

**UFRRJ  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
E FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**LIDAR ORBITAL APLICADO AO MONITORAMENTO DO  
MANEJO FLORESTAL MADEIREIRO NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA**

**Daniel Joventino Schimidt Boy**

**2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
E FLORESTAIS**

**LIDAR ORBITAL APLICADO AO MONITORAMENTO DO  
MANEJO FLORESTAL MADEIREIRO NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA**

**DANIEL JOVENTINO SCHIMIDT BOY**

*Sob a Orientação do Professor*

**Dr. Bruno Araujo Furtado de Mendonça**

Dissertação a ser submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ  
SETEMBRO de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B7891 BOY, DANIEL JOVENTINO SCHIMIDT, 1996-  
LIDAR ORBITAL APLICADO AO MONITORAMENTO DO MANEJO  
FLORESTAL MADEIREIRO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA / DANIEL  
JOVENTINO SCHIMIDT BOY. - NOVA FRIBURGO, 2024.  
35 f.: il.

Orientador: BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA.  
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural  
do Rio de Janeiro, PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
CIENCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS (PPGCAF), 2024.

1. SENSORIAMENTO REMOTO. 2. GEDI. 3. MENEJO  
FLORESTAL DE IMPACTO REDUZIDO. 4. REGENERAÇÃO  
FLORESTAL. 5. IMPACTO DO MANEJO FLORESTAL. I.  
MENDONÇA, BRUNO ARAUJO FURTADO DE , 1981-, orient. II  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIENCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS (PPGCAF) III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**DANIEL JOVENTINO SCHIMIDT BOY**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 27/09/2024

---

Bruno Araujo Furtado de Mendonça. Dr. UFRRJ  
(Orientador)

---

Marco Antonio Monte. Dr. UFRRJ

---

Vinicius Costa Cysneiros. Dr. UFSC



**TERMO N° 1028/2024 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)**

**(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 22/11/2024 17:04 )*  
**BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONCA**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)  
Matrícula: ###456#4

*(Assinado digitalmente em 25/11/2024 09:46 )*  
**MARCO ANTONIO MONTE**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)  
Matrícula: ###725#5

*(Assinado digitalmente em 25/11/2024 13:08 )*  
**VINICIUS COSTA CYSNEIROS**  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.537-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **1028**, ano: **2024**,  
tipo: **TERMO**, data de emissão: **22/11/2024** e o código de verificação: **721580dfe3**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por esta conquista

À minha mãe e ao meu pai, que sempre lutaram pelo meu sucesso na vida particular e profissional.

Aos meus avós maternos por todos os ensinamentos e auxílios e principalmente pelo amor que faz a vida ser mais bonita.

Aos amigos e colegas, sem os quais esta conquista não seria possível.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais (PPGCAF) e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo enriquecimento profissional e pessoal e por proporcionarem esta conquista.

Aos professores do PPGCAF, sempre solícitos em ajudar e ensinar, especialmente ao meu Orientador professor doutor Bruno Araujofurtado de Mendonça.

À empresa CEMAL pelo fornecimento dos dados dos inventários florestais, especialmente pelo engenheiro florestal Rodrigo Montezano, que foram essenciais para execução deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

BOY, Daniel Joventino Schimidt Boy. **LiDAR orbital aplicado ao monitoramento manejo florestal madeireiro na Amazonia brasileira**. 2024. 26p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

O LiDAR, se tornou uma ferramenta inovadora nas ciências florestais, permitindo a coleta de dados detalhados sobre a estrutura da vegetação e a quantificação de estoques florestais. O sistema GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) é um exemplo notável dessa tecnologia, que fornece informações cruciais para o manejo florestal sustentável e a conservação da biodiversidade. Este estudo visa avaliar a sensibilidade do GEDI em relação às variações na estrutura da floresta associadas ao manejo florestal madeireiro na Amazônia brasileira. Este trabalho foi conduzido em duas UPAs manejadas nas unidades de conservação Floresta Nacional de Caxiuanã (Manejo em 2018) e Floresta Estadual do Paru (Manejo em 2014), na Amazonia. Os índices PAI (Plant Area Index) e COVER (Cobertura do dossel) do Level2b do GEDI foram utilizados para comparar grupos de amostras com e sem abates nas duas UPAs. O teste não paramétrico de Mann – Whitney foi utilizado para comparar a mediana dos grupos de amostras. Os resultados revelaram diferenças significativas entre as duas UPAs. Na Floresta Nacional de Caxiuanã, os índices de COVER e PAI foram significativamente maiores no grupo sem abate (COVER: 0,84; PAI: 3,71) em comparação ao grupo com abate (COVER: 0,78; PAI: 3,04), com p-valores indicando diferenças estatísticas significativas entre grupos (p-valor=1.467e-08 para COVER e p-valor=1.547e-08 para PAI). Em contraste, na Floresta Estadual do Paru, as diferenças entre os grupos foram menos pronunciadas, com valores semelhantes para ambos os grupos (COVER: 0,85 sem abates; 0,84 com abates; PAI: 3,83 sem abates; 3,80 com abates), sugerindo que a floresta manejada mais recentemente em Caxiuanã ainda está em estágio de regeneração, processo que se encontra mais avançado na Flota do Paru. A análise dos dados do GEDI demonstrou a capacidade dessa tecnologia em captar as nuances da estrutura da vegetação e a influência do manejo florestal na densidade do dossel. Os resultados indicam que o Lidar GEDI é eficaz em capturar as variações de cobertura e densidade do dossel florestal.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; GEDI; Manejo florestal de impacto reduzido; Regeneração florestal; Impacto do manejo florestal; Amazônia.

## ABSTRACT

BOY, Daniel Joventino Schmidt Boy. **Orbital LiDAR applied to monitoring timber forest management in the Brazilian Amazon**. 2024. 26p. Dissertation (Master's Science in Forest and Environmental Sciences). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

LiDAR has become an innovative tool in forest sciences, allowing the collection of detailed data on the accumulation structure and quantification of forest stocks. The GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) system is a notable example of this technology, which provides crucial information for sustainable forest management and biodiversity conservation. This study aims to evaluate the sensitivity of GEDI in relation to variations in forest structure associated with timber forest management in the Brazilian Amazon. This work was conducted in two UPAs managed in the Caxiuanã National Forest (Managed in 2018) and Paru State Forest (Managed in 2014) conservation units, in the Amazon. The PAI (Plant Area Index) and COVER (Canopy Cover) indices from GEDI's Level2b were used to compare groups of samples with and without felling in the two UPAs. The non-parametric Mann – Whitney test was used to compare the median of the sample groups. The results revealed significant differences between the two UPAs. In the Caxiuanã National Forest, the COVER and PAI indices were significantly higher in the group without slaughter (COVER: 0.84; PAI: 3.71) compared to the group with slaughter (COVER: 0.78; PAI: 3.04 ), with p-values indicating significant statistical differences between groups (p-value=1.468e-08 for COVER and p-value=1.548e-08 for PAI). In contrast, in the Paru State Forest, differences between groups were less pronounced, with similar values for both groups (COVER: 0.85 without slaughter; 0.84 with slaughter; PAI: 3.83 without slaughter; 3.80 with fellings), suggesting that the forest managed most recently in Caxiuanã is still in the regeneration stage, a process that is more advanced in Flota do Paru. Analysis of GEDI data demonstrated the ability of this technology to capture the nuances of vegetation structure and the influence of forest management on canopy density. The results indicate that GEDI Lidar is effective in capturing variations in forest canopy cover and density.

Keywords: Remote sensing; GEDI; Sustainable Forest management; Forest regeneration; Impact of forest management; Amazon.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Manejo florestal de impacto reduzido .....	2
2.2 Sensoriamento remoto .....	3
2.3 GEDI.....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1 Áreas de estudo .....	9
3.1.1 Floresta Estadual do Paru.....	9
3.1.2 Floresta Nacional de Caxiuanã.....	11
3.2 Coleta de Campo .....	12
3.3 Dados GEDI .....	13
3.4 Amostragem dos dados GEDI .....	14
3.5 Análise estatística.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
5. CONCLUSÕES .....	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	22

## 1. INTRODUÇÃO

O manejo florestal de impacto reduzido (MFIR) é uma prática de exploração madeireira que visa reduzir os danos ambientais e promover a sustentabilidade dos ecossistemas florestais (BARRETO et al., 2021). A Instrução Normativa nº 05, de 2006, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) estabelece diretrizes para minimizar o impacto da colheita florestal na Amazônia, como técnicas para a redução de danos durante o corte e a extração de árvores, a limitação de trilhas e a seleção rigorosa de espécies (IBAMA, 2006). Segundo Martin et al (2022), o MFIR tem sido fundamental para manter a diversidade e a regeneração natural das florestas tropicais, contribuindo para a estabilidade do carbono no solo e para a recuperação mais rápida dos estoques florestais.

Uma das ferramentas importantes no MFIR é o sensoriamento remoto (INPE, 2024). Segundo Menezes e Almeida (2012), o sensoriamento remoto pode ser designado como a ciência que visa o desenvolvimento de tecnologias que permitam a obtenção de informações sobre a superfície terrestre, utilizando sensores capazes de quantificar as interações entre a radiação eletromagnética incidente e objetos na superfície, fornecendo informações precisas e contínuas sobre a cobertura florestal e as alterações na vegetação ao longo do tempo. Utilizando desta ferramenta é possível mapear e monitorar grandes áreas florestais com precisão, o que torna a execução das etapas do MFIR mais eficiente (ARAÚJO et al., 2023).

Desde 2019, uma nova tecnologia de LiDAR (*Light Detection and Ranging*) orbital tem tomado destaque, trazendo novas perspectivas para análises ambientais, conhecida como GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*). O sistema GEDI consiste em um instrumento de LiDAR acoplado na Estação Espacial Internacional (ISS) da NASA, em forma de onda completa (*full waveform*) que, traz medições detalhadas da estrutura tridimensional da superfície da Terra (TANG e ARMSTON, 2019). A distribuição da energia do laser acima do solo pode ser usada para determinar a altura e a densidade dos objetos em superfície e medições não saturadas de florestas muito mais densas do que é possível com sistemas ópticos passivos ou sistemas de radar de comprimento de onda curto (DUBAYAH et al., 2020; DUNCANSON et al., 2021).

Diante de suas informações de alta relevância, a utilização dos dados fornecidos pela missão GEDI tem se tornado cada vez mais importante em estudos que associam o

sensoriamento remoto a práticas de manejo florestal de impacto reduzido, como na avaliação da regeneração florestal e no controle dos impactos ambientais (DUNCANSON et al., 2021). Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a sensibilidade do LiDAR orbital GEDI sob variações na estrutura do dossel florestal, após o manejo florestal de impacto reduzido na Amazônia Brasileira.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Manejo florestal de impacto reduzido**

O Manejo Florestal de Impacto Reduzido (MFIR) é uma estratégia sustentável para a exploração de florestas nativas, especialmente em regiões como a Amazônia, onde a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos são críticos (BARRETO et al., 2021). Regulamentado pela Instrução Normativa nº 05 de 2006 do Ministério do Meio Ambiente, o MFIR tem como objetivo minimizar os impactos ambientais enquanto otimiza a utilização dos recursos madeireiros (IBAMA, 2006).

Essa prática busca preservar a biodiversidade, proteger o solo e os recursos hídricos, e reduzir as emissões de carbono, promovendo a regeneração florestal para futuras colheitas (BARRETO et al., 2021). O processo é baseado em etapas planejadas que começam com o inventário florestal pré-exploratório, no qual são identificadas e mapeadas as árvores de interesse comercial, incluindo informações sobre espécies, localização e volume de madeira. Em seguida, o planejamento operacional delimita estradas, trilhas e pátios de armazenamento, utilizando ferramentas de geoprocessamento para minimizar a compactação do solo e os danos à vegetação circundante (SILVA et al., 2022).

Durante a colheita, são aplicadas técnicas de corte direcionado, que controlam a queda das árvores para reduzir danos a espécies vizinhas e maximizar o aproveitamento da madeira (BARRETO et al., 2021). Essa etapa é acompanhada por práticas que evitam o desperdício e facilitam a retirada do material. Por fim, o monitoramento pós-corte avalia os impactos ambientais gerados e implementa ações de recuperação, como o manejo de regeneração e a proteção da biodiversidade. Essas medidas são essenciais para garantir que a floresta se recupere adequadamente para ciclos futuros de exploração sustentável (MENESES e ALMEIDA, 2012).

O MFIR oferece diversos benefícios. Ambientalmente, reduz os danos à regeneração natural e preserva os serviços ecossistêmicos. Socialmente, gera empregos

locais e promove capacitação técnica. Economicamente, aumenta a eficiência da exploração, agrega valor à madeira e facilita o acesso a mercados que exigem certificações florestais (FONSECA et al., 2022). Na Amazônia, a implementação do MFIR é essencial para equilibrar a conservação ambiental com o desenvolvimento socioeconômico, garantindo que os recursos florestais sejam utilizados de forma responsável e sustentável (NOVO e PONZONI, 2001).

Dessa forma, o MFIR emerge como uma solução estratégica para a exploração de florestas tropicais, integrando práticas sustentáveis e avanços tecnológicos ao manejo florestal tradicional. A adoção de suas diretrizes, como estabelecido pela IN nº 05/2006, reforça a viabilidade ambiental e econômica da exploração na Amazônia (MARTINS et al., 2020).

## **2.2 Sensoriamento remoto**

O sensoriamento remoto pode ser considerado como a tecnologia que possibilita a obtenção de dados da superfície terrestre de forma remota, utilizando-se para isso de sensores, que captam as variações de radiação eletromagnética (REM) refletidas ou emitidas pela superfície (FLORENZANO, 2007; MENEZES e ALMEIDA, 2012). A REM é considerada por Alvarenga et al (2003), como sendo o elo entre os sensores remotos e o objeto observado. Segundo os mesmos autores, esta energia pode ser de origem natural, como é o caso da radiação solar refletida pelas superfícies, ou de processos físico-químicos em superfície, podendo ser também de origem artificial, quando emitida pelos próprios sensores, sendo neste último caso, em geral, sensores utilizados para mensuração de características físicas da superfície. Demattê e Nanni (2003), apontam que esta diferença na resposta das superfícies possibilita a diferenciação do objeto e de possíveis variações em sua composição, como por exemplo as variações físicas e/ou fisiológicas da vegetação.

Segundo Meneses e Almeida (2012), o sensoriamento remoto tem início na década de 1860, quando surgem as primeiras fotografias aéreas realizadas a partir de balões e até mesmo de aves, sendo estas de cunho militar. A partir das décadas de 1910, estas passaram a ser realizadas por meio de aeronaves, até então sempre se utilizando de sensores do tipo câmera (FIGUEIREDO, 2014). Visto o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta de planejamento, nos anos seguintes, houve grande investimento em sensores, sendo já na segunda guerra mundial (1939 - 1945), utilizadas as primeiras tecnologias de radar (FLORENZANO, 2007).

A partir do final da década de 1950, durante a guerra fria, começam a entrar em órbita as primeiras plataformas para fins de espionagem, que, devido ao grande sucesso, levaram ao desenvolvimento dos primeiros satélites para fins diversos, como a série de satélites meteorológicos Tiros (*Television Infrared Observation Satellite*), lançada em 1960, que deu origem a uma sequência de outras plataformas nos anos seguintes com diferentes finalidades, como o primeiro satélite de recursos terrestres (ERTS-1) e o primeiro satélite da série Landsat (Landsat-1), em 1972 (GUEDES e DA SILVA, 2018). Através do avanço tecnológico das últimas décadas, hoje temos um grande número de sensores disponíveis e uma consequente grande disponibilidade de dados direcionados a diferentes áreas do conhecimento. Esta grande gama de aplicações propiciada pela tecnologia empregada nos sensores possibilita elevada aplicabilidade para o monitoramento de coberturas vegetais (ABREU e COUTINHO, 2014).

Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética proveniente de um objeto, transformá-la em um sinal elétrico e registrá-la, para posteriormente convertê-la em informações que descrevem a resposta do objeto ou superfície analisada (FLORENZANO, 2007).

Existem diversas características inerentes aos sensores que permitem sua classificação. Estes podem ser instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões, helicópteros e aviões) e orbitais (satélites artificiais). Podem ser baseados em sistema imageador, quando fornecem como produto uma imagem da área observada, ou não imageador, quando apresentam o resultado em forma de dígitos ou gráficos (ABREU e COUTINHO, 2014). Podem ainda ser classificados em sensores passivos, quando dependem de fonte de radiação externa para sua operação, como a radiação solar, ou ativos, quando emitem a sua própria radiação (IBGE, 2001).

Tratando de sensores ativos, uma de suas vantagens é sua independência em relação às condições ambientais. Ao emitir seu próprio sinal, este tipo de sensor pode operar em diferentes condições de iluminação e clima, o que o torna extremamente versátil. Isso é particularmente útil para aplicações em ambientes que podem não ter iluminação natural adequada ou em condições atmosféricas adversas (JANSEN, 2011). Além disso, costumam oferecer uma alta resolução espacial, o que permite a criação de mapas e modelos tridimensionais com grande precisão. Isso é valioso em diversas áreas, como mapeamento topográfico, arqueologia e estudos ambientais, onde detalhes minuciosos são essenciais. Outra vantagem significativa é sua capacidade de medir distâncias com precisão, fornecendo dados exatos sobre a distância e a forma dos objetos.

Isso permite a realização de análises detalhadas e a geração de informações geoespaciais de alta qualidade (MIKHAIL, 2008).

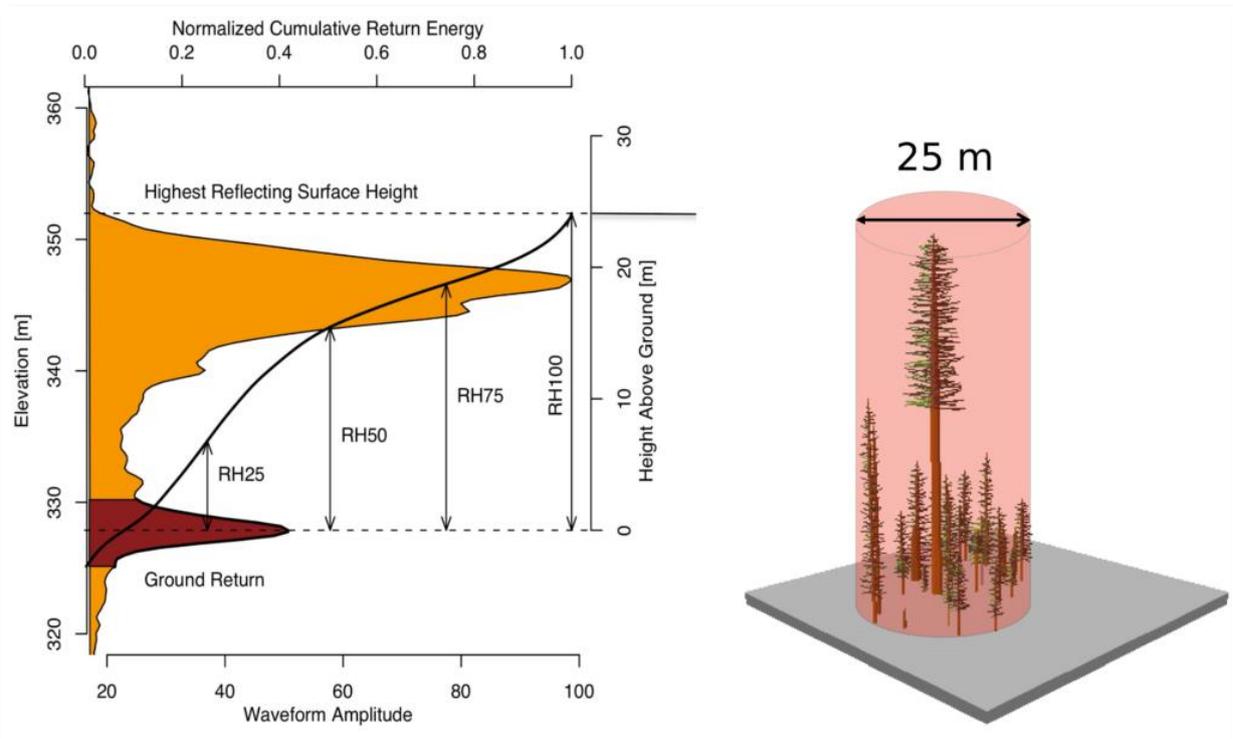
### **2.3 GEDI**

Lançada em dezembro de 2018, a plataforma GEDI foi instalada no Módulo Experimental Japonês - Instalação Exposta (JEM-EF) da Estação Espacial Internacional (ISS), com a coleta efetiva de dados científicos iniciada em 25 de março de 2019 (DUBAYAH et al., 2020). O sistema GEDI é um instrumento LiDAR orbital de onda completa, sendo o primeiro a fornecer medições detalhadas da estrutura tridimensional da superfície terrestre (ORTIZ-REYES et al., 2024). A tecnologia LiDAR permite distribuir a energia acima do solo, possibilitando determinar a altura e a densidade dos objetos na superfície.

Uma característica marcante do GEDI é sua capacidade de penetrar através de pequenas lacunas na copa das árvores. Combinada com sua geometria de visão ativa, essa capacidade permite identificar o solo em florestas densas, algo que não seria viável com sistemas ópticos passivos ou radares de comprimento de onda curto (YAN et al., 2024). Esse avanço faz do GEDI uma ferramenta crucial para estudos detalhados da estrutura florestal.

Segundo Tang e Armston (2019), o GEDI utiliza três lasers que emitem pulsos de luz para medir a estrutura tridimensional da vegetação e do solo. Esses lasers produzem pontos de cobertura (pegadas) com diâmetro médio de 25 metros e se deslocam em intervalos de 600 metros no solo. O instrumento gera oito trilhas de dados: quatro faixas de alimentação e quatro de cobertura. As pegadas são espaçadas a 60 metros ao longo da trilha e 600 metros entre as trilhas. A figura 1 ilustra o funcionamento dos pulsos de Lidar do GEDI, onde o pulso refletido pelo solo, pela vegetação e por nuvens é coletada pelo

telescópio do GEDI, permitindo obter informações como a altura do dossel florestal e seu nível de cobertura, fundamentais para o estudo da estrutura das florestas.



**Figura 1.** Esquema de funcionamento do sensor LiDAR do GEDI. Pegada de 25 metros e Níveis de retorno da *waveform*.

Os dados coletados pelo GEDI são organizados em diferentes níveis, cada um oferecendo uma profundidade distinta de processamento e interpretação. O nível mais básico, conhecido como GEDI Level 1b (L1b), consiste nos dados brutos capturados pelo Lidar. Esses dados incluem os sinais de retorno do laser que o instrumento detecta e registra (NASA, 2020). No nível L1b, os dados ainda não foram totalmente processados ou calibrados. O trabalho inicial nesse estágio envolve a correção dos sinais para remover interferências e ajustar as medidas de acordo com a geometria do satélite e do sistema Lidar. Este estágio é crucial para garantir que os dados brutos possam ser interpretados corretamente nas etapas subsequentes (BRUNT et al., 2020).

Após a coleta e correção dos dados brutos no L1b, os dados são processados no GEDI Level 2a (L2a). Nesse nível, os sinais de retorno são convertidos em informações detalhadas sobre a vegetação. Isso inclui dados sobre a altura das árvores e a densidade do dossel, oferecendo uma visão detalhada da estrutura vertical das florestas. Com essas informações, é possível analisar como a vegetação está distribuída e como varia em diferentes áreas (NASA, 2020; BACCINI et al., 2021).

O GEDI Level 2b representa um estágio ainda mais avançado, fornecendo produtos de dados que incluem estimativas sobre a biomassa da vegetação e a complexidade do dossel. Esse nível é fundamental para modelar a quantidade de carbono armazenado nas florestas e para entender o papel das florestas na dinâmica global do carbono (QUESADA et al., 2021). Os dados L2b são derivados das informações do nível L2a, mas incluem análises adicionais que permitem uma compreensão mais profunda da estrutura das florestas e da biomassa vegetal (DUBAYAH et al., 2020).

Em resumo, os diferentes níveis de dados do GEDI proporcionam uma progressão desde a coleta de dados brutos até a geração de informações detalhadas sobre a estrutura e estoques das florestas. Cada nível é projetado para oferecer uma visão mais detalhada e interpretativa dos ecossistemas monitorados. Esses dados são essenciais para pesquisas ambientais, modelagem climática e gestão de recursos naturais, possibilitando uma compreensão abrangente e precisa das florestas em todo o mundo (HANSON et al., 2024).

Os índices PAI (*Plant Area Index*) e COVER (Cobertura do dossel), são métricas derivadas dos dados Level2B e são amplamente utilizados para descrever a densidade e a distribuição da vegetação, desempenhando um papel vital em estudos de ecossistemas, manejo florestal e modelagem climática (SILVA et al., 2022). O índice COVER mede a fração da área projetada do solo que é coberta por vegetação. Essa medição é realizada utilizando dados do LiDAR, que emite pulsos de laser para medir a altura e a densidade da vegetação, desde o solo até o topo do dossel das árvores (ORTIZ-REYES et al., 2024). Os dados de COVER indicam a porcentagem de solo coberta pela copa das árvores, fornecendo uma visão precisa sobre a densidade da cobertura florestal em uma determinada área. É uma métrica crucial para entender a estrutura das florestas, os processos ecológicos e a capacidade das florestas de atuar como sumidouros de carbono (DUBAYAH et al., 2020).

A fórmula geral para o COVER pode ser expressa como:

$$COVER = \frac{RV}{RV + RS}$$

Onde: RV = Retorno da vegetação

RS= Retorno do solo

O índice COVER é geralmente expresso em percentagem (%), representando a fração da área do solo coberta pela vegetação. Um valor de 100% indicaria que toda a área analisada está coberta pela copa das árvores, enquanto um valor de 0% indicaria uma área totalmente aberta, sem vegetação (LEFSKY et al., 2002).

Por outro lado, o PAI, no contexto de sensoriamento remoto e ecologia, é uma medida que quantifica a área total de plantas por unidade de área de solo, incluindo folhas, caules e galhos, independentemente de sua orientação (ASNER et al., 2003). Segundo Medeiros e Silva (2021), O PAI é particularmente útil para avaliar a densidade e a estrutura da vegetação em ecossistemas florestais, sendo uma métrica que complementa outros índices de cobertura vegetal, como o Índice de Área Foliar (LAI – *Leaf Area Index*). No entanto, o PAI abrange mais do que apenas as folhas, oferecendo uma visão mais completa da vegetação total, enquanto o LAI se concentra exclusivamente na área foliar (MCCARTHY et al., 2021).

A fórmula geral para o PAI pode ser expressa como:

$$PAI = \frac{Asp (m^2)}{Asc (m^2)}$$

Onde: Asp= Área total da superfície das plantas (m<sup>2</sup>)

Asc= Área de solo coberta (m<sup>2</sup>)

O PAI é um índice adimensional, geralmente expresso como uma razão entre a área de vegetação e a área do solo (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>). Embora não possua uma unidade específica além de uma relação de área sobre área, ele representa na prática a área total de material vegetal (folhas, galhos e caules) por unidade de solo (HUETE et al., 2002). O PAI tem ampla aplicação nas ciências ambientais, biologia vegetal e ecologia, sendo uma métrica fundamental para o estudo de vegetação e monitoramento florestal (JIMENEZ et al., 2022).

Embora o COVER e o PAI sejam índices complementares, eles desempenham papéis distintos na análise dos ecossistemas florestais (OLIVEIRA e SILVA, 2023). O COVER é mais apropriado para avaliar a presença de vegetação na superfície e mudanças visíveis no dossel, servindo como um indicador da cobertura vegetal (DRAKE et al., 2019). Já o PAI oferece uma visão mais detalhada da densidade e estrutura total da vegetação, sendo essencial para estudos de biomassa, sequestro de carbono e

produtividade florestal (ZHENG et al., 2023). Dessa forma, o PAI é especialmente relevante para analisar a complexidade tridimensional das florestas, enquanto o COVER destaca as variações na extensão da cobertura (LEFSKY et al., 2020).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Áreas de estudo**

Foram selecionadas duas Unidades de Produção Anual (UPAs) com manejo realizado na última década em unidades de conservação de uso sustentável na Amazônia brasileira. A primeira UPA (UPA 1), manejada em 2014 está localizada na Floresta Estadual do Paru. A segunda UPA (UPA 2), manejada em 2018, foi escolhida na Floresta Nacional de Caxiuanã.

Essas UPAs foram escolhidas devido à diferença temporal entre as operações de manejo, o que permite uma análise comparativa mais rica entre os dois locais. A seleção dessas áreas possibilita o estudo dos impactos e da eficácia das práticas de manejo em diferentes condições e períodos.

##### **3.1.1 Floresta Estadual do Paru**

A Floresta Estadual do Paru (Flota Paru) é uma Unidade de Conservação (UC) do tipo Uso Sustentável, criada no ano de 2006 por meio do Decreto nº 2.608/2006, localizada no norte do estado do Pará (PA). A UC é componente de um bloco de UCs, sendo seus limites: Ao norte, a Reserva Biológica (Rebio) Maicuru; Ao sul, a Floresta Nacional (Flona) da Mulata; A sudeste, a Estação Ecológica (Esec) do Jari; A leste, a Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Rio Uiratapuru; A oeste, a Flota do Trombetas e a noroeste, com a Terra Indígena (TI) Zo'é e a Esec Grão-Pará. A UC abrange os municípios de Almeirim, Monte alegre, Alenquer, Óbidos e Prainha (SEMA, 2010).

A Flota Paru possui uma área de 3,6 milhões de hectares, sendo a terceira maior unidade de conservação do mundo (SEMA, 2010). A área em estudo é limitada a unidade de produção anual (UPA1) e possui 4,4 mil ha, que foi manejada em 2014. A UPA1 está localizada na parte sul da UC, junto ao rio Muriuçu, no município de Almeirim. Suas coordenadas geográficas são: na latitude de 0°58'50.91" sul e longitude 53°20'23.83" oeste (Figura 2).



**Figura 2.** Unidade de produção anual 1, localizada na Floresta Estadual do Paru, no estado do Pará, Brasil.

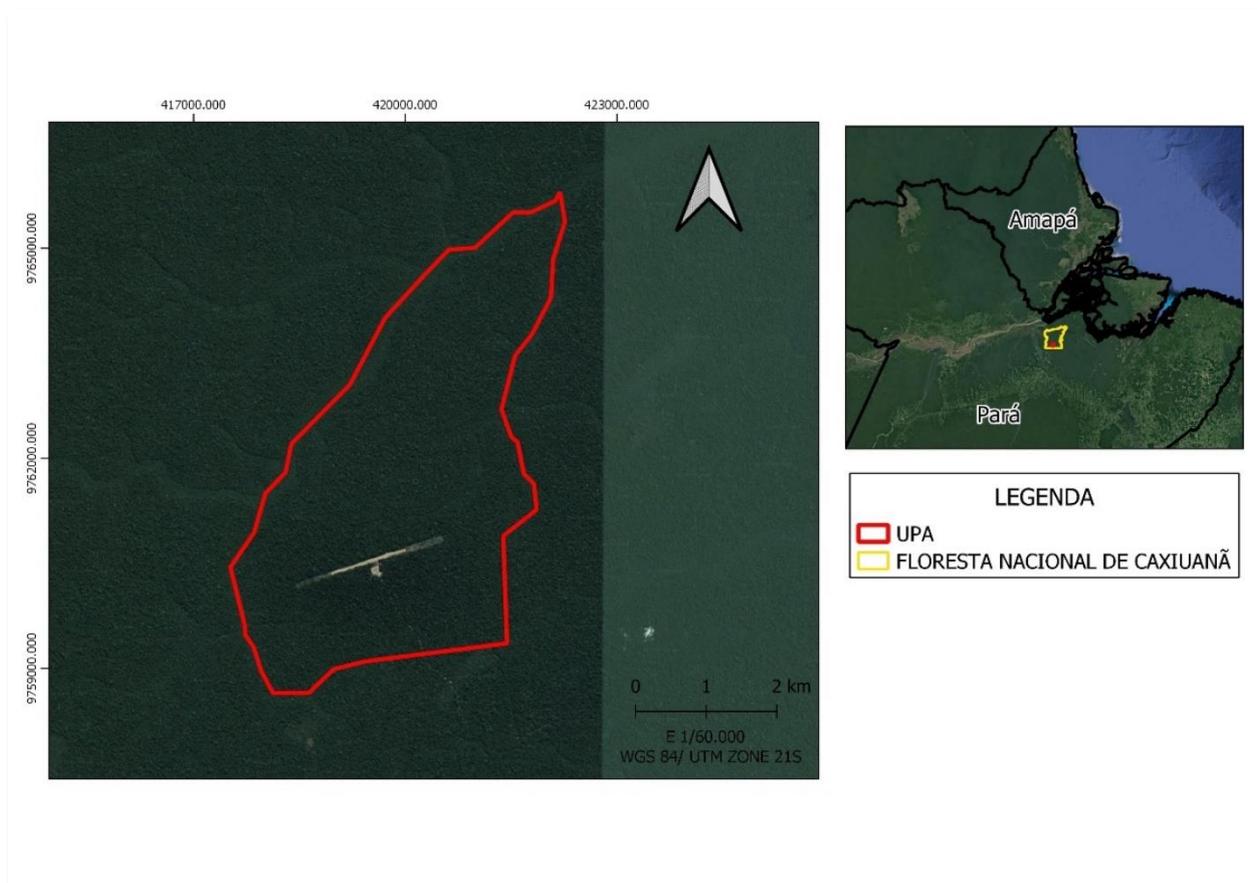
O clima da região é classificado como tropical de monção (Am) (Alvares et al. (2013); a precipitação média anual varia de 2.500 a 2.800 mm, sendo o período mais chuvoso de janeiro a junho, quando a precipitação média mensal varia de 250 a 450 mm, e o período mais seco ocorre entre julho e novembro, quando a precipitação variade 50 a 150 mm. A temperatura média anual é sempre superior a 26° C.

O solo predominante na UPA1 é o Argissolo Vermelho Amarelo. A altitude na região varia de 100 e 300 metros, com relevo dissecado de topo de morro convexo. A formação florestal é classificada como Floresta Ombrófila Aberta Submontana (SEMA, 2010). Segundo Veloso et al. (1991), esta é uma vegetação de transição, caracterizada por um clima mais seco em relação a Floresta Ombrófila Densa, o que traz características marcantes a este tipo de ambiente, como a incidência acentuada de palmeiras, bambus, cipós e, em alguns casos, bananeiras bravas (*Phenakospermun guyanense* Enf).

### 3.1.2 Floresta Nacional de Caxiuanã

A Flota Paru possui uma área de 3,6 milhões de hectares, sendo a terceira maior unidade de conservação do mundo (SEMA, 2010). A área em estudo é limitada a unidade de produção anual (UPA1) e possui 4,4 mil ha, que foi manejada em 2014. A UPA1 está localizada na parte sul da UC, junto ao rio Muriuçu, no município de Almeirim. Suas coordenadas geográficas são: na latitude de  $0^{\circ}58'50.91''$  sul e longitude  $53^{\circ}20'23.83''$  oeste (Figura 2).

A Floresta Nacional de Caxiuanã (Flona Caxiuanã) é uma Unidade de Conservação (UC) do tipo uso sustentável, criada em 1978 pelo Decreto nº 80.282, localizada no estado do Pará (PA). A UC faz parte de um complexo de áreas protegidas e está delimitada ao norte pela Reserva Biológica (Rebio) Caxiuanã, a leste pelo município de Portel, ao sul pelo Rio Pará e a oeste pela Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Rio Uruará. A Flona Caxiuanã abrange os municípios de Portel e Melgaço.



**Figura 3.** Unidade de produção anual 2, localizada na Floresta Nacional de Caxiuanã, no estado do Pará, Brasil.

A Flona Caxiuanã possui uma área total de aproximadamente 1,8 milhões de hectares, sendo uma das maiores Unidades de Conservação do Brasil (ICMBio, 2020). A área de interesse para o estudo é a Unidade de Produção Anual (UPA2), com 1,8 Mil ha, localizada na região sul da UC, ao longo do Rio Caxiuanã. A UPA2 está situada na latitude 2°44'50.91" sul e longitude 51°39'23.83" oeste (Figura 3).

Conforme descrito por Alvares et al. (2013), a região da Flona Caxiuanã possui um clima tropical úmido (Af). A precipitação média anual é alta, variando entre 3000 e 3500 mm, com um padrão de precipitação bem distribuído ao longo do ano. O período mais chuvoso vai de janeiro a maio, quando as precipitações podem ultrapassar 400 mm mensais, e o período seco vai de junho a dezembro, com precipitação média mensal variando entre 100 e 250 mm. A temperatura média anual é superior a 25°C.

A área da UPA2 apresenta predominância de Latossolo Amarelo e altitudes que variam entre 50 e 150 metros, com um relevo predominantemente plano a suavemente ondulado. Ela está inserida na zona de Floresta Ombrófila Densa (ICMBio, 2020). Este tipo de formação florestal é caracterizado por um dossel denso e contínuo, onde a vegetação é composta por árvores altas, com rica biodiversidade.

### **3.2 Coleta de Campo**

Os dados foram provenientes de um censo florestal realizado nas duas Unidade de Trabalhos (UT`s), em cada uma das florestas em estudo, foram mensurados os indivíduos com diâmetro à 1.30m do solo (DAP) acima de 40,0 cm, e para cada indivíduo foram obtidas suas coordenadas geográficas. Foram incluídas as árvores a serem exploradas, remanescentes e matrizes.

#### **Floresta Estadual do Paru:**

No ano de 2014 o Governo do Estado do Pará concedeu a AUTEX (Autorização de Exploração Florestal) para a empresa Cemal na exploração da UPA 1, que contém 42 Unidades de Trabalho (UT) na FLOTA do Paru. O censo foi realizado entre os anos de 2013 e 2014, sendo medidos 99.099 indivíduos. As coordenadas coletadas no georreferenciamento das árvores foram obtidas pelo sistema de projeção UTM, no Datum SIRGAS 2000 zona 22 S.

Floresta Nacional de Caxiuanã:

No ano de 2018 o Governo Federal concedeu a AUTEX para a empresa Cemal na exploração da UPA 2, que contém 12 Unidades de Trabalho (UT) na FLONA Caxiuanã. O censo foi realizado no ano de 2017, sendo medidos 45.404 indivíduos. As coordenadas coletadas no georreferenciamento das árvores foram obtidas pelo sistema de projeção UTM, no Datum SIRGAS 2000 zona 21 S.

Os dados para as duas unidades foram disponibilizados em formato *Shapefile*, e após seu processamento foram obtidas informações individuais de categoria, conforme indica a tabela 1.

**Tabela 1.** número de árvores por hectare em diferentes categorias nas Unidades de Produção Anual (UPAs) da Floresta Estadual do Paru e da Floresta Nacional de Caxiuanã. As categorias incluem árvores removidas (Abates), localizadas em Área de Preservação Permanente (Em APP), utilizadas como matriz para regeneração (Matriz), tocos resultantes do corte (Toco) e árvores remanescentes após a colheita (Remanescente).

<b>Categoria</b>	<b>Árvores por hectare (UPA 1)</b>	<b>Árvores por hectare (UPA 2)</b>
<b>Abates</b>	1,337	0,136
<b>Em APP</b>	0,116	0,005
<b>Matriz</b>	0,991	0,039
<b>Toco</b>	0	0,003
<b>Remanescente</b>	3,177	0,901

### 3.3 Dados GEDI

A obtenção dos dados foi realizada por meio do pacote RGEDl no software R (R Core Team, 2024). Posteriormente no *software* QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2023), foi realizado o tratamento espacial dos dados. Foram excluídas as pegadas nas áreas indicadas pelos dados de campo como pátio, estradas e corpos d'água. Esse procedimento garantiu que apenas áreas representativas da cobertura vegetal manejada ou não manejada fossem consideradas no estudo.

Na UPA 1 foram obtidas cinco órbitas dos Level 1b e Level 2b, uma de 2019 correspondente ao 191º dia do ano e quatro correspondentes aos seguintes dias corridos

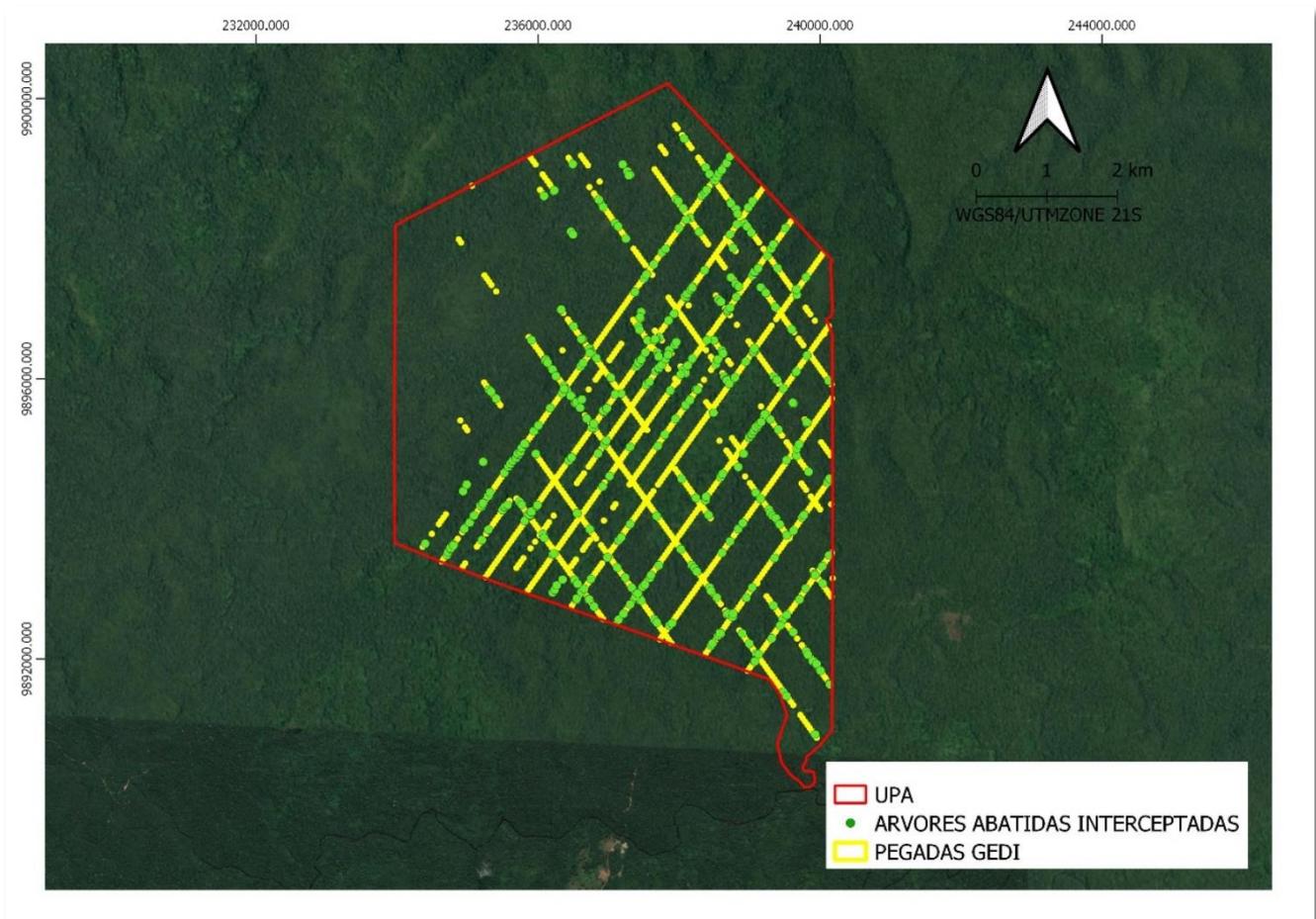
do ano de 2020: 16°, 74°, 103°, 112°. Estas órbitas, após exclusão de áreas indesejadas, totalizaram 1.034 pegadas GEDI. Foram obtidas para a área da UPA 2 também cinco órbitas dos Level 1b Level 2b para o ano de 2020, correspondentes aos respectivos dias corridos do ano: 18°, 22°, 203°, 213° e 234°, que totalizaram após exclusão das áreas indesejadas 1.346 pegadas. As pegadas do Level 1b possibilitaram a obtenção das *waveforms* (formas de onda que descrevem o perfil vertical da floresta) e as pegadas do Level 2b foram extraídos os valores dos índices COVER e o PAI.

As órbitas do GEDI foram selecionadas visando obter dados de períodos próximos, permitindo uma análise temporal mais consistente das condições das UPAs. Contudo, essa seleção foi limitada pela disponibilidade de órbitas que efetivamente cruzam as áreas de estudo, já que nem todas as órbitas do satélite abrangem as regiões das UPAs. Além disso, a qualidade dos dados de algumas órbitas foi comprometida devido às condições climáticas adversas, como a presença de nuvens e chuvas, que podem interferir na precisão das medições do sensor.

### **3.4 Amostragem dos dados GEDI**

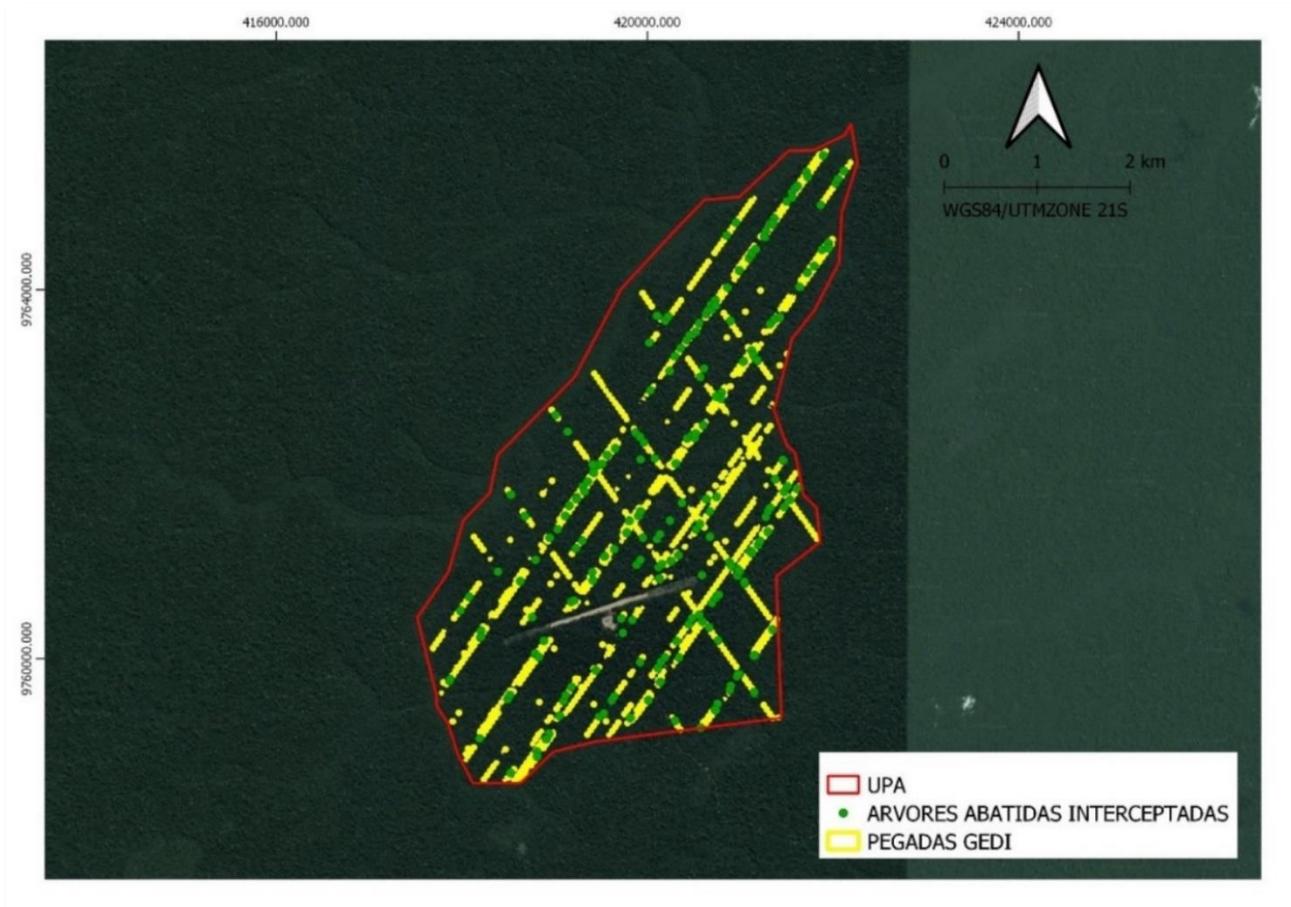
As pegadas LiDAR do GEDI, com resolução de 25 metros de diâmetro, foram tomadas como unidades amostrais. Em cada unidade amostral (pegada), foram contabilizados os indivíduos não removidos e removidos, com base em suas coordenadas geográficas. Dessa forma, esses indivíduos foram classificados em dois grupos: "0 - Sem abates" e "1 - Com abates". Para isso foi utilizada a ferramenta "Unir atributos pela localização" no *software* QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2023).

Na Floresta Estadual do Paru, das 1.034 pegadas, 189 intersectaram árvores removidas, representando a classe de abates, enquanto 845 dos pontos não intersectaram árvores removidas, compondo a classe sem abates. A Figura 4 representa a distribuição destas duas classes em campo na UPA1.



**Figura 4.** Pegadas GEDI processadas e árvores abatidas intersectadas na UPA1, na Floresta Estadual do Paru, estado do Pará, PA.

Na Floresta Nacional de Caxiuanã, das 1.346 pegadas do LiDAR GEDI, 347 intersectaram indivíduos removidos, sendo, portanto, incluídas na classe com abates, enquanto 999 pegadas não intersectaram indivíduos desta classe, assim incluídas na classe sem abates. A Figura 5 representa a distribuição destas duas classes em campo na UPA2.



**Figura 5.** Pegadas GEDI processadas e árvores abatidas intersectadas na UPA2, na Floresta Nacional de Caxiuanã, no estado do Pará, PA.

### 3.5 Análise estatística

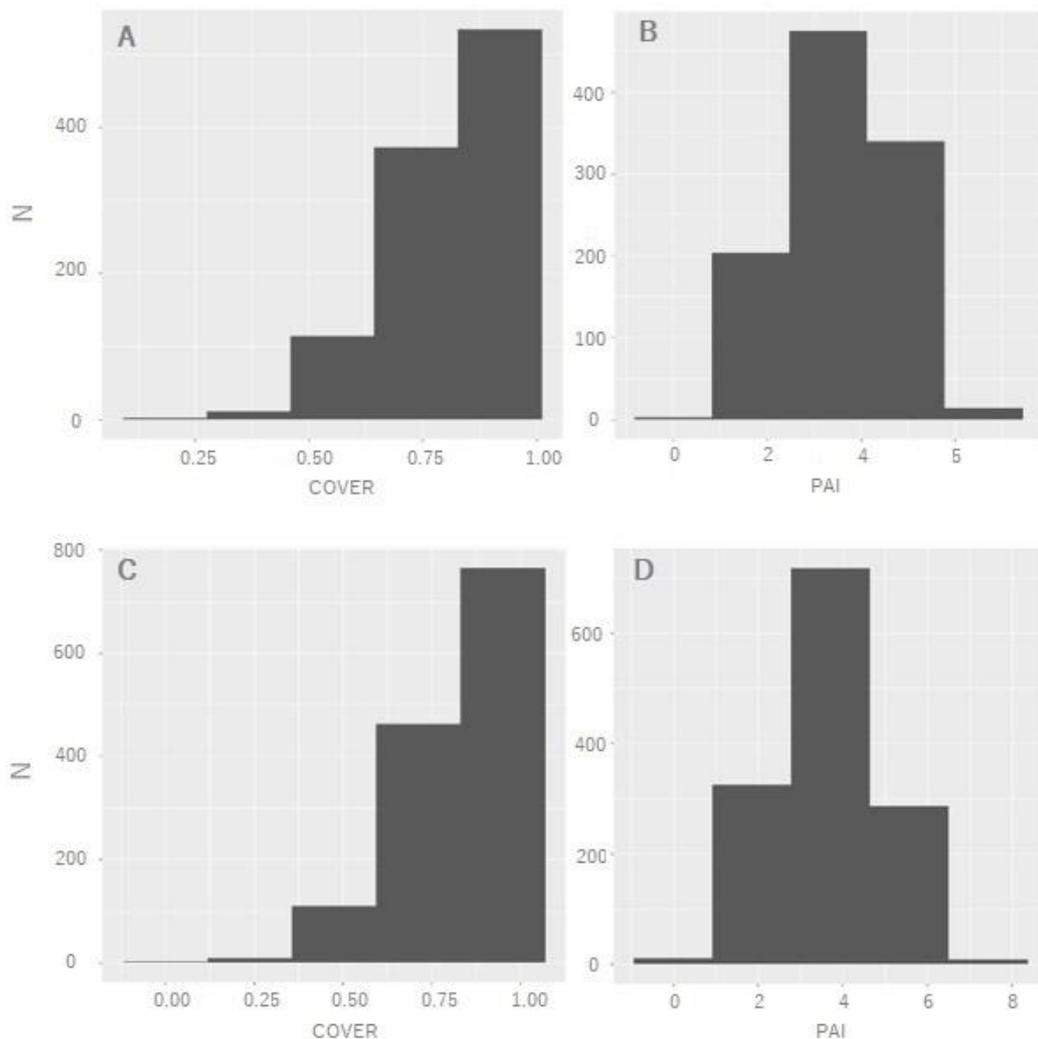
Considerando as duas Unidades de Produção Anual localizadas na Floresta Estadual do Paru, com colheita em 2014 (há 10 anos) e na Floresta Nacional de Caxiuanã, com colheita em 2019 (há 5 anos), A análise preliminar do teste de Shapiro-Wilk indicou não haver normalidade dos dados dos índices Cover e PAI. isso, optou-se pelo uso do teste não paramétrico de Mann-Whitney para comparar as medianas dos índices PAI e COVER entre os diferentes grupos de tratamento. A análise estatística foi realizada utilizando o software R (R CORE TEAM, 2024).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta a distribuição dos índices COVER e PAI obtidos nas duas áreas de estudo, no histograma C observamos que a Flona Caxiuanã apresenta uma distribuição semelhante à da Flota Paru, com a maioria dos valores de COVER próximos

a 1 (Histograma A). No entanto, a classe subsequente com 0,75 apresenta valores inferiores na Flona Caxiuanã e sugere uma cobertura do dossel pouco mais aberta com o manejo florestal mais recente (há 5 anos) em relação ao manejo na Flota do Paru, que já apresenta maior densidade de cobertura, por ser uma área manejada menos recentemente (há 10 anos).

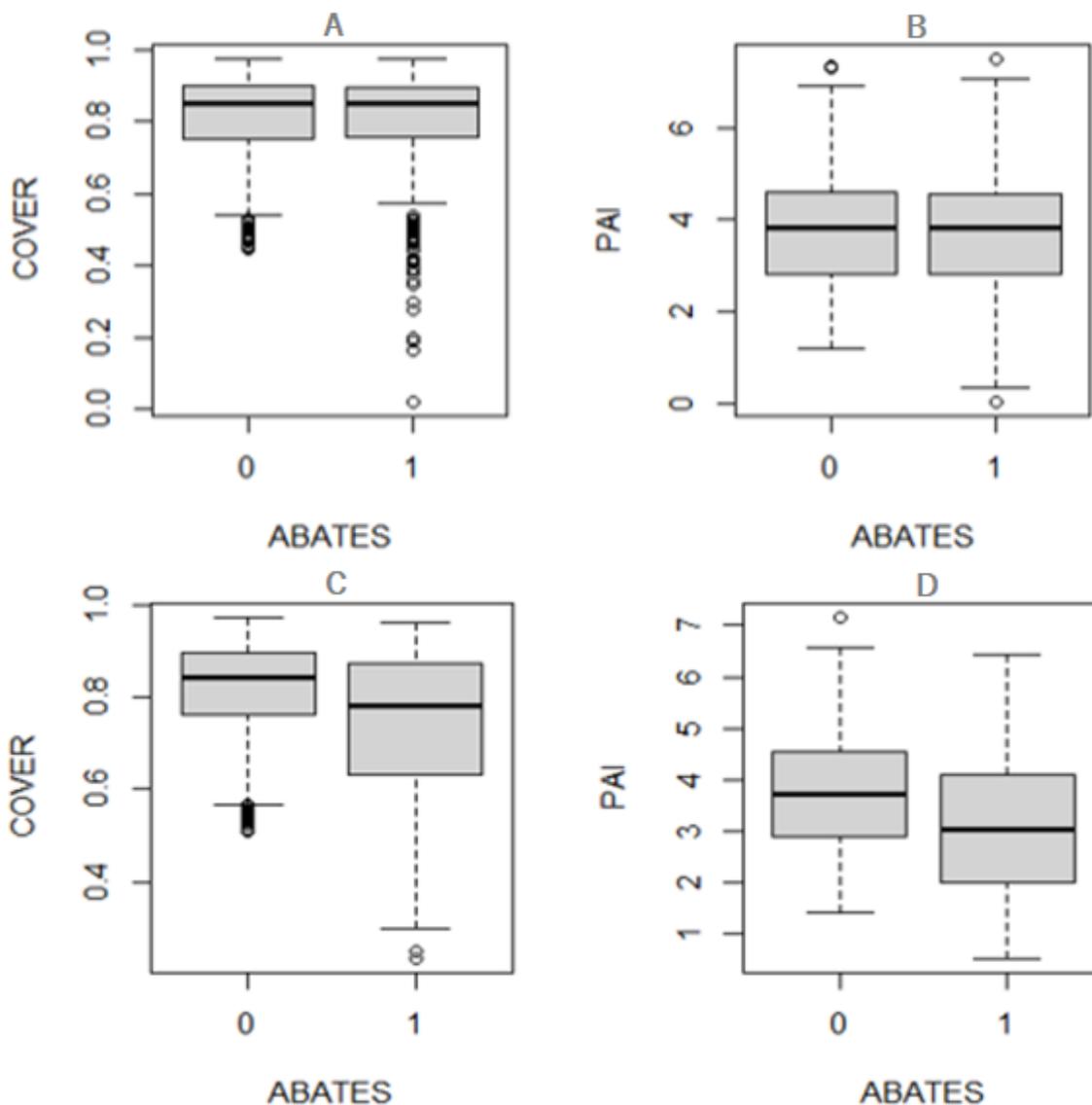
A distribuição do PAI na Flona Caxiuanã (Histograma D) é mais centralizada, com um pico em torno de 4. Isso sugere que a densidade arbórea é menor em relação à Flota Paru (Histograma C), o que é um indicativo de que o manejo florestal mais recente teve algum impacto na estrutura da vegetação, resultando em uma área com árvores menos densamente distribuídas.



**Figura 6.** Histogramas da distribuição do índice de cobertura do dossel (COVER) e índice de área de planta (PAI) na Floresta Estadual do Paru e na Floresta Nacional de Caxiuanã, localizadas no estado do Pará, BR. (A) Distribuição do COVER na Floresta Estadual do

Paru; (B) Distribuição do PAI na Floresta Estadual do Paru; (C) Distribuição do COVER na Floresta Nacional de Caxiuanã; (D) Distribuição do PAI na Floresta Nacional de Caxiuanã.

Corroborando com o apresentado pela distribuição dos dados, a análise comparativa entre as UPAs das duas unidades, Caxiuanã e Paru, revela diferenças significativas em termos de resultados estatísticos. Na unidade de Caxiuanã, que apresentou valores de mediana maiores para os dois índices no grupo sem abates (COVER:0,84 e PAI:3,71) em relação ao grupo com abates (COVER:0,78 e PAI: 3,04), o teste de Mann-Whitney indicou uma diferença significativa entre os grupos com e sem abates, para os dois índices analisados COVER ( $p$ -valor=1.468e-08) e PAI ( $p$ -valor=1.548e-08). O fato de haver uma diferença estatística relevante sugere que os grupos não apresentam comportamento homogêneo em relação aos índices estudados, apontando que, em Caxiuanã, há uma influência mais clara do manejo realizado sobre a resposta observada nos índices, existindo uma menor densidade e cobertura do dossel na classe com abates em comparação a classe sem abates. Por outro lado, a Flota do Paru apresentou valores ligeiramente maiores no grupo sem abates (COVER:0,85 e PAI:3,83), em relação ao grupo com abates (COVER:0,84 e PAI:3,80). O resultado do teste de Mann-Whitney indica que, os dois grupos podem ser considerados estatisticamente semelhantes em relação aos índices como indicam as estatísticas para o Cover ( $p$ -valor=0.9603) e PAI( $p$ -valor=0.9704). Os *boxplots* da figura 7 expressam o comportamento dos dois índices dentro dos grupos com e sem abates nas duas unidades.



**Figura 7.** *Boxplots* do índice de cobertura do dossel (COVER) e índice de área de planta (PAI) na Floresta Estadual do Paru e na Floresta Nacional de Caxiuanã, localizadas no estado do Pará, BR, para as classes 0-Sem árvores abatidas; 1 – Com árvores abatidas. (A) *Boxplot* do COVER na Floresta Estadual do Paru; (B) *Boxplot* do PAI na Floresta Estadual do Paru; (C) *Boxplot* do COVER na Floresta Nacional de Caxiuanã; (D) *Boxplot* do PAI na Floresta Nacional de Caxiuanã.

Como indica a Figura 7, quando analisamos a Flona do Paru nos *boxplots* A e B, respectivamente COVER e PAI possuem os comportamentos distinto dos encontrados em Caxiuanã (*Boxplots* C e D). No caso de Paru, os dois índices possuem valores de mediana muito próximos, podendo apenas ser observada uma tendência de acúmulo de valores baixos dos índices.

Quando analisamos o *boxplot* C, observamos que em Caxiuanã os valores do índice COVER tem distribuição entre 0,33 e 0,97 para a classe sem abates, e o intervalo

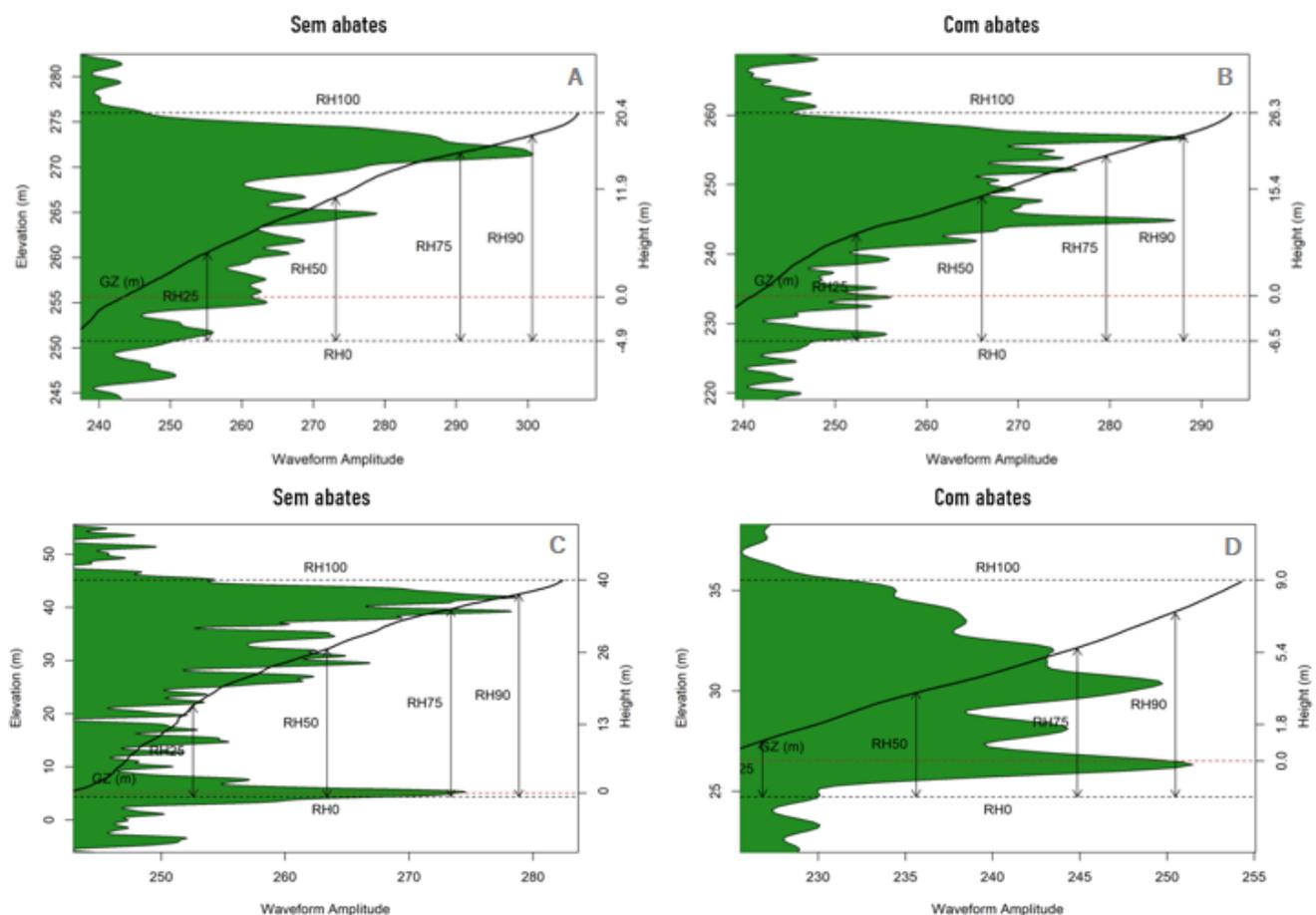
interquartil é de 0,7 a 0,9, indicando que a maior parte dos valores se concentra nesta faixa. Já quando se trata da classe com abates, temos uma mediana consideravelmente menor (0,78), além de uma dispersão maior dos dados, com acúmulo significativo de valores baixos e um intervalo interquartil mais amplo, com a presença de *outliers*.

Ainda na figura 7, quando observamos o *boxplot* D, temos que em Caxiuanã o PAI apresenta comportamento muito semelhante ao encontrado em COVER, o que indica uma alta correlação entre os dois índices, porém neste caso a presença de *outliers* é significativamente menor. Para a classe com abates, assim como acontece com COVER (*Boxplot* C), existe também uma tendência de acúmulo de amostras com valores baixos em relação a classe sem abates, indicando uma maior quantidade de pegadas com dossel menos denso.

É observado que os índices COVER e PAI apresentam comportamento muito semelhante, embora sejam complementares na análise estrutural do dossel estes possuem diferenças importantes. O COVER refere-se à cobertura do dossel, enquanto o PAI mede de forma mais detalhada o volume total do material vegetal acima do solo (YAN et al., 2024). Geralmente, áreas com alta cobertura vegetal (alto COVER) tendem a apresentar valor de PAI elevado, uma vez que a densidade da vegetação está correlacionada com a maior quantidade de material vegetal (JONES e BROWN, 2017). Isso é comprovado através da alta correlação entre os dois índices nas áreas (93%). Dessa forma, florestas densas e saudáveis, com maior cobertura, apresentam valores elevados tanto de COVER quanto de PAI, evidenciando a relação entre a cobertura do dossel e a estrutura volumétrica da vegetação (DOE et al., 2020). A menor presença de *outliers* no PAI em áreas de abate se deve à capacidade desse índice de capturar a estrutura vegetal em múltiplas camadas, o que reduz a sensibilidade a perturbações localizadas, como clareiras (YAN et al., 2024). O COVER, por outro lado, é mais suscetível a essas variações abruptas na cobertura aérea, resultando em uma maior frequência de *outliers* em áreas de perturbação (JONES e BROWN, 2017). Assim, enquanto o COVER reflete de forma mais imediata a perda de cobertura devido ao abate de árvores, o PAI fornece uma visão mais estável e integrada da estrutura da vegetação, sendo considerado um índice mais adequado para situações de heterogeneidade (HADDAD et al., 2020).

O *waveform* do GEDI nos permite entender melhor o perfil vertical da floresta dentro pegadas representativas dos dois grupos nas UPAs 1 e 2 (Figuras 8). A comparação entre as *waveforms* C e D, demonstra diferenças significativas entre as pegadas em Caxiuanã, que tornam evidentes alguns efeitos do manejo sobre a estrutura vertical da

floresta. Na pegada sem abates em Caxiuanã (*Waveform C*), a estrutura vertical da floresta tende a ser mais densa, conforme indicam as maiores amplitudes de onda (*waveform amplitude*). A altura (*Height*) máxima do dossel (RH100) é de 40 metros e os pontos com maior amplitude no perfil estão próximos desta altura máxima, indicando um dossel alto e denso. Na pegada com abates (*Waveform D*), os menores valores de amplitude em todo perfil indicam baixa densidade, especialmente em altura, já que o RH100, neste caso, está a 9 metros do solo, indicando um dossel muito pouco denso e baixo. O ponto de maior amplitude está abaixo de 5 metros de altura.



**Figura 8.** Exemplo de *Waveform* para pegada GEDI na Floresta Estadual do Paru e na Floresta Nacional de Caxiuanã, localizadas no estado do Pará, BR, para as classes 0-Sem árvores abatidas; 1 – Com árvores abatidas. (A) *Waveform* de pegada com abate na Floresta Estadual do Paru; (B) *Waveform* de pegada sem abate na Floresta Estadual do Paru; (C) *Waveform* de pegada sem abate na Floresta Nacional de Caxiuanã; (D) *Waveform* de pegada com abate na Floresta Nacional de Caxiuanã.

Para o exemplo de pegada na floresta Estadual do Paru (Figura 9), observamos um comportamento muito semelhante entre as *waveforms* dos dois grupos. É observada uma amplitude de onda ligeiramente maior na pegada sem abates e uma altura do dossel ligeiramente maior na pegada com abates, o que demonstra que, após 10 anos da data do manejo, houve regeneração do dossel florestal de forma a tornar as variações do dossel medidas pelo GEDI imperceptíveis.

## 5. CONCLUSÕES

É possível inferir, diante dos resultados que, devido ao fato do manejo na Floresta do Paru (há 10 anos) ser menos recente em relação ao manejo realizado em Caxiuanã (há 5 anos), a floresta manejada no Paru se encontra em estágio mais avançado de regeneração, tornando a densidade do dossel muito semelhante entre os grupos com e sem abate, mostrando assim, um estágio de regeneração avançado.

Além de mostrar que as práticas de MFIR podem levar a uma recuperação eficaz da vegetação, como evidenciado na Floresta Estadual do Paru. Este resultado mostra a eficácia do sensor Lidar do GEDI em capturar as variações do dossel florestal, mostrando que a ferramenta tem potencial para auxiliar nas etapas do MFIR que exigem monitoramento do estoque florestal. Assim, o sensoriamento remoto via GEDI se mostra um aliado poderoso para a maior eficiência de práticas de manejo florestal sustentável.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, K. M. P.; COUTINHO, L. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. *Vértices*, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 16, n. 1, p. 173-198, jan./abr. 2014.

ALVARENGA, B. S.; ARCO, E.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R. O Ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: Estudo de caso com solos do estado de São Paulo. *Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, 2003, p. 739-747. Belo Horizonte, MG.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ASNER, G. P.; SCURLOCK, J. M.; HICKE, J. A. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, v. 12, n. 3, p. 191-205, 2003.

ARAÚJO, R. C.; SILVA, L. C.; SANTOS, M. P.; PEREIRA, J. A. O avanço do sensoriamento remoto no monitoramento da vegetação: uma perspectiva brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 53, n. 2, p. 245-260, 2023.

BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; WALKER, W. High-resolution biomass maps for GEDI: Implications for carbon monitoring. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, p. 3542, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-23885-5>

BARRETO, P.; AMARAL, P.; VIDAL, E. Desmatamento e manejo florestal na Amazônia. Brasília: IMAZON, 2021.

BERRA, E. F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R.S.; SEBEM, E.; GOERGEN, L. C. G.; BENEDETTI, A. C. P.; BLIPPERT, D. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, out.-dez., 2012.

BRUNT, J.; SAATCHI, S. S.; MARTIN, J. GEDI Lidar Data: Processing and Analysis. *Remote Sensing*, v. 12, n. 12, p. 1945, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/12/1945>

DEMATTE, J.A.M.; NANNI, M.R. Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. *International Journal of Remote Sensing*, v.24, p.4715- 4738, 2003.

DRAKE, J. B., HIXSON, C. J; JONES, T. T. (2019). Evaluating vegetation cover and canopy change using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111-125.

DOE, S. C.; GRANT, J. L.; SIMONS, C. D. Vegetation cover and canopy structure assessment using remote sensing indices. *Journal of Vegetation Science*, v. 31, n. 3, p. 457-468, 2020.

DUNCANSON, L.; HUANG, W.; JOHNSON, K.; SWATANTRAN, A.; MCROBERTS, R.; DUBAYAH, R. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) Lidar Mission. *Remote Sensing of Environment*, v. 270, p. 112845, 2021.

DUBAYAH, R.; BLAIR, J. B.; GOETZ, S.; FAToyinbo, T.; HANSEN, M.; HEALEY, S; TANG, H. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, v. 1, p. 100002, 2020.

FIGUEIREDO, D. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. São Paulo, 2005. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos\\_sm](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm)> Acesso em 16 de maio de 2014.

FONSECA, J. A.; CUNHA, M. L.; PEREIRA, R. P. Aplicação de tecnologias de geoprocessamento no manejo florestal sustentável. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 43, p. 215-227, 2022.

FLORENZANO, T. G. Iniciação em sensoriamento remoto. Oficina de Textos, 2007.

- GUEDES, J.; DA SILVA, S. M. P. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: Princípios físicos, sensores e métodos. *Acta Geográfica*, v. 12, n. 29, p. 127-144, Dez, 2018.
- HADDAD, I.; SIMÕES, P. S.; OLIVEIRA, A. H.; SHIMABUKURO, Y. E. Recent advances in remote sensing techniques for vegetation cover and canopy structure analysis. *Remote Sensing*, v. 14, n. 15, p. 3734, 2022.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 05, de 11 de dezembro de 2006. Estabelece diretrizes para o Manejo Florestal Sustentável. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sensoriamento remoto e suas aplicações. Rio de Janeiro: IBGE, 2001.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento ambiental. São José dos Campos: INPE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- JIMENEZ, A. M.; MARTINEZ, M. R.; PEREIRA, S. F. PAI: Métricas e Aplicações em Ciências Ambientais e Monitoramento Florestal. *Journal of Environmental Monitoring*, v. 15, n. 4, p. 402-418, 2022.
- JONES, D.; BROWN, P. Quantifying Canopy Cover and Biomass Using LIDAR. *Remote Sensing Applications*, v. 23, n. 6, p. 567-580, 2017.
- MCCARTHY, H. R.; SIMMONS, G. J.; THOMAS, R. J. Comparação entre o PAI e o LAI na avaliação da vegetação florestal. *Journal of Forest Research*, v. 28, n. 3, p. 215-229, 2021.
- MARTIN, P. A.; TOBIAS, J. A.; EDWARDS, D. P. Selective logging and its impact on tropical forest biodiversity and carbon storage. *Ecology Letters*, v. 25, n. 3, p. 538–550, 2022. Disponível em: [<https://onlinelibrary.wiley.com>]. Acesso em: 10 nov. 2024.
- MARTINS, L. S.; COSTA, M. P.; SANTOS, E. J. Inventário florestal na Amazônia: métodos e desafios. *Revista de Ciências Florestais*, v. 38, n. 2, p. 132-145, 2020.
- MIKHAIL, E. M. *Geodesy: Accuracy and Precision*. 1. ed. New York: Springer, 2008.
- MEDEIROS, J. S.; SILVA, R. S. (2021). "Análise da variação do índice de área foliar em diferentes tipos de vegetação na Amazônia." *Revista Brasileira de Botânica*, 44(2), 321-331.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). GEDI Lidar Data Product Descriptions. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2020.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F.J. Introdução ao sensoriamento remoto. São José dos campos, 2001.

OLIVEIRA, A. P.; SILVA, M. A. Comparação de índices de vegetação para monitoramento da qualidade da vegetação em áreas de recuperação florestal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 1, p. 34-48, 2023.

ORTIZ-REYES, A. D.; BARRERA-ORTEGA, D.; VELASCO-BAUTISTA, E.; ROMERO-SÁNCHEZ, M. E.; CORREA-DÍAZ, A. Predicting forest parameters through generalized linear mixed models using GEDI metrics in a temperate forest in Oaxaca, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, v. 45, n. 2, p. 1-24, 2024. DOI: 10.1080/01431161.2024.2396565. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2024.2396565>. Acesso em: 25 nov. 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS: A Free and Open Source Geographic Information System. QGIS Development Team, 2023. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: [22/08/2024]

QUESADA, C. A.; HIGUCHI, N.; SANDEL, B. Biomass and canopy complexity estimates from GEDI Level 2b data: Implications for carbon storage and forest dynamics. *Global Change Biology*, v. 27, n. 4, p. 1229-1244, 2021.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em 24, Jul. 2020.

SILVA, J. A.; SOUZA, R. F.; PEREIRA, A. L. Manejo florestal em áreas de baixo impacto na Amazônia. *Revista Brasileira de Ciências Florestais*, v. 42, n. 4, p. 235-247, 2022.

KOLK, S.; RITTER, T. Estimating forest biomass and carbon stocks using airborne LIDAR data. *Forest Ecology and Management*, v. 433, p. 369-379, 2019.

LAURANCE, W. F. et al. Relationship between soils and Amazon forest biomass: A landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, v.

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; KELLER, M. Forest canopy height and complexity assessment using remote sensing: Comparisons of PAI and COVER indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 239, p. 111657, 2020.

LINDENMAYER, D. B.; FRANKLIN, J. F. Managing and Maintaining Biodiversity in Forests. Oxford: Oxford University Press, 2002.

SILVA, A. S.; RIBEIRO, G. H.; OLIVEIRA, M. T. Avaliação da vegetação com LiDAR: Medidas de altura e densidade do dossel. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v. 36, n. 1, p. 55-70, 2022.

TANG, H.; ARMSTON, J. GEDI: Global Ecosystem Dynamics Investigation: Overview and Capabilities. *Remote Sensing*, v. 11, n. 7, p. 732, 2019. DOI: 10.3390/rs11070732.

YAN, K.; WANG, J.; PENG, R.; et al. HiQ-LAI: a high-quality reprocessed MODIS leaf area index dataset with better spatiotemporal consistency from 2000 to 2022. *Earth System Science Data*, v. 16, p. 1601-1622, 2024. DOI: 10.5194/essd-16-1601-2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-16-1601-2024>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ZHENG, G.; HE, Y.; YANG, X.; LIU, H.; Zhang, Y. Assessment of forest biomass and carbon storage using Plant Area Index (PAI) derived from remote sensing data. *Remote Sensing*, v. 15, n. 2, p. 280, 2023. DOI: 10.3390/rs15020280. Smith, M. W.; Sweeney, T. M.; Edwards, T. C. Evaluating the Plant Area Index (PAI) and its relationship with forest canopy structure and disturbance. *Forest Ecology and Management*, v. 335, p. 95-104, 2015. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.10.021.