por causa que o lenho contribuir para maior parte da produção de biomassa numa árvore, com média de 0,70, seguido por raízes (0,15), casca (0,08), galhos (0,04) e folhas (0,02) (Gatto et al, 2011).

Esse componente vegetal possui a capacidade de estocar grandes quantidades de carbono, devido a sua diferente composição química (Silva et al., 2022). Segundo o Ma et al. (2018), o lenho possui altos teores de celulose e lignina, consequentemente, tende a apresentar maiores teores de carbono em comparação com tecidos com baixo teor de lignina.

Conclusão

Pode-se concluir que a utilização do LiDAR foi eficiente para a quantificação precisa da biomassa e do carbono acima do solo no Parque de Castanhal, devido a capacidade dos pulsos laser penetrar as copas densas e atingir o solo.

No qual permitiu estimar AGB e AGC presente no Parque de Castanhal, e realizar o mapeamento da distribuição espacial desses em diferentes resoluções espaciais, permitindo identificar áreas com maiores concentrações. Esses resultados estão relacionados com a presença de espécies lenhosas e de alto porte, como *Bertholletia Excelsa*, e ao estágio de sucessão avançado.

A tecnologia LiDAR permitiu obter os modelos: DTM, CSM e CHM em alta resolução espacial, por meio deles é possível fazer análise da estrutura tridimensional da área de estudo, pois o DTM representou as informações topográficas.

Enquanto CSM revelou a distribuição espacial das copas, a densidade da vegetação e a heterogeneidade da das copas, além de identificar as clareiras presente no parque; e CHM forneceu estimativa da altura das copas das árvores e permite distinguir os diferentes estratos arbóreos presente no Parque de Castanhal

Com isso, a estimativa de biomassa e carbono acima do solo utilizando dados LiDAR aerotransportados vem como uma abordagem inovadora e eficiente, para compreender a dinâmica dos ecossistemas florestais diante das mudanças climáticas.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Qualidade de Águas da Amazônia da Universidade do Estado do Pará

(LABÁGUA/UEPA), pela disponibilização dos equipamentos que foram fundamentais para desenvolvimento desta pesquisa.

À Secretaria de Meio Ambiente (SEMMA) de Castanhal, pela permissão e suporte na realização do sobrevoo do VANT no Parque Natural Municipal de Castanhal, para obtenção dos dados LiDAR.

À Universidade do Estado do Pará, por proporcionar um ambiente propício à pesquisa e ao desenvolvimento acadêmico.

Referências

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Araújo, Y. R. V., Moreira, Z. C. G., & das Neves, A. I. (2020). Estoque de carbono e de biomassa em vegetação com diferentes estágios de regeneração e alterações antrópicas em área urbana. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 8(2). <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/353>.
- Assis, T. O., Aguiar, A. P. D., Von, C. R., Gomes, D. M., P., Kury, J. N., Ometto, J. P. H., & Nobre, C. A. (2020). CO₂ emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9cfc>.
- Avelar, M. C., Pontes, A. N., & Paula, M. T. (2023). Educação Ambiental para conservação dos elementos naturais do Parque Natural Municipal de Castanhal (PA). *Revista Brasileira de Educação Ambiental* (RevBEA), 18(1), 299-317. <http://dx.doi.org/10.34024/revbea.2023.v18.1403>.
- Bar-On, Y.M., Phillips, R. e Milo, R. (2018). A distribuição de biomassa na Terra. *Anais da Academia Nacional de Ciências*, 115(25), 6506-6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
- Barros, Q. S., Rodrigues, N. M. M., Mesquita Pinheiro, R., & Ferreira, E. J. L. (2023). Potencial da tecnologia LiDAR terrestre na área florestal. *Scientia Naturalis*, 5(1). <https://doi.org/10.29327/269504.5.1-29>.
- Berveglieri, A., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G., & Martinez, B. F. (2019). Geração de Modelo de Altura de Árvore Usando Imagens Aéreas Históricas para o Monitoramento da Regeneração em Floresta Tropical de Mata Atlântica. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(4), 206-218. https://doi.org/10.11137/2019_4_206_218.

- Boa Morte, C. D. L. B., Carvalho, L. F. S. G., & Barros, R. S. (2020). Uso de VANT como ferramenta para estimativa de altura de dossel em manguezal: um estudo investigativo em Guaratiba, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Tamoios*, 16(3). <https://doi.org/10.12957/tamoios.2020.55745>.
- Borsah, A. A., Nazeer, M., & Wong, M. S. (2023). LIDAR-Based Forest Biomass Remote Sensing: A Review of Metrics, Methods, and Assessment Criteria for the Selection of Allometric Equations. *Forests*, 14(10), 2095. <https://doi.org/10.3390/f14102095>.
- Resolução CONAMA Nº 33, de 7 de dezembro de 1994. (1994, 30 de dezembro). Dispõe sobre a definição dos estágios sucessionais das formações vegetais ocorrentes na região da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul. Diário Oficial da União. <https://sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201612/02142051-resolucao-conama-n-33.pdf>.
- Caldeira, C. R. T., Polidori, L., El Hage, M., Caldeira, M. C. O., Gorgens, E. B., & Ometto, J. P. H. B. (2023). Comparação entre os Modelos Digitais de Terreno gerados por Radar em Banda P e LiDAR na Amazônia, um estudo de caso no Amapá (Brasil). *Revista de Geociências do Nordeste*, 9(1), 59-70. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID31573>.
- Lei Municipal nº 020/2018, de 30 de maio de 2018 (2018, 08 de junho). Dispõe sobre a criação do Parque Natural Municipal de Castanhal, no município de Castanhal. Castanhal, PA. Diário Oficial do Município de Castanhal. <https://www.semmacastanhal.com.br/uploads/legislacao/dee60d27bce5e1fa3aa6a6151f1fa022.pdf>.
- Căţeanu, M., Ciubotaru, A. (2021). The effect of lidar sampling density on DTM accuracy for areas with heavy forest cover. *Forests*, 12(3), 265. <https://doi.org/10.3390/f12030265>.
- Debastiani, A. B., Moura, M. M., Rex, F. E., Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P., & Pinto, N. (2019). Regressões robusta e linear para estimativa de biomassa via imagem sentinel em uma floresta tropical. *BIOFIX Scientific Journal*, 4(2), 81-87. <https://doi.org/10.5380/biofix.v4i2.62922>.
- D'Oliveira, M. V., 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.014>.
- Du, L., Pang, Y., Wang, Q., Huang, C., Bai, Y., Chen, D., ... & Kong, D. (2023). A LiDAR biomass index-based approach for tree-and plot-level biomass mapping over forest farms using 3D point clouds. *Remote Sensing of Environment*, 290, 113543. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113543>.
- Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) (2022). *Estatísticas Municipais Paraenses: Castanhal*. Belém: Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação. 2.
- Fearnside, P. M. (1997). A Roraima e o aquecimento global: Balanço anual das emissões de gases do efeito estufa provenientes da mudança de uso da terra. *Ocupação Humana, Ambiente e Ecologia em Roraima*, pgs. 337-359. <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/35227>.
- Fischer, R., Knapp, N., Bohn, F., Shugart, H. H., & Huth, A. (2019). The relevance of forest structure for biomass and productivity in temperate forests: New perspectives for remote sensing. *Surveys in Geophysics*, 40, 709-734. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09519-x>.
- Freitas, R., Cavalcanti, J. M., Cleger, S., Higuchi, N., Celes, C. H., & Lima, A. (2020). Estimating Amazon carbon stock using AI-based remote sensing. *Communications of the ACM*, 63(11), 46-48. <https://doi.org/10.1145/3416957>.
- Gatto, A., Barros, N. F. D., Novais, R. F. D., Silva, I. R. D., Leite, H. G., & Villani, E. M. D. A. (2011). Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. *Revista Árvore*, 35, 895-905. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>.
- Goldbergs, G., Levick, S. R., Lawes, M., & Edwards, A. (2018). Hierarchical integration of individual tree and area-based approaches for savanna biomass uncertainty estimation from airborne LiDAR. *Remote sensing of environment*, 205, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.010>.
- Goldstein, A., Turner, W. R., Spawn, S. A., Anderson-Teixeira, K. J., Cook-Patton, S., Fargione, J., ... & Hole, D. G. (2020). Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. *Nature Climate Change*, 10(4), 287-295. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0738-8>.
- Gomes, L. F., Brites, R. S., Locks, C. J., & dos Anjos, R. R. (2020). Estimativas das alterações na biomassa florestal utilizando LiDAR em área de manejo florestal sustentável na Amazônia Sul-Occidental. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(3), 260-268. https://doi.org/10.11137/2020_3_260_268.

- Gorgens, E. B., Motta, A. Z., Assis, M., Nunes, M.H., Jackson, T., Coomes, D., ... & Ometto, J. P. (2019). The giant trees of the Amazon basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(7), 373-374. <https://doi.org/10.1002/fee.2085>.
- Guerreiro, S. F., Conceição, A. A. S., Barbosa, F. T., Kaspary, R. M., Martins, M. S., & Marchiori, L. M. (2021). Estimativa de biomassa e carbono em floresta plantada adotando o modelo de Schumacher & Hall: estudo de caso. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 14(Supl. 2), 1-9. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.2.e8818>.
- Heinrich, V. H., Dalagnol, R., Cassol, H. L., Rosan, T. M., Almeida, C. T., Silva Junior, C. H., ... & Aragão, L. E. (2021). Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nature communication*, 12(1), 1785. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>.
- Herold, M., Carter, S., Avitabile, V., Espejo, A. B., Jonckheere, I., Lucas, R., ... & De Sy, V. (2019). The role and need for space-based forest biomass-related measurements in environmental management and policy. *Surveys in Geophysics*, 40, 757- 778. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09510-6>.
- Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade (IDEFLOR-Bio) (2018). *Resumo dos estudos para a criação legal de Parque Natural Municipal em Castanhal*. Prefeitura Municipal de Castanhal. Secretaria Municipal de Meio Ambiente.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Khosravipour, A., Skidmore, A. K., & Isenburg, M. (2016). Generating spike-free digital surface models using LiDAR raw point clouds: A new approach for forestry applications. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 52, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.005>.
- Kraus, K., & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 53(4), 193-203. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00009-4).
- Locks, C. J., & Matricardi, E. A. T. (2019). Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LIDAR. *Ciência Florestal*, 29, 481-495. <https://doi.org/10.5902/1980509826007>.
- Loh, H. Y., James, D., Ioki, K., Wong, W. V. C., Tsuyuki, S., & Phua, M. H. (2022). Estimating aboveground biomass changes in a human-modified tropical montane forest of Borneo using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100821>.
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., ... & Fang, J. (2018). Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences*, 15(3), 693-702. <https://doi.org/10.5194/bg-15-693-2018>.
- Maguya, A. S., Junttila, V., & Kauranne, T. (2013). Adaptive algorithm for large scale dtm interpolation from lidar data for forestry applications in steep forested terrain. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 85, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.08.005>.
- McGaughey, R. J. (2023). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization: Version 4.50*. USDA Forest Service Pacific Northwest Research Station, Seattle, WA. https://forsys.sefs.uw.edu/software/fusion/FUSION_manual.pdf.
- Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., & Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open-source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>.
- Musthafa, M., & Singh, G. (2022). Forest above-ground woody biomass estimation using multi-temporal space-borne LiDAR data in a managed forest at Haldwani, India. *Advances in Space Research*, 69(9), 3245-3257. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.002>.
- Nguyen, T. H., Jones, S. D., Soto-Berelov, M., Haywood, A., & Hislop, S. (2020). Monitoring aboveground forest biomass dynamics over three decades using Landsat time-series and single-date inventory data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101952>.
- Ni-Meister, W., Rojas, A., & Lee, S. (2022). Direct use of large footprint lidar waveforms to estimate aboveground biomass. *Remote Sensing of*

- Environment*, 280, 113147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113147>.
- Pimentel, E., De Paula, M. T., & Viana, J. H. (2024). Florística, fitossociologia, estimativa de biomassa e sequestro de carbono em uma floresta de terra firme no Parque Ecológico de Gunma, Santa Bárbara, Pará, Brasil. *Ciência Plena*, 20(2). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2024.022402>.
- Rex, F. E., Dalla Corte, A. P., Debastiani, A. B., Kazama, V. S., & Sanquetta, C. R. (2018a). Uso de dados LiDAR na estimativa de variáveis biofísica na Amazônia, sob diferentes resoluções espaciais. *Nativa*, 6, 841-847. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i0.6312>.
- Rex, F. E., Dalla Corte, A. P., Machado, S. A., & Sanquetta, C. R. (2018b). Identificação e extração de copas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR. *Advances in Forestry Science*, 5(2), 319-323. <https://doi.org/10.34062/afs.v5i2.5815>.
- Salomão, R., Vieira, I. C., Júnior, S., Amaral, D., & Santana, A. (2012). Sistema Capoeira Classe: uma proposta de sistema de classificação de estágios sucessionais de florestas secundárias para o estado do Pará. *Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, 7(3), 297-317. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v7i3.592>.
- Sanchez, A. K., Gomes, S. H. M., & Rodriguez, L. C. E. (2023). Efeitos dos parâmetros de voo em um sistema Drone-LIDAR sobre a nuvem de pontos em aplicações florestais. In *Anais ... São José dos Campos, SP: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo*. Recuperado de <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/efeitos-dos-parametros-de-voo-em-um-sistema-drone-lidar-sobre-a-nuvem-de-pontos?lang=pt-br>
- Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., Mognon, F., Maas, G. C. B., & Rodrigues, A. L. (2014). Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44, 01-08. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100006>.
- Santana, S. H. C. D., Sastres, L. F. S., Navarro, S. H., Silva, E. R. A. C., Laurentino, M. L. S., & Galvêncio, J. D. (2021). Método de análise de biomassa em um fragmento florestal de *Pinus uncinata*. *Mercator (Fortaleza)*, 20. <https://doi.org/10.4215/rm2021.e20001>.
- Schick, M., Griffin, R., Cherrington, E., & Sever, T. (2023). Utilizing LiDAR to quantify aboveground tree biomass within an urban university. *Urban Forestry & Urban Greening*, 89, 128098. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128098>.
- Silva, A. C. F. D., Freire, F. J., Borges, C. H. A., Araujo, E. C. G., Santana, G. M., Cunha, E. M. D., & Sanquetta, C. R. (2022). Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. *Ciência Florestal*, 32(1), 71-85. <https://doi.org/10.5902/1980509842456>.
- Silva, C. A., Klauberg, C., Hentz, A. M. K., Carvalho, S. P. C., & Corte, A. P. D. (2017). Predição da biomassa aérea em plantações de *Pinus taeda* L. por meio de dados LiDAR aerotransportado. *Scientia Forestalis*, 45(115), 527-259. : <https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n115.10>.
- Silva, V. V., Nicoletti, M. F., Dobner Jr, M., Vaz, D. R., & Oliveira, G. S. (2023). Fragmentos de floresta ombrófila mista em diferentes estágios sucessionais: caracterização dendrométrica e determinação da biomassa e carbono. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 22(4), 691-700. <https://doi.org/10.5965/223811712242023695>.
- Souza, I. A. (2024). Causas e consequências da mortalidade de árvores na floresta amazônica. In *Amazônia: tópicos atuais em ambiente, saúde e educação-volume 6* (Vol. 6, pp. 43-51). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/240917702>
- Teixeira, D. L. S., Oda, P. S. S., Marciano, A. G., Di Lorenzo, S., Riondet-Costa, D. R. T., Pons, N. A. D., & de Azevedo, S. C. (2022). Bioma Mata Atlântica: análise temporal da pressão antrópica em unidade de conservação de proteção integral e seu entorno. *ENTRE-LUGAR*, 13(26), 61-90. <https://doi.org/10.30612/rel.v13i26.16438>.
- Tian, Y., Zhang, Q., Huang, H., Huang, Y., Tao, J., Zhou, G., ... & Lin, J. (2022). Aboveground biomass of typical invasive mangroves and its distribution patterns using UAV-LiDAR data in a subtropical estuary: Maoling River estuary, Guangxi, China. *Ecological Indicators*, 136, 108694. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108694>.
- Torre-Tojal, L., Bastarrika, A., Boyano, A., Lopez-Guede, J. M., & Grana, M. (2022). Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. *Journal of Computational Science*, 58, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101517>.
- Vieira, I. C. O., Silva, S. A., Dantas, S. J., Duarte, J. C. dos S., & Santos, V. B. (2020). Balanço Hídrico Climatológico Mensal para o Município de Castanhal – PA em Eventos de ENOS e Efeitos na Produção do Açaizeiro. *COINTER PDVAgro*.

- <https://doi.org/10.31692/2526-7701.VCOINTERPDVAgro.0186>.
- Wang, S., Liu, C., Li, W., Jia, S., & Yue, H. (2023). Hybrid model for estimating forest canopy heights using fused multimodal spaceborne LiDAR data and optical imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103431. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103431>.
- Watzlawick, L. F., & Garcia, M. L. (2021). Estratificação vertical da biomassa arbórea na floresta ombrófila mista em dois sistemas de manejo. In: *Temas Da Diversidade: Experiências E Práticas De Pesquisa* (Vol. 1, pp. 290-306). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/201101962>.
- Watzlawick, L. F., Kirchner, F. F., & Sanquetta, C. R. (2009). Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. *Ciência florestal*, 19, 169-181. <https://doi.org/10.5902/19805098408>.
- Yin, T., Montesano, P. M., Cook, B. D., Chavanon, E., Neigh, C. S., Shean, D., ... & Gastellu- Etchegorry, J. P. (2023). Modeling forest canopy surface retrievals using very high-resolution spaceborne stereogrammetry:(I) methods and comparisons with actual data. *Remote Sensing of Environment*, 298, 113825. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113824>.
- Zhao, K., Suarez, J. C., Garcia, M., Hu, T., Wang, C., & Londo, A. (2018). Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. *Remote Sensing of Environment*, 204, 883-89. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.007>.