



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOÃO LUCAS SAUMA ALVARES

**PREDIÇÕES DE CARBONO EM UMA FLORESTA SECUNDÁRIA EM
RECUPERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

BELÉM
2025

JOÃO LUCAS SAUMA ALVARES

**PREDIÇÕES DE CARBONO EM UMA FLORESTA SECUNDÁRIA EM
RECUPERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência Florestais.

Área de Concentração: Ecologia e
Ecofisiologia de Árvores

Orientador: Gustavo Schwartz

Coorientador: Fabiano Emmert

Coorientador: Luiz Fernandes Silva Dionísio

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A473p Alvares, João Lucas Sauma
 Predições de carbono em uma floresta secundária em recuperação na Amazônia oriental / João Lucas Sauma Alvares. - 2025.
 67 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2025.
 Orientador: Prof. Dr. Gustavo Schwartz
 Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Emmert.
1. Floresta secundária - Pará. 2. Biomassa. 3. Modelo alométrico. 4. Parcela permanente. 5. Floresta - Carbono. I. Schwartz, Gustavo, *orient.* II. Título

CDD 333.7509811

JOÃO LUCAS SAUMA ALVARES

**PREDIÇÕES DE CARBONO EM UMA FLORESTA SECUNDÁRIA EM
RECUPERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência Florestais.

Data de aprovação: 22 / 08 / 2025.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO SCHWARTZ**
Data: 16/09/2025 15:24:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Dr. Gustavo Schwartz

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Documento assinado digitalmente
 **WALMER BRUNO ROCHA MARTINS**
Data: 23/09/2025 11:10:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1º Examinador

Dr. Walmer Bruno Rocha Martins

Universidade Federal Rural da Amazônia

Documento assinado digitalmente
 **FABIANO EMMERT**
Data: 16/09/2025 21:46:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador

Dr. Fabiano Emmert

Universidade Federal Rural da Amazônia

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO MANUEL VILLA**
Data: 01/10/2025 11:26:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2º Examinador

Dr. Pedro Manuel Villa

Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDES SILVA DIONISIO**
Data: 17/09/2025 20:47:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador

Dr. Luiz Fernandes Silva Dionísio

Universidade do Estado do Pará

Documento assinado digitalmente
 **DIVINO VICENTE SILVERIO**
Data: 23/09/2025 06:21:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3º Examinador

Dr. Divino Vicente Silverio

Universidade Federal Rural da Amazônia

SUMÁRIO

1 Contextualização	7
2 Revisão de literatura	8
2.1 Biomassa vegetal e carbono	8
2.2 Recuperação de áreas degradadas	9
2.3 Geoprocessamento na predição do carbono estocado	11
3 Estoque de carbono em uma floresta secundária na Amazônia Oriental sob diferentes estratégias de recuperação	13
RESUMO	13
ABSTRACT	14
4 Introdução	15
4.1 Questões científicas, hipóteses e objetivos	17
4.1.1 Questões científicas.....	17
4.1.2 Hipóteses.....	17
4.1.3 Objetivos	17
5 Material e métodos	18
5.1 Área de Estudo.....	18
5.2 Obtenção dos dados de campo para o modelo alométrico.....	19
5.3 Mensuração dos indivíduos em campo.....	20
5.4 Distribuição diamétrica e acúmulo de carbono por espécie	21
5.5 Predição do carbono estocado por modelo alométrica	21
5.6 Análise estatística.....	22
6 Resultados	23
6.1 Distribuição Diamétrica.....	23
6.2 Análises estatística alométrica	25
6.3 Carbono estocado por espécie	26

6.4 Carbono acumulado nos tratamentos de recuperação.....	29
7 Discussão	30
7.1 Estoque de carbono em ecossistemas florestais em sucessão ecológica	30
7.2 Distribuição diamétrica de áreas degradadas.....	31
7.3 Modelo alométrico para floresta secundária.....	32
8 Conclusão	33
9 Referências	34
10 Comparação da predição de carbono estocado por modelo alométrico e por Net Primary Productivity em uma floresta secundária na Amazônia Oriental.....	41
RESUMO	41
ABSTRACT	42
11 Introdução	43
11.1 Questões científicas, hipóteses e objetivos	45
11.1.1 Questões científicas.....	45
11.1.2 Hipóteses	46
11.1.3 Objetivos	46
12 Material e métodos	47
12.1 Área de Estudo.....	47
12.2 Obtenção dos dados de campo para o modelo alométrico.....	48
12.3 Mensuração dos indivíduos em campo.....	49
12.4 Predição do carbono estocado por modelo alométrica	49
12.5 Estimativas de sensoriamento remoto	50
12.6 Análise estatística.....	53
13 Resultados	54
13.1 Análise estatística das predições de carbono por <i>Net Primary Productivity</i>	54
13.2 Estoque de carbono das predições de <i>Net Primary Productivity</i>	54
13.3 Máximas e mínimas de carbono estocado por pixel.....	57

14 Discussão	60
14.1 Capacidade das predições de carbono por <i>Net Primary Productivity</i>	60
14.2 Predições de carbono estocado	60
14.3 Influências nas predições de carbono	61
15 Conclusão	62
16 Referências	63

1 Contextualização

A Amazônia Oriental abriga extensas áreas de florestas secundárias em diferentes estágios de regeneração, áreas essas que surgiram em decorrência majoritariamente das atividades antrópicas. Essas florestas desempenham papéis fundamentais relacionados a serviços ecossistêmicos e mudança climática, como o sequestro e estoque de carbono e mudança de uma área emissora de carbono para captadora. Nesse contexto, compreender como diferentes técnicas de recuperação influenciam no estoque de carbono é essencial, principalmente para melhorar a tomada de decisão, monitoramento e políticas voltadas ao carbono estocado e mudança climática.

Entre os meios de predição de carbono estocado há os modelos alométricos (MA) e a *Net Primary Productivity* (NPP), o primeiro método se relaciona muitas vezes com dados obtidos diretamente em campo, estabelecendo uma relação matemática entre variáveis de fácil mensuração com uma característica de difícil obtenção. Esse princípio também é aplicado à NPP, porém vinculando valores espectrais com um ou vários componentes da vegetação. Desta forma, ambos os métodos se tornam um meio para a obtenção do carbono estocado em determinada floresta.

Com isso estudos que aprofundem a respeito da influência da técnica de recuperação no estoque de carbono em florestas secundárias juntamente com aplicação de MA e NPP para a quantificação do estoque de carbono são importantes no contexto ambiental, haja vista que são técnicas comumente utilizadas para esse fim, porém aplicadas em um cenário de floresta primária ou escalas globais. Assim abordar o estoque de carbono total e as espécies responsáveis por esse armazenamento conforme o método de recuperação aplicado em uma escala local tornam-se de suma importância para uma melhor compreensão do comportamento dessas predições, assim como verificar se independentemente da técnica de predição, NPP ou alometria, é possível obter resultados de carbono semelhantes em uma determinada área.

Com base nessas questões, buscou-se avaliar a capacidade da NPP em prever os estoques de carbono de forma comparável aos modelos alométricos, tanto nos quantitativos quanto nas diferenciações entre os tratamentos, considerando para isso, distintas escalas temporais, única cena, anual e sazonais. Dessa forma, a pesquisa foi estruturada em dois capítulos interligados: estoque de carbono em florestas secundárias sob diferentes estratégias de restauração na Amazônia Oriental e comparação da predição de carbono estocado por modelo alométrico e *Net Primary Productivity* em uma floresta secundária na Amazônia.

2 Revisão de literatura

2.1 Biomassa vegetal e carbono

A floresta Amazônica possui cerca de seis milhões de km², estando presente nos territórios do Brasil, Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa. Dentre esses países, o Brasil abriga 4,2 milhões de km², cobrindo mais de 50% do território brasileiro, abrangendo os estados do Acre, Amazonas, Amapá, Rondônia, Roraima, Pará, Mato Grosso, Tocantins e Maranhão (Brasil, 2019; Araújo et al., 2023; Vale et al., 2020). Essa extensão coloca o país em uma posição de destaque no cenário global, em virtude principalmente da exuberante biodiversidade da floresta amazônica (IPAM, 2023; Nakai, 2016).

Entre os fatores de grande importância da floresta amazônica estão os serviços ecossistêmicos, como os de provisão, os de suporte, os de regulação e os culturais, fundamentais para o equilíbrio ambiental e estabilidade climática, conforme a legislação nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Além da função crucial para o contexto das mudanças climáticas, que se vincula com a fixação do carbono das árvores para reduzi-lo da atmosfera (Romero et al., 2022; Piva et al., 2021; Araújo et al., 2023).

Para que esse potencial seja devidamente catalogado, são necessárias predições adequadas e não genéricas ou desenvolvidas para regiões totalmente distintas. Entre as formas de obtenção há os MA, que possibilitam meios para quantificar o carbono de uma determinada área e os componentes relacionados a ele. Os levantamentos baseados para elaboração dessas equações decorrem de inventários florestais, procedimento que tem distintos objetivos e características, sendo o central, o de fornecer informações dos recursos florestais, o que auxilia no entendimento dos processos biológicos e nas tomadas de decisões (Schaefer et al., 2022).

Para definir a técnica de inventário florestal, e posteriormente o MA que será utilizado, deve-se considerar o uso atual da área, as características da região e os objetivos a serem determinados, sendo que dentre as técnicas existentes, o inventário florestal contínuo é o mais utilizado (Schaefer et al., 2022; Kafy et al., 2023). A sua construção envolve a instalação de parcelas permanentes, o que permite a construção de um banco de dados no tempo e possibilita o monitoramento dos parâmetros quantitativos e qualitativos conforme o tratamento aplicado (Schaefer et al., 2022; Kafy et al., 2023).

Essa disponibilidade de dados com temporalidade possibilita a construção e o aprimoramento de modelos matemáticos de estimativas indiretas, o que facilita levantamentos de campo em grande escala, como ocorre com os MA e de NPP (Amaro, 2010; Woortmann et al., 2018; Nelson et al., 1999; Moura et al., 2022). No entanto, certas predições de carbono, como as por sensoriamento remoto, ainda necessitam de dados complementares como forma de validação e verificação, que possuem o objetivo de reduzir erros associados aos ajustes inadequados ou incertos, característica semelhante à utilização equivocada de MA's (Schaefer et al., 2022; Verly, 2021; Amaro, 2010; Nelson et al., 1999).

Essas predições indiretas são consideradas eficazes para quantificação de parâmetros em uma determinada localidade, principalmente quando se almeja aumentar a área de análise, haja vista que possibilita prever, de maneira rápida e com custo reduzido, fator que ocorre em virtude da relação matemática entre as características físicas, fisiológicas e dimensionais dos organismos (Amaro, 2010; Woortmann et al., 2018; Nelson et al., 1999; Moura et al., 2022; Piva et al., 2021; Araújo et al., 2023). Entre essas técnicas indiretas existem os MA's, que possuem distintos objetivos, entre eles, a mensuração da biomassa, que se interliga com o carbono estocado.

Para a construção e aplicação de um determinado MA, deve-se considerar as características específicas da localidade e da região em estudo, características essas que ocasionam erros caso não sejam respeitadas, principalmente a utilização de modelos desenvolvidos para áreas com condições distintas da que foi fundamentada. Essa particularidade é essencial para quantificar de forma adequada as variáveis desejadas, o que torna fundamental, quando possível, a elaboração ou seleção de MA's próximos ou desenvolvidos para a área estudada (Amaro, 2010; Woortmann et al., 2018; Romero et al., 2022; Nelson et al., 1999).

2.2 Recuperação de áreas degradadas

O armazenamento de carbono em florestas tropicais desempenha um papel fundamental na regulação climática global, especialmente considerando os serviços ecossistêmicos tangíveis e intangíveis oferecidos pelas florestas. Esse serviço está presente em florestas secundárias, as quais têm crescimento acelerado nas primeiras décadas de desenvolvimento até a sua estabilização. Isso faz com que esses ecossistemas detenham uma contribuição significativa na regulação climática, conservação da biodiversidade e proteção

do solo (Kafy et al., 2023; Karyati et al., 2019, Zanini, 2018; Moura et al., 2022; Lu et al., 2018, 2020; Liao, Liu & Xiao, 2022).

Diante disso, recuperar áreas degradadas é importante para mitigar os impactos antrópicos negativos, como a fragmentação de habitats, a redução da biodiversidade, e a conversão do solo (Barbosa, 2021). Consorciado a essa necessidade, o conceito de mitigação definido no Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) do Brasil, Lei nº 12.187/2009, referente às atividades humanas, diretas ou indiretas, que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa e minimizar as alterações climáticas, elenca, no art. 2º, inciso VII, técnicas e formas capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como tecnologias mais limpas e captação e fixação de carbono, cenário a qual a recuperação florestal se encaixa. No art. 4º, da mesma lei, coloca como objetivo, o desenvolvimento econômico-social compatível com reduções desses gases, a exemplo, com a expansão de áreas legalmente protegidas, incentivo ao reflorestamento e a recomposição da cobertura vegetal em áreas degradadas (Brasil, 2009).

Alinhando-se a essas diretrizes e conceitos, o Brasil, ao aderir ao Protocolo de Quioto em 1997 e, posteriormente, com os compromissos firmados na COP-21 em Paris, comprometeu-se a restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares até 2030 na Amazônia e na Mata Atlântica (Verly, 2021). Meta ambiciosa, porém, que impulsiona, mesmo que parcialmente, mudanças no ordenamento ambiental brasileiro, além de colocar a recuperação de áreas degradadas em destaque, o que fortalece o papel das florestas em “pé” e reforça as atividades sustentáveis. Essas atividades também auxiliam na diminuição de eventos ambientais negativos, incluindo as instabilidades climáticas, que se tornam cada vez mais frequentes.

Em virtude dessa importância, o conceito de captação e armazenamento de carbono em áreas degradadas tem passado por constantes aprimoramentos, com aumento exponencial de pesquisas com essa temática desde a década de 1990 (Liao, Liu & Xiao, 2022; Martins et al., 2020). No entanto, apesar do crescente volume de estudos, ainda há necessidade de pesquisas, fator associado à complexidade dos ecossistemas florestais e suas interações com o meio.

Com isso, abordagens multifacetadas são recomendadas, com o intuito de integrar aspectos funcionais, composicionais e estruturais das florestas e promover uma recuperação e restabelecimento da resiliência, conforme o cenário existente (Zanini et al., 2021; Martins et al., 2022; Liu et al., 2023; Martins, 2020; Moura et al., 2022; Zeng et al., 2019). Dessa forma,

pesquisas detalhadas de qualificação e quantificação dos componentes da floresta amazônica, bem como o seu monitoramento, são essenciais, principalmente para embasar políticas públicas e orientar o uso sustentável dessas florestas.

2.3 Geoprocessamento na predição do carbono estocado

A mensuração dos estoques de biomassa e carbono em florestas por meio de geotecnologias data da década de 1980 e desde então manteve-se em constante crescimento, especialmente no que se refere ao uso e à ocupação do solo. A característica principal para esse aumento é a capacidade de adquirir dados em larga escala de forma ágil e econômica, o que permite uma representação dinâmica da ocupação territorial, aspecto essencial para o planejamento e a tomada de decisões (Vale et al., 2020; Verly, 2021).

Desde seu primeiro uso, na área militar, o sensoriamento remoto teve diversas evoluções e aprimoramentos, a exemplo, nos Índices de Vegetação (IV), os quais implementaram indicadores específicos para determinadas situações, como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Em conjunto com essa evolução, o monitoramento dos ecossistemas florestais se tornou mais frequente e com uma escala global, permitindo o acompanhamento das flutuações do carbono (Liao, Liu e Xiao, 2022; Spinosa et al., 2023). Essa capacidade foi fundamental para a compreensão do ciclo global do carbono, facilitando e auxiliando a gestão ambiental e o combate às mudanças climáticas (Vale et al., 2020; Verly, 2021; Fernández-Urrutia e Gil, 2022).

Nesse contexto, o sensoriamento remoto destaca-se como uma ferramenta de grande potencial para predições indiretas e de acompanhamento de áreas florestais, com capacidade de verificar diferentes ecossistemas nas mais remotas localidades, evitando retrocessos ou ajustados metodologias de recuperação (Martins, 2020; Sousa et al., 2023). Consonante a essas características, o art. 5º, inciso II, do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) do Brasil, estabeleceu que as ações de mitigação da mudança climática devem estar alinhadas ao desenvolvimento sustentável e sempre que possível, ser mensuráveis para permitir sua quantificação e verificação a posteriori (Brasil, 1988). Nesse seguimento, as predições por sensoriamento remoto podem suprir essa necessidade de forma eficaz e constante.

Dentre as diversas possibilidades de predições para obtenção do carbono estocado, destacam-se a NPP, que pode ser mesclada com diversas técnicas (Spinosa et al., 2023). No entanto, essas estimações ainda dependem de diversas variáveis, como radiação atmosférica, características do dossel, umidade, reflectância e tipo de solo (Huete, 1988; Martins et al.,

2022; Verly, 2021; Barbosa, 2021; Liao, Liu e Xiao, 2022). Essa característica gera a necessidade de dados complementares para validação e verificação, como dados coletados em campo, fator frequentemente negligenciado.

Associado aos avanços do sensoriamento remoto, a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) vem se tornando uma ferramenta cada vez mais usada para análises remotas, haja vista que disponibiliza um amplo acervo de dados gratuitos, abrangentes e em escala global (Sousa et al., 2023). Seu uso, aliado ao aperfeiçoamento dessas predições de carbono, contribui para uma gestão mais sustentável dos ecossistemas florestais e fortalece iniciativas globais de monitoramento, gerando informações de diversos meios e fontes.

Desta forma, pesquisas que integrem o sensoriamento remoto, as análises de campo e a plataformas gratuitas com o GEE, são essenciais para aprofundar e aumentar a compreensão sobre a biomassa e o estoque de carbono em florestas. Pesquisas desse cunho possibilitam prever o carbono estocado que posteriormente poderá ser utilizado em projetos ou em políticas públicas, ou ainda, para validação dos estoques obtidos por meio do uso de *scripts* criado na plataforma, de modo rápido, barato e simples.

3 Estoque de carbono em uma floresta secundária na Amazônia Oriental sob diferentes estratégias de recuperação

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o estoque de carbono total e identificar as principais espécies responsáveis por esse estoque conforme diferentes técnicas de recuperação. Foram analisadas três recuperações, passiva, dirigida e ativa e em três anos, 2018, 2020 e 2022. Os dados foram coletados na Fazenda Piave, localizada em Igarapé-Açu (PA) que é composta majoritariamente por floresta secundária que está em processo de regeneração há mais de 20 anos e com histórico de pastagem abandonada. Os tratamentos foram delimitados de acordo o nível de intervenção na parcela: Recuperação Passiva (RP), caracterizada pela ausência de ações humanas desde o abandono da área; Recuperação Dirigida (RD), houve práticas de exploração de baixo impacto, como a remoção seletiva de árvores para fins madeireiros e o enriquecimento com espécies desse cunho; e Recuperação Ativa (RA), ocorreu o plantio de espécies nativas e exóticas juntamente com a implementação de um sistema silvipastoril. Cada tratamento possuiu uma parcela de 100×100 m e que foi subdividida em subparcela de 10×10 m. Para prever o carbono estocado utilizou-se um modelo alométrico desenvolvido para floresta secundária e uma conversão de carbono de 47%. Os resultados indicaram que a RA apresentou o maior estoque de carbono em todos os anos analisados, especialmente devido a contribuição da espécie exótica *Acacia mangium*, a qual é muito utilizada pelo rápido estoque de biomassa, porém considerada invasora. Na RP e RD, a espécie *Lacistema pubescens* foi a espécie que possui o maior estoque de carbono nos anos analisados. No entanto, a RD apresentou estoques totais consideravelmente inferiores à RP, menos da metade, possivelmente em decorrência da remoção de indivíduos pelo manejo. Outra distinção encontrada entre as recuperações foi o estoque de carbono conforme a classe diamétrica, em que o maior estoque de carbono para o RD decorreu de classes menores, 0 – 20 cm, enquanto que na RP e RA foram de classes entre 10 a 40 cm. Portanto, os o método de recuperação exerce influência no estoque de carbono, nas espécies responsáveis e nas classes diamétricas que estão realizando esse estoque, considerando um cenário de florestas secundárias, essa questão reforça a importância de estudos sobre a temática e da escolha adequada da estratégia de recuperação para atender o objetivo almejado.

Palavras-chave: biomassa; modelo alométrico; parcela permanente.

ABSTRACT

This study aimed to assess the total carbon stock and to identify the main species responsible for this stock under different restoration techniques. Three restoration strategies were analyzed, passive, assisted and active, over three years, 2018, 2020 and 2022. Data were collected at Fazenda Piave, located in Igarapé-Açu (PA), which is predominantly composed of secondary forest under regeneration for more than 20 years, with a history of abandoned pasture. The treatments were defined according to the level of intervention within each plot: Passive Restoration (PR), characterized by the absence of human intervention since abandonment; Directed Restoration (DR), involving low-impact management practices, such as selective logging and enrichment planting with species of commercial interest; and Active Restoration (AR), which consisted of planting native and exotic species combined with the implementation of a silvopastoral system. Each treatment consisted of a 100 × 100 m plot subdivided into 10 × 10 m subplots. Carbon stock prediction was based on an allometric model developed for secondary forests, with a conversion factor of 47% for carbon. The results indicated that AR exhibited the highest carbon stock in all years analyzed, mainly due to the contribution of the exotic species *Acacia mangium*, widely used for its rapid biomass accumulation but considered invasive. In PR and DR, *Lacistema pubescens* was the species with the highest carbon stock in the assessed years. However, DR showed considerably lower total carbon stocks compared to PR, less than half, possibly due to the removal of individuals through management. Another distinction observed among the restoration strategies concerned carbon stocks by diameter class, in DR the highest carbon stock was concentrated in smaller classes, 0–20 cm, whereas in PR and AR, it was concentrated in intermediate classes, 10–40 cm. Therefore, the restoration method influences not only total carbon stocks, but also the species contributing to them and the diameter classes in which they accumulate. In the context of secondary forests, this finding highlights the importance of further studies on the subject and the careful selection of restoration strategies to achieve the desired outcomes.

Keywords: biomass; allometric model; permanent plot.

4 Introdução

A Floresta Amazônica é reconhecida como a mais biodiversa do planeta e a segunda maior em extensão, cobre aproximadamente seis milhões de km². Sua área se estende por diversos países da América do Sul, abrangendo cerca de 50% do território brasileiro, o que corresponde a aproximadamente 60% da cobertura florestal amazônica total no continente (Brasil, 2009; Araújo et al., 2023; Vale et al., 2020; IPAM, 2023; Nakai, 2016; Tejada et al., 2019). Essas características conferem à Amazônia um papel de destaque no fornecimento de serviços ecossistêmicos globais, especialmente no sequestro e armazenamento de carbono, definido na lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021 como um serviço de regulação.

Estima-se que as florestas tropicais armazenem 228,7 bilhões de toneladas de carbono, destacando sua importância na regulação climática, o que gera a necessidade de sua proteção, uso sustentável e recuperação (Tejada et al., 2019; Liu et al., 2023). Associado a esse aspecto, os serviços ecossistêmicos são relevantes para combater impactos causados por mudanças no uso do solo, como a conversão de florestas em atividades agrícolas ou agropecuária, que elevam, muitas vezes, as emissões antrópicas de gases de efeito estufa e a necessidade de mitigá-los (Baccini et al., 2012).

Diante dessa relevância, a Amazônia tem sido tema central em diversas articulações internacionais, como o Protocolo de Quioto (1997), o Acordo de Paris (2015) e as Conferências das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COPs). Iniciativas lideradas por instituições como o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) também têm impulsionado avanços, principalmente nas previsões e mensurações dos estoques de carbono (Spinosa et al., 2023; Liu et al., 2023; Higuchi et al., 2014). No entanto, desafios persistem, como a alta heterogeneidade da vegetação, a estrutura vertical complexa e o difícil acesso em muitas áreas, o que dificulta a coleta de dados, principalmente em campo (Moura et al., 2022; Van Breugel et al., 2011).

Esses aspectos contribuem para que apenas 0,0013% do bioma amazônico brasileiro seja monitorada por parcelas permanentes, valor insuficiente para representar a complexidade da região, mesmo em uma abordagem mais otimista em que essa cobertura atinge 17% do bioma (Schaefer et al., 2022; Tejada et al., 2019). Diante disso, mais estudos e monitoramentos de longo prazo dos indicadores ecológicos tornam-se fundamentais para compreender melhor o bioma.

Nesse contexto, previsões indiretas são fundamentais, visto que levantamentos diretos demandam mão-de-obra qualificada, equipamentos, tempo, logística e recursos financeiros

elevados, fatores limitam a frequência espacial e temporal das amostragens. Desta forma, os métodos indiretos, baseados em relações matemáticas, surgem como alternativas para redução de custos e ampliação da escala de análise, a exemplo, dos modelos alométricos (Araújo et al., 2023; Verly, 2021; Manzato, 2018; Zanini et al., 2021; Higuchi et al., 2014; Chaves et al., 2005; Ketterings et al., 2001; Tejada et al., 2019).

Esses estudos, além de auxiliar no controle do desmatamento ocorrido na Amazônia, são relevantes para entender melhor a dinâmica da estrutura florestal. Dentre os diversos tipos de florestas existentes, há as secundárias, que possuem comportamentos distintos das florestas primária, principalmente na intensidade das relações ambientais (Poorter et al., 2021; Ducey et al., 2009). Entre os motivos para o crescimento da importância dessas áreas é o desmatamento, que em conjunto com o abandono dessas terras, geram florestas secundárias. Estima-se que atualmente 28% dos neotrópicos já sejam florestas secundárias decorrente do desmatamento (Poorter et al., 2021)

Essas florestas além desse cenário de crescimento, também são importantes para o combate ou mitigação da mudança climática, já que há a transformação de um ecossistema emissor de CO₂ para um captador de CO₂, além de reestabelecer serviços ambientais e benefícios ecológicos importantes, como o estoque de carbono (Liu et al., 2023; Moura et al., 2022; Martins et al., 2020; Nytych et al., 2023; Poorter et al., 2021). Com isso estudos com o enfoque em florestas secundárias devem ser desenvolver de forma distinta das florestas primárias, o que exige adaptações das práticas, fator relacionado a dinâmica distinta da floresta primária, espécies, microclima entre outros fatores (Ducey et al., 2009; Nelson et al., 1999).

Uma das adaptações necessárias é sob os modelos alométricos, a qual muitas vezes são desenvolvidos considerando as características da área estudada, como espécies e estrutura da vegetação, o que em um contexto amplo, comparando florestas primárias e secundárias, são distintos. Entre essas diferenciações está intensidade de desenvolvimento de certas características das florestas secundárias, a exemplo, do estoque de carbono, que é considerando, muitas vezes, exponencial até a estabilidade dinâmica da floresta (Liu et al., 2023; Moura et al., 2022; Ducey et al., 2009; Nelson et al., 1999).

Diante disso, estudos voltados para o estoque de carbono em florestas secundárias tem grande relevância para políticas de combate e mitigação da mudança climática, principalmente quando considerado distintas práticas de recuperação (Poorter et al., 2021; Martins 2020). Entre as premissas da recuperação está a sucessão, que é definida como uma

mudança na estrutura da vegetação, composição de espécies e funcionamento do ecossistema ao longo do tempo após uma perturbação e que possuem até certo ponto um comportamento previsível, porém que sofrem influência de fatores incertos, ou seja, cada técnica de recuperação possui um resultado distinto (Poorter et al., 2021).

Entre as técnicas de recuperação utilizadas, as que se destaca mais são a recuperação passiva e a ativa, técnicas que possui como base o uso da resiliência local, porém tendo, respectivamente, o retorno da vegetação sem qualquer intervenção humana ou a aplicação de técnicas para auxílio dessa recuperação (Martins et al., 2020).

Dessa forma, estudos com parcelas permanentes em áreas em regeneração devem ser valorizados e ampliados, especialmente diante da complexidade ecológica desses ambientes, visto que muitos estudos são elaborados para florestas maduras, o que pode não ser adequado para florestas em regeneração (Van Breugel et al., 2011; Karyati et al., 2019; Schaefer et al., 2022). Neste contexto, o presente estudo visa verificar o efeito de diferentes práticas de recuperação no estoque de carbono em uma floresta secundária, assim como as espécies que mais contribuíram para esse estoque e ser são semelhantes entre os tratamentos.

4.1 Questões científicas, hipóteses e objetivos

4.1.1 Questões científicas

1. A técnica de recuperação aplicada em uma floresta secundária influencia significativamente no estoque de carbono?
2. Conforme a técnica de recuperação aplicada diferentes espécies estocam carbono?

4.1.2 Hipóteses

1. A técnica de recuperação ativa possui o maior estoque de carbono
2. Espécies nativas são as que possuem as maiores concentrações de carbono independente da técnica de recuperação

4.1.3 Objetivos

4.1.3.1 Geral:

Analisar a influência da técnica de recuperação no estoque de carbono por modelo alométrico.

4.1.3.2 Objetivos específicos:

- Comparar os estoques de carbonos por modelos alométricos conforme a recuperação aplicada.
- Analisar as principais espécies que estocam carbono de acordo com a técnica de recuperação aplicada.

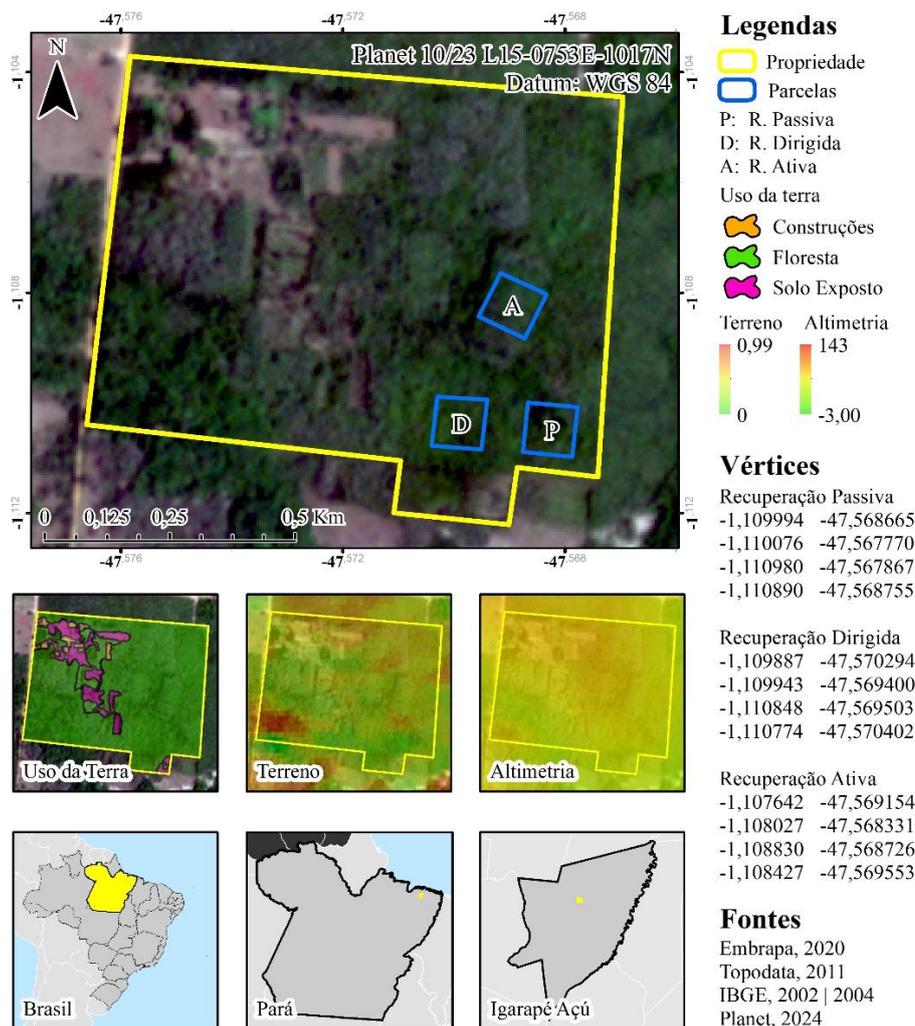
5 Material e métodos

5.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na fazenda Fattoria Piave, município de Igarapé-Açu, Pará, na microrregião Bragantina da mesorregião nordeste paraense, coordenadas 01°06'15" S e 47°34'28" O (Figura 1). A propriedade possui 75 hectares e tem produção voltada à agropecuária com cultivos solteiros ou consorciados de espécies florestais nativas e exóticas com a integração da pecuária de ovinos desde 1982 (Schaefer et al., 2022). A vegetação na propriedade possui porções de floresta ripária e trechos de floresta secundária que totalizam 22 hectares. A floresta secundária está em regeneração natural após o abandono de pastagens (Schaefer et al., 2022).

O clima da região de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Am, monção tropical quente e úmido, com elevada precipitação sazonal e com períodos curtos com redução das chuvas, gerando deficiência hídrica de baixa intensidade. A temperatura média da região varia de 33,9 °C a 21,1 °C e o volume de chuva anual é entre 2.302,5 a 2.857,4 mm, em que os maiores volumes ocorrem nos meses de março e abril. O solo predominante é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico coeso, textura média, bem drenado, com baixa saturação de bases, troca catiônica, teor de fósforo assimilável com médio à baixo conteúdo de matéria orgânica (Schaefer et al., 2022; Alvares et al., 2013).

Figura 1: Mapa de localização, uso do solo, relevo, altimetria da fazenda Fattoria Piave localizada nas coordenadas 01°06'15" S e 47°34'28" O.



5.2 Obtenção dos dados de campo para o modelo alométrico

Os dados do estudo foram coletados em três parcelas permanentes distintas sendo cada parcela considerada um tratamento, considerando o tratamento aplicado, definidas como parcela sem intervenção humana, considerada como recuperação passiva (RP), parcela manejada, definida como recuperação dirigida (RD) e parcela com recuperação ativa, catalogada como recuperação ativa (RA). O tratamento RP está localizado em um trecho de floresta secundária formada a partir do abandono de pastagens há mais de 20 anos e que não houve intervenção humana desde então. O tratamento RD possui as mesmas características que o RP, no entanto passou por duas estratégias de manejo, a aceleração da regeneração natural e o enriquecimento da vegetação com o plantio de espécies florestais madeireiras. Já o

tratamento RA está sob processo de recuperação ativa desde 2001, e houve a instalação de um sistema silvipastoril com espaçamento no sistema florestal 4 x 4 m composto por oito espécies florestais, nativas e exóticas e com proporções diferentes, além da presença de ovinos (Schaefer et al., 2022).

As parcelas continham dimensões de 100 x 100 m composta cada uma por 10 subparcelas de 10 x 10 m devidamente enumeradas (Figura 2). As sinalizações foram realizadas com canos de policloreto de vinila (PVC), alocados nas trilhas de acesso das parcelas e subparcelas. A delimitação da área de coleta foi realizada pelo método do triângulo retângulo e por balizamento com ângulos de 90° a partir dos cantos das parcelas, seguindo o protocolo de estabelecimento e remedição Rainfor (Phillips et al., 2016). Após esses procedimentos, foram definidas as coordenadas dos vértices das parcelas.

A realização do primeiro inventário ocorreu em agosto de 2018 para a RP, em abril de 2018 para o RD e, em dezembro de 2017, para a RA. As remedições foram realizadas em intervalos de 2 anos, totalizando três medições para cada tratamento até o momento.

Figura 2: Encaminhamento numerativo das subparcelas de cada tratamento, recuperação passiva, dirigida e ativa na área de estudo, Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

10	11	30	31	50	51	70	71	90	91
9	12	29	32	49	52	69	72	89	92
8	13	28	33	48	53	68	73	88	93
7	14	27	34	47	54	67	74	87	94
6	15	26	35	46	55	66	75	86	95
5	16	25	36	45	56	65	76	85	96
4	17	24	37	44	57	64	77	84	97
3	18	23	38	43	58	63	78	83	98
2	19	22	39	42	59	62	79	82	99
1	20	21	40	41	60	61	80	81	100

5.3 Mensuração dos indivíduos em campo

O levantamento dos indivíduos em campo nas subparcelas ocorreu com a mensuração da circunferência a altura do peito (CAP) de todos os indivíduos arbóreos com diâmetro a altura do peito (DAP) $\geq 3,3$ cm, sendo considerado nos casos de rebrotações com DAP acima

ou igual a 5 cm indivíduos separados. Todos os indivíduos foram identificados e numerados com uma placa de alumínio. As variáveis levantadas foram: altura estimada (m), CAP (cm), incidência de luz e, presença de cipós. Cada espécie também passou pelo processo de identificação taxonômica no Herbário IAN da Embrapa Amazônia Oriental. Para a obtenção do DAP utilizou-se CAP convertido, que foi obtido com o auxílio de fitas métricas e após a mensuração do CAP, o ponto de medição foi demarcado com tinta vermelha a base de óleo para auxiliar em remediações futuras (Schaefer et al., 2022).

5.4 Distribuição diamétrica e acúmulo de carbono por espécie

Para a comparação entre os tratamentos RP, RD e RA, na análise de campo, foi avaliado o número de indivíduos por classe diamétrica, em intervalos de 10 cm de DAP, o objetivo foi analisar a sustentabilidade e a resiliência de cada área, aspecto relacionado à presença de uma distribuição do tipo exponencial negativa. Complementarmente, realizou-se a segmentação das espécies com base no carbono acumulado por ano, por tratamento e pela quantidade de indivíduos, sendo utilizada para o carbono acumulado a base das estimativas alométricas. Para essa análise, foram elaborados histogramas que consideraram as 15 espécies mais representativas com os dados por tratamento individual nos anos de 2018, 2020 e 2022 e outro com os três tratamentos conjuntos e considerando cada ano de mensuração.

5.5 Predição do carbono estocado por modelo alométrica

O modelo alométrico (MA) utilizado para estimar a biomassa baseou-se nos estudos de Ducey et al. (2009) desenvolvida para florestas secundárias e voltados à estimativa da biomassa seca dos indivíduos. O modelo selecionado foi de entrada única, tendo o DAP como variável independente (Tabela 1). Essa escolha deve-se ao fato de o DAP apresentar baixa margem de erro durante a mensuração, o que confere maior confiabilidade às estimativas. Outro fator determinante na adoção do modelo de Ducey et al. (2009) foi a similaridade ecológica entre a área de estudo e as parcelas originais utilizadas na modelagem, o que assegura maior representatividade das espécies locais e minimiza os erros decorrentes do uso de modelo genéricos.

Tabela 1: Modelo alométrico utilizado no estudo com DAP como variável independente.

Equação	α	β	Espécie
$BAS = \alpha * (DAP^\beta)$	0,14978	3,5763	<i>Abarema jupunha</i>
	0,32982	1,7336	<i>Casearia javitensis</i>
	0,044856	3,1285	<i>Lacistema pubescens</i>
	0,14988	3,093	<i>Myrcia sylvatica</i>
	0,098412	2,6117	<i>Ocotea guianensis</i>
	0,28772	2,2747	<i>Poecilanthe effuse</i>
	0,2897	2,0468	<i>Vismia guianensis</i>
	0,2237	2,260	Geral

Ducey et al. (2009). Em que: BAS é biomassa acima do solo.

Após a estimativa da biomassa por meio do MA, foi aplicada a conversão para carbono acumulado (Equação 1), conforme as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Para isso utilizou-se o fator de conversão de 47% recomendado para indivíduos arbóreos, valor que está em conformidade com o intervalo de teor de carbono identificado por Higuchi e Carvalho Jr. (1994) para a Floresta Amazônica, que varia entre 46% e 52%.

$$C = BAS * TC \quad (1)$$

Em que: C = carbono acumulado, em megagramas; BAS = biomassa acima do solo, em megagramas; TC = teor de carbono (47%).

5.6 Análise estatística

Os resultados estimados foram organizados no RStudio para análise e comparação entre os tratamentos por ano. As análises estatísticas adotaram testes não paramétricos em decorrência do não atendimento dos pressupostos básicos de normalidade e homoscedasticidade dos testes paramétricos. Desse modo, os testes aplicados foram o de Kruskal-Wallis para identificação de diferenças significativas entre os tratamentos em cada ano mensurado, 2018, 2020 e 2022, e o teste de Dunn para determinar quais tratamentos foram considerados diferentes.

6 Resultados

6.1 Distribuição Diamétrica

As três áreas analisadas apresentaram distribuição diamétrica em exponencial negativa (J-reverso), comportamento caracterizado por um maior número de indivíduos nas menores classes de diâmetro, a qual diminui com o aumento do tamanho das classes. No entanto, na área de RA, apresentou menor número de indivíduos na base da curva em relação às demais áreas no ano de 2018, sendo mais expressiva em 2020 (Figura 3).

Em relação ao estoque de carbono de acordo com a classes de diâmetro, a maior concentração de carbono ocorreu nas classes entre 10 e 40 cm, com os tratamentos RA e RP. Para a RD essa classe de concentração foi distinta, entre 0 a 20 cm (Tabela 2), fator que pode estar relacionado ao histórico de uso da área, que possui a remoção de indivíduos com DAPs maiores. Esta remoção pode ter alterado a distribuição dos indivíduos, aspecto reforçado pelo maior quantitativo de indivíduos nas classes de 0-10 cm de DAP, possivelmente decorrente da maior disponibilidade de luz, o que favorece novos indivíduos.

Figura 3: Distribuição diamétrica dos tratamentos conforme o quantitativo de indivíduos por classe e ano.

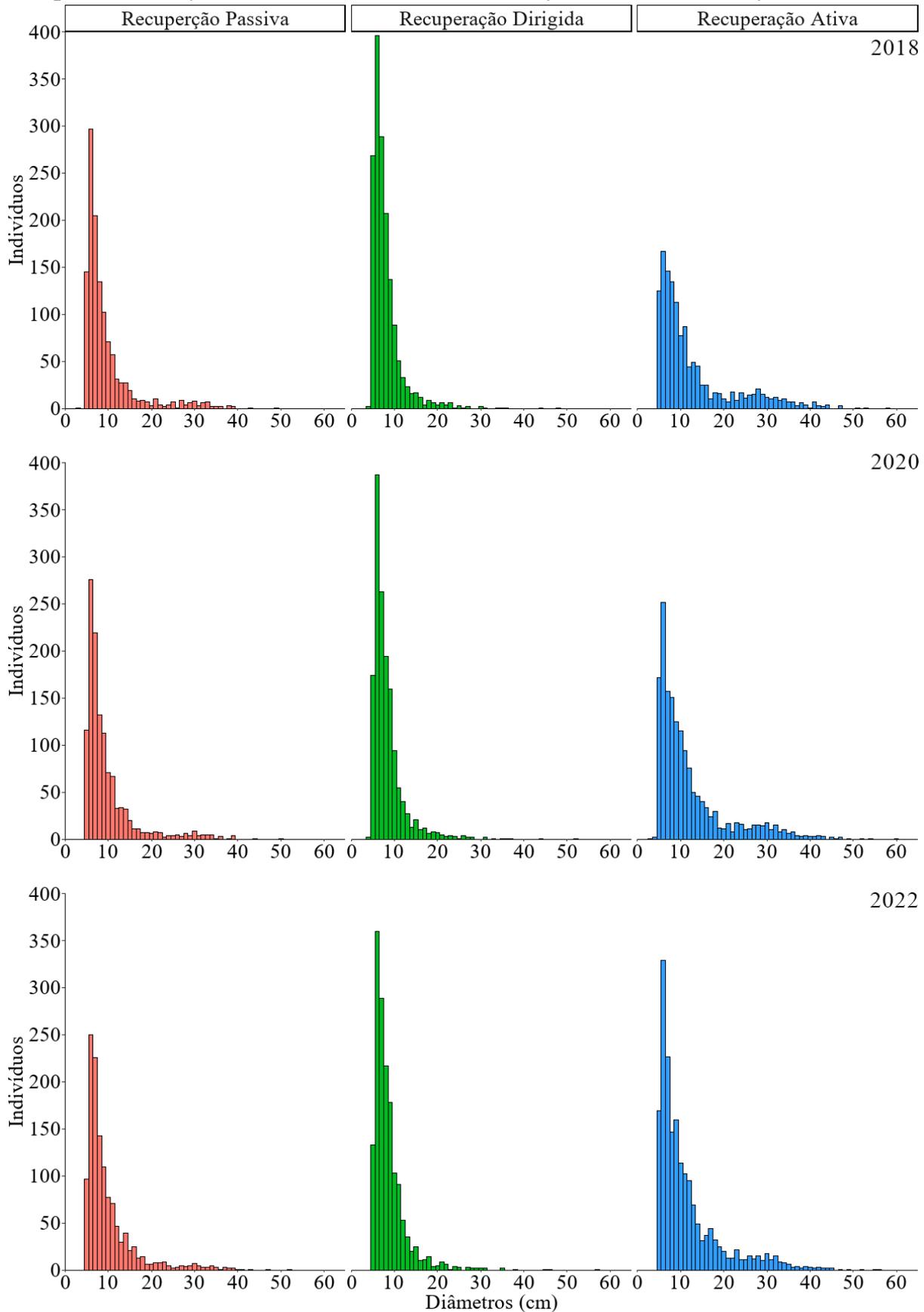


Tabela 2: Quantitativo de indivíduos por classe de diâmetro (DAP) e carbono acumulado em megagramas por hectare segmentado conforme o ano e tratamento.

Classe de DAP	Ano	Recuperação Passiva		Recuperação Dirigida		Recuperação Ativa	
		Indivíduos	Carbono	Indivíduos	Carbono	Indivíduos	Carbono
0 – 10	2018	921	8,1998	1353	11,8724	729	6,4103
	2020	891	8,1360	1229	11,2196	926	8,1660
	2022	875	8,3452	1239	12,0315	1094	10,2180
10 – 20	2018	231	10,1157	210	7,4173	357	13,1621
	2020	260	11,2448	241	8,6166	459	17,1124
	2022	297	14,0942	307	10,8044	549	21,6584
20 – 30	2018	56	15,9697	25	3,2603	140	22,5360
	2020	50	11,7445	27	3,5996	143	22,3104
	2022	55	11,8026	34	4,7157	137	20,7878
30 – 40	2018	28	26,5363	5	1,4863	73	22,5761
	2020	34	31,2537	6	1,8301	77	23,6509
	2022	31	29,1975	5	1,5417	75	22,4365
40 – 50	2018	2	1,2491	2	1,2218	19	10,0816
	2020	2	1,2830	1	0,5676	16	8,7802
	2022	4	5,6489	2	1,1978	13	7,1536
50 – 60	2018	-	-	-	-	3	2,6912
	2020	-	-	1	0,8320	3	2,8612
	2022	1	0,8331	1	1,0029	3	2,7398

6.2 Análises estatística alométria

Houve diferença estatística significativa entre as áreas ao longo dos três anos avaliados, com distinções entre todos os tratamentos nos três anos analisados, sugerindo que o tratamento aplicado influenciou diretamente no estoque de carbono nas três áreas analisadas, RP, RD e RA, nos três anos levantados, 2018, 2020 e 2022 (Tabela 3).

Para o estoque de carbono, a área de RA destacou-se nos três anos avaliados, com uma contribuição de 47% em 2018, 47,85% em 2020 e 45,64% em 2022, o que corresponde a 77,46, 82,88 e 84,99 Mg/ha, respectivamente, de um total de 164,79, 173,21 e 186,21 Mg/ha por ano. O segundo maior estoque de carbono foi da RP nos respectivos anos analisados (Figura 4).

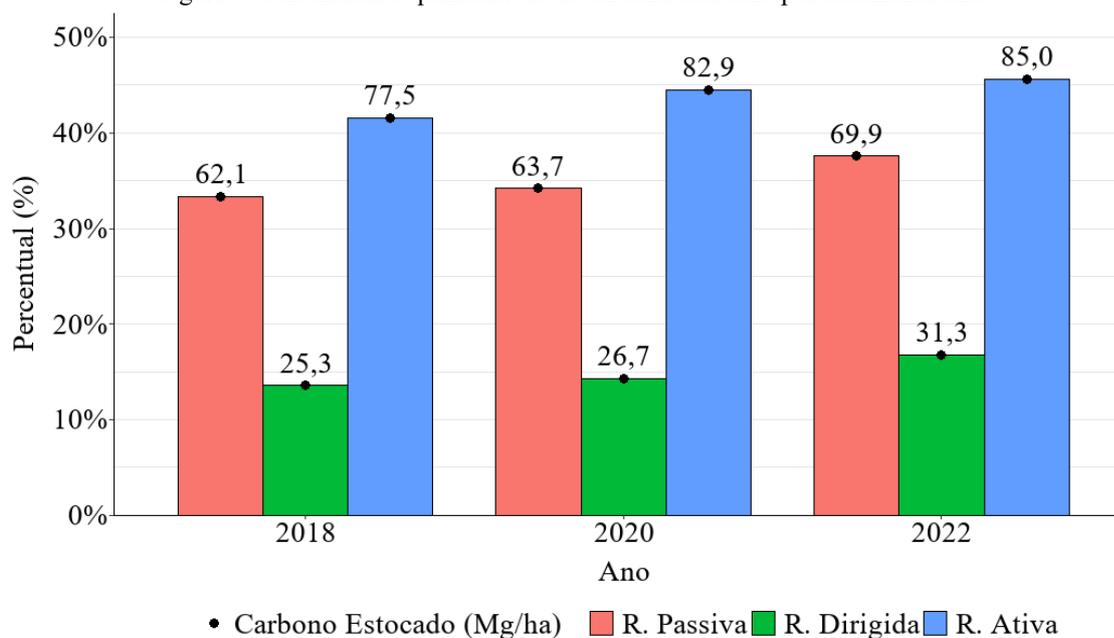
Os resultados indicaram que a prática de RA foi mais eficaz no estoque de carbono. Em contrapartida, o tratamento RD apresentou os menores quantitativos, sugerindo que a remoção de indivíduos, em um primeiro momento, pode estar impactando significativamente a fixação e o estoque de carbono nessa floresta.

Tabela 3: Comparação do estoque de carbono dos tratamentos por meio do teste de Dunn para verificação de diferenças significativas

Ano	Tratamentos	P valor
2018	R. Passiva - R. Dirigida	2,45e ⁻⁰⁷
	R. Passiva - R. Ativa	3,59e ⁻²¹
	R. Dirigida - R. Ativa	1,49e ⁻⁵⁴
2020	R. Passiva - R. Dirigida	2,45e ⁻⁰⁷
	R. Passiva - R. Ativa	3,59e ⁻²¹
	R. Dirigida - R. Ativa	1,49e ⁻⁵⁴
2022	R. Passiva - R. Dirigida	1,44e ⁻⁰⁵
	R. Passiva - R. Ativa	1,11e ⁻¹¹
	R. Dirigida - R. Ativa	6,12e ⁻³⁴

*R. representa Recuperação

Figura 4: Percentuais e quantitativos de carbono estocado por tratamento/ano.



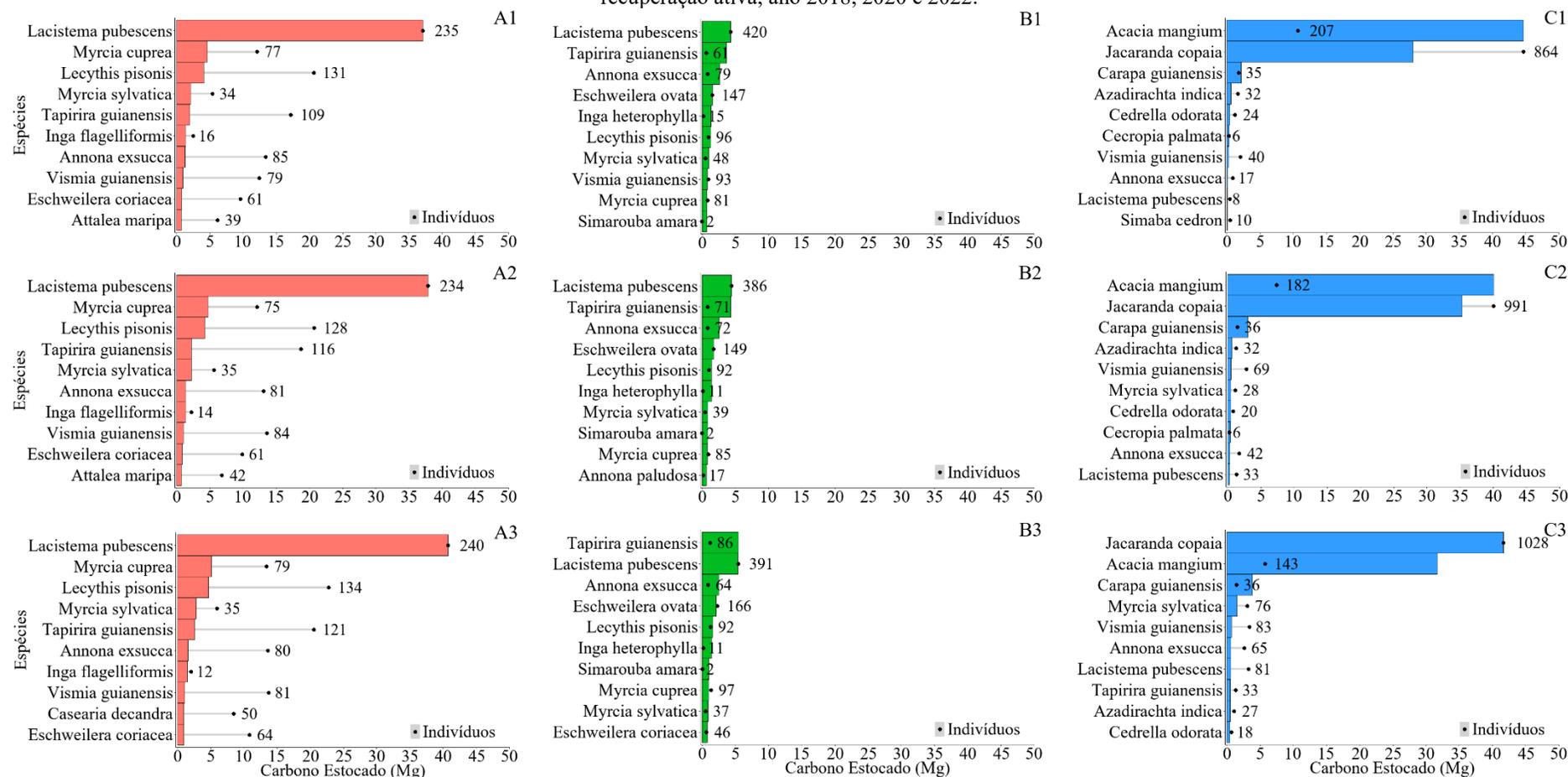
6.3 Carbono estocado por espécie

Ao analisar o carbono total estocado por espécie nas áreas nos diferentes anos, nota-se que os maiores estoques ocorreram em espécies distintas (Figura 5). No ano de 2018, as espécies *Lacistema pubescens*, *Myrcia cuprea* e *Lecythis pisonis* apresentaram as maiores contribuições na área RP (Figura 5 A1). Para o RD, foram as espécies *L. pubescens*, *Tapirira*

guianensis e *Annona exsucca* (Figura 5 B1). Já na RA, as espécies *Acacia mangium*, *Jacaranda copaia* e *Carapa guianensis* foram as que mais estocaram carbono (Figura 5 C1). Essas diferenças podem estar relacionadas ao histórico da área, a exemplo, a RA em que houve estimulação e implantação de espécies, como a *A. mangium* a qual possui uma geração de biomassa e cobertura elevada, o que contribuiu para o estoque de carbono.

Em 2020, as três primeiras espécies, nos tratamentos individualizados, se mantiveram, havendo somente a substituição de algumas entre as dez primeiras (Figuras 5 A2, B2, C2). Para 2022 a espécie *J. copaia* apresentou maior quantitativo de carbono e de indivíduos na área de RA (Figuras 5 A3, B3, C3). Essa tendência pode estar relacionada a alta densidade de indivíduos e o rápido crescimento, além da alta mortalidade da *A. mangium*, o que aumenta a incidência de luz no interior da floresta e colabora com o estabelecimento de espécies demandantes de luz como a *J. copaia*.

Figura 5 A1| A2| A3: Estoque de carbono em megagramas das dez primeiras espécies com seu respectivo quantitativo de indivíduos no tratamento recuperação passiva, ano 2018, 2020 e 2022; B1| B2| B3: Estoque de carbono em megagramas das dez primeiras espécies com seu respectivo quantitativo de indivíduos no tratamento recuperação dirigida, ano 2018, 2020 e 2022; C1| C2| C3: Estoque de carbono em megagramas das dez primeiras espécies com seu respectivo quantitativo de indivíduos no tratamento recuperação ativa, ano 2018, 2020 e 2022.



6.4 Carbono acumulado nos tratamentos de recuperação

Ao verificar o acúmulo de carbono nas recuperações analisadas ao longo do tempo, notou-se um aumento quando considerado os três anos estudados. Contudo, observou-se uma desaceleração na taxa de crescimento na RA entre 2020 e 2022, enquanto que na RP e RD tiveram um aumento no mesmo período (Figura 6).

Ao aplicar essa análise para as classes diamétricas, o RP registrou um aumento nas classes de 10-20 cm e 40-50 cm, uma redução nas de 20-30 cm e 30-40 cm, estabilidade em 0-10 cm e o surgimento da classe de 50-60 cm em 2022 (Figura 7). Para a RD, a classe de 30-40 cm apresentou uma redução em 2022 e as demais um em elevação no acúmulo desde o primeiro ano mensurado (Figura 7). Já a RA, determinadas classes demonstraram uma redução desde 2018, como as de 20-30 cm e 40-50 cm, e outras houve uma redução seguida de um aumento, a exemplo, da 30-40 cm, as demais classes evidenciaram um aumento no tempo, exceto a de 50-60 cm que se manteve estável (Figura 7).

Figura 6: Total de carbono acumulado em megagrama nos tratamentos recuperação passiva, dirigida e ativa nos 2018, 2020 e 2022.

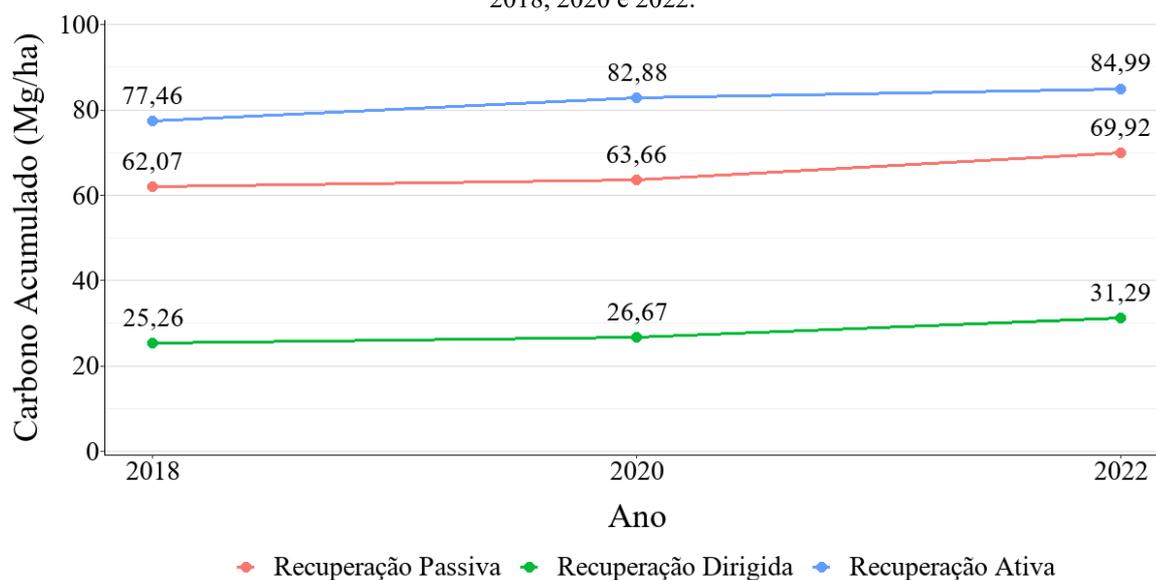
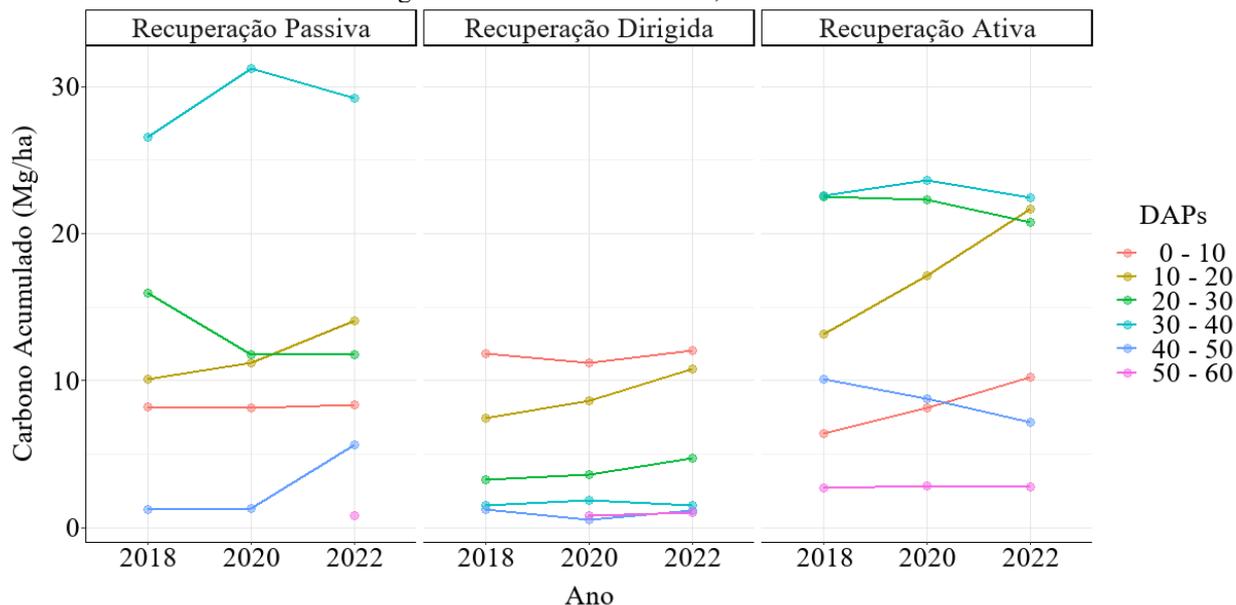


Figura 7: Total de carbono acumulado (Mg/ha) por classe diamétrica nos tratamentos recuperação passiva, dirigida e ativa nos anos de 2018, 2020 e 2022.



7 Discussão

7.1 Estoque de carbono em ecossistemas florestais em sucessão ecológica

Os resultados obtidos de carbono estocado por meio do MA indica que a área está em processo de aumento de biomassa, uma característica típica de ambientes em sucessão (Zanini, 2018; Shimamoto et al., 2018; Liu et al., 2023). Esse padrão é comum em áreas que passam por regeneração natural ou locais em que os impactos negativos a ambientes florestais cessaram, o que permite o retorno do desenvolvimento da vegetação no tempo, aspecto também reforçado pela exponencial negativa encontrada, em que, muitas vezes, representa a capacidade de regeneração e resiliência da floresta (Saldarriaga et al., 1988; Liao, Liu e Xiao, 2022).

O aumento da biomassa, e conseqüentemente do carbono, tende a ocorrer de forma acentuada nas primeiras décadas de sucessão, impulsionado principalmente pelo rápido crescimento de espécies pioneiras (Uhl et al., 1988; Zanini, 2018; Liao, Liu e Xiao, 2022; Liu et al., 2023). Contudo, esses aumentos do estoque tendem a diminuir com o envelhecimento do povoamento e a substituição das espécies pioneiras por espécies de crescimento mais lento, o que reduz os incrementos anuais de biomassa e levando a uma estabilização do carbono estocado (Uhl et al., 1988; Zanini, 2018; Liao, Liu e Xiao, 2022; Liu et al., 2023).

Esse padrão foi constatado por Saldarriaga et al. (1988) que observaram um crescimento contínuo da biomassa ao longo de 40 anos, antes de uma queda significativa nos

acréscimos anuais. De forma semelhante, Liu et al. (2023) verificaram aumentos progressivos do estoque de carbono durante os primeiros 30 anos antes da diminuição em uma área degradada.

Esse estoque de carbono é afetado por diversos fatores, a exemplo, pela remoção de indivíduos, questão essa que pode prejudicar a categorização adequada do estágio sucessional, além de dificultar o progresso da recuperação, tornando-a mais lenta ou até ineficaz. Esse fator dificulta a compreensão do sucesso ou não da prática de recuperação empregada, o que pode inviabilizar decisões de correções, haja vista que o carbono estocado é uma variável que pode ser utilizada para acompanhar o processo de recomposição da área (Zanini et al., 2021; Uhl et al., 1988; Poorter et al., 2021; Latterini et al. 2023).

A recuperação da vegetação ou a interrupção dos fatores degradantes mostra-se, muitas vezes, suficiente para gerar uma captura e estoque de carbono adequada, uma vez que transforma uma área emissora em sequestradora de carbono, o que contribui para a proteção da biodiversidade e a melhoria dos atributos do solo, além de auxiliar no combate mitigação da mudança climática (Lu et al., 2018; Liao, Liu e Xiao, 2022; Verly, 2021; Shimamoto et al., 2018; Poorter et al., 2021).

Outra questão com forte contribuição para o aumento do carbono é o estabelecimento de indivíduos com rápida geração de biomassa, como realizado no tratamento recuperação com a espécie *A. mangium*, que possui considerável destaque nesse objetivo (Koutika e Richardson, 2019). Essa questão pode ter auxiliado para o maior acúmulo de carbono, além de ter acelerado a recuperação da área, porém a espécie é considerada invasora em muitos ambientes, o que pode prejudicar a estabilidade do meio a longo prazo (Matos et al., 2020; Osuri et al., 2019; Zanini et al., 2021; Martins et al, 2020; Martins et al, 2020; Koutika e Richardson, 2019).

7.2 Distribuição diamétrica de áreas degradadas

A distribuição observada nas áreas de RP e RA em 2022 indica que a floresta apresenta um baixo nível de perturbação, evidenciado pelo maior quantitativo de indivíduos em classes diamétricas inferiores e a diminuição dos indivíduos com o aumento dessas classes (Caliman et al., 2020). Esse padrão de distribuição é amplamente utilizado no manejo florestal para controlar a intensidade de corte, pois permite avaliar tanto a área basal remanescente quanto sua distribuição entre as classes de diâmetro, uma vez que perturbações podem influenciar diretamente nessa estrutura (Caliman et al., 2020, Moura et al., 2022).

7.3 Modelo alométrico para floresta secundária

A identificação de espécies semelhantes às encontradas por Ducey et al. (2009) no desenvolvimento do modelo alométrico, como *L. pubescens* e *M. sylvatica*, reforça a similaridade entre as características de floresta secundária em recuperação em ambas as regiões. As espécies e a proximidade geográfica entre os estudos, cerca de 40 km, contribui para a redução de erros associados ao uso de estimativas inadequadas ou genéricas, tornando as estimativas do estoque de carbono mais confiáveis (Amaro, 2010; Woortmann et al., 2018; Romero et al., 2022; Nelson et al., 1999; Ducey et al., 2009).

Interligado a essas características, as variáveis utilizadas também possuem influência nos valores obtidos, a qual a inclusão de dados não confiáveis, como a altura estimada, em muitos casos, pode resultar em quantificações inconsistentes de biomassa e de carbono. Nesse contexto, o uso de apenas o DAP no modelo alométrica tende a produzir resultados mais confiáveis do que a utilização de dupla entrada, DAP e altura estimada, apesar das subestimações já vinculadas ao modelo alométrico e os erros inerentes ao processo de amostragem (Nelson et al., 1999; Chaves et al., 2005; Chaves et al., 2014).

Outro ponto de destaque são as conversões de biomassa para carbono acumulado, que apresenta variações de acordo com o autor ou área estudada, característica que dificulta o estabelecimento de um percentual universal. Tais variações são decorrentes da influência do clima, tipo de solo, composição da vegetação entre outros fatores ambientais, assim como ocorre nos modelos alométrico (Zanini, 2018; Nelson et al., 1999; Ducey et al., 2009; Araujo et al., 2023). No entanto, essas flutuações de conversão de biomassa para carbono são próximas, a exemplo, do estudo de Zanini (2018) com 45,3%, Vieira et al. (2011) com 46,05% e Higuchi e Carvalho Jr. (1994) entre 46% a 52%, sendo esse último autor, responsável pelo estabelecimento oficial dos limites utilizados pelo IPCC (2006) de 47%, percentual aplicado no estudo.

Desta forma, considerando essas características, as estimativas obtidas para o tratamento recuperação no período estudado estão próximos ao registrado por Piva et al. (2021), que utilizando diferentes modelos alométricos para a tipologia florestal Ombrófila densa encontraram valores entre 75,02 a 84,42 Mg/ha. Esse intervalo está acima do apresentado pela RP, fator que pode estar relacionado à maturidade da floresta, modelo alométrico utilizado ou em distinções da intensidade da degradação entre as áreas, como já

destacado por diversos autores (Uhl et al., 1988; Nelson et al., 1999; Ducey et al., 2009; Romero et al., 2020).

Essas divergências ocorrem em decorrência das estruturas distintas dos modelos alométricos, resultando em variações significativas nas predições (Romero et al., 2020). Esse comportamento foi testado por Nelson et al. (1999) e Ducey et al. (2009) em florestas secundárias, os quais observaram faixas ideais de DAP para cada modelo alométrico analisadas, tendo, nessas faixas, uma redução das superestimativas ou subestimativas, porém, que são diferentes para cada ecossistema, povoamento, floresta ou modelo.

Associado a esse aspecto, autores como Baccini et al. (2012), Saatchi et al. (2011) e Jiang et al. (2020) também evidenciam incertezas nas predições de biomassa na Amazônia brasileira, sendo atribuído a variabilidades das áreas como, diferenças regionais, espécies, estrutura da floresta, ao número reduzido de observações de campo, entre outros fatores. Essa limitação pode estar associada aos levantamentos de campo, que de acordo com Tejada et al. (2019), em seu trabalho na Amazônia brasileira, destacou que o monitoramento em campo com parcelas permanentes cobriria apenas 0,0013% da Amazônia. Em uma abordagem otimista, chegaria até 17%, valores insatisfatórios dada a complexidade dessa floresta.

8 Conclusão

Os tratamentos RP, RD e RA demonstraram diferenças na distribuição diamétrica e no estoque de carbono, tendo a RA com o maior estoque nos três anos avaliados e a RD o menor. Considerando o estoque de carbono por espécie, a *L. pubescens* destacou-se na RP e RD em todos os anos. Na RA a espécie *A. mangium* se promoveu o maior estoque inicialmente, posteriormente, 2022, a espécie *J. copaia* obteve o maior quantitativo de indivíduos e estoque de carbono.

Conclui-se que o estoque de carbono em floresta secundária predito por MA é afetado pela prática de recuperação aplicada, o que influencia nas classes que estão concentração esse carbono, as espécies responsáveis por esse estoque e nos quantitativos total de carbono no tratamento.

Nesse contexto, é fundamental utilizar e desenvolver modelos e estudos para florestas secundárias, haja vista que cada formação florestal possui suas características e que afetam as predições de carbono estocado, gerando a necessidade de pesquisas que considerem a floresta estudada e o contexto a qual ela se inclui.

9 Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift. v. 22, n. 6, dez. 2013. Schweizerbart, 711-728 p. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMARO, M.A. **Quantificação do Estoque Volumétrico de Biomassa e de Carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual on Município de Viçosa-MG**. 2010. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ARAÚJO, T.M; HIGUCHI, N.; J.A.C. JÚNIOR. **Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil**. Elsevier, Ss, v. 117, p. 43-52, ago. 1998.

ARAUJO, E.C.G.; SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P.D.; PELISSARI, A.L.; ORSO, G.A.; SILVA, T.C. **Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon**. Journal Of Environmental Management, v. 331, p. 117251, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117251>.

BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; WALKER, W. S.; LAPORTE, N. T.; SUN, M.; SULLAMENASHE, D.; HACKLER, J.; BECK, P. S. A.; DUBAYAH, R.; FRIEDL, M. A. **Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps**. Nature Climate Change, v. 2, n. 3, p. 182-185, 29 jan. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1354>.

BARBOSA, Rodrigo de Sousa. **Técnicas de restauração florestal em áreas mineradas e definição de espécies chaves para a Amazônia Oriental**. 2021. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2021.

BRASIL. **Agência Nacional de Mineração** – 2009. Disponível em: Outras Publicações - Agência Nacional de Mineração (www.gov.br). Acesso em: 01/01/2024.

BRASIL. **Constituição Da República Federativa Do Brasil De 1988** – 1998. Disponível em: [Constituição \(planalto.gov.br\)](http://www.planalto.gov.br). Acesso em: 01/01/2024.

BRASIL. **Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)** - 2009. Disponível em: [L12187 \(planalto.gov.br\)](http://www.planalto.gov.br). Acesso em: 01/01/2024.

CALIMAN, J.P.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; LEITE, H.G.; TORRES, C.M.M.E.; VOLPATO, M.M.L.; RESENDE, R.T.; MONTE, M.A. **Temporal and spatial variability of the diameter distribution in a secondary brazilian atlantic forest suggests site-specific management practices**. Revista Árvore, Viçosa, v. 44, n. 1, p. 1-13, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-908820200000006>.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. Oecologia, v. 145, n. 1, p. 87-99, 22 jun. 2005. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÖRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSSIDE, P.M.; GOODMAN, R.C. **Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees.** *Global Change Biology*. v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 21 jun. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12629>.

DUCEY, M.J.; ZARIN, D.J.; VASCONCELOS, S.S.; ARAÚJO, M.M. **Biomass equations for forest regrowth in the eastern Amazon using randomized branch sampling.** *Acta Amazonica, Castanhal*, v. 39, n. 2, p. 349-360, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672009000200013>.

FERNÁNDEZ-URRUTIA, M.; GIL, A. Resource Communication: ForestAz - Using Google Earth Engine and Sentinel data for forest monitoring in the Azores Islands (Portugal). *Forest Systems*, v. 31, n. 2, p. eRC01, 11 jul. 2022. Doi: <https://doi.org/10.5424/fs/2022312-18929>.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **A importância das florestas em pé - IPAM Amazônia**, acesso em: 25/03/2024.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use - Chapter 4: Forest Land. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

JIANG, X.; LI, G., LU, D.; MORAN, E.; BATISTELLA, M. **Modeling Forest Aboveground Carbon Density in the Brazilian Amazon with Integration of MODIS and Airborne LiDAR Data.** *Remote Sensing*. v. 12, n. 3330, p. 1-25, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12203330>

MANZATO, C.L. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono na cultura do eucalipto por meio de sensoriamento remoto.** 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental, Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2018.

HIGUCHI, N. e CARVALHO Jr, J. A. **Biomassa florestal e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia.** Em: Emissão x Seqüestro de CO₂ - Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil. CVRD. p.125-153, 1995.

HIGUCHI, N., SANTOS, J., RIBEIRO, R.J., MINETTEY, L., BIOT, V. **Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira.** *Acta Amazonica*. v 28, n. 2, p 153–166. 1998. Doi: <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282166>.

HIGUCHI, F.G.; LIMA, A.J.N.; RIBEIRO, G.H.P.M.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. **Equações alométricas específicas: estimativas de biomassa para diferentes sítios da Amazônia brasileira.** In: LIMA, A.J.N.; DURGANTE, F.M.; CAMPOS, M.A.A.; SANTOS, J.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. Dinâmica Do Carbono Das Florestas Da Amazônia. Manaus: INPA, 2014. Cap. 2. p. 21-27.

HUETE, A. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI).** *Remote Sensing of Environment*, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. **Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS.** *Remote Sensing of Environment*, v. 49, n. 3, p. 224–234, 1994.

KAFY, A.; SAHA, M.; FATTAH, M.A.; RAHMAN, M.T.; DUTI, B.M.; RAHAMAN, Z.A.; BAKSHI, A.; KALAIVANI, S.; RAHAMAN, S.N.; SATTAR, G.S. **Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: leveraging google earth engine and invest model to inform conservation in hilly regions**. *Ecological Indicators*, v. 152, p. 11074, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110374>.

KARYATI, I. B.; IPOR, I.; JUSOH, I.; WASLI, M. E. Allometric equations to estimate the above-ground biomass of trees in the tropical secondary forests of different ages. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 20, n. 9, 5 ago. 2019. Doi: <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200901>

KETTERINGS, Q.M.; COE, R.; VAN NOORDWIJK, M.; AMBAGAU, Y.; PALM, C.A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, v. 146, n.1-3, p. 199–209, jun. 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)

KOUTIKA, L. e RICHARDSON, D.M. *Acacia mangium* Willd: benefits and threats associated with its increasing use around the world. *Forest Ecosystems*, v.6, n.2, p.1-13, 2019.Doi: <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0159-1>

LATTERINI, F.; MEDERSKI, P.S.; JAEGER, D.; VENANZI, R.; TAVANKAR, F.; PICCHIO, R. The Influence of Various Silvicultural Treatments and Forest Operations on Tree Species Biodiversity. **Current Forestry Reports**, v. 9, n. 2, p. 59-71, 28 fev. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40725-023-00179-0>.

LIAO, Q.; LIU, X.; XIAO, M. **Ecological restoration and carbon sequestration regulation of mining areas - a case study of Huangshi city**. *International Journal of Environmental Research and Public Health, China*, v. 19, n. 7, p. 4175, mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19074175>.

LIU, J.; GAO, W.; LIU, T.; DAI, L.; WU, L.; MIAO, H.; YANG, C. **A bibliometric analysis of the impact of ecological restoration on carbon sequestration in ecosystems**. *Forests, China*, v. 14, n. 7, p. 1442, jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/f14071442>.

LU, F.; HU, H.; SUN, W.; ZHU, J.; LIU, G.; ZHOU, W.; ZHANG, Q.; SHI, P.; LIU, X.; WU, X. **Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 16, p. 4039-4044, 16 abr. 2018. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1700294115>.

MATOS, F.A. R.; MAGNAGO, L.F.S.; MIRANDA, C.A.C.; MENEZES, L.F.T.; GASTAUER, M.; SAFAR, N.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, M.P.; SIMONELLI, M.; EDWARDS, F.A. **Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits**. *Global Change Biology*, v. 26, n. 2, p. 509-522, 2 nov. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14824>.

MARTINS, W.B.R.; LIMA, M.D.R.; BARROS, J.U.O.; AMORIM, L.S.V.; OLIVEIRA, F.A.; SCHWARTZ, G. **Ecological methods and indicators for recovering and monitoring**

ecosystems after mining: a global literature review. *Ecological Engineering*, Belém/PA, v. 145, p. 13, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>.

MARTINS, W.B.R. **Restauração de ecossistemas degradados pela mineração na amazônia oriental.** 2020. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2020.

MARTINS, W.B.R.; RODRIGUES, J.I.M.; OLIVEIRA, V.P.; RIBEIRO, S.S.; BARROS, W.S.; SCHWARTZ, G. **Mining in the Amazon: importance, impacts, and challenges to restore degraded ecosystems. are we on the right way?.** *Ecological Engineering*, v. 174, p. 106468, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106468>.

MANZATO, C.L. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono na cultura do eucalipto por meio de sensoriamento remoto.** 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental, Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2018.

MOURA, M.; SANQUETTA, M., SANQUETTA, C.; BASTOS, A.; CORTE, A. **Dynamics of biomass stocks in areas of secondary forest located in Western Amazon between 2016 and 2020.** *Agriculture and Forestry*, v. 68, n. 1, p. 7-23, 2021. doi:10.17707/AgricultForest.68.1.01

NAKAI, Érica Silva. **Quantificação da biomassa e estoque de carbono em diferentes coberturas vegetais por meio de sensoriamento remoto.** 2016. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016.

NELSON, B.W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J.L.G.; SOUZA, S.G.A. de; BATISTA, G.T.; COUTO, L.B. **Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon.** *Forest Ecology and Management*, v. 117, n. 3, p 149-167, 1999.

NYTCH, C.J.; ROJAS-SANDOVAL, J.; OLIVERAS, A.E.; GARCÍA, R.J.S.; MELÉNDEZ-ACKERMAN, E.J. **Effects of historical land use and recovery pathways on composition, structure, ecological function, and ecosystem services in a Caribbean secondary forest.** *Forest Ecology and Management*, San Juan, USA, v. 546, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121311>.

OSURI, A.M., KASINATHAN, S., SIDDHARTHA, M.K., MUDAPPA, D., RAMAN, T.S. **Effects of restoration on tree communities and carbon storage in rainforest fragments of the Western Ghats, India.** *Ecosphere* v.10, n.9, p.1-13. 2019. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2860>

PIVA, L.R.O.; SANQUETTA, C.R.; WOJCIECHOWSKI, J.; CORTE, A.P.D. **Estoques de biomassa e carbono na Amazônia brasileira: uma nova abordagem.** *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 2, p. 1-20, 1 dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14supl.2.e8820>.

PHILLIPS, O.; BAKER, T.; FELDPAUSCH, T.; BRIENEN, R. **Manual de Campo para o estabelecimento e remediação de parcelas da RAINFOR.**: The Royal Society, 2016. 29 p.

POORTER, L.; CRAVEN, D.; JAKOVAC, C.C.; SANDE, M.T. van der; AMISSAH, L.; BONGERS, F.; CHAZDON, R.L.; FARRIOR, C.E.; KAMBACH, S.; MEAVE, J.A.; MUÑOZ, R.; NORDEN, N.; RÜGER, N.; BREUGEL, M. van; ALMEYDA ZAMBRANO, A.M.; AMANI, B.; ANDRADE, J.L.; BRANCALION, P.H.S.; BROADBENT, E.N.; FORESTA, H. de; DENT, D.H.; DERROIRE, G.; DEWALT, S.J.; DUPUY, J.M.; DURÁN, S.M.; FANTINI, A.C.; FINEGAN, B.; HERNÁNDEZ-JARAMILLO, A.; HERNÁNDEZ-STEFANONI, J.L.; HIETZ, P.; JUNQUEIRA, A.B.; N'DJA, J.K.; LETCHER, S.G.; LOHBECK, M.; LÓPEZ-CAMACHO, R.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; MELO, F.P.L.; MORA, F.; MÜLLER, S.C.; N'GUESSAN, A.E.; OBERLEITNER, F.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; PÉREZ-GARCÍA, E.A.; PINHO, B.X.; PIOTTO, D.; POWERS, J.S.; RODRÍGUEZ-BURITICÁ, S.; ROZENDAAL, D.M.A.; RUÍZ, J.; TABARELLI, M.; TEIXEIRA, H.M.; SAMPAIO, E.V.S.B.; WAL, H. van der; VILLA, P.M.; FERNANDES, G.W.; SANTOS, B.A.; AGUILAR-CANO, J.; ALMEIDA-CORTEZ, J.S.; ALVAREZ-DAVILA, E.; ARREOLA-VILLA, F.; BALVANERA, P.; BECKNELL, J.M.; CABRAL, G.A.L.; CASTELLANOS-CASTRO, C.; JONG, B.H.J. de; NIETO, J.E.; ESPÍRITO-SANTO, M.M.; FANDINO, M.C.; GARCÍA, H.; GARCÍA-VILLALOBOS, D.; HALL, J.S.; IDÁRRAGA, A.; JIMÉNEZ-MONTOYA, J.; KENNARD, D.; MARÍN-SPIOTTA, E.; MESQUITA, R.; NUNES, Y.R.F.; OCHOA-GAONA, S.; PEÑA-CLAROS, M.; PÉREZ-CÁRDENAS, N.; RODRÍGUEZ-VELÁZQUEZ, J.; SANAPHRE VILLANUEVA, L.; SCHWARTZ, N.B.; STEININGER, M.K.; VELOSO, M.D.M.; VESTER, H.F.M.; VIEIRA, I.C.G.; WILLIAMSON, G.B.; ZANINI, K.; HÉRAULT, B. **Multidimensional tropical forest recovery**. *Science*, v. 374, n. 6573, p. 1370-1376, 10 dez. 2021. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.abh3629>.

ROMERO, F.M.B.; JACOVINE, L.A.G.; RIBEIRO, S.C.; TORRES, C.M.M.E.; SILVA, L. F.; GASPAS, R.O.; ROCHA, S.J.S.S.; STAUDHAMMER, C.L.; FEARNSSIDE, P.M. **Allometric Equations for Volume, Biomass, and Carbon in Commercial Stems Harvested in a Managed Forest in the Southwestern Amazon: a case study**. *Forests, Manaus*, v. 11, n. 8, p. 1-17, 11 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/fl11080874>.

ROMERO, F.M.B.; JACOVINE, L.A.G.; TORRES, C.M.M.E.; RIBEIRO, S.C.; ROCHA, S.J.S.S.; NOVAIS, T.N.O.; GASPAS, R.O.; SILVA, L.F.; VIDAL, E.; LEITE, H.G. **Aboveground biomass allometric models for large trees in southwestern Amazonia**. *Trees, Forests and People, Manaus*, v. 9, n. 100317, p. 1-13, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100317>.

SAATCHI, S.S.; HARRIS, N.L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E.T.A.; SALAS, W.; ZUTTA, B.R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S.L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. **Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents**. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 9899–9904. 2011 <https://doi.org/10.1073/pnas.101957610>

SALDARRIAGA J.G.; WEST D.C.; THARP M.L.; UHL C. **Long-term chronosequence of forest succession in the Upper Rio Negro of Colombia and Venezuela**. *Journal of Ecology*, 76, p. 938-958. 1988.

SCHAEFER, S.M., SCHWARTZ, G., SILVA, A.R., LUNZ, A.M., SOUSA, F.I.B., SANTIAGO, A.V., FERREIRA, F.N., SOARES, M.H.M., & FALESI, I.C. **Monitoramento da restauração florestal e do manejo de floresta secundária em propriedade rural do Nordeste Paraense**. Documentos, 478. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2022.

SHIMAMOTO, C.Y.; PADIAL, A.A.; ROSA, C.M.; MARQUES, M.C. M. **Restoration of ecosystem services in tropical forests: a global meta-analysis.** Plos One, Oregon, v. 13, n. 12, p. 1-16, 27 dez. 2018. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0208523>.

SPINOSA, A.; FUENTES-MONJARAZ, M.A.; SERAFY, G.E. **Assessing the use of sentinel-2 data for spatio-temporal upscaling of flux tower gross primary productivity measurements.** Remote Sensing, v. 15, n. 3, p. 562, 17 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15030562>.

SOUSA, J.H.S.; RIBEIRO, G.N.; FRANCISCO, P.R.M.; MORAES NETO, J.M.; MEDEIROS, P.C. **Classificação do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Sucuru utilizando o Google Earth Engine e aplicação do algoritmo Random Forest.** Campina Grande: Eptec, 2023. 86 p.

TEJADA, G.; GÖRGENS, E.B.; ESPÍRITO-SANTO, F.D.B.; CANTINHO, R.Z.; OMETTO, J.P. Evaluating spatial coverage of data on the aboveground biomass in undisturbed forests in the Brazilian Amazon. **Carbon Balance and Management**, v. 14, n. 1, 3 set. 2019.

UHL, C.; BUSCHBACHER, R.; SERRÃO, E.A.S. **Abandoned pastures in eastern Amazonia. I. Patterns of plant succession.** journal of ecology, 76(3): 663-681. 1988. <https://doi.org/10.2307/2260566>

VALE, J.R.B.; PEREIRA, J.A.A.; CEREJA, S.S.A.; SOUSA, L.F.P. **Análise multitemporal do uso e cobertura da terra do município de Conceição do Araguaia-Pará através do Google Earth Engine.** Revista Cerrados, Montes Claros, v. 18, n. 02, p. 297-318, 16 out. 2020. Universidade Estadual de Montes Claros (UNIIMONTES). <http://dx.doi.org/10.46551/rc24482692202019>.

VAN BREUGEL, M.; RANSIJN, J.; CRAVEN, D.; BONGERS, F.; HALL, J.S. Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 8, p. 1648–1657, out. 2011.

VERLY, O.M. **Sensoriamento remoto na estimativa do estoque de carbono em fragmentos florestais da mata atlântica.** 2021. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

VIEIRA, S.A.; ALVES, L.F.; DUARTE-NETO, P.J.; MARTINS, S.C.; VEIGA, L.G.; SCARANELLO, M.A.; PICOLLO, M.C.; CAMARGO, P.B.; CARMO, J.B.; SOUSA NETO, E. **Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above- and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range.** Ecology and Evolution, Piracicaba, v. 1, n. 3, p. 421-434, 11 out. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.41>.

VIEIRA, S.; VILANOVA-TORRE, E.; VOS, V. A.; WANG, O.; ZARTMAN, C. E.; MALHI, Y.; PHILLIPS, O. L. **Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites.** Global Ecology and Biogeography, v. 23, n. 8, p. 935-946, 22 abr. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/geb.12168>.

WOORTMANN, C.P.I.B.; HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; SILVA, R.P. **Allometric equations for total, above- and below-ground biomass and carbon of the Amazonian forest type known as campinarana.** Acta Amazonica, Manaus, v. 48, n. 2, p. 85-92, abr. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201700673>.

ZANINI, A. M. **Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na Mata Atlântica.** 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2018.

ZANINI, A.M.; MAYRINCK, R.C.; VIEIRA, S.A.; CAMARGO, P.B.; RODRIGUES, R.R. **The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest.** Forest Ecology and Management, v. 481, p. 118734, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118734>.

10 Comparação da predição de carbono estocado por modelo alométrico e por Net Primary Productivity em uma floresta secundária na Amazônia Oriental

RESUMO

A pesquisa objetivou analisar dois métodos de predição do carbono estocado em uma área de floresta secundária, *Net Primary Productivity* (NPP) e modelo alométrico (MA). Foram comparados os estoques de carbono de três tratamentos de recuperação classificados conforme os critérios de intervenção: Recuperação Passiva, área sem manejo e sem interferência humana; Recuperação Dirigida, com práticas de manejo de baixo impacto, como extração seletiva de árvores e o enriquecimento com espécies; Recuperação Ativa, houve intervenções para acelerar a recuperação, como o plantio de espécies exóticas e nativas e a implantação de um sistema silvipastoril. Os dados foram obtidos em três anos, 2018, 2020 e 2022 e foram coletados na Fazenda Piave em Igarapé-Açu (PA). A área é considerada como floresta secundária em regeneração que decorreu de uma pastagem abandonada há mais de 20 anos. Para a predição de carbono por NPP, utilizou-se três escalas temporais, cena única, anual e sazonal (inverno e verão), todas acompanhando os anos de mensurações de campo. Já para o carbono por MA, se usou a biomassa predita para posteriormente utilizar um fator de conversão de 47%. As comparações entre NPP e MA foram conduzidas no RStudio e com o uso testes não paramétricos. Com isso, os testes demonstraram que o MA teve diferenças significativas no estoque de carbono conforme o método de recuperação aplicado, comportamento que não foi perceptível em todos os casos do NPP. Além disso, foi verificado superestimações da NPP em relação a MA, principalmente na sazonalidade de inverno, que obteve os menores estoques de carbono entre as predições de NPP. Outra questão verificada foi o não acúmulo de carbono no tempo para a cena única, como ocorrido no MA, esse comportamento somente foi perceptível nas médias anuais e sazonais. Em geral, a NPP superestimou consideravelmente os estoques de carbono obtidos por MA para todas as temporalidades analisadas, embora haja superestimações variadas conforme a margem temporal utilizada. Portanto o MA ainda é essencial para o monitoramento florestal, seja para prever o carbono estocado ou para validar as predições de carbono por NPP.

Palavras-chave: parcela permanente; sensoriamento remoto; recuperação de área degradada.

ABSTRACT

A pesquisa objetivou analisar dois métodos de predição do carbono estocado em uma área de floresta secundária, Net Primary Productivity (NPP) e modelo alométrico (MA). Foram comparados os estoques de carbono de três tratamentos de recuperação classificados conforme os critérios de intervenção: Recuperação Passiva, área sem manejo e sem interferência humana; Recuperação Dirigida, com práticas de manejo de baixo impacto, como extração seletiva de árvores e o enriquecimento com espécies; Recuperação Ativa, houve intervenções para acelerar a recuperação, como o plantio de espécies exóticas e nativas e a implantação de um sistema silvipastoril. Os dados foram obtidos em três anos, 2018, 2020 e 2022 e foram coletados na Fazenda Piave em Igarapé-Açu (PA). A área é considerada como floresta secundária em regeneração que decorreu de uma pastagem abandonada há mais de 20 anos. Para a predição de carbono por NPP, utilizou-se três escalas temporais, cena única, anual e sazonal (inverno e verão), todas acompanhando os anos de mensurações de campo. Já para o carbono por MA, se usou a biomassa predita para posteriormente utilizar um fator de conversão de 47%. As comparações entre NPP e MA foram conduzidas no RStudio e com o uso testes não paramétricos. Com isso, os testes demonstraram que o MA teve diferenças significativas no estoque de carbono conforme o método de recuperação aplicado, comportamento que não foi perceptível em todos os casos do NPP. Além disso, foi verificado superestimções da NPP em relação a MA, principalmente na sazonalidade de inverno, que obteve os menores estoques de carbono entre as predições de NPP. Outra questão verificada foi o não acúmulo de carbono no tempo para a cena única, como ocorrido no MA, esse comportamento somente foi perceptível nas médias anuais e sazonais. Em geral, a NPP superestimou consideravelmente os estoques de carbono obtidos por MA para todas as temporalidades analisadas, embora haja superestimções variadas conforme a margem temporal utilizada. Portanto o MA ainda é essencial para o monitoramento florestal, seja para prever o carbono estocado ou para validar as predições de carbono por NPP.

Keywords: permanent plot; remote sensing; recovery of degraded areas.

11 Introdução

A Floresta Amazônica é reconhecida como a mais biodiversa do planeta e a segunda maior em extensão, cobre aproximadamente seis milhões de km². Sua área se estende por diversos países da América do Sul, abrangendo mais de 50% do território brasileiro, o que corresponde a aproximadamente 60% da cobertura florestal amazônica total no continente (Brasil, 2009; Araújo et al., 2023; Vale et al., 2020; IPAM, 2023; Nakai, 2016; Tejada et al., 2019). Essas características conferem à Amazônia um papel de destaque no fornecimento de serviços ecossistêmicos globais, especialmente no sequestro e armazenamento de carbono, definido na lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021 como um serviço de regulação.

Estima-se que as florestas tropicais armazenem 228,7 bilhões de toneladas de carbono, destacando sua importância na regulação climática, o que gera a necessidade de sua proteção, uso sustentável e recuperação (Tejada et al., 2019; Liu et al., 2023). Associado a esse aspecto, os serviços ecossistêmicos são relevantes para combater impactos causados por mudanças no uso do solo, como a conversão de florestas em atividades agrícolas ou agropecuária, que elevam, muitas vezes, as emissões antrópicas de gases de efeito estufa e a necessidade de mitigá-los (Baccini et al., 2012).

Diante dessa relevância, a Amazônia tem sido tema central em diversas articulações internacionais, como o Protocolo de Quioto (1997), o Acordo de Paris (2015) e as Conferências das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COPs). Iniciativas lideradas por instituições como o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) também têm impulsionado avanços, principalmente nas previsões e mensurações dos estoques de carbono (Spinosa et al., 2023; Liu et al., 2023; Higuchi et al., 2014).

O apoio internacional à pesquisa tem promovido avanços metodológicos e tecnológicos, contribuindo para o melhor entendimento da floresta Amazônica. No entanto, desafios persistem, como a alta heterogeneidade da vegetação, a estrutura vertical complexa e o difícil acesso em muitas áreas, dificultando as coletas de dados em campo. Essas barreiras atrasam o desenvolvimento de modelos de quantificação de carbono e de outras variáveis ecológicas (Moura et al., 2022; Van Breugel et al., 2011).

Nesse contexto, o uso de previsões torna-se fundamental, visto que levantamentos diretos demandam mão-de-obra qualificada, equipamentos, tempo, logística e recursos financeiros elevados. Esses fatores limitam a frequência espacial e temporal das amostragens, comprometendo o monitoramento de longo prazo. Assim, métodos indiretos, baseados em relações matemáticas entre variáveis, surgem como alternativas viáveis, reduzindo custos e

ampliando a escala de análise, ainda que apresentem erros inerentes ao processo de amostragem (Araújo et al., 2023; Verly, 2021; Manzato, 2018; Zanini et al., 2021; Higuchi et al., 2014; Chaves et al., 2005; Ketterings et al., 2001; Tejada et al., 2019).

Complementarmente às predições indiretas em campo, geralmente efetuadas por modelos alométricos, o sensoriamento remoto permite relacionar dados espectrais a características biofísicas da vegetação. Essa técnica possibilita o monitoramento contínuo do uso da terra, com cobertura temporal quase constante e em grandes extensões territoriais, facilitando a tomada de decisões e o ajuste de estratégias (Vale et al., 2020). Contudo, sua aplicação ainda depende de dados para validação e calibração dos modelos, de forma a reduzir possíveis erros nas estimativas (Tejada et al., 2019).

Desta forma estudos e monitoramentos de longo prazo de indicadores ecológicos são essenciais para compreender as estruturas florestais, funções e as composições, bem como avaliar os impactos das técnicas de manejos e recuperações (Schaefer et al., 2022). No entanto, apenas 0,0013% da Amazônia brasileira é monitorada por parcelas permanentes e que em uma abordagem mais otimista, considerando parcelas com abrangência de até 50 km, esse valor atinge no máximo 17% do território, valor ainda insuficiente para representar a complexidade dessa floresta (Tejada et al., 2019).

Diante disso, é indispensável ampliar os estudos em campo, especialmente em um bioma tão diversos quanto a Amazônia. A combinação entre modelos alométricos e predições por sensoriamento remoto representa uma estratégia promissora, proporcionando monitoramento mais contínuo, abrangente e com menor custo. Essa abordagem combinada não apenas aumenta a eficiência do monitoramento, como também fornece subsídios mais robustos para a tomada de decisões voltadas à conservação.

Entre as técnicas de sensoriamento remoto utilizadas para prever o carbono estocado destaca-se a *Net Primary Productivity* (NPP), desenvolvida por Potter et al. (1993), que quantifica a produção líquida de matéria orgânica por fotossíntese, descontando a respiração autotrófica. A NPP permite estimar o fluxo de matéria e energia no ecossistema, além de fornecer dados sobre a assimilação de CO₂ e o ciclo do carbono atmosférico (Zhu et al., 2017).

Em conjunto a esse método, as plataformas *Google Earth Engine* torna-se promissora, haja vista que há possibilidade de análises em diferentes ambientes, escalas e períodos. Aspecto que se deve, principalmente, ao vasto acervo de dados e à facilidade de processamento oferecidos por essa ferramenta, em virtude do seu processamento em nuvem, o que viabiliza

um monitoramento contínuo, de forma gratuita, abrangente e compartilhado, independente do equipamento (Sousa et al., 2023).

Entre as áreas promissoras para acompanhamento e pesquisa, as áreas degradadas em processo de recuperação possuem grande relevância, em virtude do acúmulo e estoque de carbono significativo durante o crescimento da floresta até a sua estabilidade, o que auxilia na mitigação dos efeitos da mudança climática (Liu et al., 2023; Moura et al., 2022). Nesses locais ocorre a transição de um ecossistema emissor de CO₂ para um captador, o que contribui para o sequestro de carbono de forma exponencial, além de restituir serviços ecossistêmicos e benefícios ambientais, como a proteção do solo e a recomposição da biodiversidade (Martins et al., 2020; Liu et al., 2023; Nytych et al., 2023).

Essa importância se dá em decorrência de que se estima que aproximadamente 21% das áreas totais já desmatadas na Amazônia atualmente sejam florestas secundárias. Essas áreas possuem estrutura diferente de florestas primárias, o que exige o desenvolvimento e a adaptação das práticas, como os modelos alométricos aplicados, visto que muitos modelos são elaborados para florestas maduras, o que pode não ser adequado para essas florestas (Van Breugel et al., 2011; Karyati et al., 2019).

Dessa forma, estudos com parcelas permanentes em áreas em regeneração devem ser valorizados e ampliados, especialmente diante da complexidade ecológica desses ambientes (Schaefer et al., 2022). Concomitantemente, observa-se a carência de pesquisas sobre a NPP em escala regional, tornando estudos que integrem modelos alométricos e NPP na predição do estoque de carbono fundamentais.

Neste contexto, o presente estudo visa verificar a compatibilidade entre métodos de predição de estoque de carbono, modelo alométrico e NPP, avaliando sua capacidade de detectar diferenças entre tratamentos, bem como os totais estimados por tratamento e ano, para isso, considerando para o NPP a influência da temporalidade nas predições.

11.1 Questões científicas, hipóteses e objetivos

11.1.1 Questões científicas

1. É possível prever o carbono estocado em uma floresta secundária por meio da Net Primary Productivity com resultados semelhantes aos obtidos por modelo alométrico?
2. A predição de carbono por Net Primary Productivity sofre significativa influência da temporalidade?

11.1.2 Hipóteses

1. Não há diferença estatisticamente significativa entre as predições de carbono por modelo alométrico e Net Primary Productivity.
2. As predições de carbono por Net Primary Productivity são diferentes em uma mesma área conforme a temporalidade.

11.1.3 Objetivos

11.1.3.1 Geral:

Analisar as predições de carbono estocado obtidas por Net Primary Productivity e modelo alométrico em três tratamentos de recuperação em uma floresta secundária.

11.1.3.2 Objetivos específicos:

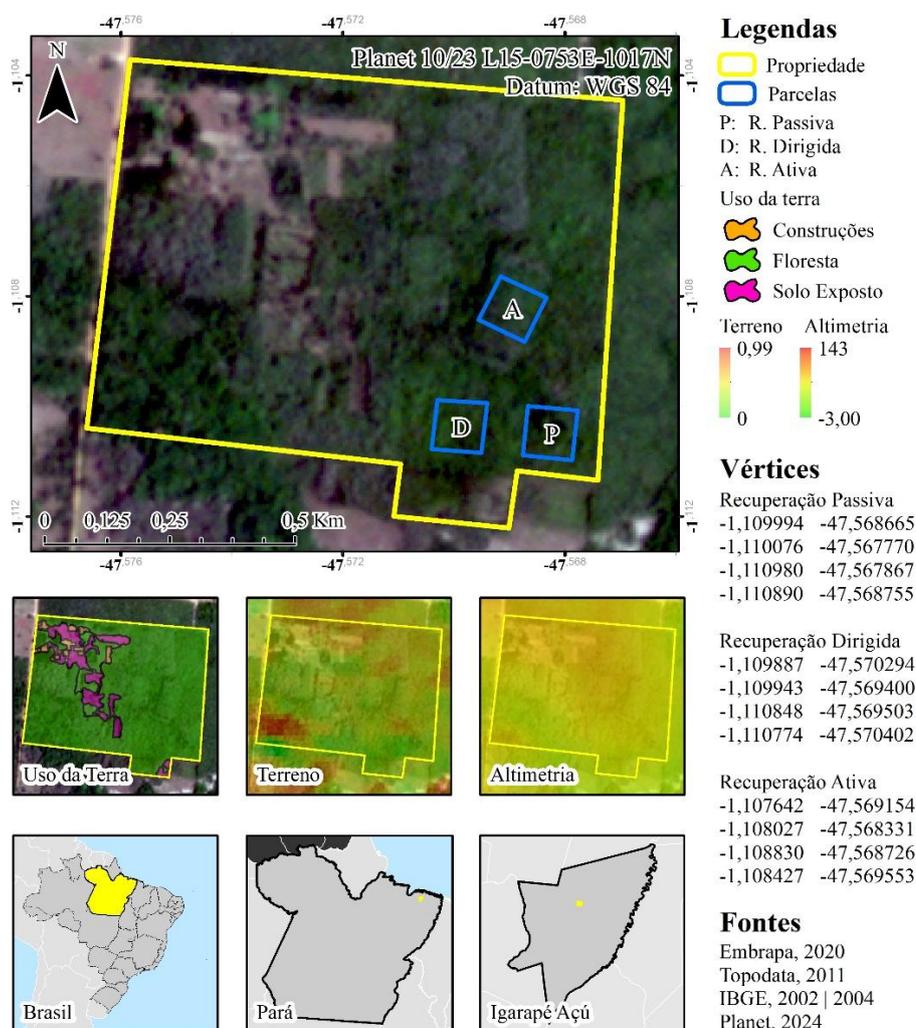
- Comparar as predições de carbono estocado obtidas por Net Primary Productivity e por modelo alométrico.
- Analisar a influência da temporalidade na predição do carbono estocado por Net Primary Productivity.
- Verificar os efeitos dos tratamentos de recuperação no estoque de carbono conforme o método de predição utilizado.

12 Material e métodos

12.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na fazenda Fattoria Piave, município de Igarapé-Açu, Pará, na microrregião Bragantina da mesorregião nordeste paraense, coordenadas 01°06'15" S e 47°34'28" O (Figura 8). A propriedade possui 75 hectares e tem produção voltada à agropecuária com cultivos solteiros ou consorciados de espécies florestais nativas e exóticas com a integração da pecuária de ovinos desde 1982 (Schaefer et al., 2022). A vegetação na propriedade possui porções de floresta ripária e trechos de floresta secundária que totalizam 22 hectares. A floresta secundária está em regeneração natural após o abandono de pastagens (Schaefer et al., 2022).

Figura 8: Mapa de localização, uso do solo, relevo, altimetria da fazenda Fattoria Piave localizada nas coordenadas 01°06'15" S e 47°34'28" O.



O clima da região de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Am, monção tropical quente e úmido, com elevada precipitação sazonal e com períodos curtos com redução das chuvas, gerando deficiência hídrica de baixa intensidade. A temperatura média da região varia de 33,9 °C a 21,1 °C e o volume de chuva anual é entre 2.302,5 a 2.857,4 mm, em que os maiores volumes ocorrem nos meses de março e abril. O solo predominante é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico coeso, textura média, bem drenado, com baixa saturação de bases, troca catiônica, teor de fósforo assimilável com médio à baixo conteúdo de matéria orgânica (Schaefer et al., 2022; Alvares et al., 2013).

12.2 Obtenção dos dados de campo para o modelo alométrico

Os dados do estudo foram coletados em três parcelas permanentes distintas sendo cada parcela considerada um tratamento, considerando o tratamento aplicado, definidas como parcela sem intervenção humana, considerada como recuperação passiva (RP), parcela manejada, definida como recuperação dirigida (RD) e parcela com recuperação ativa, catalogada como recuperação ativa (RA). O tratamento RP está localizado em um trecho de floresta secundária formada a partir do abandono de pastagens há mais de 20 anos e que não houve intervenção humana desde então. O tratamento RD possui as mesmas características que o RP, no entanto passou por duas estratégias de manejo, a aceleração da regeneração natural e o enriquecimento da vegetação com o plantio de espécies florestais madeireiras. Já o tratamento RA está sob processo de recuperação ativa desde 2001, e houve a instalação de um sistema silvipastoril com espaçamento no sistema florestal 4 x 4 m composto por oito espécies florestais, nativas e exóticas e com proporções diferentes, além da presença de ovinos (Schaefer et al., 2022).

As parcelas continham dimensões de 100 x 100 m composta cada uma por 10 subparcelas de 10 x 10 m devidamente enumeradas (Figura 9). As sinalizações foram realizadas com canos de policloreto de vinila (PVC), alocados nas trilhas de acesso das parcelas e subparcelas. A delimitação da área de coleta foi realizada pelo método do triângulo retângulo e por balizamento com ângulos de 90° a partir dos cantos das parcelas, seguindo o protocolo de estabelecimento e remedição Rainfor (Phillips et al., 2016). Após esses procedimentos, foram definidas as coordenadas dos vértices das parcelas.

A realização do primeiro inventário ocorreu em agosto de 2018 para a RP, em abril de 2018 para o RD e, em dezembro de 2017, para a RA. As remediações foram realizadas em intervalos de 2 anos, totalizando três medições para cada tratamento até o momento.

Figura 9: Encaminhamento numerativo das subparcelas de cada tratamento, recuperação passiva, dirigida e ativa na área de estudo, Igarapé-Açu, Pará, Brasil.

10	11	30	31	50	51	70	71	90	91
9	12	29	32	49	52	69	72	89	92
8	13	28	33	48	53	68	73	88	93
7	14	27	34	47	54	67	74	87	94
6	15	26	35	46	55	66	75	86	95
5	16	25	36	45	56	65	76	85	96
4	17	24	37	44	57	64	77	84	97
3	18	23	38	43	58	63	78	83	98
2	19	22	39	42	59	62	79	82	99
1	20	21	40	41	60	61	80	81	100

12.3 Mensuração dos indivíduos em campo

O levantamento dos indivíduos em campo nas subparcelas ocorreu com a mensuração da circunferência a altura do peito (CAP) de todos os indivíduos arbóreos com diâmetro a altura do peito (DAP) $\geq 3,3$ cm, sendo considerado nos casos de rebrotações com DAP acima ou igual a 5 cm indivíduos separados. Todos os indivíduos foram identificados e numerados com uma placa de alumínio. As variáveis levantadas foram: altura estimada (m), CAP (cm), incidência de luz e, presença de cipós. Cada espécie também passou pelo processo de identificação taxonômica no Herbário IAN da Embrapa Amazônia Oriental. Para a obtenção do DAP utilizou-se CAP convertido, que foi obtido com o auxílio de fitas métricas e após a mensuração do CAP, o ponto de medição foi demarcado com tinta vermelha a base de óleo para auxiliar em remeções futuras (Schaefer et al., 2022).

12.4 Predição do carbono estocado por modelo alométrica

O modelo alométrico (MA) utilizado para estimar a biomassa baseou-se nos estudos de Ducey et al. (2009) desenvolvida para florestas secundárias e voltados à estimativa da biomassa seca dos indivíduos. O modelo selecionado foi de entrada única, tendo o DAP como

variável independente (Tabela 4). Essa escolha deve-se ao fato de o DAP apresentar baixa margem de erro durante a mensuração, o que confere maior confiabilidade às estimativas. Outro fator determinante na adoção do modelo de Ducey et al. (2009) foi a similaridade ecológica entre a área de estudo e as parcelas originais utilizadas na modelagem, o que assegura maior representatividade das espécies locais e minimiza os erros decorrentes do uso de modelo genéricos.

Tabela 4: Modelo alométrico utilizado no estudo com DAP como variável independente.

Equação	α	β	Espécie
$BAS = \alpha * (DAP^\beta)$	0,14978	3,5763	<i>Abarema jupunha</i>
	0,32982	1,7336	<i>Casearia javitensis</i>
	0,044856	3,1285	<i>Lacistema pubescens</i>
	0,14988	3,093	<i>Myrcia sylvatica</i>
	0,098412	2,6117	<i>Ocotea guianensis</i>
	0,28772	2,2747	<i>Poecilanthe effuse</i>
	0,2897	2,0468	<i>Vismia guianensis</i>
	0,2237	2,260	Geral

Ducey et al. (2009). Em que: BAS é biomassa acima do solo.

Após a estimativa da biomassa por meio do MA, foi aplicada a conversão para carbono estocado (Equação 2), conforme as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Para isso utilizou-se o fator de conversão de 47% recomendado para indivíduos arbóreos, valor que está em conformidade com o intervalo de teor de carbono identificado por Higuchi e Carvalho Jr. (1994) para a Floresta Amazônica, que varia entre 46% e 52%.

$$C = BAS * TC \quad (2)$$

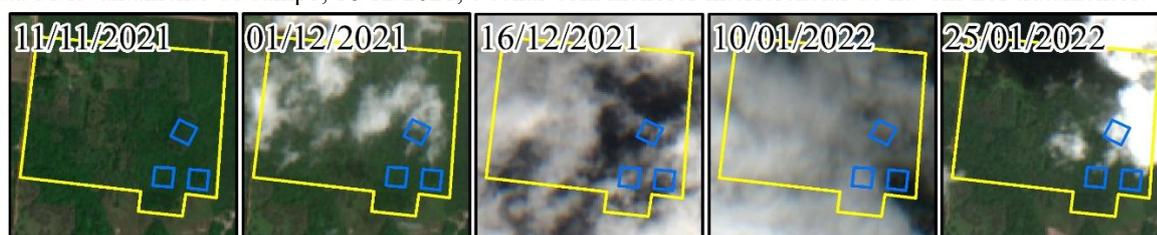
Em que: C = carbono acumulado, em megagramas; BAS = biomassa acima do solo, em megagramas; TC = teor de carbono (47%).

12.5 Estimativas de sensoriamento remoto

As predições de NPP foram obtidas por meio da plataforma *Google Earth Engine*, utilizando a linguagem *Python* no ambiente *Google Colaboratory*, disponível em <https://github.com/Joao-Alvares/Carbon-Estimation>. Os dados utilizados na análise incluem o

sensor MODIS (MODIS/061/MOD11A2 e MODIS/061/MOD16A2GF), estimativas climáticas do Centro Europeu para Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) ERA5-Land (ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR) e imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2, processadas no nível 1C, refletância topo de atmosfera (COPERNICUS/S2_HARMONIZED). As predições foram efetuadas considerando uma única cena, a mais próxima das medições de campo e com menor interferência de nuvem (Figura 10), médias anuais e médias sazonais, verão (junho a novembro) e inverno (dezembro a maio). Os dados obtidos foram baixados para a elaboração e padronização dos mapas.

Figura 10: Padrão de seleção das cenas únicas para a estimação da produtividade primária líquida, destacando a data do levantamento de campo, 16/12/2021, e cenas com menores interferências de nuvens nos tratamentos.



A partir da seleção dos períodos e cenas, a estruturação dos *scripts* se baseou no modelo *Carnegie-Ames-Stanford Approach* (CASA) de Potter et al. (1993) exemplificado na Tabela 5. A construção utilizou o estudo desenvolvido por Rodigheri et al. (2024), metodologia descrita por de Liao, Liu e Xiao (2022), NPP com o uso do Sentinel-2, e dados de *Light Use Efficiency Maximum* (LUEMax) e Temperatura Ideal de Crescimento (TIC) de Sun et al. (2020), a qual delimitou valores de LUEMax e TIC para floresta ombrófila densa (Figura 11). Posteriormente as predições de NPP foram baixadas e convertidas de g/m^2 para Mg/ha.

Os parâmetros da NPP tem o papel de: T1 e T2 minimizam os efeitos de temperaturas extremas, baixas e altas, respectivamente; *Light Use Efficiency* (LUE), eficiência do uso da luz na conversão de biomassa; LUEMax, máxima eficiência do uso da luz; TIC, temperatura ideal para o crescimento vegetativo; *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), mede a densidade da vegetação; *Solar Radiation* (SOL), energia solar incidente na superfície terrestre; *Land Surface Temperature* (LST), temperatura da superfície; *Water Efficiency* (We), expressa a eficiência do uso da água; *Photosynthetically Active Radiation* (PAR), quantidade de radiação fotossinteticamente ativa, desdobrada em *Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (APAR), fração absorvida, *Fraction of Photosynthetically Active Radiation*

(FPAR), fração efetivamente utilizada pelas plantas (Potter et al., 1993; Rodigheri et al., 2024).

Tabela 5: Modelo *Carnegie-Ames-Stanford Approach* de Potter et al. (1993) para estimar a *Net Primary Productivity* adaptado por Rodigheri et al. (2024).

Equações:

$$NPP = APAR * LUE$$

$$APAR = PAR * FPAR$$

$$PAR = SOL * 0,5$$

$$FPAR = NDVI * 1,2 - 0,14$$

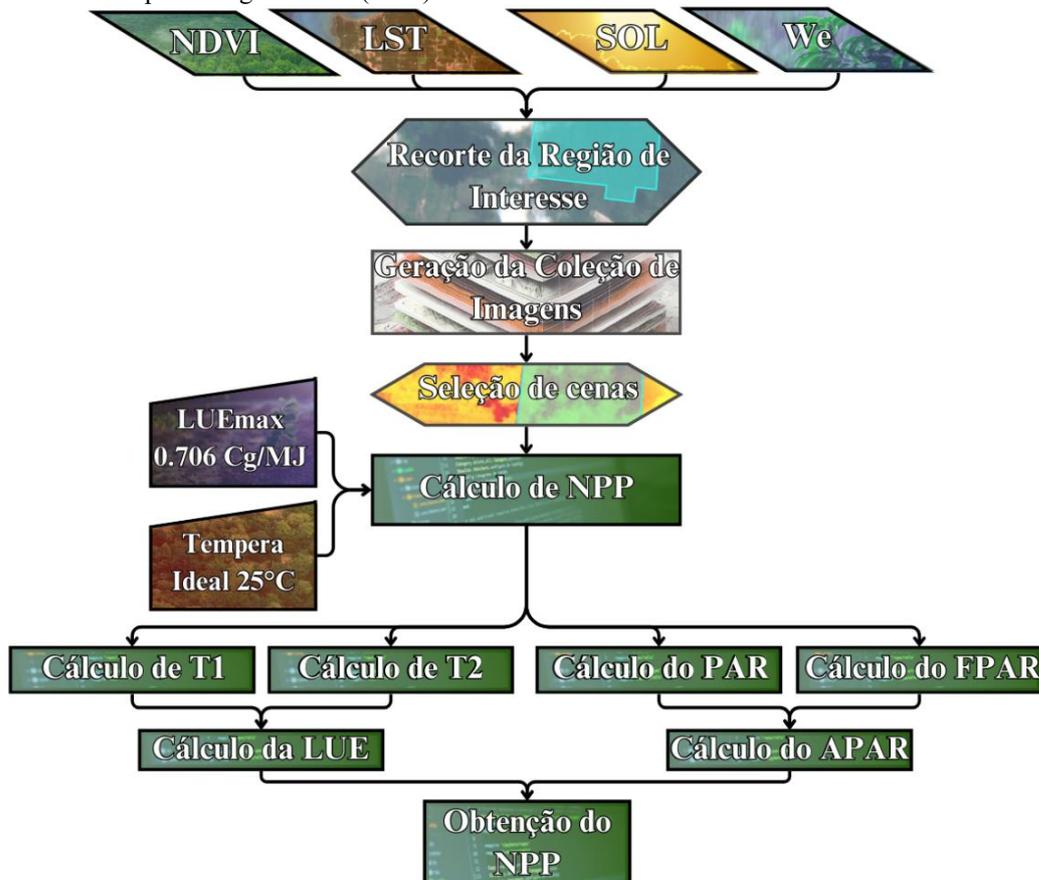
$$LUE = T_1 * T_2 * W_e * LUE_{max}$$

$$T_1 = 0,8 + 0,02 * T_{opt} - 0,0005 * TIC^2$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + e^{0,2*(Tic-10-LST)}} * \frac{1}{1 + e^{0,3*(-Tic-10+LST)}}$$

Em que: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Solar Radiation* (SOL), *Land Surface Temperature* (LST), *Water Efficiency* (We), *Net Primary Productivity* (NPP), *Light Use Efficiency* (LUE), *Light Use Efficiency Maximum* (LUE_{max}), Fator de estresse de baixa temperatura (T1), Fator de estresse de alta temperatura (T2), *Photosynthetically Active Radiation* (PAR), *Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (APAR), *Fraction of Photosynthetically Active Radiation* (FPAR), Temperatura ideal de crescimento (TIC).

Figura 11: Fluxograma para construção da *Net Primary Productivity* (NPP) no *Google Earth Engine* a partir do modelo estabelecido por Rodigheri et al. (2024)

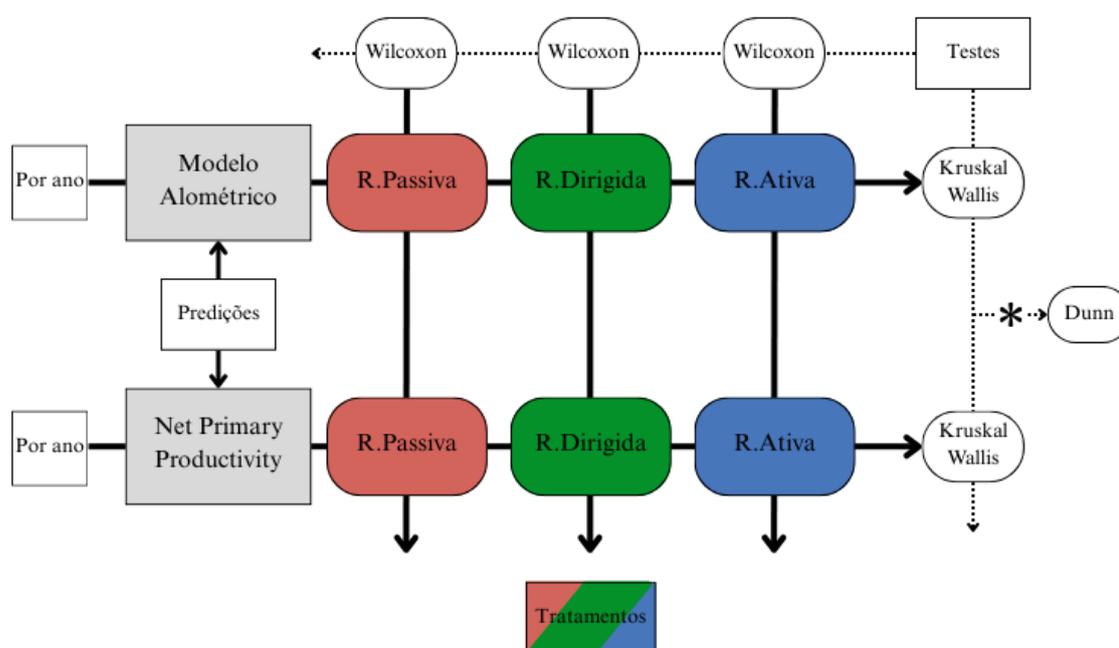


12.6 Análise estatística

Os resultados estimados foram organizados no RStudio para análise e comparação, tendo um confronto de NPP e MA. Foi utilizado o valor de NPP total de predição da área para a cena única e as médias para os recortes sazonais e anuais. As análises estatísticas adotaram testes não paramétricos em virtude do não atendimento dos pressupostos de normalidade e homoscedasticidade dos testes paramétricos por todos os tratamentos. As comparações realizadas foram feitas sob um mesmo método de predição de carbono, comparando todos os tratamentos entre si (RP, RD e RA), e entre os métodos considerando um mesmo tratamento, MA e NPP, (Figura 12).

Os testes aplicados foram o de Kruskal-Wallis para identificação de diferenças significativas entre os tratamentos em cada ano mensurado, 2018, 2020 e 2022, e o teste de Dunn para determinar quais tratamentos foram considerados diferentes (Figura 12). Para avaliar as diferenças entre os métodos dentro de um mesmo tratamento, considerando a MA com base comparativa, foi empregado o teste de Wilcoxon de acordo com o ano, método e tratamento (Figura 12).

Figura 12: Representação das aplicações dos testes estatísticos no estudo



* teste Kruskal-Wallis significativo, haverá a aplicação do teste Dunn; R. representa Recuperação.

13 Resultados

13.1 Análise estatística das predições de carbono por *Net Primary Productivity*

Verificou-se que as predições de carbono a partir da NPP nas recuperações estudadas e nos anos analisados, que foram consideradas diferentes em praticamente em todos, exceto para o ano de 2020 com o uso de cena única, aspecto que diverge do MO para o mesmo ano analisado, que obtiveram estoques de carbono significativamente distintos em todos os anos em para todos os tratamentos (Tabela 6).

Tabela 6: Comparação por teste de Dunn do estoque de carbono obtido por *Net Primary Productivity* dos tratamentos de recuperações da área de estudo nos anos de 2018, 2020 e 2022, considerando os totais de cena única, médias anuais, médias sazonais de verão e de inverno e verificação de diferenças significativa das predições por modelo alométrico.

		Cena Única	Média Anual	Média Verão	Média Inverno	Alometria
Ano	Tratamentos	<i>P-valor</i>	<i>P-valor</i>	<i>P-valor</i>	<i>P-valor</i>	<i>P-valor</i>
2018	R. Passiva - R. Dirigida	8,25e ⁻¹⁶	9,08e ⁻¹²	9,03e ⁻¹⁴	1,87e ⁻⁰⁴	2,45e ⁻⁰⁷
	R. Passiva - R. Ativa	2,98e ⁻¹⁵	1,79e ⁻²⁰	3,57e ⁻⁰⁶	4,60e ⁻¹⁹	3,59e ⁻²¹
	R. Dirigida - R. Ativa	4,69e ⁻⁵⁹	5,45e ⁻⁰²	1,95e ⁻³⁵	1,64e ⁻⁰⁶	1,49e ⁻⁵⁴
2020	R. Passiva - R. Dirigida	1,00	1,11e ⁻¹⁰	2,78e ⁻¹⁵	1,34e ⁻¹⁹	2,45e ⁻⁰⁷
	R. Passiva - R. Ativa	1,00	6,41e ⁻⁰⁹	3,88e ⁻⁰²	4,00e ⁻³⁷	3,59e ⁻²¹
	R. Dirigida - R. Ativa	1,00	3,29e ⁻³⁶	1,10e ⁻²⁵	1,06e ⁻⁰³	1,49e ⁻⁵⁴
2022	R. Passiva - R. Dirigida	8,05e ⁻⁰⁴	1,98e ⁻⁰⁹	1,28e ⁻⁰⁷	7,11e ⁻²²	1,44e ⁻⁰⁵
	R. Passiva - R. Ativa	9,13e ⁻⁴⁵	1,00	2,48e ⁻⁰²	7,08e ⁻⁰¹	1,11e ⁻¹¹
	R. Dirigida - R. Ativa	4,64e ⁻²⁵	8,46e ⁻¹⁰	1,20e ⁻⁰²	2,17e ⁻¹⁷	6,12e ⁻³⁴

* R representa Recuperação

13.2 Estoque de carbono das predições de *Net Primary Productivity*

Na contribuição de cada tratamento em relação ao total considerando a predição de cena única, o maior percentual de estoque ocorreu da RA, com 43,12%, 33,65% e 36,50% nos anos de 2018, 2020 e 2022, respectivamente. Esses valores em comparação MA estão em sua maioria subestimados, porém, condizentes com o MA, a qual coloca a RA como principal promotor do estoque de carbono, assim como a RP como segundo maior estoque de carbono nos respectivos anos analisados (Figura 7). No entanto, as superestimções constatadas na RD foram elevadas em comparação ao MA, tendência que foi acentuada nos anos de 2020 e 2022, o que pode ser considerada uma limitação das predições de carbono por NPP.

No teste Wilcoxon para cena única houve a detecção de diferenças significativas em todos os tratamentos em todos os anos analisados, apesar da proximidade de certas predições, a exemplo, o tratamento RA em 2022 (Tabela 7). Também foi observado que as predições de carbono por NPP não identificou aumentos anuais no acúmulo de carbono, característica presente no MA. Para essa predição em questão, foi constatado variações de aumentos e diminuições de carbono no tempo. Aspecto que diverge do MA, que verificou um aumento no acúmulo de carbono em todas as áreas estudadas ao longo do tempo analisado (Tabela 7).

Considerando a média anual, o teste de Wilcoxon detectou diferenças significativas com relação ao MO, exceto para a RP no ano de 2020 (Tabela 7). Ao considera-se os percentuais de contribuição, os maiores decorreram da recuperação no ano de 2018 com 37,96% e em 2022 com 34,41%, sendo que em 2020 a maior contribuição foi do tratamento manejo, contrapondo, nesse ano, a alometria (Tabela 7). Além disso, as predições de carbono foram inferiores à de cena única, que ocasionou uma superestimação mais acentuada para a maior parte dos tratamentos.

Assim como a média anual e cena única, o teste Wilcoxon para as médias de verão demonstraram diferenças significativas na maior parte dos tratamentos em relação ao MA, exceto para a RD no ano de 2018 (Tabela 7). Para a contribuição percentual na média sazonal de verão, os valores obtidos se antepuseram ao MA, tendo como maior estoque de carbono a RD nos anos de 2018 e 2020 e somente em 2022 que a RA possuiu o maior estoque. Essa questão gera superestimações, na maior parte, superiores a 30% e que chega, em alguns casos, acima de 70% quando comparado ao MA, a exemplo, a RA em 2018 (Tabela 7).

Com relação ao teste Wilcoxon na média sazonal de inverno, todos os tratamentos apresentaram diferenças significativas em comparação ao MA (Tabela 7). Analisando as predições, notou-se que todas foram inferiores às do período do verão, aumentando as superestimações em comparação ao MA. Tais percentuais foram superiores a 60% e chegou, em alguns casos, a 88%, a exemplo da RA 2020 e 2022. Averiguando as contribuições percentuais, o maior destaque foi a RA com 38,37%, 36,32% e 34,94% para os respectivos anos, seguido pela RP, comportamento semelhante ao MA, porém com um quantitativo de carbono predito muito inferior.

Tabela 7: Quantitativos de carbono estocado por *Net Primary Productivity* utilizando cena única, médias anuais, médias sazonais de verão e de inverno por tratamento por ano, considerando sua contribuição percentual e superestimação em comparação ao modelo alométrico juntamente com a predição de carbono por modelo alométrico e o teste de Wilcoxon para comparativo de significância entre as predições de carbono estocado.

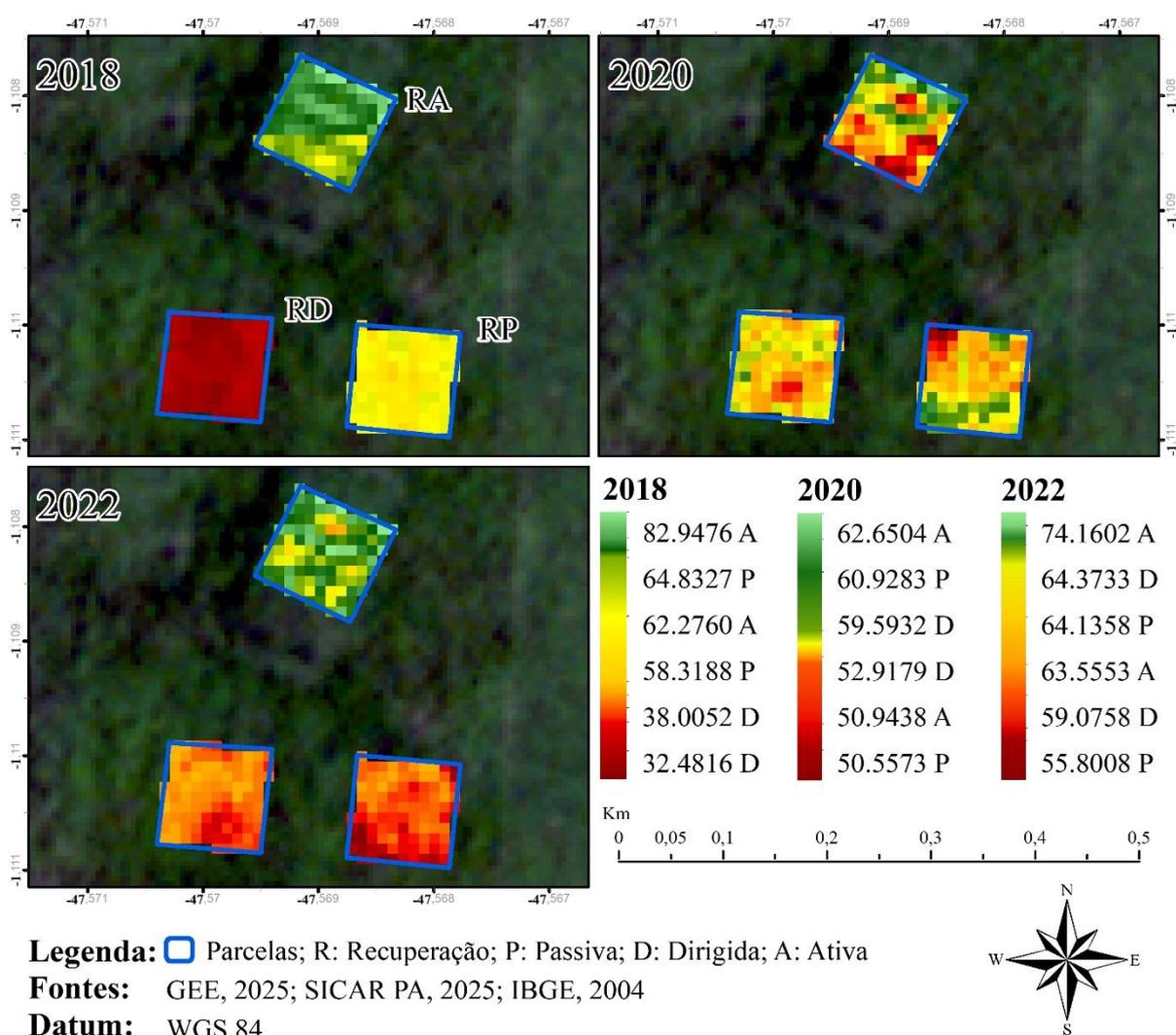
Ano	Tratamento	Carbono Predito (Mg/ha)					Contribuições Percentuais (%)					Superestimações (%)				Wilcoxon Teste (<i>P</i> -valor)			
		Cena Única	Anual	Verão	Inverno	MA	Cena Única	Anual	Verão	Inverno	MA	Cena Única	Anual	Verão	Inverno	Cena Única	Ano	Verão	Inverno
2018	R. Passiva	62,12	14,62	23,09	8,64	62,07	35,92	30,12	32,74	30,20	37,67	0,07	-76,44	-62,79	-86,08	6,99e ⁻⁰⁸	8,40e ⁻⁰⁹	4,29e ⁻⁰²	2,20e ⁻¹⁶
	R. Dirigida	35,62	15,50	24,60	8,98	25,26	20,60	31,92	34,88	31,41	15,33	41,04	-36,67	-2,61	-64,43	2,20e ⁻¹⁶	2,05e ⁻⁰⁶	0,2168	2,20e ⁻¹⁶
	R. Ativa	75,18	18,43	22,84	10,98	77,46	43,48	37,96	32,38	38,39	47,00	-2,94	-76,2	-70,52	-85,82	4,65e ⁻⁰¹	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶
	Total	172,92	48,55	70,53	28,60	164,79	-	-	-	-	-	4,94	-70,52	-57,20	-82,64	-	-	-	-
2020	R. Passiva	56,86	24,99	37,05	7,93	62,66	33,05	32,99	32,70	30,04	36,75	-9,25	-60,12	-41,80	-87,54	1,06e ⁻⁰⁷	5,13e ⁻⁰²	0,03637	2,20e ⁻¹⁶
	R. Dirigida	56,79	26,00	38,89	8,88	26,67	33,01	34,32	34,32	33,63	15,39	112,96	-2,50	45,85	-66,71	2,20e ⁻¹⁶	2,35e ⁻⁰¹	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶
	R. Ativa	58,37	24,77	37,37	9,59	82,88	33,93	32,69	32,98	36,32	47,85	-29,57	-70,13	-54,91	-88,43	8,27e ⁻¹⁹	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶
	Total	172,03	75,76	113,31	26,39	172,21	-	-	-	-	-	-0,11	-55,99	-34,58	-84,76	-	-	-	-
2022	R. Passiva	61,01	29,97	46,62	9,44	69,92	31,24	33,34	33,46	34,29	37,55	-12,75	-57,12	-33,32	-86,49	2,29e ⁻⁰⁷	9,93e ⁻⁰²	3,89e ⁻⁰³	2,20e ⁻¹⁶
	R. Dirigida	62,38	29,00	45,29	8,48	31,29	31,94	32,26	32,50	30,78	16,81	99,34	-7,34	44,72	-72,91	2,20e ⁻¹⁶	2,52e ⁻⁰¹	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶
	R. Ativa	71,90	30,93	47,42	9,62	84,99	36,82	34,41	34,04	34,94	45,64	-15,4	-63,61	-44,20	-88,68	6,02e ⁻⁰⁴	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶	2,20e ⁻¹⁶
	Total	195,29	89,90	139,33	27,54	186,21	-	-	-	-	-	4,88	-51,71	-25,17	-85,21	-	-	-	-

* R representa Recuperação; MA Modelo Alométrico.

13.3 Máximas e mínimas de carbono estocado por pixel

Os maiores estoques de carbono por pixel para a única cena foram encontrados no tratamento RA, tanto em 2018 quanto em 2022. Em 2020, houve uma mesclagem entre a RP e a RA, fator que pode ter decorrido da utilização de uma mesma cena para todos os tratamentos, aspecto que decorreu da proximidade da mensuração de campo e de cenas favoráveis para verificação do estoque, baixa intensidade de nuvens. Porém os quantitativos de estoque por pixel ainda permaneceram com a RA (Figura 13).

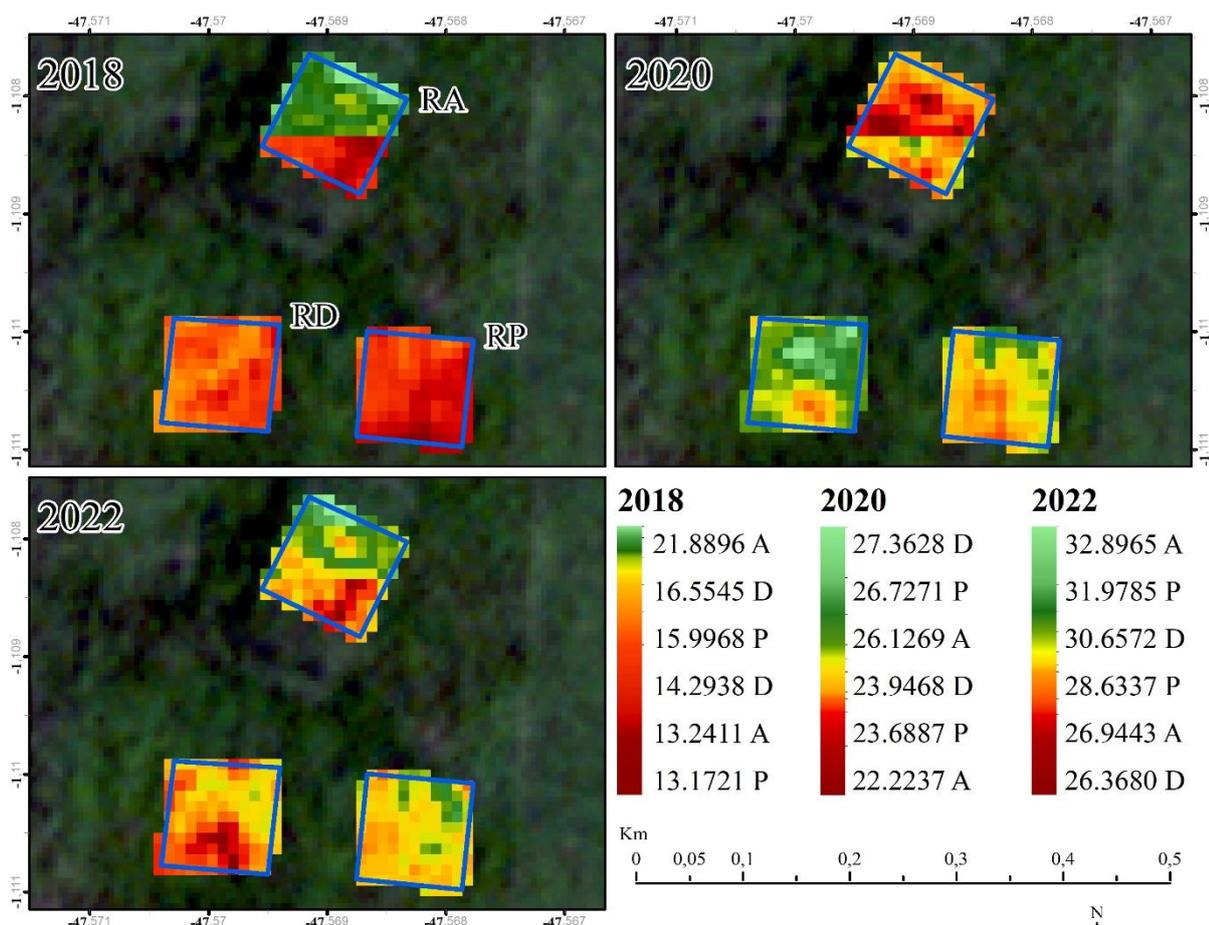
Figura 13: Valores máximos e mínimos de carbono estocado em megagrama por pixel considerando o tratamento e ano, cena única



Para as médias anuais, as variações entre os tratamentos diminuíram em todos os anos em comparação a cena única, sendo a maior discrepância no ano de 2018 (Figura 15). Esse distanciamento entre os tratamentos reduziu conforme os anos, além de apresentar um

aumento das máximas e mínimas. O tratamento que obteve a maior concentração de carbono nos pixels para a média anual foi a RA em 2018 e 2020 e em 2022 a RD. Porém, foi detectado alterações bruscas entre pixels na RA, o que gerou uma mudança acentuada dos valores preditos de carbono em uma área muito próximo (Figura 14).

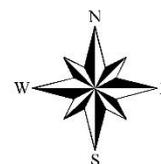
Figura 14: Valores máximos e mínimos de carbono estocado em megagrama por pixel considerando o tratamento e ano, média anual.



Legenda: Parcelas; R: Recuperação; P: Passiva; D: Dirigida; A: Ativa

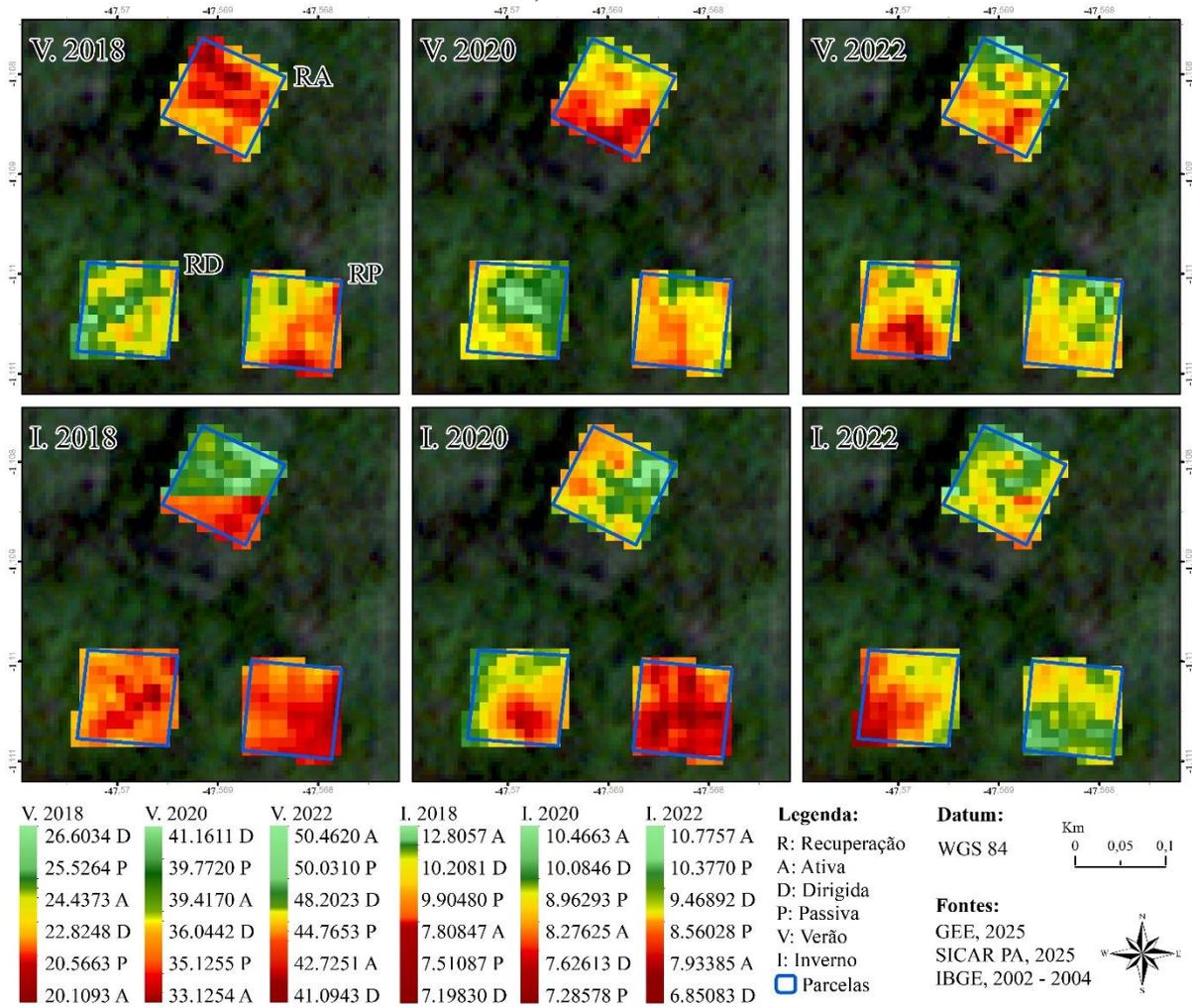
Fontes: GEE, 2025; SICAR PA, 2025; IBGE, 2004

Datum: WGS 84



Na média sazonal do verão e inverno foi observado a influência da temporalidade climática nas predições de carbono, a qual notou-se que todas as predições inverno apresentaram predições máximas menores que as mínimas do verão (Figura 15). Outro ponto de destaque para o efeito da sazonalidade na progressão do estoque de carbono ao longo dos anos no verão, fator que não ocorreu no inverno, gerando, em alguns casos, a diminuição do carbono predito no tempo.

Figura 15: Valores máximos e mínimos de carbono estocado em megagrama por pixel considerando o tratamento e ano, médias sazonais.



14 Discussão

14.1 Capacidade das predições de carbono por *Net Primary Productivity*

As condições atmosféricas influenciaram significativamente nos resultados de carbono preditos por NPP. Essa questão é notória no uso de distintas cenas para um mesmo ano, aspecto associado à distância entre as medições de campo. Conforme relatado por diversos autores, as estimativas de NPP são sensíveis a diversos fatores, como clima, tipo de solo, características das plantas, regimes de perturbação, entre outros fatores naturais e antrópicos (Field et al., 1995; Verly, 2021; Barbosa, 2021; Liao, Liu e Xiao, 2022; Sun et al., 2020).

Complementando essas características, verificou-se que o nível de degradação da área influenciou diretamente no estoque de carbono. Nas áreas mais degradadas, observou-se uma tendência de superestimativa em comparação aos MA, como na RD. Esse resultado, contrapõe o comportamento descrito por Spinosa et al. (2023), em que as melhores predições de carbono para o NPP com base no NDVI são para regiões com menor densidade florestal.

Considerando as predições obtidas, autores como Liao, Liu e Xiao (2022) obtiveram resultados promissores ao monitorar áreas em processo de recuperação após atividades antrópicas, indicando um aumento progressivo do estoque de carbono a partir do NPP ao longo do tempo, ainda que sem validação por meio de dados de campo. Esse padrão de incremento contínuo do carbono, no estudo, só não foi possível com o uso de uma única cena.

As variações observadas do estoque de carbono com a utilização de uma única cena podem estar associadas ao curto intervalo temporal das imagens de LST e SOL, que possuem resolução temporal de 15 dias no satélite MODIS. Essa limitação pode ter contribuído para as oscilações nos resultados ao longo dos anos analisados, embora tais variações não tenham comprometido significativamente as estimativas em comparação ao MA, especialmente no que diz respeito às superestimativas. Autores como Zhu et al. (2017), Sun et al. (2020) e Rodigheri et al. (2024) já destacaram que o método utilizado pode influenciar na predição de carbono do NPP.

14.2 Predições de carbono estocado

As predições de carbono por NPP obtidos neste estudo para a RD estão dentro da margem relatada por Yang et al. (2020), que realizou predições dos estoques de carbono entre 9,4 e 32,9 Mg/ha em áreas com idades entre 1 e 8 anos. Esses valores indicam que o desenvolvimento da área de manejo está comprometido, considerando que a área possui mais

de 20 anos de recuperação. Para as áreas RP e RA, Cassol et al. (2019) observaram que regiões da Amazônia em recuperação há 10 anos apresentam valores de carbono inferiores a 47 Mg/ha, o que sugere que os tratamentos citados se encontram em condições favoráveis para o acúmulo de carbono.

Os mesmos autores também verificaram que a média de biomassa em uma floresta secundária preditos por sensoriamento remoto foi de 83,2 Mg/ha para sucessão inicial, 99,3 Mg/ha na intermediária e 151,5 Mg/ha na avançada, considerando para cada classificação 3,3, 9,2 e 20,2 anos, respectivamente. Esses valores convertidos para carbono estocado, considerando o percentual do IPCC, equivalem a 39,10, 46,67 e 71,20 Mg/ha, o que se aproxima da área estudada em alguns casos das predições de carbono por NPP e MA.

14.3 Influências nas predições de carbono

A capacidade da NPP representar o carbono por planta por unidade de área ao longo do tempo ainda necessita de dados de campo para a validação das predições. Isso se deve à menor influência de fatores ambientais na coleta de campo, o que contribui para uma predição mais fidedignidade com a realidade em comparação ao sensoriamento remoto (Zhu et al., 2017; Verly, 2021). Entre os fatores ambientais que afetam a NPP, destacam-se a presença de nuvens, que apesar da possibilidade de utilização de múltiplas cenas, em certas regiões ou épocas, o monitoramento torna-se inviável, principalmente para satélites com resolução espacial elevada, como o MODIS e o Landsat (Ghorbanian et al., 2021; Jiang et al., 2020).

Com isso, entre os fatores que pode ter contribuído para as variações entre as predições de MA e de NPP são os formatos das parcelas, o que pode ter causado desajustes entre a parcela e os pixels das cenas, comprometendo as predições de carbono, especialmente em produtos com baixa resolução espacial (Jiang et al., 2020). Além disso, os sensores possuem margens de superestimação e de subestimação, a exemplo, do Landsat que superestimam valores de biomassa inferiores a 40 Mg/ha e subestimar aqueles acima de 150 Mg/ha. Já o sensor MODIS, os valores de superestimação são acima de 100 Mg/ha e de subestimação abaixo de 250 Mg/ha (Jiang et al., 2020).

Outro fator de influência é a escala temporal, que varia conforme a área de estudo, porém, em alguns casos, é necessária uma margem temporal muito superior para evitar predições de carbono substancialmente baixas ou inconsistentes. Entre essas áreas está as que possuem elevada cobertura de nuvens, regiões com alta umidade ou próximos a corpos hídricos, a exemplo, regiões da Amazônia (Ghorbanian et al., 2021). Essa condição, associada

à baixa resolução espacial, saturações ou contaminações atmosféricas, prejudicam significativamente as previsões de carbono, comprometendo o monitoramento local, especialmente em ambientes com alta heterogeneidade da vegetação (Spinosa et al., 2023; Jiang et al., 2020).

Tais limitações comprometem a qualidade e a quantidade de cenas utilizáveis, principalmente quando se é necessário realizar um monitoramento constante da área (Spinosa et al., 2023). Desta forma, estudos voltados para a escala local são importantes, haja vista que muitas pesquisas se concentram em extensões territoriais de estados ou biomas inteiros, o que reduz a influência desses fatores. Portanto é necessárias mais pesquisas para contornar ou minimizar essas dificuldades, de modo que, se tenha previsões de carbono mais semelhantes ou próximas das obtidas com dados de campo, mesmo em áreas com muitas interferências atmosféricas.

15 Conclusão

Não foi possível prever o carbono estocado por NPP de forma semelhante ao e MA. No MA, todas as previsões dos tratamentos foram diferentes significativamente em todos os anos, enquanto que na NPP, essa diferença não foi verificada para todos os casos, aspecto semelhante para o acúmulo de carbono e os tratamentos que mais contribuíram para o estoque de carbono.

Além disso, também houve a influência da temporalidade nas previsões de carbono por NPP, gerando quantitativos distintos conforme o período analisado, questão possivelmente relacionada à presença de nuvens, o que favoreceu a utilização de uma única cena, tendo resultados mais próximo e menos superestimado em relação a MA.

Portanto os valores de carbono preditos em florestas secundárias dependem do método utilizado. Desta forma, recomenda-se integrar, sempre que possível, a NPP com o MA, com o objetivo de validar as previsões de carbono por NPP. No entanto, essa integração exige mais estudos em florestas secundárias, com o intuito de aprimorar as metodologias existentes ou ao desenvolvimento de novas abordagens, principalmente em escalas locais, e sempre considerando as particularidades ecológicas da formação florestal estudada.

16 Referências

- ALVARES, C.A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift. v. 22, n. 6, dez. 2013. Schweizerbart, 711-728 p. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ARAÚJO, T.M; HIGUCHI, N.; J.A.C. JÚNIOR. **Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil**. Elsevier, Ss, v. 117, p. 43-52, ago. 1998.
- ARAUJO, E.C.G.; SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P.D.; PELISSARI, A.L.; ORSO, G.A.; SILVA, T.C. **Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon**. Journal Of Environmental Management, v. 331, p. 117251, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117251>.
- BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; WALKER, W. S.; LAPORTE, N. T.; SUN, M.; SULLAMENASHE, D.; HACKLER, J.; BECK, P. S. A.; DUBAYAH, R.; FRIEDL, M. A. **Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps**. Nature Climate Change, v. 2, n. 3, p. 182-185, 29 jan. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1354>.
- BARBOSA, Rodrigo de Sousa. **Técnicas de restauração florestal em áreas mineradas e definição de espécies chaves para a Amazônia Oriental**. 2021. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2021.
- BRASIL. **Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) - 2009**. Disponível em: [L12187 \(planalto.gov.br\)](http://planalto.gov.br). Acesso em: 01/01/2024.
- CASSOL, H.L.G.; CARREIRAS, J.M.B.; MORAES, E.C.; OLIVEIRA, L.E.; ARAGÃO, C.; SILVA, C.V.J.; QUEGAN, S.; SHIMABUKURO, Y.E. **Retrieving Secondary Forest Aboveground Biomass from Polarimetric ALOS-2 PALSAR-2 Data in the Brazilian Amazon**. Remote sensing, v.11, n.59, p.1-32, 30 nov. 2019. MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs11010059>
- CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. Oecologia, v. 145, n. 1, p. 87-99, 22 jun. 2005. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÖRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P.M.; GOODMAN, R.C. **Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees**. Global Change Biology. v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 21 jun. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- DUCEY, M.J.; ZARIN, D.J.; VASCONCELOS, S.S.; ARAÚJO, M.M. **Biomass equations for forest regrowth in the eastern Amazon using randomized branch sampling**. Acta Amazonica, Castanhal, v. 39, n. 2, p. 349-360, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672009000200013>.

FIELD, C.B.; RANDERSON, J.T.; MALMSTRÖM, C.M. **Global net primary production: combining ecology and remote sensing**. Remote Sensing of Environment, Stanford, v. 51, n. 1, p. 74-88, jan. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00066-v](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-v).

GHORBANIAN, A.; ZAGHIAN, S.; ASIYABI, R.M.; AMANI, M.; MOHAMMADZADEH, A.; JAMALI, S. **Mangrove Ecosystem Mapping Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Satellite Images and Random Forest Algorithm in Google Earth Engine**. Remote Sensing, Iran, v. 13, n. 13, p. 2565-2583, 30 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13132565>.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **A importância das florestas em pé - IPAM Amazônia**, acesso em: 25/03/2024.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use - Chapter 4: Forest Land**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

JIANG, X.; LI, G., LU, D.; MORAN, E.; BATISTELLA, M. **Modeling Forest Aboveground Carbon Density in the Brazilian Amazon with Integration of MODIS and Airborne LiDAR Data**. Remote Sensing. v. 12, n. 3330, p. 1-25, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12203330>

MANZATO, C.L. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono na cultura do eucalipto por meio de sensoriamento remoto**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental, Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2018.

HIGUCHI, N. e CARVALHO Jr, J. A. **Biomassa florestal e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia**. Em: Emissão x Seqüestro de CO₂ - Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil. CVRD. p.125-153, 1995.

HIGUCHI, N., SANTOS, J., RIBEIRO, R.J., MINETTEY, L., BIOT, V. **Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira**. Acta Amazonica. v 28, n. 2, p 153–166. 1998. Doi: <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282166>.

HIGUCHI, F.G.; LIMA, A.J.N.; RIBEIRO, G.H.P.M.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. **Equações alométricas específicas: estimativas de biomassa para diferentes sítios da Amazônia brasileira**. In: LIMA, A.J.N.; DURGANTE, F.M.; CAMPOS, M.A.A.; SANTOS, J.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. Dinâmica Do Carbono Das Florestas Da Amazônia. Manaus: INPA, 2014. Cap. 2. p. 21-27.

KARYATI, I. B.; IPOR, I.; JUSOH, I.; WASLI, M. E. Allometric equations to estimate the above-ground biomass of trees in the tropical secondary forests of different ages. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 20, n. 9, 5 ago. 2019. Doi: <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200901>

KETTERINGS, Q.M.; COE, R.; VAN NOORDWIJK, M.; AMBAGAU, Y.; PALM, C.A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, v. 146, n.1-3, p. 199–209, jun. 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)

LIAO, Q.; LIU, X.; XIAO, M. **Ecological restoration and carbon sequestration regulation of mining areas - a case study of Huangshi city**. International Journal of Environmental Research and Public Health, China, v. 19, n. 7, p. 4175, mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19074175>.

LIU, J.; GAO, W.; LIU, T.; DAI, L.; WU, L.; MIAO, H.; YANG, C. **A bibliometric analysis of the impact of ecological restoration on carbon sequestration in ecosystems**. Forests, China, v. 14, n. 7, p. 1442, jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/f14071442>.

LU, F.; HU, H.; SUN, W.; ZHU, J.; LIU, G.; ZHOU, W.; ZHANG, Q.; SHI, P.; LIU, X.; WU, X. **Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 115, n. 16, p. 4039-4044, 16 abr. 2018. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1700294115>.

MATOS, F.A. R.; MAGNAGO, L.F.S.; MIRANDA, C.A.C.; MENEZES, L.F.T.; GASTAUER, M.; SAFAR, N.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, M.P.; SIMONELLI, M.; EDWARDS, F.A. **Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits**. Global Change Biology, v. 26, n. 2, p. 509-522, 2 nov. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14824>.

MARTINS, W.B.R.; LIMA, M.D.R.; BARROS, J.U.O.; AMORIM, L.S.V.; OLIVEIRA, F.A.; SCHWARTZ, G. **Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: a global literature review**. Ecological Engineering, Belém/PA, v. 145, p. 13, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>.

MARTINS, W.B.R. **Restauração de ecossistemas degradados pela mineração na amazônia oriental**. 2020. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2020.

MARTINS, W.B.R.; RODRIGUES, J.I.M.; OLIVEIRA, V.P.; RIBEIRO, S.S.; BARROS, W.S.; SCHWARTZ, G. **Mining in the Amazon: importance, impacts, and challenges to restore degraded ecosystems. are we on the right way?**. Ecological Engineering, v. 174, p. 106468, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106468>.

MOURA, M.; SANQUETTA, M., SANQUETTA, C.; BASTOS, A.; CORTE, A. **Dynamics of biomass stocks in areas of secondary forest located in Western Amazon between 2016 and 2020**. Agriculture and Forestry, v. 68, n. 1, p. 7-23, 2021. doi:10.17707/AgricultForest.68.1.01

NAKAI, Érica Silva. **Quantificação da biomassa e estoque de carbono em diferentes coberturas vegetais por meio de sensoriamento remoto**. 2016. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016.

NYTCH, C.J.; ROJAS-SANDOVAL, J.; OLIVERAS, A.E.; GARCÍA, R.J.S.; MELÉNDEZ-ACKERMAN, E.J. **Effects of historical land use and recovery pathways on composition, structure, ecological function, and ecosystem services in a Caribbean secondary forest.** *Forest Ecology and Management*, San Juan, USA, v. 546, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121311>.

PHILLIPS, O.; BAKER, T.; FELDPAUSCH, T.; BRIENEN, R. **Manual de Campo para o estabelecimento e remediação de parcelas da RAINFOR.**: The Royal Society, 2016. 29 p.

POTTER, C.S.; RANDERSON, J.T.; FIELD, C.B.; MATSON, P.A.; VITOUSEK, P.M.; MOONEY, H.A.; KLOOSTER, S.A. **Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data.** *Global Biogeochemical Cycles*, v. 7, n. 4, p. 811-841, dez. 1993. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/93gb02725>.

RODIGHERI, G.; FONTANA, D.C.; LUZ, L.B. da; DALMAGO, G.A.; SCHIRMBECK, L.W.; SCHIRMBECK, J.; GOUVÊA, J.A. de; CUNHA, G.R. da. TVDI-based water stress coefficient to estimate net primary productivity in soybean areas. **Ecological Modelling**, v. 490, p. 110636, abr. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110636>.

SCHAEFER, S.M., SCHWARTZ, G., SILVA, A.R., LUNZ, A.M., SOUSA, F.I.B., SANTIAGO, A.V., FERREIRA, F.N., SOARES, M.H.M., & FALESÍ, I.C. **Monitoramento da restauração florestal e do manejo de floresta secundária em propriedade rural do Nordeste Paraense.** Documentos, 478. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2022.

SPINOSA, A.; FUENTES-MONJARAZ, M.A.; SERAFY, G.E. **Assessing the use of sentinel-2 data for spatio-temporal upscaling of flux tower gross primary productivity measurements.** *Remote Sensing*, v. 15, n. 3, p. 562, 17 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15030562>.

SOUSA, J.H.S.; RIBEIRO, G.N.; FRANCISCO, P.R.M.; MORAES NETO, J.M.; MEDEIROS, P.C. **Classificação do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Sucuru utilizando o Google Earth Engine e aplicação do algoritmo Random Forest.** Campina Grande: Eptec, 2023. 86 p.

SUN, R.; WANG, J.; XIAO, Z.; ZHU, A.; WANG, M.; YU, T. **Estimation of Global Net Primary Productivity from 1981 to 2018 with Remote Sensing Data.** *Igarss 2020 - 2020 Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa-Usa*, v. 14, n. 1, p. 4331-4334, 26 set. 2020. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/igarss39084.2020.9323555>.

TEJADA, G.; GÖRGENS, E.B.; ESPÍRITO-SANTO, F.D.B.; CANTINHO, R.Z.; OMETTO, J.P. Evaluating spatial coverage of data on the aboveground biomass in undisturbed forests in the Brazilian Amazon. **Carbon Balance and Management**, v. 14, n. 1, 3 set. 2019.

VALE, J.R.B.; PEREIRA, J.A.A.; CEREJA, S.S.A.; SOUSA, L.F.P. **Análise multitemporal do uso e cobertura da terra do município de Conceição do Araguaia-Pará através do Google Earth Engine.** *Revista Cerrados, Montes Claros*, v. 18, n. 02, p. 297-318, 16 out. 2020. Universidade Estadual de Montes Claros (UNIIMONTES). <http://dx.doi.org/10.46551/rc24482692202019>.

VAN BREUGEL, M.; RANSIJN, J.; CRAVEN, D.; BONGERS, F.; HALL, J.S. Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 8, p. 1648–1657, out. 2011.

VERLY, O.M. **Sensoriamento remoto na estimativa do estoque de carbono em fragmentos florestais da mata atlântica**. 2021. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

YANG, Y.; SAATCHI, S.; XU, L.; KELLER, M.; CORSINI, C.R.; ARAGÃO, L.E.O.C.; AGUIAR, A.P.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R.B. **Interannual Variability of Carbon Uptake of Secondary Forests in the Brazilian Amazon (2004-2014)**. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 34, n. 6, p. 1-14, jun. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2019gb006396>.

ZANINI, A. M. **Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na Mata Atlântica**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2018.

ZANINI, A.M.; MAYRINCK, R.C.; VIEIRA, S.A.; CAMARGO, P.B.; RODRIGUES, R.R. **The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest**. *Forest Ecology and Management*, v. 481, p. 118734, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118734>.

ZHU, Q.; ZHAO, J.; ZHU, Z.; ZHANG, H.; ZHANG, Z.; GUO, X.; BI, Y.; SUN, L. Remotely Sensed Estimation of Net Primary Productivity (NPP) and Its Spatial and Temporal Variations in the Greater Khingan Mountain Region, China. **Sustainability**, v. 9, n. 7, p. 1213–1213, 10 jul. 2017. Doi: <https://doi.org/10.3390/su9071213>