



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS – PPGCA

**MAYARA SOARES CAMPOS**

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BIOMASSA FLORESTAL  
AMAZÔNICA: PREVISÃO DE PERDA E ESTRATÉGIAS DE CONSERVAÇÃO  
PRIORITÁRIAS PARA O POTENCIAL DE BIOMASSA SOB AS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

**BELÉM – PA**

**2024**

**MAYARA SOARES CAMPOS**

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BIOMASSA FLORESTAL  
AMAZÔNICA: PREVISÃO DE PERDA E ESTRATÉGIAS DE CONSERVAÇÃO  
PRIORITÁRIAS PARA O POTENCIAL DE BIOMASSA SOB AS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcos Adami

Coorientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos

**BELÉM - PA**

**2024**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

C198i Campos, Mayara Soares.  
Impactos das mudanças climáticas na biomassa florestal Amazônica: Previsão de perda e estratégias de conservação prioritárias para o potencial de biomassa sob as mudanças climáticas / Mayara Soares Campos. —2024.  
90 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Adami  
Coorientador(a): Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2024.

1. Florestas. 2. Mudanças climáticas. 3. Amazônia. 4. Biomassa acima do solo. 5. Áreas protegidas. I. Título.

CDD 333.751609811

---

**MAYARA SOARES CAMPOS**

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BIOMASSA FLORESTAL  
AMAZÔNICA: PREVISÃO DE PERDA E ESTRATÉGIAS DE CONSERVAÇÃO  
PRIORITÁRIAS PARA O POTENCIAL DE BIOMASSA SOB AS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia.  
Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente.

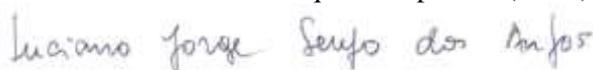
Aprovado em: 25/04/2024.

Banca Examinadora:



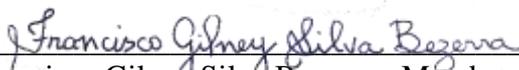
---

Prof. Marcos Adami- Orientador  
Doutor em Sensoramento Remoto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)



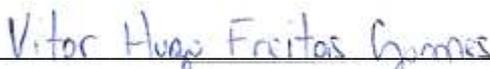
---

Prof. Luciano Jorge Serejo dos Anjos-Coorientador  
Doutor em Ciências Ambientais  
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)



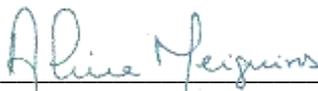
---

Prof. Francisco Gilney Silva Bezerra - Membro externo  
Doutor em Ciências do Sistema Terrestre  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)



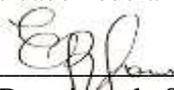
---

Prof. Vitor Hugo Freitas Gomes - Membro externo  
Doutor em Ciências Ambientais  
Instituto Tecnológico Vale (ITV)



---

Profa. Aline Maria Meiguins de Lima - Membro interno  
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido  
Universidade Federal do Pará (UFPA)



---

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Membro interno  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

**Jesus,**

“A cruz revela seu amor por mim”

**Dedico.**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus, pois Ele é meu sustento e principal orientador na minha vida, sem Ele não estaria realizando mais uma conquista. A honra, glória e poder pertencem a Jesus, meu Senhor.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), pela oportunidade de estudo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro durante um período importante da minha formação. Meus sinceros agradecimentos ao Dr. Marcos Adami, cuja ética profissional e dedicação me inspiram a almejar a excelência em minha carreira, e também me ensinou valiosas lições por meio de seu exemplar caráter. Seu apoio foi indispensável para o meu crescimento profissional e pessoal. Ao meu co-orientador, Dr. Luciano dos Anjos, sou grata por todos os ensinamentos que me transmitiu, pela parceria e pelos incentivos nos momentos mais desafiadores. Sua orientação foi fundamental para a realização deste trabalho, oferecendo-me a dedicação, paciência e as contribuições necessárias para que eu pudesse evoluir ao longo desta jornada.

A todos os meus amigos que estiveram ao meu lado, oferecendo palavras de encorajamento de que tudo daria certo. Um agradecimento especial para Veríssimo César e Fabiana Pereira que tanto me auxiliaram e apoiaram; assim como aos meus amigos/irmãos da célula, por todo sustento espiritual em oração.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família, pelo cuidado, incentivo e amor. Meus pais, Mariano Campos e Maria de Lourdes Campos, juntamente com meus irmãos, Tatiana, Wenderson, Michelle e Gabriel são a base e os motivos para que eu possa conquistar muitas vitórias.

## RESUMO

O estudo aborda a influência das mudanças climáticas na Biomassa Acima do Solo (AGB) na Amazônia, analisando tanto as previsões de redução quanto o potencial de aumento sob diferentes cenários climáticos até o final do século. Utilizando dados de AGB (GEDI) e variáveis climáticas de Modelos de Circulação Global (GCM's) e Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP's), a pesquisa emprega a Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) para explorar padrões espaciais da distribuição da AGB. Os resultados apontam para um declínio significativo da AGB, com reduções estimadas entre 14,2% a 32,1%, onde a densidade vegetativa média poderia cair para 177,61 Mg/ha<sup>-1</sup> até 2040 e 140,43 Mg/ha<sup>-1</sup> até 2100, evidenciando uma diminuição na capacidade de sequestro de carbono da floresta, especialmente nas regiões nordeste, central-leste, oeste e sul da Amazônia. Paralelamente, identificou-se potencial de ganho de AGB em áreas específicas do bioma Amazônia Brasileira, principalmente nas regiões noroeste e sudeste, abrangendo as bacias dos rios Negro, Xingu e Tapajós, sob ambos cenários futuros. Dentro desse potencial de ganho, as Terras Indígenas (TI's) emergem como primordiais para a conservação, mostrando maiores ganhos de AGB em ambos os cenários analisados. Este estudo destaca a importância de estratégias de mitigação e o papel das áreas protegidas na manutenção da resiliência da Amazônia diante das adversidades climáticas futuras. Ao destacar as áreas de possível aumento da AGB, salienta a importância de preservar e valorizar as áreas protegidas e TI's como estratégias fundamentais para enfrentar os desafios ambientais e climáticos. Essa abordagem não só enfoca a mitigação da perda de AGB, mas também reconhece o potencial de regiões específicas para contribuir positivamente para a resiliência da Amazônia diante das mudanças climáticas futuras, pois verificou que em melhores condições climáticas resulta em mais AGB e, conseqüentemente, em uma maior capacidade de sequestro de carbono pela floresta quando comparada às projeções onde as condições são mais severas e as emissões são mais altas. Portanto, este estudo é de grande importância para a ciência quanto para formulações políticas públicas, pois oferece uma análise do impacto das mudanças climáticas de AGB na Amazônia, essencial no ciclo do carbono e, por extensão, na mitigação das mudanças climáticas globais. Identificando regiões vulneráveis e também com potencial de aumento de AGB, realça a urgência de estratégias de conservação direcionadas.

**Palavras-chave:** florestas; mudanças climáticas; Amazônia; biomassa acima do solo; áreas protegidas.

## ABSTRACT

The study addresses the influence of climate change on Aboveground Biomass (AGB) in the Amazon, examining both reduction forecasts and potential increases under different climate scenarios until the end of the century. Using AGB data (GEDI) and climate variables from Global Circulation Models (GCM's) and Shared Socioeconomic Pathways (SSP's), the research employs Geographically Weighted Regression (GWR) to explore spatial patterns of AGB distribution. The results point to a significant decline in AGB, with estimated reductions ranging from 14.2% to 32.1%, where the average vegetation density could drop to 177.61 Mg/ha-1 by 2040 and 140.43 Mg/ha-1 by 2100, indicating a decrease in the forest's carbon sequestration capacity, especially in the northeast, central-east, west, and south regions of the Amazon. Conversely, potential AGB gains were identified in specific areas of the Brazilian Amazon, mainly in the northwest and southeast regions, covering the Negro, Xingu, and Tapajós river basins, under both future scenarios. Indigenous Lands (TI's) emerge as crucial for conservation, exhibiting greater AGB gains in both scenarios analyzed. This study underscores the importance of mitigation strategies and the role of protected areas in maintaining Amazon resilience in the face of future climate adversities. By highlighting areas of potential AGB increase, it emphasizes the significance of preserving and valuing protected areas and TI's as fundamental strategies to address environmental and climate challenges. This approach not only focuses on mitigating AGB loss but also recognizes the potential of specific regions to positively contribute to Amazon resilience amid future climate changes. Therefore, this study is of great importance for both science and public policy formulations, as it provides an analysis of the impact of AGB climate change in the Amazon, essential in the carbon cycle and, by extension, in mitigating global climate change. By identifying vulnerable regions and those with potential AGB increase, it highlights the urgency of targeted conservation strategies.

**Keywords:** forests; climate change; Amazon; above-ground biomass; protected areas.

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Gráfico da ação de comando e controle do Plano Federal de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Brasileira (PPCDAM). .....	16
Figura 1.2- Contribuições das futuras emissões antropogênicas dos principais causadores de mudança do clima e aquecimento por grupos de agentes causadores para os cinco cenários. ....	24
Figura 1.3-Resumo Gráfico do Capítulo 2.....	27
Figura 1.4-Resumo Gráfico do Capítulo 3 .....	28
Figura 2.1- Localização da área de Estudo.....	32
Figura 2.2- Resiliência da AGB às condições climáticas. Apresenta as imagens da distribuição da AGB sob cenário de AGB atual e de cenários futuros, com as previsões da AGB em relação às condições climáticas futuras, em cada período de intervalos de 20 anos (2021 a 2100) e para cada cenário climático, a partir da análise de dados observados e do modelo preditos GWR para bioma Amazônia .....	36
Figura 2.3- Exposição da AGB em cenários climáticos em Mg/ha <sup>-1</sup> . Apresenta o diagrama de caixa da estimativa de AGB no decorrer dos anos de 2021 a 2100, em intervalos de 20 anos modelados pelo método GWR em 4 cenários futuros de mudança do clima diferentes, do mais otimistas ao mais pessimista. A linha tracejada apresenta a estimativa da média de AGB (atual) para a Amazônia. ....	38
Figura 3.1- Localização da área de Estudo no Bioma Amazônia Brasileiro.....	51
Figura 3.2- Variação da Biomassa Acima do Solo (AGB) sob cenários climáticos contrastantes, fundamentados em modelos de previsão do clima otimista (SSP1-2.6) e pessimista (SSP5-8.5) para o período de curto prazo (2021-2040 ) no bioma Amazônia. ....	55
Figura 3.3 - Análise Comparativa de Ganhos e Perdas de AGB nos Cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 para Diferentes Estados Amazônicos.....	56
Figura 3.4 - Cenários climáticos de ganho de biomassa nas áreas protegidas no cenário (SSP1-2.6) e (SSP5-8.5) para período de curto prazo (2021-2040) no bioma Amazônia.....	58
Figura 3.5- Distribuição da delimitação das Áreas protegidas no cenário SSP1-2.6 (A) e SSP5-8.5 (B), para o período de curto prazo (2021-2040), na Amazônia. Apresentação do Ranking das 15 UC's e TI's com maior capacidade adaptativa para ganho de AGB em suas respectivas áreas para cenário SSP1-2.6 (C) e SSP5-8.5 (D).....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- AGB- Aboveground Biomass (Biomassa Acima do Solo)
- AR6 - Sexto Relatório de Avaliação
- BIO1 - Temperatura Média Anual
- BIO12 - Precipitação Acumulada
- BIO15 - Sazonalidade da Precipitação
- CMIP6 - World Climate Research Programme Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
- COP: Conferência das Partes
- ECS - Equilibrium Climate Sensibility (Sensibilidade Climática de Equilíbrio)
- GCMs- Modelos de Circulação Global
- GEDI- Experimento de Diversidade Global de Ecossistemas
- GEE- Gases de Efeito Estufa
- GLCC - Global Consensus Land Cover
- GWR- Regressão Geograficamente Ponderada
- IFL - Intact Forest Landscapes
- INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- LiDAR - Light Detection and Ranging
- Mg/ha-1 - Megagramas por hectare
- MMA- Ministério do Meio Ambiente
- NDC's- Contribuições Determinadas Nacionalmente
- ODS- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- ONGs- Organizações Não Governamentais
- ONU- Organização das Nações Unidas
- PPCDAM- Plano Federal de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Brasileira
- PNMC- Plano Nacional sobre Mudanças do Clima
- PRODES-Projeto de Monitoramento do Desflorestamento na Amazônia Brasileira
- SSPs- Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
- TCR - Transient Climate Response (Resposta Climática Transitória)
- TI's- Terras Indígenas
- UC's- Unidades de Conservação
- UNFCCC- Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	12
<b>1.1 Contextualização</b> .....	12
<b>1.2 Referencial Teórico</b> .....	14
1.2.1 A floresta Amazônica e seu papel nas mudanças climáticas .....	14
1.2.2 Desmatamento na Amazônia e sua contribuição às mudanças climáticas .....	15
1.2.3 Agendas Climáticas.....	20
1.2.4 Modelagem Climática e Ambiental .....	22
<b>1.3 Questões Científicas</b> .....	25
<b>1.4 Hipóteses</b> .....	26
<b>1.5 Objetivos</b> .....	26
<b>1.6 Apresentação da estrutura da tese</b> .....	26
<b>CAPÍTULO 2 PREDIÇÃO DE PERDA DE BIOMASSA FLORESTAL EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS NA AMAZÔNIA<sup>1</sup></b> .....	29
<b>2.1 Introdução</b> .....	30
<b>2.2 Métodos</b> .....	31
2.2.1 Área de Estudo .....	31
2.2.2 Estimativa de Biomassa Florestal .....	32
2.2.3 Construção da base de Dados Climáticos .....	33
2.2.4 Exposição de AGB com as condições climáticas atuais e futuras .....	34
<b>2.3 Resultados</b> .....	<b>35</b>
2.3.1 Tendência geral da variação da AGB sob cenários climáticos futuros.....	35
2.3.2 Áreas de maior vulnerabilidade .....	36
2.3.3 Relação entre variabilidade climática e AGB .....	37
2.3.4 Projeções de AGB até 2100 .....	37
<b>2.4 Discussão</b> .....	38
2.4.1 Perspectivas Futuras.....	41
<b>CAPÍTULO 3 PRIORIZANDO A CONSERVAÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA: AVALIANDO O POTENCIAL DA BIOMASSA SOB AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS<sup>1</sup></b> .....	<b>48</b>
<b>3.1 Introdução</b> .....	49
<b>3.2 Métodos</b> .....	50
3.2.1 Área de Estudo .....	50
3.2.2 Estimativa de biomassa florestal.....	51

3.2.3 Dados sobre áreas protegidas .....	52
3.2.4 Construção da base de dados climáticos .....	52
3.2.5 Exposição de AGB frente às condições climáticas presentes e futuras .....	54
<b>3.3 Resultados</b> .....	<b>55</b>
3.3.1 Tendência geral da variação da AGB sob cenários climáticos futuros de curto prazo .....	55
3.3.2 Análise do Ganho de AGB nos Estados Amazônicos.....	56
3.3.3 Análise do Ganho de AGB nas Áreas Protegidas .....	57
3.3.4 Desempenho adaptativo de áreas protegidas sob diferentes cenários climáticos .....	59
<b>3.4 Discussão</b> .....	<b>61</b>
<b>3.5 Conclusão</b> .....	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL</b> .....	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A - INFORMAÇÕES DE SUPORTE</b> .....	<b>77</b>

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Contextualização

A Biomassa Acima do Solo (AGB), formada por troncos, galhos e folhas, desempenha um papel fundamental (Dubayah *et al.*, 2022). Ela influencia diretamente a produtividade e o estoque de carbono, essenciais para regular o clima global (Huntingford *et al.*, 2013; Esquivel-Muelbert *et al.*, 2020). Além disso, contribui para a biodiversidade e serviços ecossistêmicos, sendo especialmente relevante na Amazônia, onde seu impacto global é pronunciado diante das mudanças climáticas (Phillips *et al.*, 2010; Putz *et al.*, 2014; Dubayah *et al.*, 2022).

Ao impacto das mudanças climáticas, o conceito de uma nova era geológica, chamada de Antropoceno, tem sido amplamente considerado, nos anos de 1950, após a segunda guerra mundial, as ações antrópicas têm causado transformações intensas na terra e de maneira acelerada, tem alterado suas características naturais quase irreversivelmente (Lewis; Mark, 2015). Como resultado das mudanças ambientais em curso, principalmente devido às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) causadas pela atividade humana, a quantidade de energia que aquece a atmosfera está diretamente ligada às mudanças feitas pelo homem na cobertura terrestre, sendo essa relação considerada a mais significativa (Sena *et al.*, 2013; O'Neill *et al.*, 2016). Nesse contexto, os cenários climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) se destacam como ferramentas importantes para projetar as mudanças climáticas futuras, tornando-se essenciais diante desse cenário de transformações ambientais aceleradas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) introduziu o conceito de *tipping point*, que marca o ponto em que um ecossistema perde sua capacidade de recuperação e entra em um estado irreversível, um ponto sem retorno. Em um contexto de sistemas ecológicos, a teoria dos estados estáveis de resiliência dos ecossistemas destaca a capacidade de um ecossistema se recuperar após sofrer um distúrbio (Forzieri *et al.*, 2022). Dentro dessa perspectiva, a suscetibilidade é definida como a vulnerabilidade climática de um ecossistema ou região às mudanças nas condições climáticas, incluindo temperatura e precipitação e seu impacto na AGB.

Diante das mudanças globais, as coberturas florestais são ameaçadas nos limites da sua resiliência, que tem papel fundamental na conservação da biodiversidade, restauração paisagística e mitigação das mudanças climáticas, tornando importante verificar essa capacidade adaptativa das florestas em cenários futuros de mudanças climáticas e outras perturbações, que podem se desenvolver ao longo do tempo (Thompson *et al.*, 2012; Ibáñez *et al.*, 2019; Forzieri *et al.*, 2022; Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023). Neste sentido, especialistas têm alertado para a urgência na adoção de medidas efetivas para combater os efeitos das mudanças climáticas como, por exemplo, a proteção das áreas florestadas (Pan *et al.*, 2013), recuperação florestal em larga escala, desde que

adaptados para o local socioecologicamente (Holl; Brancalion, 2020), investimento em formas sustentáveis na produção de biocombustíveis e de alimentos, etc (Nobre; Nobre, 2019).

Nobre (2016) e Artaxo (2018) afirmam que o Brasil possui grandes vantagens por possuir a maior área de floresta amazônica. No entanto, o desmatamento na Amazônia voltou a crescer a partir de 2015, após períodos de redução (2004-2011) e estabilização (2012-2014) (Inpe, 2020). Isso tem colocado em risco a manutenção de bens e serviços que as florestas tropicais possuem para o mundo. Neste sentido, Gatti *et al.* (2021) observaram que a Amazônia, em função do desflorestamento e das mudanças climáticas globais, têm reduzido a capacidade de atuar como sumidouro de carbono e começou, em algumas regiões, a atuar como uma fonte líquida de carbono para a atmosfera, acelerando significativamente as mudanças climáticas.

As mudanças climáticas, incluindo alterações nos padrões de precipitação, temperatura e eventos extremos como secas e tempestades intensas, têm um impacto significativo sobre as florestas intactas, podendo afetar a AGB (Galbraith *et al.*, 2010; Phillips *et al.*, 2009; Chagas *et al.* 2012; Tavares *et al.*, 2023 Uribe *et al.*, 2023; Flores *et al.*, 2017). E qualquer impacto negativo nessas florestas pode ter consequências sérias para o equilíbrio climático global, pois quando há perda de AGB, há redução na capacidade da floresta de absorver carbono da atmosfera, levando a um aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub>, um dos principais Gases de Efeito Estufa (GEE), além de gerar impactos na saúde e na função dos ecossistemas florestais (Galbraith *et al.*, 2010; Huntingford *et al.*, 2013; Silva-Júnior *et al.*, 2020; Li, *et al.*, 2020; Uribe *et al.*, 2023). Portanto, é essencial proteger e conservar esses ecossistemas.

As perdas de áreas florestadas por conversão em outros usos e cobertura do solo têm graves consequências para a resiliência dos ecossistemas, que sinergicamente têm potencializado a perda da biodiversidade, fornecimento de água, regulação climática, entre outros (Thompson *et al.*, 2012). Por isso, é necessário pensar em ações que possam unir medidas que visem à conservação e proteção ambiental (por meio das Unidades de Conservação-UC's e Terras indígenas- TI's), melhoria das condições de bem-estar humano com a valorização dos serviços ecossistêmicos, a restauração florestal para fornecer base para sustentabilidade econômica e ambiental (STRAND *et al.*, 2018) e respeito a legislação ambiental sem a flexibilização das regras ao permitir atividades econômicas prejudiciais à conservação florestal (Moraes *et al.*, 2021; Silva, *et al.*, 2022).

Portanto, o objetivo principal desta tese é analisar a suscetibilidade da biomassa florestal Amazônica frente às mudanças climáticas futuras. Isso requer uma compreensão da adoção de estratégias de conservação prioritárias para mitigar esses impactos, considerando a proteção de áreas-chave para garantir a resiliência e a sobrevivência dos ecossistemas amazônicos diante dos efeitos das mudanças climáticas em cenários futuros e o cumprimento das *Contribuições Determinadas Nacionalmente* (NDC's).

## 1.2 Referencial Teórico

### 1.2.1 A floresta Amazônica e seu papel nas mudanças climáticas

A Floresta Amazônica é importante nas mudanças climáticas devido ao seu impacto no ciclo do carbono e na biomassa florestal. As árvores da Amazônia regulam o carbono atmosférico através da fotossíntese, absorvendo CO<sub>2</sub> e liberando oxigênio. Esse processo reduz a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera, essencial para mitigar o aquecimento global (Nobre, 2004), tornando as florestas cada vez mais reconhecidas como fundamentais para qualquer estratégia de estabilização do clima, conforme destacado no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (ODS 13).

A biomassa florestal da Amazônia é uma grande reserva de carbono, representando cerca de 54% do estoque global de AGB (Liu *et al.*, 2015). A quantidade de carbono armazenado nas árvores, solo e vegetação é enorme, variando entre 193 e 229 PgC (pentagrama de carbono) (Saatchi *et al.*, 2011). Quando as florestas são destruídas ou degradadas, esse carbono é liberado como CO<sub>2</sub>, aumentando significativamente a concentração de GEE (Lovejoy; Nobre, 2019).

A Amazônia Brasileira abriga a maior floresta tropical do mundo, cobrindo aproximadamente 5,5 milhões de km<sup>2</sup> e estendendo-se por nove países sul-americanos, sendo a maior parte localizada no Brasil, cerca de 60% (Ibge, 2023). Esta região sustenta uma alta biodiversidade e desempenha um papel crucial nas interações biosfera-atmosfera globais (Lima *et al.*, 2018). Com sua vasta relevância social e econômica, a Amazônia enfrenta desafios complexos de governança devido à sua extensão transnacional e à necessidade de cooperação entre os países envolvidos (Moura *et al.*, 2017).

A história de ocupação e consolidação do território na região amazônica apresenta propriedades dinâmicas quanto ao uso do solo, devido a distintos processos de transformação da paisagem. Esses processos são analisados na dimensão espaço-temporal e em relação às características sociais, econômicas, políticas e ambientais (Becker, 2005). Por exemplo, Sathler *et al.* (2018) identificaram que a dinâmica do uso do solo difere nas sub-regiões da Amazônia de acordo com o histórico de ocupação.

Essas variações no uso do solo impactam diretamente as funções adaptativas da floresta às mudanças climáticas. A floresta desempenha várias funções adaptativas essenciais: sua biodiversidade diversificada promove resiliência natural; regula ciclos hidrológicos essenciais para a mitigação de secas e inundações; armazena grandes quantidades de carbono, contribuindo para a redução dos níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub>; e fornece serviços ecossistêmicos cruciais, como purificação da água e polinização (Nobre, 2004; Galbraith *et al.*, 2010; Thompson *et al.*, 2012; Flores *et al.*, 2017; Uribe *et al.*, 2023; Lapola *et al.*, 2023).

Além disso, práticas sustentáveis de manejo podem facilitar adaptações tanto para as comunidades locais quanto para a própria floresta diante dos desafios climáticos emergentes

(Rorato *et al.*, 2022; Lapola *et al.*, 2023; Qin *et al.*, 2023). Implementar essas práticas sustentáveis é essencial para garantir a resiliência da floresta e o bem-estar das comunidades que dela dependem, sendo fundamentais para proteger esses recursos naturais, promover a biodiversidade e mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas. A preservação e o manejo sustentável da Amazônia são essenciais para enfrentar os desafios climáticos atuais e futuros.

Fatores climáticos como temperatura, disponibilidade de radiação solar e água possuem papel fundamental como reguladores do funcionamento e na composição e variabilidade florística das florestas tropicais (Oliveira-Filho; Fontes, 2000). Contudo, os ecossistemas florestais em todo o mundo estão sob a influência de inúmeras perturbações, incluindo dinâmicas naturais e ações antrópicas.

### 1.2.2 Desmatamento na Amazônia e sua contribuição às mudanças climáticas

O desmatamento ou desflorestamento definido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) refere-se à remoção completa da cobertura de vegetação natural, de florestas primárias ou nativas em uma determinada área. Brown e Zarin (2013) explicam a diferença entre os termos utilizados de desmatamento zero bruto e líquido. Segundo os autores, o desmatamento zero bruto é usado para se referir em que nenhuma área de floresta primária deve ser desmatada ou convertida, enquanto o desmatamento zero líquido reconhece que algumas perdas florestais podem ser compensadas pela restauração florestal.

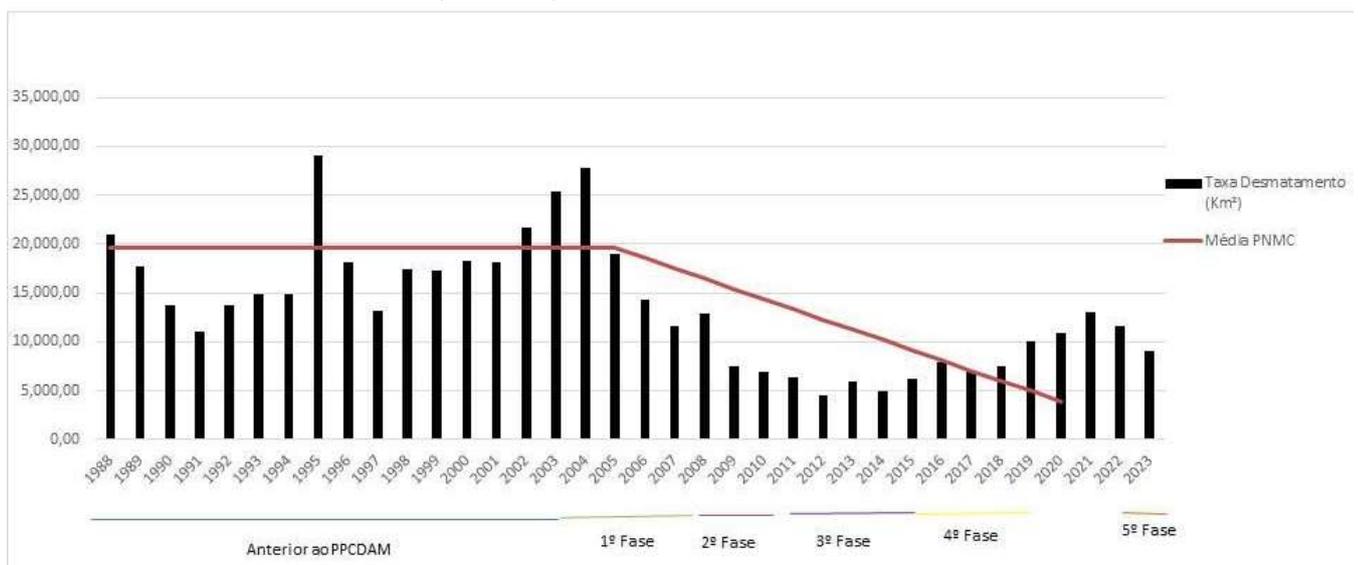
A história de ocupação e consolidação do território na região amazônica apresenta propriedades dinâmicas quanto ao uso do solo, devido a distintos processos de transformação da paisagem, analisados na dimensão espaço-temporal e na relação com as características sociais, econômicas, políticas e ambientais (Becker, 2005). Por exemplo, Sathler *et al.* (2018) identificaram que a dinâmica do uso do solo difere nas sub-regiões da Amazônia de acordo com o histórico de ocupação ocorrida. Mas cabe apontar que a maior parte do desmatamento na Amazônia Brasileira ocorreu nos últimos 50 anos, estando associado ao início do regime militar (1964 a 1985), quando programas específicos de desenvolvimento e ocupação da área estimularam o crescimento populacional e econômico da região, e desde então vem variando de acordo com as mudanças relacionadas às forças econômicas (Almeida *et al.*, 2010).

O desmatamento na Amazônia é impulsionado por diversos fatores, incluindo a conversão de florestas em pastagens para a criação de gado, invasão e grilagem de terras públicas florestais, além do aumento do valor das commodities agrícolas, como a soja, impulsionado pela crescente posição favorável da agroindústria brasileira no mercado de exportação (Song *et al.*, 2021; Câmara *et al.*, 2023); investimentos em infraestrutura, especialmente a pavimentação de estradas que facilitam o acesso da população às áreas anteriormente remotas ou por diminuir o custo de transporte da produção, aumentando a margem do ganho financeiro; além da indisponibilidade de crédito e

dinâmica populacional (Barber *et al.*, 2014); lentidão na consolidação das UCs; e por conta das ausências de implementação de políticas públicas de âmbito municipal (Rorato *et al.*, 2022).

Diante das altas taxas de desmatamento, o Brasil conseguiu reduzir as taxas anuais de 20.000 km<sup>2</sup> registrados em 2004 para um patamar de 6.000-7.000 km<sup>2</sup> em 2015 (Fig. 1.1) por ação de comando e controle do Plano Federal de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Brasileira (PPCDAM) (Assunção; Gandour; Rocha, 2023). O PPCDAM foi constituído por quatro fases: a primeira (2004-2008); segunda (2009-2011), terceira (2012-2015) e a quarta (2016-2020) (Fig. 1.1). Ramos (2020) afirma que houve um exemplo bem sucedido no combate ao desmatamento entre 2004 até 2012, como resposta às crescentes taxas de desmatamento. Porém, a partir de 2013 o desmatamento voltou a subir, atingindo cerca de 10.129 km<sup>2</sup>, 10.851 km<sup>2</sup> e 13.038 km<sup>2</sup> em 2019, 2020 e 2021 respectivamente (Inpe, 2021), o que não refletiu a proposta do Plano Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC) de redução do desmatamento pretendido até 2020 (Fig. 1.1). Além disso, parte das florestas remanescentes está degradada por exploração madeireira predatória e/ou fogo (Moura *et al.*, 2017). Ramos (2020) comenta que o plano falhou em manter a eficiência em suas ações, que, embora variada, nem sempre são realizadas com sucesso, e que a taxa de desmatamento a 3.925 km<sup>2</sup> até o ano de 2020 não seria efetiva. Porém, a 5ª fase do PPCDAM é lançado em 2023, com prazo até 2027, com intuito de ser novamente uma ferramenta eficaz para atingir a meta do desmatamento zero na Amazônia até 2030, a partir do Decreto nº 11.367/2023. O que pode ter refletido na redução do desmatamento no ano de 2023 para 9.001 km<sup>2</sup>

Figura 1.1- Gráfico da ação de comando e controle do Plano Federal de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Brasileira (PPCDAM).



Fonte: Adaptado do MMA e Inpe (2024).

Durante o período de 2001 e 2015, as taxas de desmatamento tiveram aumento significativo nos Países como Equador, Guiana, Peru e Suriname, estando associadas ao aumento à atividade de extração madeireira e minerária, principalmente ilegal, entre outras (Silva-Junior *et al.*, 2020).

Enquanto segundo os autores as taxas de desmatamento em Países como Bolívia, Colômbia, Guiana Francesa e Venezuela não tiveram taxas de desmatamento tão significativas. Atualmente, o MapBiomias (2023) expõem perdas na Pan-Amazônia de 1985 a 2021 com cerca de 8,4% na Bolívia, Colômbia de 6%, Equador de 1,6%, Guiana de 2,5%, Guiana Francesa 1%, Peru 11,4%, Suriname 1,7%, Venezuela 5,6% e Brasil com 61,8%.

Alguns autores alertam para a urgência de zerar o desmatamento para evitar o ponto de não retorno com a savanização em larga escala, defendendo que se as mudanças alcançarem um limiar crítico, chamado de *tipping point*, em um futuro próximo, desencadearia grandes alterações no clima, uma vez que, estima-se que mais de 3000 bilhões de gás carbônico chegará atmosfera, e será muito difícil não aquecer o planeta (Nobre; Borma, 2009; Salazar; Nobre; Oyama, 2007; Moura *et al.*, 2017; Lovejoy; Nobre, 2019). Hoje em dia, o principal perigo para as espécies arbóreas da Amazônia vem do desmatamento, contudo, em algumas décadas, as alterações climáticas têm o potencial de se tornarem uma ameaça ainda maior (Gomes *et al.*, 2019).

O quadro de destruição da floresta é um caminho para eventos climáticos catastróficos, poluição da água e do ar, podendo agravar-se no futuro, refletindo no Brasil, caso continue a tolerar, mesmo que a baixas taxas, a destruição de suas florestas (Lovejoy; Nobre, 2019). O país tem condições potenciais de ser competitivo numa economia de baixo carbono, desde que estabeleça metas para a eliminação completa e definitiva do desmatamento e da destruição de vegetação nativa para manter um clima minimamente equilibrado para as próximas gerações (Nobre, 2016).

O estudo da AGB na floresta intacta (primária) da Amazônia é importante no ciclo do carbono porque as árvores são grandes reservatórios de carbono, armazenando entre 60 a 140 PgC, abrangendo aproximadamente 6 milhões de km<sup>2</sup> (Galbraith *et al.*, 2010). A quantidade de carbono armazenada na AGB contribui diretamente para regular a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Lovejoy; Nobre, 2019). Isso ajuda a mitigar o efeito estufa e as mudanças climáticas, pois o carbono fica retido nas árvores e fora da atmosfera. Portanto, entender a quantidade e a distribuição da AGB na floresta amazônica é essencial para estimar sua capacidade de sequestro de carbono e avaliar seu papel no equilíbrio do carbono.

As áreas protegidas na Amazônia são essenciais na capacidade de sequestro de carbono, para conservação da biodiversidade, a regulação do clima, prestação de serviços ecossistêmicos e o sustento de comunidades indígenas e locais (Rorato *et al.*, 2022; Lapola *et al.*, 2023; Qin *et al.*, 2023). No entanto, enfrentam graves ameaças devido ao desmatamento e às mudanças climáticas (Qin *et al.*, 2023). Para proteger essas áreas, é necessário fortalecer a fiscalização ambiental, apoiar iniciativas de conservação que envolvam comunidades locais, implementar estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas e promover o desenvolvimento econômico sustentável (Arruda

*et al.*, 2024). A ação efetiva é urgente para garantir a preservação da Amazônia frente às ameaças atuais.

Diversas iniciativas institucionais da sociedade civil, de segmentos do setor privado, do governo federal e de alguns governos estaduais têm proposto o desmatamento zero na Amazônia (Moura *et al.*, 2017). O governo federal propõe e assume compromisso do desmatamento ilegal zero até 2030 (MMA, 2023), o *World Wide Fund For Nature* (WWF) (2009) defende o desmatamento líquido zero, desde que, as áreas compensadas pela restauração tenham a qualidade e a densidade de carbono das florestas mantidas. Ou seja, o governo federal e o WWF adotariam o que argumentam Nunes *et al.* (2016) que o desmatamento legal poderia continuar.

Nobre (2014) comenta que o desmatamento é inaceitável nos dias de hoje. Pois, segundo o autor, há impactos no clima global, na perda de biodiversidade e no ciclo das águas, agrava os problemas sociais e não gera desenvolvimento econômico de qualidade na região. O autor argumenta, ainda, que as áreas desmatadas na região que estão abandonadas ou degradadas já são suficientes para garantir o aumento da produção agropecuária no futuro. Uma vez que, segundo dados do TerraClass às áreas desmatadas estão sendo utilizadas principalmente para pastagem, com 63%, e o restante, para FS em 22,8% e 5,9% para agricultura (Almeida *et al.*, 2014).

Apesar da existência de áreas desmatadas já suficientes para a expansão agropecuária, a Amazônia tem enfrentado recordes de desmatamento nos últimos anos. Este aumento no desmatamento está alterando os fluxos de energia, podendo culminar com a savanização de parte dessa região (Artaxo *et al.*, 2014), além de reduzir a capacidade da Amazônia de atuar como sumidouro de carbono (Gatti *et al.*, 2021). Gomes *et al.*, (2019) revelam que a interação entre o clima e o desmatamento pode levar a uma redução de até 58% na diversidade de espécies de árvores na Amazônia, enquanto as mudanças climáticas isoladamente podem contribuir com 31-37% desse declínio até 2050.

Segundo a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), mudanças climáticas são alterações do clima, atribuídas direta ou indiretamente às atividades antropogênicas, as quais alteram a composição da atmosfera global e que são adicionadas às variações climáticas naturais (Unfccc, 2015). Estas mudanças são observadas e comparadas por período de tempo através do monitoramento do IPCC.

Na Amazônia, as mudanças de uso e ocupação do solo, interagem diretamente com ciclos de retroalimentação positiva ou negativa no processo de aquecimento (Almeida *et al.*, 2016), visto que a vegetação é intimamente dependente do clima, assim como o clima também é influenciado pela vegetação (Lovejoy; Nobre, 2019). As alterações em larga escala nas florestas podem alterar o balanço radiativo superficial, diminuir as taxas de evapotranspiração, que podem levar à modificação do regime de chuvas, além do aquecimento superficial e atmosférico (Sena *et al.*,

2013; Artaxo *et al.*, 2014; Nobre, 2014; Tavares *et al.*, 2023; Smith *et al.*, 2023). A região também sofre com o impacto de secas, agravadas pelos fenômenos El Niño que, por sua vez, têm sido agravados por causa das mudanças climáticas (Erfanian *et al.*, 2017; Jiménez- Muñoz *et al.*, 2016).

Os atuais modelos de previsão de clima sugerem uma alta probabilidade de aumento da frequência dos eventos extremos de secas prolongadas, principalmente na Amazônia Oriental (Erfanian *et al.*, 2017; Jiménez- Muñoz *et al.*, 2016). Esses modelos apontam que caso a pressão antrópica sobre as florestas continue, ocorrerão mudanças climáticas por declínios na precipitação e aumentos na temperatura associados ao desmatamento regional (Baker; Spracklen, 2019). Outros autores argumentam que as alterações em larga escala de conversão da cobertura vegetal para outros usos e coberturas poderão conduzir a um *die-back* florestal (Malhi *et al.*, 2009). Lovejoy e Nobre (2019) sinalizam que o ponto de inflexão está próximo devido à crescente frequência de secas sem precedentes em 2005, 2010 e 2015/16.

A derrubada da floresta tropical acaba com o “efeito esfriador” provocando um aquecimento global acima do que o estimado previamente, tanto pelas alterações nas emissões de compostos orgânicos voláteis, como pelas emissões de CO<sub>2</sub> com gases de efeito estufa de meia-vida curta e carbono negro (Lovejoy; Nobre, 2019).

O desmatamento é a principal fonte brasileira de emissão de GEE para a atmosfera, o que interfere no clima regional e global (Marengo *et al.*, 2018). A floresta amazônica tem função primordial dentro do contexto na regulação do clima, uma vez que ela é parte de uma robusta rede de *feedbacks* de matéria e energia, contribuindo desta forma com uma parcela significativa na retenção de CO<sub>2</sub> na biomassa existente dos indivíduos vivos florestais (Nobre *et al.*, 2016; Zemp *et al.*, 2017).

Segundo Nobre (2004) a floresta amazônica é um grande armazenador de biomassa em material orgânico do solo e da vegetação, cerca de 100 a 120 bilhões de toneladas de carbono, pois as florestas tropicais têm a maior porcentagem de carbono armazenado na sua biomassa (Pan *et al.*, 2011). Todavia, estudos de Artaxo (2018) revelam que devido ao aquecimento excessivo do clima na terra, a floresta preservada tem absorvido o carbono praticamente nas mesmas proporções que emite. Gatti *et al.* (2021) descobriram que as emissões totais de carbono são maiores na Amazônia oriental do que na parte ocidental, com o sudeste da região atuando como uma fonte líquida de carbono para a atmosfera. Esses estudos destacam a importância da Amazônia no balanço global de CO<sub>2</sub>, apesar de sua extensão territorial (Artaxo, 2018; Gatti *et al.*, 2021).

As florestas tropicais são responsáveis pela capacidade de assimilação de carbono no ambiente terrestre, mas tem perdido biomassa sob mudanças climáticas (Saatchi *et al.*, 2011; Galbraith *et al.*, 2010). Nesse contexto, é importante evidenciar as transformações que as mudanças

climáticas globais podem causar nas florestas, assim como, as formas através das quais estas podem contribuir para a minimizar ou agravar os sintomas de tais mudanças climáticas.

O efeito do desmatamento nas florestas tropicais promove o estresse do ecossistema, aumento na ocorrência de incêndios e maiores emissões de carbono na Amazônia Brasileira, que pode ser liberada rapidamente para atmosfera, como cita o estudo de Gatti *et al.* (2021). Os autores destacam ainda que a floresta amazônica contém mais de 120 PgC de biomassa acima e abaixo do solo, resultando em uma resposta positiva da capacidade que a Amazônia Brasileira atua como sumidouro de carbono.

### 1.2.3 Agendas Climáticas

Em 2015 a ONU apresentou 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, também chamados de Objetivos Globais, que devem ser alcançados até 2030. Para isso, a necessidade de redução do desmatamento na Amazônia Brasileira é internacionalmente reconhecida, tendo em vista a importância da floresta no alcance dos ODS, sub-representada na agenda 2030, alcançando todos os 17 objetivos de desenvolvimento de forma direta ou indireta, com destaque para objetivo 14 - Vida na Água e 15 - Vida na Terra (Reid *et al.*, 2017; Unep, 2019).

Destacam-se nessa agenda 2030 como metas a proteção, recuperação e promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres. Assim como, aumentar o sequestro de carbono e/ou evitar as emissões de GEE (Reid *et al.*, 2017), sendo essencial para a manutenção do aquecimento global 2°C abaixo dos níveis pré-industriais, meta acordada por 195 países no âmbito do Acordo sobre Mudanças do Clima de Paris (Unfccc, 2015). Conjuntamente, uma gama de termos é proposta dentro do contexto de limitar o aquecimento global a 1,5°C e reduzir a pegada de carbono sejam na prática da descarbonização, neutralidade de carbono, net zero, usados pelo IPCC.

Em relação ao Acordo de Paris estão estabelecidas as NDC's, no qual o Brasil se comprometeu em reduzir as emissões em 37% para 2025 e 43% para 2030. O país também se comprometeu a uma meta de longo prazo de neutralidade climática até 2060 (Crouzeilles; *et al.*, 2020). Essas NDC's buscam combater essas mudanças climáticas e adaptar-se aos riscos associados.

O REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal) é considerado um mecanismo dentro do Acordo de Paris, que é um tratado internacional legalmente vinculante sobre as mudanças climáticas. A legislação atual do REDD+ inclui medidas de salvaguardas para proteger os direitos das comunidades locais e indígenas, sistemas de monitoramento, relato e verificação (MRV) para acompanhar as reduções de emissões, e estratégias nacionais que cada país desenvolve para implementar o programa. Para a Amazônia, REDD+ é essencial na redução do desmatamento, conservando a biodiversidade e proporcionando benefícios socioeconômicos para as comunidades locais. Além disso, ajuda a combater as mudanças climáticas, pois a Amazônia atua

como um sumidouro de carbono. O programa também fortalece as políticas ambientais, incentivando práticas sustentáveis e mecanismos de governança robustos. No entanto, enfrenta desafios como garantir governança e transparência, proteger os direitos das comunidades locais e assegurar financiamento sustentável. REDD+ é, portanto, uma ferramenta essencial para a conservação da Amazônia, promovendo a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das comunidades.

Todas as metas segundo a ONU são para manter ao alcance o limite de 1,5 °C de aquecimento, que foram discutidas na 26ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas (*Conference of the Parties-COP 26*), na cidade de Glasgow, na Escócia, em 2021, onde foram anunciadas as políticas de combate à mudança climática, como zerar o desmatamento global até 2030, um fundo para ações de preservação, combate a incêndios e reflorestamento, acordo para eliminar o uso de carvão mineral entre as décadas de 2030 e 2040, a utilização de fontes de energia renováveis, entre outros. Na COP 27, realizada em Sharm El Sheikh, no Egito, em 2022, enfrentou críticas pela falta de avanços significativos em relação às mudanças climáticas, limitando-se a reiterar compromissos previamente estabelecidos na COP 26 sem abordar de forma efetiva outros temas considerados críticos pelos cientistas. Contudo, o evento culminou na instituição do fundo de perdas e danos, destinado a fornecer apoio financeiro a nações vulneráveis para auxiliá-las na recuperação dos impactos de catástrofes climáticas. Na COP 28 de 2023, em Dubai, a proposta é triplicar as energias renováveis e dobrar a eficiência energética até 2030, obtendo uma nova estrutura para o financiamento climático até 2025 (Unfccc, 2024).

Na Amazônia, as políticas públicas orientadas por meio do fundo Amazônia para combater as mudanças climáticas vêm sendo alvo de inflexões devido a mudanças políticas, desafios entre conciliar a proteção ambiental com o desenvolvimento sustentável, entre outras. Contudo, a agenda de sustentabilidade tem sido colocada como prioridade em alguns estados. No Pará, foi lançado em 2016 o Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Estado do Pará- 'Pará 2030', pelo Decreto estadual nº 1.570/2016, o qual visava fomentar o desenvolvimento sustentável do estado e foi desenhado para ser a estratégia econômica estadual de longo prazo, mas que não se estabeleceu devido à troca de governo.

Em 2020, o governo do Pará estabeleceu políticas e programas de mudanças climáticas, de territórios sustentáveis e o Plano Estadual Amazônia Agora. A política estadual sobre mudanças climáticas instituída pela lei nº 9.048, de 29 de abril de 2020, apresenta princípios, diretrizes, objetivos e instrumentos para guiar os municípios paraenses no combate às mudanças climáticas e na mitigação dos seus efeitos adversos. Essa política complementa outras iniciativas já criadas, como a Política de autuação integrada de Territórios Sustentáveis. Essa política visa contribuir para o alcance dos ODS a nível estadual e também para os compromissos da agenda de desenvolvimento

a nível global. Dentre as diretrizes dessa política, estão a conservação do capital natural e promoção do desenvolvimento socioeconômico, a partir do aumento da eficiência e produtividade, e recuperação de áreas degradadas para dessa forma cumprir as demandas locais, regionais, e até mesmo internacionais na redução dos efeitos das mudanças climáticas (Semas, 2020).

Tendo em vista essas políticas e o papel crucial da Amazônia no contexto das mudanças climáticas, o Brasil foi oficialmente designado como o país anfitrião da COP 30, programada para ocorrer em Belém, de 10 a 21 de novembro de 2025. Espera-se que essa escolha reflita o compromisso dos Estados Amazônicos e do Brasil com a preservação ambiental e o enfrentamento das mudanças climáticas globais, que provavelmente afetará a capacidade de mitigar taxas de carbono, conforme apontado por cientistas do clima (Artaxo *et al.*, 2014; Elias *et al.*, 2020), ao mesmo tempo em que impulsiona a busca por soluções através de modelos climáticos e ambientais.

#### 1.2.4 Modelagem Climática e Ambiental

Os modelos climáticos e ambientais buscam através de estruturas simplificadas, mas fortemente calcadas na teoria vigente, reconstruir o mundo real. Esses modelos realizam possíveis representações das interações nas diferentes escalas espaciais e temporais, com intuito de conhecer o funcionamento dos fenômenos da natureza, seu comportamento, transformação ou uma evolução (Rocha; Salvi, 2017). Diante disso, são importantes instrumentos para estudar os sistemas complexos da natureza, pois permite estruturá-los para compreender melhor as variáveis climáticas e ambientais e suas interações.

A avaliação de impactos e riscos relacionados ao meio ambiente através do uso da modelagem produzem cenários que são importantes estratégias para subsidiar políticas públicas pelos sistemas de representações associadas às características vindas do passado e presente para projeções futuras (Salazar; Nobre; Oyama, 2007; Moura *et al.*, 2017; Lovejoy; Nobre, 2019). Esses cenários são representações baseadas em um conjunto de suposições que incluem tendências e alterações no meio, por exemplo, a modificação do clima no planeta em decorrências de uma determinada composição da atmosfera ou de uso e cobertura da terra, resultantes das atividades humanas (Salazar; Nobre; Oyama, 2007).

Diversos estudos utilizam métodos de modelagem para prever cenários possíveis das diferentes dimensões das mudanças climáticas no âmbito ambiental, social e econômico (Huntingford *et al.*, 2013; Chazdon *et al.*, 2016; Aguiar *et al.*, 2016; Lovejoy; Nobre, 2019; Esquivel-Muelbert *et al.*, 2020; Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023). Muitos desses estudos apresentam os efeitos associados às mudanças de uso e cobertura da terra em grande escala, que fornecem diferentes respostas bióticas, traços funcionais de tolerância climáticas, frequência dos eventos extremos, entre outras características que mostram o quanto os modelos climáticos e

ambientais estão interligados, ou seja, qualquer mudança do clima está fortemente conectada com as alterações ambientais.

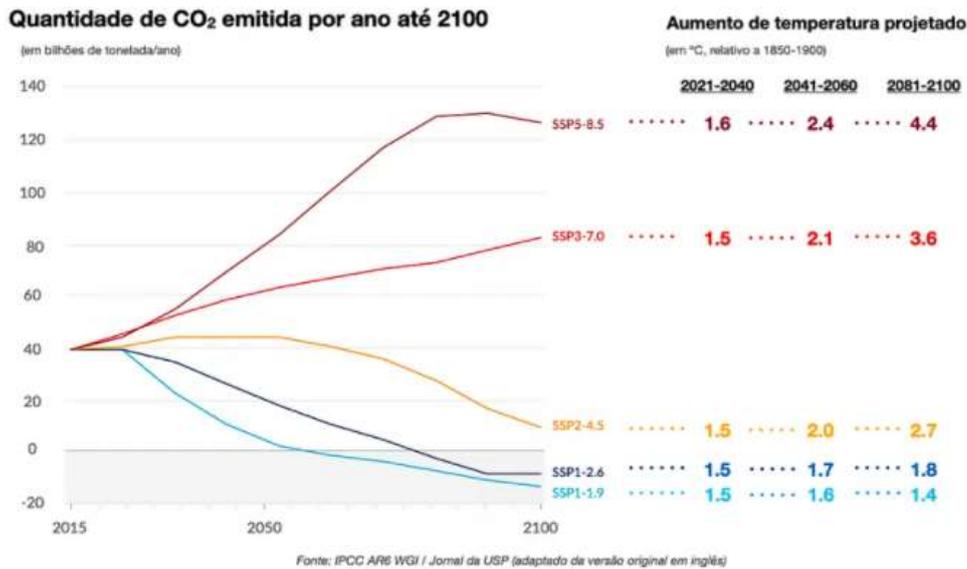
Por meio do ambiente computacional, a modelagem propicia a simulação de eventos do mundo real, utilizando parametrização de modelos matemáticos para refletir através das dimensões espacial e temporal os caminhos e velocidade das transformações ocorridas em um espaço de tempo (Nobre; Sampaio; Salazar, 2008). Por exemplo, nos modelos climáticos apresentados por Santos *et al.* (2020a) há uma tendência de aquecimento, da ordem de 0,5 °C por década em praticamente todas as regiões do Brasil, e em toda região norte. Diferentemente, relata os autores, a precipitação anual, evidencia grande variabilidade espacial no Brasil, porém, com indicativos de aumento na região norte do País. Enquanto isso, os modelos ambientais, tais como, modelos dinâmicos, apresentam evidências de vulnerabilidade, degradação/desertificação, e outros, diante das alterações realizadas no uso e cobertura da terra (Aguiar *et al.*, 2016).

Os modelos climáticos simulam o clima futuro para uma escala temporal de anos a décadas, com base em pressupostos teóricos, por exemplo, os efeitos de uma possível trajetória de aumento ou redução nas concentrações dos GEE e aerossóis na atmosfera, resultante das atividades humanas, economia mundial, crescimento populacional, globalização, etc. Esses cenários de mudança do clima para o século XXI são derivados dos vários modelos do clima global utilizados pelo IPCC com previsões para o clima passado, presente e futuro (IPCC, 2014). Esses cenários, conforme o IPCC são agrupados em diferentes projeções de emissão de GEE, relacionados aos aspectos de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais até 2100.

Atualmente foram desenvolvidos quatro cenários climáticos e socioeconômicos representativos de tendências possíveis de concentrações até final do século (Fig. 1.2), os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP's), considerando: SSP5-8.5 (altas emissões); SSP3-7.0 (emissões intermediárias); SSP2-4.5 (emissões intermediárias-baixas); e SSP1-2.6 (baixas emissões). Esses cenários conforme Santos *et al.* (2020) são de alta qualidade por tentar representar os processos atmosféricos, oceânicos e terrestres da melhor forma possível.

Eles foram projetados para representar diferentes graus de desafios em mitigação e adaptação, onde cada SSP tem um cenário de implementação de linha de base e cenários adicionais que combinam o enredo com políticas de mitigação climática compatíveis com certos níveis de concentração de CO<sub>2</sub> que variam de acordo com os cenários e, conseqüentemente, as mudanças climáticas (Fig. 1.2) (Silva-Bezerra *et al.*, 2022).

Figura 1.2- Contribuições das futuras emissões antropogênicas dos principais causadores de mudança do clima e aquecimento por grupos de agentes causadores para os cinco cenários.



Fonte: Adaptado (Ipcc, 2021).

Como os modelos matemáticos são representações imperfeitas do mundo real, eles são fontes de incertezas associadas a cada cenário, uma vez que, as decisões humanas sobre o caminho social, econômico e ambiental podem influenciar as trajetórias futuras das emissões dos GEE na atmosfera (Silva-Bezerra *et al.*, 2022). Para que as projeções plausíveis da mudança do clima sejam analisadas permitindo os efeitos das incertezas, são utilizados conjuntos de simulações de modelos, chamados *ensembles* - que são avaliações de incertezas das projeções (Diniz-Filho *et al.*, 2009). De acordo com Franklin (2010), essa técnica se torna útil para quantificar as incertezas das projeções futuras considerando vários modelos.

A modelagem climática e ambiental para a Amazônia avançou consideravelmente diante da importância que a região possui para o clima global. Alguns estudos indicam que uma considerável área de floresta amazônica seria substituída por vegetação não florestal, como, por exemplo, savanas (Salazar; Nobre; Oyama, 2007; Artaxo *et al.*, 2014; Lovejoy; Nobre, 2019). Esses efeitos de modelos especializados sugerem que a região amazônica se tornará muito mais seca no futuro, e que o impacto na redução da precipitação, devido ao desmatamento, contribui para os efeitos das mudanças climáticas globais ainda mais (Jiménez- Muñoz *et al.*, 2016; Lovejoy; Nobre, 2019). Cox *et al.* (2004) indicam uma mortalidade catastrófica da floresta amazônica até 2080, devido aos altos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico. Outros estudos apontam que haverá mudanças significativas no padrão do ciclo hidrológico, com a diminuição da evapotranspiração, aquecimento superficial, que compromete a exportação de serviços ambientais para a região e áreas distantes da Amazônia (Sena; Artaxo; Correia, 2013; Artaxo *et al.*, 2014, Nobre *et al.*, 2016).

Gomes *et al.* (2019) indicam que quase metade das espécies de árvores da Amazônia estará em risco de extinção até 2050 devido ao aquecimento global, especialmente nas partes orientais,

sulistas e uma grande porção do sudoeste. Essa ameaça à biodiversidade pode impactar a AGB na região, reduzindo a diversidade vegetal, alterando os ciclos de nutrientes, modificando os padrões de crescimento e aumentando a vulnerabilidade a distúrbios naturais (Esquivel-Muelbert *et al.*, 2019; Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023). Assim, os modelos climáticos e ambientais estão interligados, significando que as mudanças climáticas estão estreitamente ligadas às alterações ambientais.

Segundo Dubayah *et al.* (2022), os dados de AGB do GEDI são importantes para a modelagem climática e ambiental, oferecendo uma visão detalhada da estrutura e quantidade de AGB florestal, permitindo uma avaliação mais precisa do ciclo de carbono global. O GEDI utilizando um sistema de Lidar instalado na Estação Espacial Internacional, mede a estrutura tridimensional da vegetação, passando por diversos níveis de processamento: dados brutos (Nível 1), calibrados e georreferenciados (Nível 2), transformados em estimativas de AGB (Nível 3) e sintetizados para análises globais de longo prazo (Nível 4). Esses dados são fundamentais para monitorar o carbono armazenado, auxiliar na gestão sustentável das florestas e apoiar pesquisas ecológicas. Portanto, ao integrar esses dados em modelos climáticos, os cientistas podem melhorar as previsões sobre o sequestro de carbono e o impacto das mudanças climáticas nas florestas.

Diante desse contexto, a modelagem permite uma análise detalhada e preditiva da quantidade e distribuição da AGB na floresta amazônica, através de informações espaciais para extensas áreas e com uma avaliação temporal ao simular cenários futuros, com isso, a modelagem ajuda na formulação de políticas de conservação e uso sustentável da floresta.

### 1.3 Questões Científicas

Diante de todo esse arcabouço teórico, a obtenção de estimativas confiáveis da quantidade de AGB estocada nas florestas diante das incertezas sobre como as mudanças climáticas e a composição atmosférica afetarão a capacidade de armazenamento de carbono na floresta amazônica é imprescindível, seja para subsidiar políticas visando preservar e restaurar os serviços ecossistêmicos fundamentais, como, na indicação de locais adequados para a implementação de projetos visando a conservação de áreas que serão mais resilientes diante das mudanças do clima. Por isso, este trabalho tem o propósito de investigar as seguintes questões:

- As projeções climáticas futuras podem afetar a AGB no bioma Amazônia até o final do século, considerando os cenários de mudanças climáticas?
- Quais as áreas de maior suscetibilidade da AGB sob diferentes cenários climáticos futuros na Amazônia?
- Quais os padrões de estimativas das áreas potenciais de ganho da AGB na Amazônia Brasileira diante dos cenários de mudanças climáticas?
- As áreas protegidas podem influenciar a capacidade das florestas intactas de manter a AGB diante das novas condições climáticas?

## 1.4 Hipóteses

- As condições climáticas futuras causam redução da AGB no bioma Amazônia até o final do século;
- Diante dos cenários climáticos futuros, o bioma Amazônia terá áreas suscetíveis expostas a grandes extensões de perda de AGB;
- O ganho de AGB na Amazônia Brasileira sugere que as áreas protegidas têm maior potencial de recuperação, sob diferentes cenários de mudanças climáticas;
- As áreas protegidas tem influência na capacidade das florestas intactas de manter a AGB diante das novas condições climáticas;

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo Geral

Analisar a suscetibilidade da cobertura florestal, tanto espacial quanto temporal, no bioma Amazônia frente às mudanças climáticas futuras.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Analisar como as variações climáticas podem influenciar a AGB na Amazônia, considerando diversos cenários climáticos projetados pelos modelos do CMIP6;
- Identificar áreas de maior suscetibilidade à perda de AGB sob os diferentes cenários climáticos até o final do século;
- Analisar a capacidade das florestas intactas no ganhos da AGB face às novas condições climáticas na Amazônia Brasileira;
- Avaliar o papel das áreas protegidas de conservação na promoção do ganho da AGB na região amazônica.

## 1.6 Apresentação da estrutura da tese

Esta tese examina o impacto das mudanças climáticas na AGB das florestas amazônicas, destacando áreas com maior suscetibilidade à perda de AGB e investigando aquelas com capacidade de mantê-la. Além disso, analisa o papel das áreas protegidas na conservação da AGB. A tese se divide em 3 capítulos:

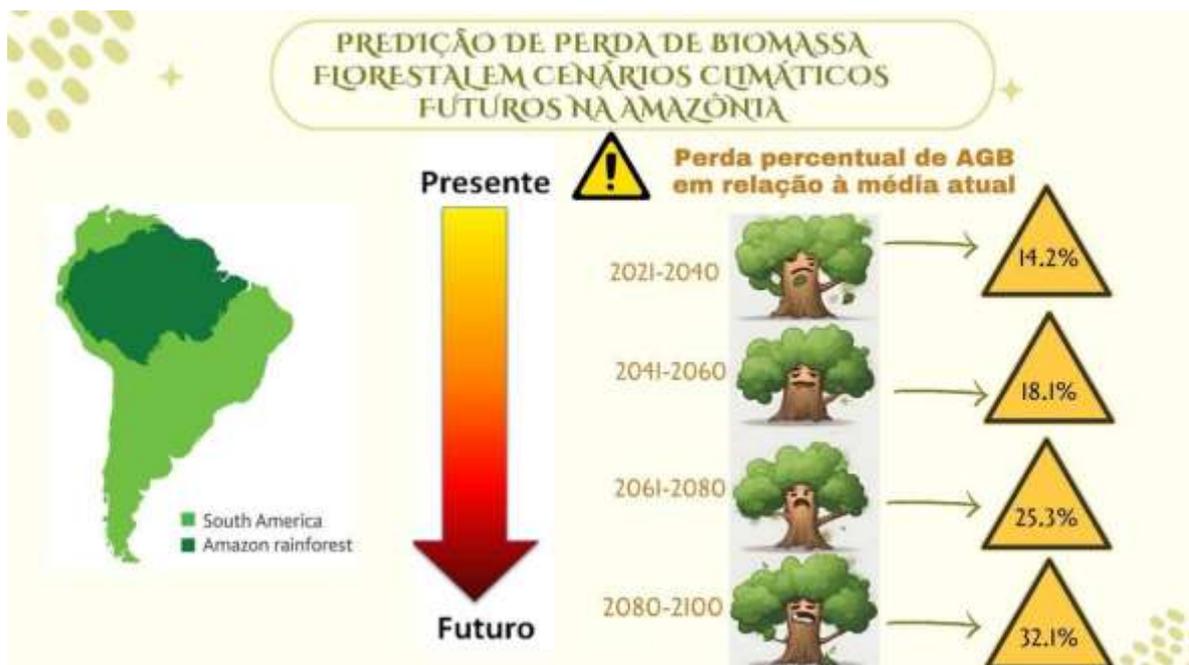
O **Capítulo 1** corresponde a uma contextualização, abordando os temas sobre desmatamento na Amazônia e sua contribuição às mudanças climáticas, as principais agendas climáticas e a modelagem como ferramentas para compreender melhor a aplicação dessas medidas de conservação e mitigação, visando a proteção da biodiversidade e a redução das emissões de GEE na região. O capítulo também aborda a seção sumarizada das questões científicas, hipóteses e objetivos da pesquisa.

No **Capítulo 2**, introduzimos o primeiro artigo, que aborda sobre as perdas da AGB diante das mudanças climáticas futuras para a Amazônia. Isso porque o bioma amazônico desempenha um papel importante na provisão de serviços ecossistêmicos, graças à sua densidade de cobertura vegetal, que armazena grandes quantidades de carbono nas florestas ainda intactas. Entretanto, essa AGB tem sido afetada em sua capacidade de se recuperar devido às alterações na precipitação e temperatura, que direta e indiretamente influenciam a capacidade de sequestrar carbono.

Embora diversos estudos científicos tenham investigado a relação de AGB e clima, ainda permanece incerto como a floresta amazônica responderá a diferentes cenários climáticos futuros projetados pelos GCM's, rodados para o CMIP6, bem como em diferentes SSP's.

Posto isso, o objetivo deste estudo é analisar como as variações climáticas afetam a AGB na Amazônia, considerando diferentes cenários climáticos do CMIP6, e identificar as áreas mais suscetíveis à perda de AGB sob esses cenários até o final do século.

Figura 1.3-Resumo Gráfico do Capítulo 2.



O **Capítulo 3** correspondendo ao segundo artigo aborda sobre a priorização de áreas para conservação florestal na Amazônia, buscando uma avaliação da capacidade de ganho de AGB sob projeções futuras de mudanças climáticas. Eventos decorrentes das mudanças climáticas já indicam fortes modificações no meio ambiente nas próximas décadas, tanto que estudos recentes demonstram que parte da Amazônia está perdendo sua capacidade de retirar CO<sub>2</sub> da atmosfera, reduzindo sua capacidade de agir como sumidouro.

Diante das evidências científicas que confirmam a realidade das mudanças climáticas, é fundamental implementar ações que investiguem a capacidade de recuperação da AGB em resposta aos efeitos dessas mudanças ao longo do século. Nesse contexto, as áreas protegidas desempenham papel importante nas agendas climáticas ao ajudar na mitigação das mudanças climáticas, adaptação aos seus efeitos, conservação da biodiversidade e a promoção da resiliência dos ecossistemas.

Posto isso, o objetivo busca examinar como as florestas intactas na Amazônia brasileira estão se adaptando às novas condições climáticas em relação ao ganho de AGB e avaliar como as áreas prioritárias de conservação contribuem na região amazônica.

Figura 1.4-Resumo Gráfico do Capítulo 3.



## CAPÍTULO 2 PREDIÇÃO DE PERDA DE BIOMASSA FLORESTAL EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS NA AMAZÔNIA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Submetido a Revista Scientific Report, Qualis A1, fator de impacto 4.6*

**RESUMO:** A biomassa acima do solo (AGB) desempenha um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, na conservação da biodiversidade e no fornecimento de recursos fundamentais. Diante disso, o estudo visa analisar a potencial mudança na AGB da Pan-Amazônia sob projeções climáticas futuras até o final do século. Para isso, utilizou-se produto de AGB (GEDI) e variáveis climáticas atuais e futuras de diferentes cenários de Modelos de Circulação Global (GCM's) e Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP's), aplicou-se a Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) para investigar e explicar padrões espaciais. Os resultados indicam um deslocamento gradual da densidade da vegetação em relação ao estado atual, com previsões de redução na AGB de 14.2% a 32.1% até o final do século. A AGB projetada estaria abaixo da mediana atual (207.00 Mg/ha<sup>-1</sup>), diminuindo para 177.61 Mg/ha<sup>-1</sup> até 2040 e 140.43 Mg/ha<sup>-1</sup> até 2100. Independente do cenário, as maiores perdas de resiliência estão a nordeste do bioma, principalmente próximo às regiões no escudo das Guianas e na Amazônia central-leste. A Amazônia ocidental e sul também são regiões com reduções consideráveis de reduções de AGB diante dos efeitos das mudanças climáticas, com aumento da temperatura e modificações no regime de chuvas, que afetam a resiliência das florestas amazônicas. Essas descobertas ressaltam a perda potencial da capacidade de sequestro de carbono da floresta diante das mudanças climáticas, fornecendo conhecimentos relevantes para estratégias de mitigação.

**Palavras-chave:** Cenários CMIP6; Biomassa Florestal; Bioma Amazônia; Mudanças Climáticas.

### PREDICTION OF FOREST BIOMASS LOSS IN FUTURE CLIMATE SCENARIOS IN THE AMAZON

**ABSTRACT:** Aboveground biomass (AGB) plays an important role in mitigating climate change, conserving biodiversity, and providing essential resources. Therefore, the study aims to analyze the potential change in AGB across the Pan-Amazon under future climate projections until the end of the century. For this purpose, the AGB product (GEDI) and current and future climatic variables from different Global Circulation Models (GCMs) scenarios and Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) were used, applying Geographically Weighted Regression (GWR) to investigate and explain spatial patterns. The results indicate a gradual shift in vegetation density compared to the current state, with projected reductions in AGB ranging from 14.2% to 32.1% by the end of the century. The projected AGB would be below the current median (207.00 Mg/ha<sup>-1</sup>), decreasing to 177.61 Mg/ha<sup>-1</sup> by 2040 and 140.43 Mg/ha<sup>-1</sup> by 2100. Regardless of the scenario, the greatest resilience

losses are in the northeast of the biome, mainly near the regions in the Guiana Shield and in the central-eastern Amazon. The western and southern Amazon are also regions with considerable reductions in AGB due to the effects of climate change, with increasing temperatures and modifications in rainfall patterns, affecting the resilience of the Amazon forests. These findings highlight the potential loss of the forest's carbon sequestration capacity in the face of climate change, providing relevant insights for mitigation strategies.

**Keywords:** CMIP6 scenarios; Forest Biomass; Amazon Biome; Climate Change.

## 2.1 Introdução

Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas em curso, evidências apontam para um aumento significativo na severidade e frequência da ocorrência de eventos extremos, tais como ondas de calor, tempestades e secas ao redor do globo (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016; Erfanian *et al.*, 2017; Marengo *et al.*, 2018; Ipcc, 2021). Projeções indicam que, até o final do século, esses eventos se tornarão ainda mais frequentes, duradouros e intensos (Jiménez-Muñoz *et al.* 2016; URIBE *et al.*, 2023), afetando diretamente a produtividade dos ecossistemas florestais, sua capacidade de estocagem de carbono e a mortalidade de espécies arbóreas (Huntingford *et al.*, 2013; Esquivel-Muelbert *et al.*, 2020; Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023).

No contexto das estratégias de mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), delineadas pelo Acordo de Paris, destaca-se a captura e armazenamento de carbono como meios fundamentais (Huntingford *et al.*, 2013). Os objetivos estabelecidos pelos *Contribuições Determinadas Nacionalmente* (NDC's), derivados desse acordo, incluem o aumento da capacidade de adaptação aos impactos adversos das mudanças climáticas, fomentando a resiliência climática das florestas e o desenvolvimento sustentável das emissões de GEE (Unfccc, 2015). Alinhados a isso, o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 13 visa adotar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos, enfatizando a capacidade de adaptação a riscos climáticos nas estratégias e planejamento nacionais.

As florestas tropicais, ricas em biodiversidade, desempenham um papel crucial na oferta de serviços ecossistêmicos (Strand *et al.*, 2018). Segundo a teoria da estabilidade ecológica, essas florestas apresentam resiliência notável às mudanças climáticas, sendo capazes de retornar ao seu estado de equilíbrio após perturbações, desde que operem dentro de seu "espaço operacional crítico" (Anjos; Toledo, 2018; Forzieri *et al.*, 2022). Essa resiliência é essencial, visto que variações climáticas podem influenciar significativamente as perturbações e o equilíbrio desses ecossistemas, podendo resultar em consequências severas para sua resiliência, caso os distúrbios ambientais ultrapassem os limites de estabilidade (Thompson *et al.*, 2014; Ibáñez, *et al.*, 2019; Anjos *et al.*, 2021; Forzieri *et al.*, 2022).

As florestas tropicais, especialmente a Amazônia, devido à sua significativa capacidade de armazenamento de carbono, são vitais para manter a estabilidade do clima global e sustentar a vida no planeta (Nobre C.; Nobre A., 2002; Li, *et al.*, 2020). Estima-se que as florestas amazônicas armazenem entre 60 a 140 PgC (pentagrama de carbono), abrangendo aproximadamente 6 milhões de km<sup>2</sup> (Galbraith *et al.*, 2010). Essas florestas contribuem com cerca de 16% de toda a produtividade fotossintética terrestre, regulando os ciclos globais de carbono e água (Albert *et al.*, 2023).

No entanto, a região Pan-Amazônia experimentou uma perda de 9.7% de sua vegetação natural nos últimos anos 1985-2021 (Mapbiomas, 2023), exacerbando as mudanças climáticas (Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023). A floresta, outrora considerada um sumidouro de carbono, agora enfrenta o risco de torna-se uma fonte líquida de carbono para a atmosfera, devido ao desmatamento e às mudanças climática globais (Gatti *et al.*, 2021; Artaxo, 2018; Baccini *et al.*, 2017; Silva-Júnior *et al.*, 2020; Walker *et al.*, 2020).

A incerteza sobre os impactos das mudanças climáticas e da composição atmosférica na capacidade de armazenamento de carbono na Amazônia persiste (Li, *et al.*, 2020; Uribe *et al.*, 2023). Neste cenário, o uso do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) se torna crucial, pois oferece uma metodologia inovadora para prever os impactos das mudanças climáticas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (O'Neill *et al.*, 2016). A abordagem do CMIP6 incorpora uma nova metodologia, incluindo o uso de níveis de aquecimento, conforme apresentado no 6º relatório de avaliação do IPCC (AR6). Esses níveis foram definidos com base no Acordo de Paris, que estabelece o limite de aquecimento global em 1.5°C em relação aos níveis pré-industriais, visando minimizar impactos e facilitar a adaptação às mudanças (O'Neill *et al.*, 2016).

Este estudo visa, portanto, analisar como as variações climáticas podem influenciar a biomassa acima do solo (AGB) na Amazônia, considerando diversos cenários climáticos projetados pelos modelos do CMIP6. Através desta abordagem, busca-se fornecer insights valiosos para futuras políticas de adaptação e conservação florestal, contribuindo significativamente para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Área de Estudo

A área de estudo engloba o limite biogeográfico da Pan-Amazônia (Raisg, 2019), incluindo formações de floresta ombrófila densa, florestas abertas (ombrófila aberta) e savanas ou cerrados, além de uma extensa zona de transição entre estes tipos. Esta região, caracterizada por sua alta diversidade de ecorregiões (Raisg, 2012), está distribuída por 8 países (Brasil, Bolívia, Peru,

Colômbia, Equador, Venezuela, Guiana e Suriname) e um território ultramarino (Guiana Francesa), totalizando aproximadamente 7 milhões de km<sup>2</sup> (Fig. 2.1). A extensão da região amazônica representa 58.8% do território brasileiro, 43.3% da Bolívia, 42.4% Colômbia, 46.9% Equador, 60.9% Peru, 49.5% da Venezuela e 100% nos territórios da Guiana, Guiana Francesa e Suriname (Raisg, 2012; Walker *et al.*, 2020).

Figura 2.1- Localização da área de Estudo.



### 2.2.2 Estimativa de Biomassa Florestal

Utilizou-se o conjunto de dados AGB (Mg/ha<sup>-1</sup>) do *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) Nível 4A (L4A), versão 2.1 (Dubayah *et al.*, 2022), obtido por medições de *Light Detection and Ranging* (LiDaR) pela *Estação Espacial Internacional* (ISS) de 18/04/2019 a 16/03/2023. A AGB média da região pelo GEDI ocorre através da estimativa de três lasers que criam oito transectos de feixe no solo, amostrando áreas de aproximadamente 25 metros de comprimento, espaçadas a cada 60 metros ao longo da área na superfície da Terra que é iluminada por um único pulso de laser. A partir das medições GEDI que penetram em copas densas e fornecem amostragem abrangente são geradas estimativas de densidade de AGB (Sun *et al.*, 2022).

Para refinar a análise de área florestais minimamente afetadas pela ação humana, foram aplicados filtros utilizando o Global Consensus Land Cover (Glcc, v2) e o Intact Forest Landscapes (IFL) além de um critério de exclusão para AGB abaixo de  $50 \text{ Mg/ha}^{-1}$ , visando focar em vegetação arbórea (Tuanmu *et al.*, 2014; Potapov *et al.*, 2017) (ver Figura Suplementar S1).

Em seguida, procedeu-se à validação dos pontos de AGB utilizando as parcelas de inventário florestal para uma análise de precisão do modelo. Foram empregadas métricas como o Erro Absoluto Médio (MAE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) juntamente com os índices de Willmott (Willmott *et al.*, 2011) para esta finalidade (Ver Fig. S5- Apêndice de Informações de Suporte). Os resultados forneceram uma medida da acurácia e confiabilidade das estimativas de AGB, demonstrando uma correlação positiva moderada entre as variáveis observadas (RAINFOR) (Mitchard *et al.*, 2014; Lopez-Gonzalez *et al.*, 2014) e as previsões (AGB atual), com um intervalo de confiança de 95% variando entre 0.38 e 0.67. Além disso, o RMSE do modelo variou entre 92.80 e 120.79, enquanto o MAE variou entre 72.28 e 95.99 (Ver Fig S5- Apêndice de Informações de Suporte). Estas métricas indicam que o modelo produz estimativas sem tendência sistemática para superestimar ou subestimar os valores observados, sugerindo uma relação consistente entre as previsões do modelo e os valores reais observados (ver Tab. S4- Apêndice de Informações de Suporte). Em resumo, os resultados da análise de precisão do modelo demonstram sua eficácia.

### 2.2.3 Construção da base de Dados Climáticos

Os dados climáticos foram obtidos do WORLDCLIM, no qual, oferece informações climáticas atuais e futuras em diferentes resoluções, as utilizadas no estudo foram a resolução espacial de 10 minutos (aproximadamente  $340 \text{ km}^2$ ) (Hijmans *et al.*, 2005).

Para os padrões climáticos atuais, utilizou-se a base de dados bioclimáticas, lançada em 2020. Essa base apresenta tendências anuais derivadas dos valores mensais de 1970 - 2000 (Fick; Hijmans, 2017). As variáveis bioclimáticas selecionadas foram: Temperatura Média Anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) (BIO1); Amplitude Anual de Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) (BIO7); Precipitação Acumulada (mm/ano) (BIO12) e Sazonalidade da Precipitação (%) (BIO 15), sendo escolhidas por sua relevância na compreensão ecológica do funcionamento do ecossistema amazônico (Malhi *et al.*, 2020), e por serem preditores ecoclimáticos de disponibilidade energética e de umidade, utilizadas com frequência na construção de modelos que afetam direta e negativamente a resiliência da floresta (Anjos; Toledo, 2018).

Nos padrões climáticos projetados para o futuro, foram utilizados dados bioclimáticos provenientes de cenários futuros do *World Climate Research Programme Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) (Eyring *et al.*, 2016). Esses dados estão disponíveis para nove Modelos de Circulação Geral (GCM's), dos quais foram escolhidos cinco: BCC-CSM2-MR,

CanESM5, CNRM-CM6-1, IPSL-CM6A-LR e MIROC6 (Wu *et al.*, 2019; Swart *et al.*, 2019; Voldoire *et al.*, 2019; Boucher *et al.*, 2020; Tatebe *et al.*, 2019).

A escolha dos 5 GCMs do CMIP6 foi fundamentada em seus altos valores de Equilibrium Climate Sensibility (ECS) e Transient Climate Response (TCR), parâmetros cruciais para avaliar a confiabilidade das previsões dos modelos (ver Tab. S1-Apêndice de Informações de Suporte) (Flynn; Mauritsen, 2020; Zelinka *et al.*, 2020). Os critérios utilizados para contornar as incertezas das previsões, incluíram a seleção da média desses 5 Modelos de GCM's do CMIP6, empregados em projeções climáticas futuras e escolhidos com base na métrica de similaridade (Sanderson *et al.*, 2015). A formação do “*ensemble*”, que destaca as previsões mais consensuais entre diferentes métodos de modelagem (Franklin, 2010), tem como objetivo minimizar o efeito das incertezas sobre a predição dos modelos (Diniz-Filho *et al.*, 2009).

Os dados do CMIP6 são disponibilizados para quatro cenários climáticos diferentes seguindo trajetórias de emissões e políticas climáticas (O'Neill *et al.*, 2017). Os quatro cenários climáticos escolhidos foram: SSP1-2.6 (baixas emissões); SSP2-4.5 (médias emissões); SSP3-7.0 e SSP5-8.5 (altas emissões). Esses cenários, conforme o IPCC é agrupado em diferentes projeções de emissão de GEE, relacionados aos aspectos de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais até 2100. Os cenários climáticos representam diferentes graus de desafios em mitigação e adaptação, onde cada SSP tem um cenário de implementação de linha de base e cenários adicionais que combinam o enredo com políticas de mitigação climática compatíveis com certos níveis de concentração de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, as mudanças climáticas (Silva-Bezerra *et al.*, 2022).

Como resultado utilizando essas projeções até o final do século 21 com intervalos de 20 anos, foram escolhidos os prazos descritos no AR6 do IPCC de: 2021-2040 (Curto Prazo), 2041-2060 (Médio Prazo), 2061-2080 (Longa Duração) e 2081-2100 (Final do Século).

#### 2.2.4 Exposição de AGB com as condições climáticas atuais e futuras

A relação entre AGB e as variáveis bioclimáticas foi explorada por meio de regressão linear múltipla (LM), com significância estatística dos coeficientes indicando impacto relevante das variáveis independentes (ver Fig. S2A; S2B, S2C, S3C e ver Tab. S2-Apêndice de Informações de Suporte).

Após a modelagem dos dados para o presente, realizou-se análise espacial para explorar padrões de distribuição da AGB nas diferentes regiões de estudo através da Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) (Brunsdon *et al.*, 1996). Com o modelo GWR foi possível explicar uma parcela significativa da variação espacial na variável dependente, com coeficiente de determinação global (GlobalR<sup>2</sup>) de 0.42 (ver Fig. S3-Apêndice de Informações de Suporte). Para isso, foi selecionada a largura de banda para regressão espacial utilizando o parâmetro de banda

(GWRBandwidth) de 0.07 para as coordenadas espaciais associadas aos dados, com esse ajuste do modelo, foi possível indicar a influência da relação espacial entre as observações, com um Residual standard error de 58.35 (ver Tab.S3-Apêndice de Informações de Suporte).

Para cada pixel foi calculado o valor médio de AGB relacionados à cobertura florestal, onde se assumiu que o valor máximo de AGB representa o potencial de AGB que poderia ser alcançado por floresta em cada pixel (Um pixel é a menor unidade de área em uma imagem digital).

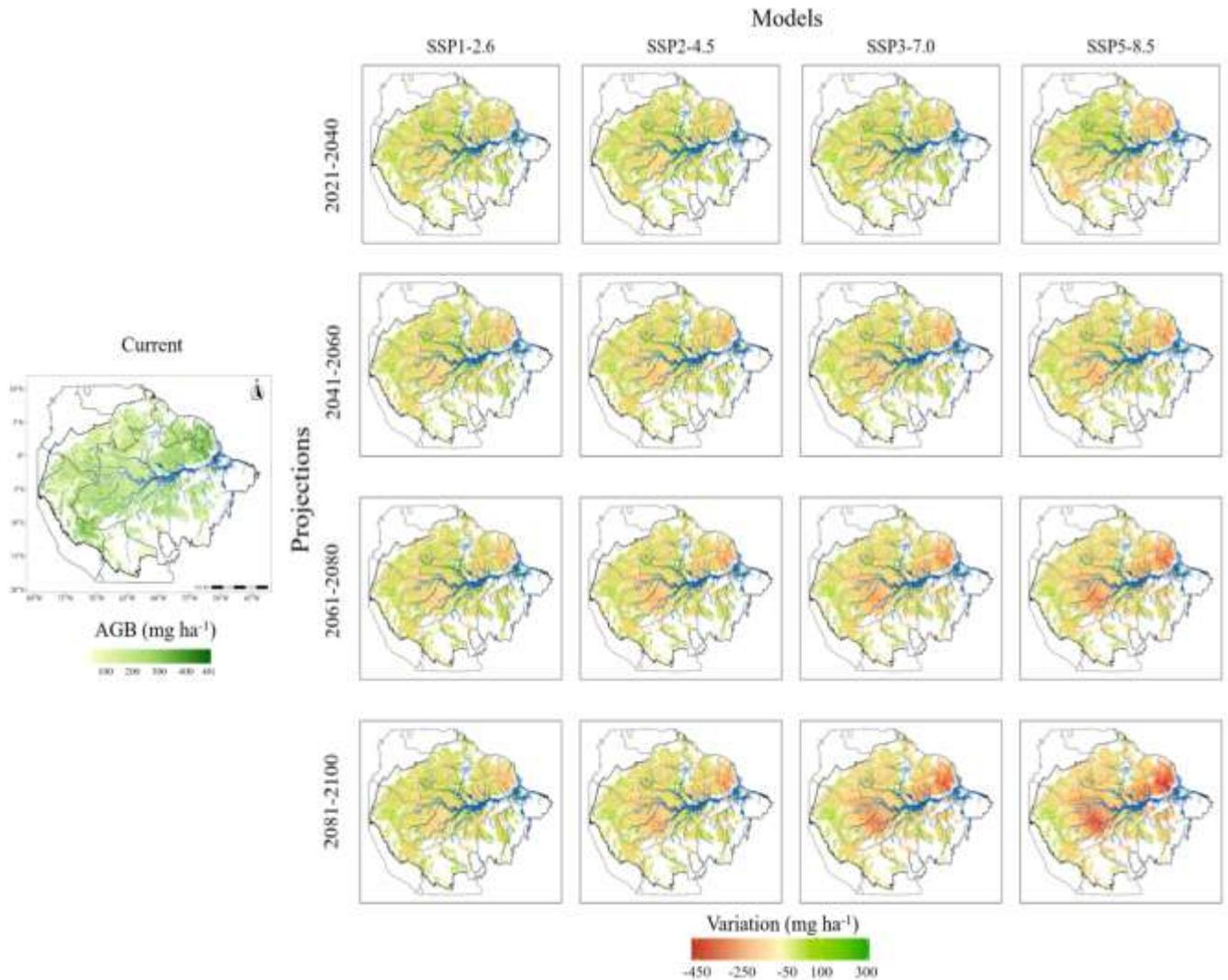
Posteriormente, com o modelo de AGB calibrado para o presente, foi utilizado para projetar seu potencial em condições climáticas não-análogas. As variáveis bioclimáticas futuras foram consideradas para estimar a AGB até o final do século nos quatro cenários climáticos, abrangendo os quatro períodos (curto, médio e longo prazo). A partir disso, a diferença entre os valores previstos da AGB para cada cenário e período, em comparação com os dados atuais, foi calculada para avaliar o impacto da exposição às condições climáticas na produção de AGB.

## **2.3 Resultados**

### **2.3.1 Tendência geral da variação da AGB sob cenários climáticos futuros**

A análise da distribuição espacial das áreas com variação de AGB, utilizando a média dos diferentes GCM's projetados a cada 20 anos até o final do século, revelou uma tendência predominante de redução da AGB em grande parte do bioma Amazônico. Apenas um número limitado de áreas demonstrou uma tendência de aumento da AGB. De forma geral, é esperado que as formações florestais sofram uma perda de AGB em resposta às mudanças climáticas (Fig. 2.2).

Figura 2.2- Resiliência da AGB às condições climáticas. Apresenta as imagens da distribuição da AGB sob cenário de AGB atual e de cenários futuros, com as previsões da AGB em relação às condições climáticas futuras, em cada período de intervalos de 20 anos (2021 a 2100) e para cada cenário climático, a partir da análise de dados observados e do modelo preditos GWR para bioma Amazônia.



### 2.3.2 Áreas de maior vulnerabilidade

Especificamente, as regiões nordeste do bioma, especialmente próximas ao escudo das Guianas e na Amazônia central-leste, estão entre as mais susceptíveis a perda de AGB, independentemente do cenário climático (Fig. 2.2). Essas áreas são caracterizadas por apresentar as maiores perdas de resiliência. Além disso, a Amazônia ocidental e sul também evidenciaram reduções significativas de AGB (Fig. 2.2). As estimativas indicam uma diminuição média de AGB de 177.61 Mg/ha<sup>-1</sup> para o período de 2021-2040 até 140.43 Mg/ha<sup>-1</sup> até o final do século. No cenário mais pessimista (SSP 5-8.5), avalia-se que 90% da área de estudo no bioma vivencie perdas de AGB, implicando em reduções máximas de até 474 Mg/ha<sup>-1</sup> (Fig. 2.2). Essa tendência de padrões espacial é consistente com os trabalhos que evidenciam áreas que o bioma enfrentaria baixa resiliência de AGB (Boulton *et al.* 2022; Tavares *et al.* 2023; Flores, Montoya e Sakschewski; 2024).

### 2.3.3 Relação entre variabilidade climática e AGB

Os padrões espaciais sugerem uma baixa resiliência do bioma à variabilidade climática, com implicações significativas para a capacidade da Amazônia de enfrentar as mudanças climáticas futuras. As variáveis bioclimáticas BIO1 e BIO7 mostraram uma associação negativa com a AGB, enquanto a BIO12 apresentou uma relação negativa menos pronunciada. Por outro lado, um aumento na BIO15 está associado ao aumento da AGB (Ver Tab. S2-Apêndice de Informações de Suporte), destacando a importância de manter a cobertura florestal primária (Walker *et al.*, 2020).

### 2.3.4 Projeções de AGB até 2100

As projeções para todos os cenários climáticos na figura 2.3, indicaram valores de AGB abaixo da média atual (207.00 Mg/ha<sup>-1</sup>), sinalizando um declínio da vegetação ao longo do tempo, com implicações significativas para a estabilidade das florestas tropicais diante das condições climáticas futuras.

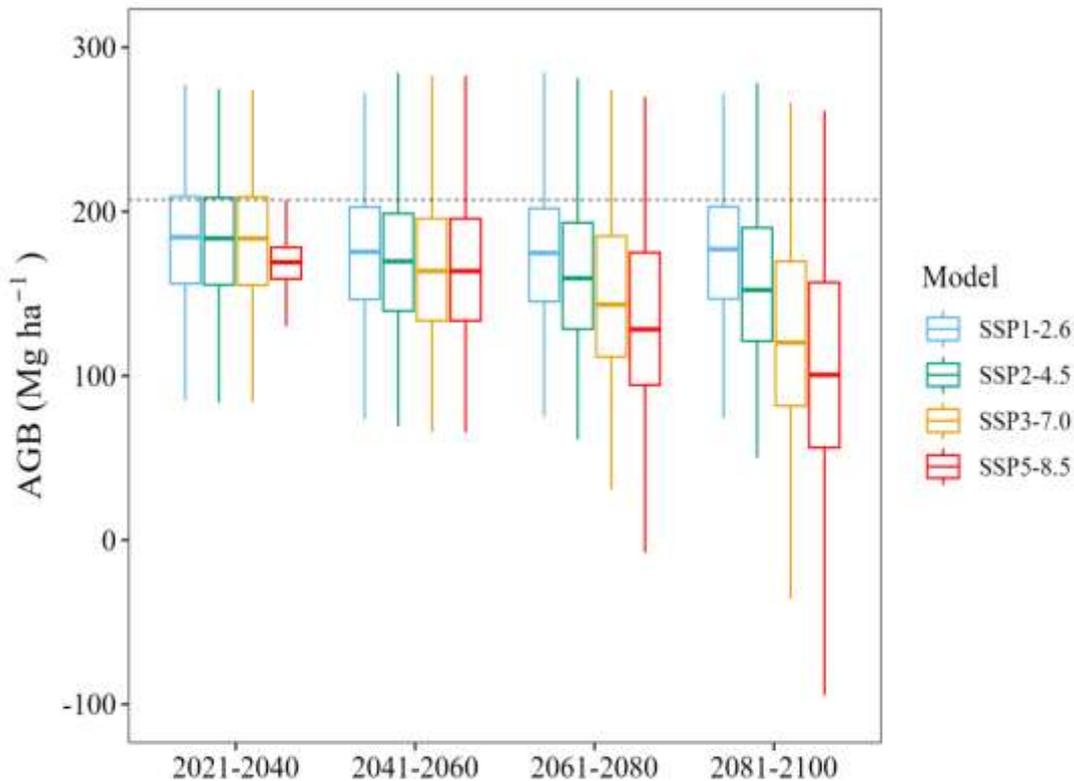
- **Curto Prazo (2021-2040):** As estimativas indicam que a média de AGB será mais próxima à atual, com 177.61 Mg/ha<sup>-1</sup>, e a menor mediana observada é de 169.05 Mg/ha<sup>-1</sup> no cenário SSP5-8.5. Durante este período, a variabilidade nas perdas de AGB entre os cenários é relativamente baixa, sugerindo uma fase inicial de ajustes na AGB em resposta às mudanças climáticas.
- **Médio Prazo (2041-2060):** A média de AGB é projetada para 169.51 Mg/ha<sup>-1</sup>, com menor variabilidade entre as predições dos cenários, indicando uma continuidade na tendência de declínio da AGB.
- **Longa Duração (2061-2080):** Observa-se uma redução para uma média de 154.68 Mg/ha<sup>-1</sup>, com a mediana variando significativamente entre os cenários, de 174.75 Mg/ha<sup>-1</sup> no SSP1-2.6 a 128.28 Mg/ha<sup>-1</sup> no SSP5-8.5. Essa variação destaca uma perda gradativa da AGB, na ordem de aproximadamente 8.5%, refletindo uma diminuição progressiva da resiliência da floresta.
- **Final do Século (2081-2100):** As projeções indicam uma média de AGB de 140.43 Mg/ha<sup>-1</sup> para o bioma, com uma variabilidade notável entre os cenários, variando de 176.75 Mg/ha<sup>-1</sup> a 104.30 Mg/ha<sup>-1</sup>. Essa ampla gama reflete a incerteza associada às respostas do ecossistema sob diferentes trajetórias de emissões e políticas climáticas.

As projeções em cenários de emissões até 2100 mostram padrões distintos na média de AGB. No cenário SSP1-2.6, espera-se uma estabilidade ao longo do tempo, com flutuações mínimas. No entanto, no cenário SSP2-4.5, prevê-se uma tendência de diminuição gradual, especialmente nas últimas décadas do século. Já no SSP3-7.0, as projeções apontam para uma diminuição significativa e pronunciada de AGB, com uma redução mais rápida em comparação com

outros cenários. Por fim, em SSP5-8.5, espera-se uma redução drástica e contínua na AGB ao longo do século, com um declínio acentuado já nas primeiras décadas do século XXI (Fig. 2.3).

Essas projeções refletem uma tendência de declínio na estabilidade das florestas tropicais devido às condições climáticas futuras. Até 2100, espera-se que ocorram as maiores perdas de AGB, o que implicaria em uma redução significativa na capacidade de sequestro de carbono da floresta, resultando em menores estoques de carbono. A Figura 2.3 ilustra essa tendência, apresentando o diagrama de caixa da estimativa de AGB ao longo dos anos, em intervalos de 20 anos, para os quatro cenários climáticos futuros.

Figura 2.3- Exposição da AGB em cenários climáticos em  $\text{Mg/ha}^{-1}$ . Apresenta o diagrama de caixa da estimativa de AGB no decorrer dos anos de 2021 a 2100, em intervalos de 20 anos modelados pelo método GWR em 4 cenários futuros de mudança do clima diferentes, do mais otimistas ao mais pessimista. A linha tracejada apresenta a estimativa da média de AGB (atual) para a Amazônia.



## 2.4 Discussão

Uma alteração na estabilidade da floresta Amazônica devido às mudanças climáticas é evidente, dada a tendência observada que sugere uma possível perda na capacidade de sequestro de carbono. Estudos anteriores já haviam destacado que padrões com temperaturas mais altas e com déficit no regime hidrológico podem alterar as formações florestais densas existentes, em diversos níveis da estrutura florestal indicando alta sensibilidade da biomassa (Putz *et al.*, 2014; Rammig *et al.*, 2010; Anjos; Toledo, 2018; Flores, Montoya e Sakschewski, 2024). Isso porque muitas espécies

não conseguem se adaptar às novas condições, afetando diretamente os serviços ecossistêmicos oferecidos, como a capacidade de estocagem de carbono na sua biomassa (Phillips *et al.*, 2010; Putz *et al.* 2014).

Na Amazônia, a resposta fisiológica de algumas espécies de árvores ao estresse hídrico indica um aumento na concentração de CO<sub>2</sub>, levando essas árvores a experimentarem condições climáticas além de seus limites adaptativos (Esquivel-Muelbert *et al.*, 2019). Os cenários de emissão do estudo mostram que, no cenário SSP1-2.6, caracterizado por uma redução significativa das emissões de GEE, é esperado que as flutuações na AGB sejam mínimas até o final do século. Por outro lado, cenários pessimistas preveem uma redução drástica e contínua na AGB, começando já nas primeiras décadas do século XXI. Portanto, as informações de diferentes projeções climáticas reduzem a incerteza associada às projeções.

A precipitação e a temperatura, segundo Uribe *et al.* (2023), são variáveis subjacentes que direta e indiretamente influenciam a quantidade de assimilação e armazenamento de carbono na floresta. No estudo, as variáveis de temperatura e precipitação anual mostraram ter um impacto negativo na AGB. No entanto, no que diz respeito à sazonalidade da precipitação, observou-se um impacto positivo, exceto durante a estação mais seca, na qual o efeito na AGB foi ligeiramente negativo. Sugerindo que as condições de estresse hídrico e térmico diminuem a AGB, seja devido à mortalidade das árvores, à diminuição do crescimento ou ambas as razões (Esquivel-Muelbert *et al.*, 2019; Uribe *et al.*, 2023).

As projeções climáticas futuras de redução da umidade e aumento significativo e persistente da temperatura no bioma da floresta amazônica (Galbraith *et al.*, 2010; Anjos *et al.*, 2021), possuem um efeito direto sobre a produtividade florestal, e consequente perda de biomassa vegetal (Phillips *et al.*, 2010; Galbraith *et al.*, 2010; Tavares *et al.*, 2023), corroborando com as indicações apresentadas no nosso trabalho de possíveis déficits na densidade da vegetação de 14.2% em um futuro próximo para o período de (2021-2040); 18.1% (2041-2060); 25.9% (2061-2080) e 32.1% (2081-2100).

Admitindo o contexto das regiões globais, a Amazônia está entre as mais expostas às novas condições do clima, com maiores diferenças de temperatura até 2100 (Williams; Jackson; Kutzbach, 2007; Wright; Muller-Landau; Schipper, 2009). Nos resultados de Chagas *et al.* (2012) apresentam redução da biomassa de até 25% em áreas de experimentos no leste da Amazônia com exclusão de metade da precipitação às condições naturais do clima. Tavares *et al.* (2023) concluíram que as regiões de mudanças climáticas mais pronunciadas, como a oeste, sudoeste e sul da Amazônia, estão perdendo AGB devido à suscetibilidade da mortalidade da vegetação. Flores, Montoya e Sakschewski (2024) citam que os modelos climáticos recentes do CMIP6 concordam que, nas

próximas décadas, as condições de precipitação se tornarão mais sazonais nas regiões leste e sul da Amazônia, e as temperaturas se tornarão mais altas em toda a Amazônia.

Diante dos cenários apresentados nos estudos anteriores (Chagas *et al.* 2012; Tavares *et al.* 2023; Flores, Montoya e Sakschewski, 2024), o nosso estudo também apresentou a indicação de maior suscetibilidade à perda de AGB na região central-leste da Amazônia, sul do bioma e na Amazônia ocidental. Portanto, essas áreas devem ser consideradas prioritárias para restauração de ecossistemas florestais, como estratégias que aumentem a resiliência das florestas tropicais com o estabelecimento, por exemplo, de corredores ecológicos para facilitar a dispersão de espécies, a implementação de práticas de manejo florestal sustentável etc, uma vez que, as evidências encontradas de perda de AGB apresentadas nas figuras 2.2 e 2.3, estão perdendo AGB devido a suscetibilidade da vegetação.

As mudanças climáticas previstas para o futuro, como aumento de temperatura e eventos climáticos extremos, prejudicam a capacidade das árvores de absorver carbono, levando a um aumento na mortalidade, conforme observado por Gatti *et al.* (2021) e Tavares *et al.* (2023). Florestas mais férteis na Amazônia ocidental, de acordo com Esquivel-Muelbert *et al.* (2020), apresentam taxas de mortalidade superiores às áreas menos férteis da Amazônia central-oriental, contudo, as florestas da Amazônia central e perto das savanas da Guiana poderiam fazer a transição para uma baixa cobertura arbórea (Flores, Montoya e Sakschewski, 2024). Outra região de grande vulnerabilidade em relação às taxas de mortalidade, com perdas de biomassa, foi identificada na margem sul da Amazônia por Tavares *et al.* (2023). Além disso, Flores, Montoya e Sakschewski (2024) expõem que as florestas perderam a estabilidade em parte do sul e centro da Amazônia, podendo ultrapassar o limite crítico para uma savana estável no sul da Amazônia Boliviana.

As variações na estabilidade da AGB nas florestas amazônicas ao longo do tempo devido às mudanças climáticas, tais como, secas extremas, mostram uma redução gradativa da AGB (Galbraith *et al.*, 2010; Tavares *et al.*, 2023; Lapola *et al.*, 2023). Autores como Uribe *et al.* (2022) observaram uma redução gradual na AGB, com previsões pessimistas sugerindo perdas líquidas de carbono de até 20%. Essas projeções climáticas, de acordo com Bunker *et al.* (2005), indicam menor armazenamento de carbono na AGB da floresta. Boulton *et al.* (2022) apontam uma perda acentuada na resiliência da AGB, especialmente a partir dos anos 2000, com as grandes secas contribuindo para tais perdas, principalmente em áreas onde a precipitação cai abaixo de 3500 - 4000 mm. Estes fatores afetam a capacidade adaptativa da floresta, especialmente na parte central e oeste do bioma, onde altas temperaturas e diminuição da precipitação prejudicam a resiliência da AGB (Anjos *et al.*, 2021).

Os valores calculados e apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3 permitem estimar uma tendência de mudanças potenciais de AGB na floresta Amazônia diante das condições climáticas futuras, em

função de diferentes cenários climáticos utilizando CMIP6 até o final do século. A perda de AGB identificada é atribuída aos efeitos das mudanças climáticas, com aumento da temperatura e diminuição da umidade, que afetam a resiliência das florestas amazônicas. Essas informações dos locais de perda são importantes para que haja uma intensificação dos esforços de conservação e gestão no bioma Amazônia, a definição de investimentos em programas de restauração e reflorestamento, fortalecimento das agências governamentais de proteção ambiental, ressaltando a urgência da necessidade de políticas e práticas que visem mitigar os efeitos das mudanças climáticas e proteger a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos oferecidos pela floresta amazônica.

A incorporação dos resultados deste estudo torna-se essencial como suporte para as NDC's, que incluem as contribuições das florestas, diante dos sumidouros de carbono presente nas florestas tropicais intactas, destacando a urgência da necessidade de políticas e práticas que visem mitigar os efeitos das mudanças climáticas e proteger a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos oferecidos pela floresta amazônica.

#### 2.4.1 Perspectivas Futuras

As descobertas deste estudo ressaltam a importância da modelagem integrada de perda e ganho de AGB na Amazônia diante das mudanças climáticas além de seus impactos, e como estes refletem nas funções dos ecossistemas florestais futuros. Vários estudos científicos apontam que manter o carbono estocado nas florestas é crucial para evitar o agravamento da crise climática global (Huntingford *et al.*, 2013; Silva-Júnior *et al.*, 2020; Li, *et al.*, 2020; Uribe *et al.*, 2023), e como forma de melhorar a modelagem com base nos resultados obtidos, uma vez que, aproximadamente 58.25% da variabilidade na AGB ainda não está sendo explicada pelo modelo (Tab. 3 e Fig.3.3-Apêndice de Informações de Suporte), sugerindo que a presença de outras variáveis não incluídas no modelo possam influenciar a AGB. Algumas perspectivas futuras poderiam fornecer informações adicionais sobre a dinâmica da AGB sob mudanças climáticas, inserindo no modelo além dos dados climáticos fornecidos nesse estudo, incorporar também dados biológicos e socioeconômicos.

Uma abordagem biológica importante a ser considerada na modelagem dos diferentes cenários climáticos é a análise dos processos fisiológicos e ecológicos que influenciam a resposta das espécies de árvores presentes no bioma Amazônia diante do estresse hídrico e das mudanças na concentração de CO<sub>2</sub>. O crescimento e a sobrevivência das árvores dependem da diversidade de espécies e da estrutura da vegetação, ambos fundamentais para os processos ecológicos (Esquivel-Muelbert *et al.*, 2019). Estudos como o de Galbraith *et al.* (2010) discutem que aumentos na respiração das plantas, declínios diretos na fotossíntese e aumentos no déficit de pressão de vapor (VPD) contribuíram para reduzir o carbono da vegetação amazônica. Portanto, os resultados da

inserção dos processos principais da vegetação, possibilitaria a simulação da capacidade da vegetação em lidar com o estresse hídrico, acesso à água subterrânea, vulnerabilidade a incêndios florestais e fertilidade do solo (Flores; Montoya; Sakschewski, 2024). No entanto, para avançar nesse estudo, seria necessário coletar dados em áreas pouco estudadas e investir em tecnologias de monitoramento remoto para avaliar as mudanças na vegetação ao longo do tempo.

A incorporação de dados socioeconômicos, tais como, as pressões antropogênicas na modelagem do nosso estudo também auxiliaria na avaliação dessa capacidade do ecossistema amazônico em se adaptar e recuperar diante das mudanças climáticas. As pressões de desmatamento, queimadas, exploração madeireira são distúrbios humano que podem propagar gramíneas invasoras e, tornar o sistema florestal amazônico mais homogêneo, reduzindo a heterogeneidade e potencialmente aumentando o risco de transições sistêmicas (Flores; Montoya; Sakschewski, 2024). Os resultados de Kukla *et al.* (2021) sugerem que o fogo e o desmatamento provocados pelo homem provavelmente representam uma ameaça maior ao futuro dos ecossistemas amazônicos do que apenas a seca. Flores, Montoya e Sakschewski (2024) retratam que modelos de vegetação apontam para um limite crítico de 20% de desmatamento acumulado na Amazônia, a partir do qual, a mortalidade das florestas se acelera, levando a diminuição das chuvas, podendo resultar em uma transição ecossistêmica na região, além disso, sugerem que a deflorestação acumulada de 30 a 50%, a precipitação em áreas não desmatadas pode diminuir significativamente, aumentando o risco de mais perda florestal. Portanto, esses fatores seriam interessantes para avaliar a dinâmica da AGB no bioma Amazônia.

## REFERÊNCIAS

ALBERT, J. S. *et al.* Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, v. 379, n. 6630, 2023.

ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, v. 43, n. 6, p. 1223-1232, 2006.

AMAZONIAN NETWORK OF GEOREFERENCED SOCIO-ENVIRONMENTAL INFORMATION-RAISG. *Datos cartográficos: limites*. Disponível em: <http://raisg.socioambiental.org/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

ANJOS, L. J. S.; TOLEDO, P. M.de. Measuring resilience and assessing the vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America. *PLoS ONE*, v. 13, n. 3, e0194654, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0194654.

ANJOS, L. J. S.; SOUZA, E. B. de; AMARAL, C. T.; IGAWA, T. K.; TOLEDO, P. M. de. Future projections for terrestrial biomes indicate widespread warming and moisture reduction in forests up to 2100 in South America. *Global Ecology and Conservation*, v. 25, e01441, 2021.

- ARTAXO, P. Interactions between the functioning of the Amazon rainforest and climate. *In: WORKSHOP: THE SCIENTIFIC, SOCIAL AND ECONOMIC DIMENSIONS OF THE DEVELOPMENT OF THE AMAZON. Anais[...]*. Manaus: INPA, 2018. Disponível em: <http://www.fapesp.br/eventos/amazon-workshop/pt>. Acesso em: 03 set. 2021.
- BACCINI, A.; WALKER, L.; CARVALHO, M.; FARINA, M.; SULLA-MENASHE, D.; HOUGHTON, R. A. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science*, v. 358, n. 6360, p. 230-234, 2017.
- BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Climate benefits of Intact Amazon forests and the biophysical consequences of disturbance. *Journal of Frontiers in Forests and Global Change*, 2019. DOI: 10.3389/FFGC.2019.00047.
- BOUCHER, O.; SERVONNAT, J.; ALBRIGHT, A. L.; AUMONT, O.; BALKANSKI, Y.; BASTRIKOV, V. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 7, e2019MS002010, 2020.
- BRUNSDON, C.; FOTHERINGHAM, A. S.; CHARLTON, M. E. Geographically weighted regression: a method for exploring non-spatial statistics. *Geographical Analysis*, v. 28, p. 281-298, 1996.
- BUNKER, D. E. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science*, v. 310, n. 5750, p. 1029-1031, 2005.
- CHAGAS, G. F. B. das; SILVA, V. de P. R. da; COSTA, A. C. L. da; DANTAS, V. de A. Impacts of rainfall reduction on the aerial biomass of the Amazon Forest. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, v. 16, n. 1, p. 72-79, 2012. DOI: 10.1590/s1415-43662012000100010.
- DINIZ-FILHO, J. A. F.; BINI, L. M.; RANGEL, T. F.; LOYOLA, R. D.; HOF, C.; NOGUE, D.; ARAU, M. B. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. *Ecography*, v. 32, p. 897-906, 2009. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2009.06196.x.
- DUBAYAH, R. O. *et al.* Above-ground biomass density at the GEDI L4A footprint level, version 2.1. Oak Ridge: ORNL DAAC, 2022.
- EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Journal of Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 1937-1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- ESQUIVEL-MUELBERT. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 2018. DOI: 10.1111/gcb.14413.
- ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: Significantly under-predicted by tropical SST. *Scientific Reports*, v. 7, p. 5811, 2017.
- FORZIERI, G. *et al.* Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, v. 608, n. 7923, p. 534-539, 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-04959-9.

FLORES, B. M.; MONTOYA, E.; SAKSCHEWSKI, B. Transições críticas no sistema florestal amazônico. *Nature*, v. 626, p. 555–564, 2024. DOI: 10.1038/s41586-023-06970-0.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.

FLYNN, C. M.; MAURITSEN, T. On the climate sensitivity and historical warming evolution in recent coupled model ensembles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020. DOI: 10.5194/acp-2019-1175.

FRANKLIN, J. *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Texas, EUA: Department of Geography and the Environment, University of Texas, EUA., 2010.

GALBRAITH, D.; *et al.* Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 647–665, 2010.

GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. DOI: 10.1038/s41586-021-03629-6.

GORELİK, S. R. *et al.* The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 117, n. 6, p. 3015–3025, 2020.

HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 25, p. 1965–1978, 2005.

HUNTINGFORD, C.; ZELAZOWSKI, P.; GALBRAITH, D.; MERCADO, L. M.; SITCH, S.; FISHER, R.; LOMAS, M.; WALKER, A. P.; JONES, C. D.; BOOTH, B. B. B.; MALHI, Y.; HEMMING, D.; KAY, G.; GOOD, P.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; ATKIN, O. K.; LLOYD, J.; GLOOR, E.; COX, P. M. Simulated resilience of tropical rainforests to CO<sub>2</sub>-induced climate change. *Nature Geoscience*, v. 6, n. 4, p. 268–273, 2013. DOI: 10.1038/ngeo1741.

IBÁÑEZ, I. *et al.* Forest Resilience Under Global Environmental Change: Do We Have the Information We Need? A systematic review. *PLoS ONE*, v. 14, n. 9, e0222207, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0222207.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J. A.; VAN DER SCHRIER, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific Reports*, v. 6, p. 33130, 2016.

KUKLA, T.; *et al.* The resilience of Amazon tree cover to past and present drying. *Global and Planetary Change*, v. 202, p. 103520, 2021.

LAPOLA, D. M.; PINE, P.; BARLOW, J.; ARAGÃO, L. E. O. C. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, n. 6630, 2023.

LOPEZ-GONZALEZ, G. *et al.* Amazon forest biomass measured in inventory plots. Plot Data from "Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites" (2014). Disponível em: <https://forestplots.net/>. DOI: 10.5521/FORESTPLOTS.NET/2014\_1.

LI, Y.; LI, M.; LI, C.; LIU, Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-67024-3.

MALHI, Y.; FRANKLIN, J.; SEDDON, N.; SOLAN, M.; TURNER, M. G.; FIELD, C. B.; KNOWLTON, N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 375, 20190104, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>.

MAPBIOMAS. *Land Use and Cover Maps*. 2021. Disponível em: [https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR). Acesso em: 18 ago. 2023.

MARENGO, J. A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*, v. 6, p. 228, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. The carbon balance of the Brazilian Amazon. *Advances in Studies São Paulo*, v. 16, n. 45, p. 34–42, 2002.

PHILLIPS, O. L. *et al.* Changes in the biomass, dynamics, and composition of the Amazon rainforest, 1980–2002. In: PHILLIPS, O. L. *et al.* *Amazon and global change*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 373-387. (Geophysical Monograph Series 186).

POTAPOV, P. *et al.* The last frontiers of wilderness: tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*, v. 3, n. 1, e1600821, 2017.

RAMMIG, A. *et al.* Estimating the risk of Amazonian forest dieback. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 694–706, 2010.

SANDERSON, B. M.; KNUTTI, R.; CALDWELL, P. A representative democracy to reduce interdependency in a multimodel ensemble. *Journal of Climate*, v. 28, p. 5171-5194, 2015. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00362.1.

SILVA-JÚNIOR, C. H. L.; HEINRICH, V. H. A.; FREIRE, A. T. G.; BROGGIO, I. S.; ROSAN, T. M.; DOBLAS, J.; ANDERSON, L. O.; ROUSSEAU, G. X.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA, C. A.; HOUSE, J. I.; ARAGÃO, L. E. O. C. Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. *Scientific Data*, v. 7, n. 1, p. 1-9, 2020. DOI: 10.1038/s41597-020-00600-4.

SILVA-BEZERRA, F. G. *et al.* New land-use change scenarios for Brazil: Refining global SSPs with a regional spatially-explicit allocation model. *PLoS ONE*, v. 17, n. 4, e0256052, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0256052.

STRAND, J.; SOARES-FILHO, B.; COSTA, M. H.; OLIVEIRA, U.; RIBEIRO, S. C.; PIRES, G. F.; OLIVEIRA, A.; RAJÃO, R.; MAY, P.; VAN DER HOFF, R.; SIIKAMÄKI, J.; DA MOTTA, R. S.; TOMAN, M. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. *Nature Sustainability*, v. 1, n. 11, p. 657-664, 2018. DOI: 10.1038/s41893-018-0175-0.

SUN, M. *et al.* Evaluation of NASA's GEDI Lidar Observations for Biomass Estimation in Temperate and Tropical Forests. *Forests*, v. 13, n. 10, 1686, 2022.

SWART, N. C. *et al.* The Canadian earth system model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 11, p. 4823-4873, 2019.

TATEBE, H. *et al.* Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, v. 12, p. 2727-2765, 2019. DOI: 10.5194/gmd-12-2727-2019.

THOMPSON, J. R.; GREEN, A. J.; KINGSTON, D. G. Potential evapotranspiration-related uncertainty in climate change impacts on river flow: an assessment for the Mekong River basin. *Journal of Hydrology*, v. 510, p. 259-279, 2014.

TUANMU, M. N.; JETZ, W. A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modelling. *Global Ecology and Biogeography*, v. 23, n. 9, p. 1031-1045, 2014. DOI: 10.1111/geb.12182.

TAVARES, J. V. *et al.* Basin-wide variation in tree hydraulic safety margins predicts the carbon balance of Amazon forests. *Nature*, v. 617, n. 7959, p. 111-117, 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE-UNFCCC. Durban Platform for Enhanced Action (decision 1/CP.17)-Adoption of a protocol, other legal instrument, or an agreed outcome with legal force under the Convention applicable to all Parties. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 21 maio 2021.

URIBE, M. R.; COE, M. T.; DA CASTANHO, A.; MARCIA, N. M.; V., D.; B., P. M. Net loss of biomass predicted for tropical biomes in a changing climate. *Nature Climate Change*, p. 1-6, 2023. DOI: 10.1038/S41558-023-01600-Z.

WALKER, W. S. *al.* The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 117, n. 6, p. 3015-3025, 2020.

WILLIAMS, J. W.; JACKSON, S. T.; KUTZBACH, J. E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 104, n. 14, p. 5738-5742, 2007.

WU, T. *et al.* The beijing climate center climate system model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 4, p. 1573-1600, 2019. DOI: 10.5194/gmd-12-1573-2019.

WRIGHT, S. J.; MULLER-LANDAU, H. C.; SCHIPPER, J. The future of tropical species on a warmer planet. *Conservation Biology*, v. 23, n. 6, p. 1418-1426, 2009. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2009.01337.x.

VOLDOIRE, A. *et al.* Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 11, n. 7, p. 2177-2213, 2019. DOI: 10.1029/2019MS001683.

ZELINKA, M. D.; MYERS, T. A.; MCCOY, D. T.; PO-CHEDLEY, S.; CALDWELL, P. M.; CEPPI, P.; KOLIAC, D. CMIP6 climate models predict significantly higher amplification of extreme temperature and rainfall events compared to CMIP5 models. *Earth's Future*, v. 8, e2020EF001809, 2020. DOI: 10.1029/2020EF001809.

ZHANG, Y.; LIU, H.; PIAO, S.; JIA, G.; HE, Y.; LIU, Q.; LI, L. Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 7, 074013, 2015. DOI: 10.1088/1748-9326/10/7/074013.

## **CAPÍTULO 3 PRIORIZANDO A CONSERVAÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA: AVALIANDO O POTENCIAL DA BIOMASSA SOB AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Publicado na Revista Global ecology and conservation (GECCO) em 9 de julho de 2024 \*  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03106>\**

**RESUMO:** Este estudo visa identificar a capacidade das florestas intactas de manter a Biomassa Acima do Solo (AGB) sob novas condições climáticas. Utilizando uma abordagem preditiva sob diferentes cenários climáticos (SSP1-2.6 e SSP5-8.5), e considerando a média dos Modelos de Circulação Geral (GCMs) para o período (2021-2040), foi revelado que as regiões com maior capacidade de AGB no cenário otimista estão concentradas nas regiões noroeste e sudeste, abrangendo as bacias dos rios Negro, Xingu e Tapajós. No cenário SSP5-8.5, embora os ganhos potenciais de AGB estejam concentrados nas mesmas regiões, a distribuição espacial é mais restrita e dispersa. Terras Indígenas (TIs) surgem como áreas com o maior potencial de ganhos de AGB em ambos os cenários climáticos. No entanto, essas previsões não incluem o impacto de eventos climáticos extremos, como tempestades, secas severas e incêndios florestais, que poderiam levar a uma subestimação das variações reais de biomassa.

**Palavras-chave:** Cenários CMIP6; Biomassa Florestal; Bioma Amazônia; Mudanças Climáticas; Áreas Protegidas.

### **PRIORITIZING AMAZON FOREST CONSERVATION: ASSESSING POTENTIAL BIOMASS UNDER CLIMATE CHANGE**

**ABSTRACT:** The aim of the study was to identify the capacity of intact forests to maintain Aboveground Biomass (AGB) under new climatic conditions, seeking areas with predictions of AGB increase in the biome. The analysis of AGB gain potential in the Brazilian Amazon, using a predictive approach in future scenarios under different climate scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-8.5), considering the average of General Circulation Models (GCM's) in the short-term period (2021-2040), revealed that the regions of the biome demonstrating capacity for AGB increase in the optimistic scenario are concentrated in the northwest and southeast regions, encompassing the Negro, Xingu, and Tapajós river basins, distributed in different fragments along them. In contrast, in the SSP5-8.5 scenario, although AGB gains are concentrated in the same regions, they present a more restricted and dispersed spatial distribution in the landscape. It is observed that, in the optimistic scenario, the AGB average is approximately 10.5% higher than that projected in the pessimistic scenario. It is noteworthy that protected areas play a significant role as an integral part of the strategy to address environmental and climatic challenges in the Amazon region, with

Indigenous Lands (TI's) emerging as areas with the greatest AGB gains in both climate scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-8.5).

**Keywords:** CMIP6 scenarios; Forest Biomass; Amazon Biome; Climate Change; Protected Areas.

### 3.1 Introdução

A mudança climática está intensificando distúrbios e alterando a dinâmica dos biomas terrestres (Higgins *et al.*, 2023). O bioma da Floresta Amazônica, a maior região florestal da Terra, está agora acumulando menos carbono do que antes (Brienen *et al.*, 2015), com algumas partes da Bacia já atuando como fontes líquidas de carbono (Gatti *et al.*, 2021). Tanto o balanço atual quanto o futuro de carbono da floresta Amazônica têm se mostrado muito sensíveis à temperatura (Galbraith *et al.*, 2010; Sullivan *et al.*, 2022). Isso tem importantes consequências para a conservação e resiliência das florestas amazônicas, incluindo aquelas em territórios indígenas que armazenam grandes quantidades de biomassa (Ibáñez *et al.*, 2019).

Fatores como disponibilidade de nutrientes no solo, competição por luz, diversidade de espécies e condições microclimáticas influenciam o crescimento das árvores e sustentam a variação espacial observada na dinâmica da floresta Amazônica (Esquivel-Muelbert *et al.*, 2019; Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023). No entanto, a precipitação e a temperatura, como destacado por Uribe *et al.* (2023), são variáveis subjacentes que influenciam diretamente e indiretamente a assimilação e o armazenamento de carbono na floresta, além de terem o potencial de acelerar a perda de biomassa acima do solo (Galbraith *et al.*, 2013).

Em face de mudanças severas no clima, há preocupações de que as florestas amazônicas possam transitar para um estado estável alternativo não florestal, resultando em perdas significativas de biomassa acima do solo (AGB) (Flores *et al.*, 2017; Ibáñez *et al.*, 2019; Pinho *et al.*, 2020). Compreender esses efeitos é crucial, uma vez que a abundância de AGB armazenado nessas florestas, estimada em cerca de 60 a 140 PgC (petagramas de carbono) em uma área de 6 milhões de km<sup>2</sup> (Galbraith *et al.*, 2010), desempenha um papel fundamental na estabilização do clima, ajudando a reduzir os GEE e promover a resiliência dos ecossistemas naturais às mudanças climáticas (Walker *et al.*, 2020; Tavares *et al.*, 2023).

A conservação e restauração de áreas vegetadas na Amazônia são cruciais para o equilíbrio climático global (Pan *et al.*, 2013). As florestas remanescentes em áreas protegidas, como Unidades de Conservação (UCs), Terras Indígenas (TIs) e Florestas Públicas Não Destinadas (FPND), têm sua eficácia na conservação da vegetação nativa comprometida por uma variedade de estressores ambientais, incluindo as mudanças climáticas (Walker *et al.*, 2020). Portanto, entender como as florestas amazônicas serão impactadas pelas mudanças climáticas é necessário para fortalecer a gestão dessas áreas e proteger a biodiversidade. Este estudo contribui para os esforços de

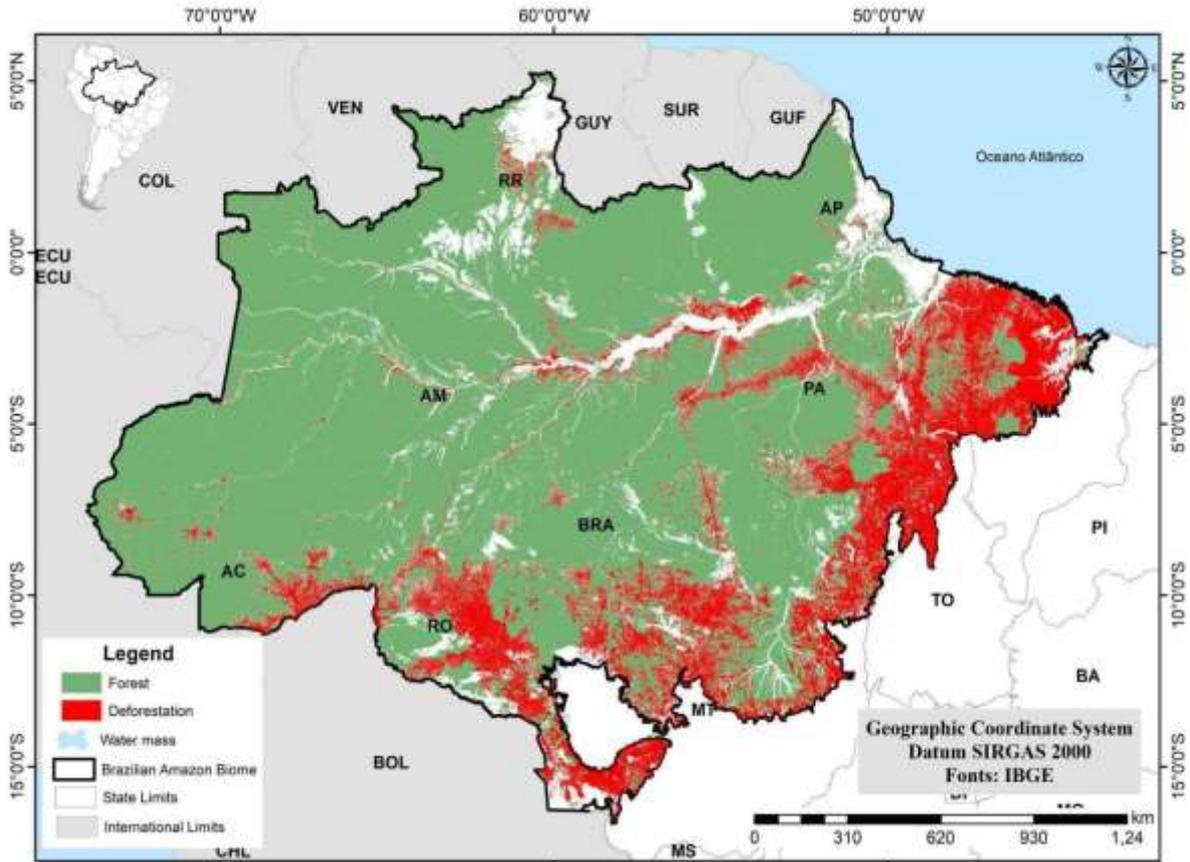
conservação na Amazônia ao analisar a capacidade das florestas primárias intactas na Amazônia brasileira de aumentar o AGB sob padrões projetados de mudança climática. Especificamente, nosso objetivo foi priorizar a identificação de áreas com alto potencial de ganho de AGB no bioma, não apenas com o propósito de conservar a biodiversidade, mas também para fortalecer a resiliência do ecossistema amazônico às mudanças climáticas. Esta abordagem orienta práticas de manejo florestal e conservação para garantir a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das comunidades locais, enfatizando a importância de priorizar áreas com potencial de ganho de biomassa para conservação.

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Área de Estudo**

O bioma Amazônico, situado na região norte do Brasil, constitui o foco do presente estudo (Fig. 3.1). Este bioma, conforme delineado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), abrange integralmente os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Roraima, e parcialmente os estados de Rondônia, Tocantins, Maranhão e Mato Grosso, totalizando uma área aproximada de 420 milhões de hectares, o que representa 49,5% da extensão territorial do Brasil. Segundo dados do Projeto de Monitoramento do Desflorestamento na Amazônia Brasileira - PRODES (Inpe, 2023) a região amazônica possui aproximadamente 4 milhões de km<sup>2</sup> caracterizados por fisionomia florestal. Destaca-se, contudo, que cerca de 20% desta área já sofreu processos de desmatamento. Tal constatação evidencia a criticidade da situação atual da biodiversidade e dos ecossistemas amazônicos, sublinhando a premente necessidade de aprofundamento nas investigações científicas voltadas para a compreensão e mitigação dos impactos antrópicos e das alterações climáticas sobre este bioma de significativa importância global.

Figura 3.1- Localização da área de Estudo no Bioma Amazônia Brasileiro.



### 3.2.2 Estimativa de biomassa florestal

Para a estimativa de biomassa florestal, adotou-se a base de dados de AGB do *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) Nível 4A (L4A), versão 2.1, como fonte de dados (Dubayah *et al.*, 2022). O GEDI, um instrumento a laser do tipo *Light Detection and Ranging* (LiDAR), destaca-se por sua capacidade de penetrar em copas densas de florestas, proporcionando uma amostragem abrangente e detalhada, o que é fundamental para a obtenção de estimativas de AGB em  $\text{Mg/ha}^{-1}$  (Sun *et al.*, 2022). Esta característica é particularmente relevante para a análise de florestas tropicais, onde a densidade das copas pode significativamente obstruir a coleta de dados de outros tipos de sensores remotos.

A seleção de áreas de floresta amazônica estruturalmente intacta foi guiada pela aplicação de filtros rigorosos, visando mitigar o impacto da influência humana. Utilizou-se o *Global Consensus Land Cover* (GLCC, v2), que oferece informações detalhadas sobre cobertura da terra, incluindo dados sobre vegetação cultivada e manejada, bem como áreas urbanas/construídas, para auxiliar na exclusão de regiões afetadas pela antropização (Tuanmu *et al.*, 2014). Adicionalmente, o produto *Intact Forest Landscapes* (IFL) foi empregado para identificar áreas de floresta que permanecem estruturalmente intactas e conservadas, sem sinais significativos de atividade humana, garantindo que a amostra selecionada representasse adequadamente florestas em estado natural (Potapov *et al.*, 2017).

Após aplicação desses filtros, um critério de exclusão foi adotado para pontos de AGB inferiores a  $50 \text{ Mg/ha}^{-1}$ , com o objetivo de eliminar vegetações herbáceas e arbustivas, focando assim nas áreas florestais com significativa biomassa aérea. Este processo de seleção e filtragem é essencial para assegurar a acurácia das estimativas de AGB, reduzindo o risco de inclusão de áreas não-florestais ou degradadas que poderiam distorcer os resultados.

Posteriormente, foram validados os pontos de AGB a partir das parcelas de inventário florestal para uma análise de acurácia do modelo, utilizando as métricas como Erro Absoluto Médio (MAE) (ver Fig. S5-Apêndice de Informações de Suporte), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (ver ver Fig. S5-Apêndice de Informações de Suporte) e índices de Willmott (Willmott *et al.*, 2011). Os resultados fornecem uma medida da precisão e da confiabilidade das estimativas de AGB ao apresentar uma correlação positiva moderada entre as variáveis observadas (RAINFOR) (Mitchard *et al.*, 2014; Lopez-Gonzalez *et al.*, 2014) e preditas (AGB atual), com um intervalo de confiança de 95% entre 0,38 e 0,67. Além disso, o RMSE do modelo varia entre 92,80 e 120,79 (ver Fig. S5-Apêndice de Informações de Suporte), e o MAE do modelo varia entre 72,28 e 95,99. Essas métricas indicam que o modelo fornece estimativas sem tendência sistemática para superestimar ou subestimar os valores observados, sugerindo uma relação consistente entre as previsões do modelo e os valores reais observados (ver Tab. S4-Apêndice de Informações de Suporte). Em suma, os resultados da análise de acurácia do modelo são eficazes.

### 3.2.3 Dados sobre áreas protegidas

Os dados utilizados na análise foram obtidos de diferentes fontes governamentais responsáveis pela gestão das áreas protegidas. As informações sobre as UC's foram fornecidas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO), enquanto os dados das TI's foram disponibilizados pela Fundação Nacional do Índio (FUNAI). Além disso, as informações sobre as FPND foram adquiridas através do Serviço Florestal Brasileiro, que é gerido pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) (Icmbio, 2023; Funai, 2023; SFB, 2024). Esses conjuntos de dados incluem informações espaciais sobre as áreas de floresta intacta do estudo. No total, foram analisadas 365 áreas protegidas, das quais 159 são UC's, cobrindo uma área de  $684.020,00 \text{ km}^2$ , e 206 são TI's, cobrindo uma área de  $1.034.332,83 \text{ km}^2$ . As áreas de FPND cobrem uma extensão de  $325.241,91 \text{ km}^2$ .

### 3.2.4 Construção da base de dados climáticos

A construção da base de dados climáticos para o presente estudo foi efetuada por meio da utilização de informações provenientes do WORLDCLIM, uma plataforma reconhecida internacionalmente por prover dados climáticos tanto contemporâneos quanto projeções futuras em diversas escalas de resolução. Especificamente, os dados adotados neste estudo possuem uma

resolução espacial de 10 minutos, correspondendo aproximadamente a uma área de 340 km<sup>2</sup> por ponto de dados sobre a área de estudo.

Os conjuntos de dados climáticos atuais foram extraídos com base nas médias anuais, derivadas de registros mensais compreendidos entre 1970 e 2000. Quatro variáveis bioclimáticas foram priorizadas devido à sua relevância para a compreensão dos processos ecológicos na Amazônia, facilitando a análise da capacidade de resiliência da floresta frente às alterações ambientais. Estas variáveis incluem: a Temperatura Média Anual (°C) (BIO1); a Amplitude Anual de Temperatura (°C) (BIO7); a Precipitação Acumulada (mm/ano) (BIO12); e a Sazonalidade da Precipitação (%) (BIO 15). A seleção destas variáveis apoia-se na fundamentação de que elas são essenciais para a modelagem de impactos sobre a resiliência do ecossistema amazônico (Anjos; Toledo, 2018).

Para as projeções climáticas de curto prazo, abrangendo o período de 2021 a 2040, foram utilizados dados bioclimáticos oriundos dos cenários desenvolvidos no âmbito do *World Climate Research Programme Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). Neste contexto, foram selecionados cinco Modelos de Circulação Geral (GCMs) com base em critérios rigorosos de confiabilidade, que incluem o Equilibrium Climate Sensibility (ECS) e a Transient Climate Response (TCR). Os modelos escolhidos foram: BCC-CSM2-MR, CanESM5, CNRM-CM6-1, IPSL-CM6A-LR e MIROC6, os quais encontram-se detalhados em Wu *et al.* (2019), Swart *et al.* (2019), Voldoire *et al.* (2019), Boucher *et al.* (2020) e Tatebe *et al.* (2019), respectivamente (ver Tab.S1-Apêndice de Informações de Suporte). A partir desta seleção, procedeu-se a realização de um "ensemble", visando destacar as predições mais consensuais entre os diversos métodos de modelagem, com o intuito de mitigar os efeitos das incertezas nas previsões dos modelos (Franklin, 2010; Diniz-Filho *et al.*, 2009).

Os dados do CMIP6 foram analisados considerando quatro cenários climáticos distintos. No entanto, este estudo focou especialmente no cenário mais otimista, caracterizado por baixas emissões de gases de efeito estufa (SSP1-2.6), e no cenário mais pessimista, associado a altas emissões (SSP5-8.5). Estes cenários são delineados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e representam trajetórias divergentes de emissões e políticas climáticas até o ano de 2100, incorporando variáveis de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupações ambientais e diferenças regionais (Silva-Bezerra *et al.*, 2022). O cenário SSP1-2.6 sugere uma trajetória de emissões reduzidas, com uma forte mitigação das mudanças climáticas, enquanto o cenário SSP5-8.5 prevê altas emissões, levando a um aumento significativo na temperatura global e a impactos mais severos sobre o clima e o meio ambiente.

### 3.2.5 Exposição de AGB frente às condições climáticas presentes e futuras

Com o objetivo de investigar a associação entre a AGB e as variáveis bioclimáticas (BIO1; BIO7; BIO12; BIO15) no período de 2021- 2040, empregamos a técnica de regressão linear múltipla (LM). Esta escolha metodológica foi fundamentada na necessidade de compreender a dinâmica e a significância estatística das relações entre a AGB e as condições bioclimáticas prevalentes. A regressão linear múltipla foi selecionada por sua capacidade de analisar simultaneamente o impacto de múltiplas variáveis independentes sobre uma variável dependente, neste caso, a AGB. Através desta abordagem, buscamos não apenas identificar, mas também quantificar a significância das interações entre a AGB e os fatores bioclimáticos, proporcionando uma análise detalhada e robusta dessas relações.

Entretanto, na análise dos resíduos da LM foi verificado que haveria alguma dependência espacial. Por isso e também com o intuito de entender os padrões de distribuição da AGB no cenário atual, empregou-se a metodologia de Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) (Brunsdon *et al.*, 1996). Esta abordagem permitiu uma exploração detalhada das variações espaciais da AGB, resultando em um coeficiente de determinação global (GlobalR<sup>2</sup>) de 0.42. Tal resultado indica que o modelo GWR conseguiu explicar uma fração considerável da variação espacial observada na AGB. O sucesso desta modelagem deve-se, em parte, ao ajuste criterioso do parâmetro de largura de banda, fixado em 0.07 para as coordenadas espaciais dos dados, o que otimizou a interpretação da influência espacial entre as observações, refletida em um erro padrão residual de 58.35 Mg/ha<sup>-1</sup>.

Neste contexto, também foi estimado o valor médio da AGB para cada unidade de pixel, com base na cobertura florestal presente. Assumiu-se que o valor máximo de AGB por pixel representa o potencial máximo de biomassa que uma floresta poderia alcançar naquela localidade específica.

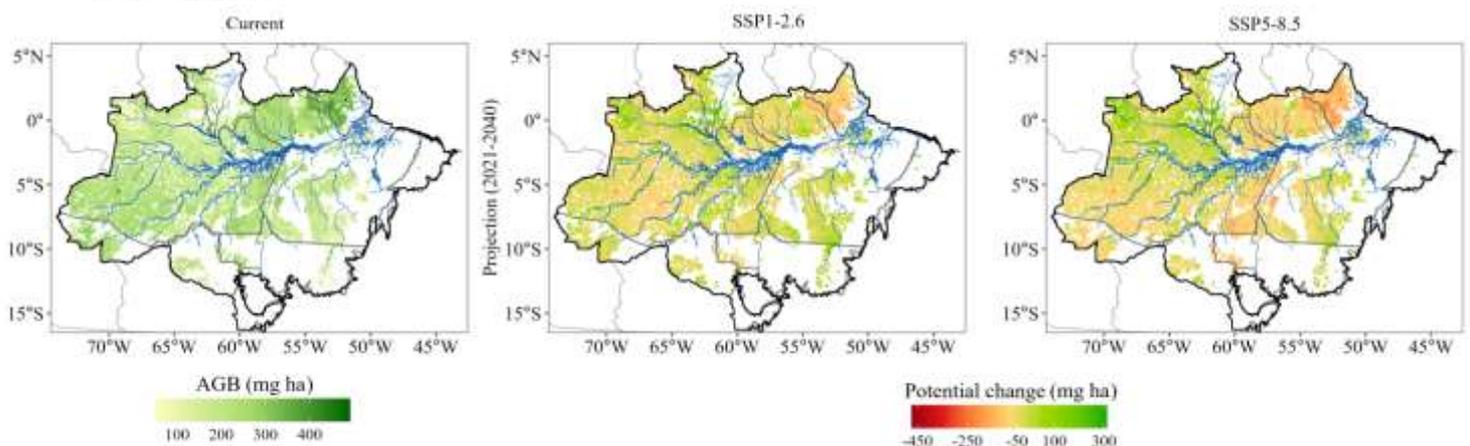
Utilizando o modelo de AGB ajustado para as condições atuais, foi possível projetar o potencial futuro da AGB sob cenários climáticos futuros. Para isso, utilizaram-se as variáveis bioclimáticas projetadas para estimar a AGB em quatro cenários climáticos distintos, cobrindo um horizonte de curto prazo. Essa projeção foi realizada através da comparação entre os valores futuros estimados de AGB para cada cenário e período, em relação aos dados contemporâneos. Este exercício permitiu uma avaliação prospectiva do impacto das mudanças climáticas sobre a distribuição e o potencial da AGB, fornecendo conhecimentos valiosos para estratégias de conservação e manejo florestal.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Tendência geral da variação da AGB sob cenários climáticos futuros de curto prazo

A Figura 3.2 ilustra de maneira detalhada as variações na AGB em dois cenários contrastantes, definidos como cenário otimista (SSP1-2.6) e o cenário pessimista (SSP5-8.5), para o intervalo temporal de curto prazo compreendido entre 2021 e 2040 no bioma Amazônia Brasileira. A análise dos dados indica que uma proporção significativa do bioma está predisposta a experimentar reduções na AGB, com projeções estimando perdas em área de aproximadamente 74% e 79% do bioma nos cenários otimista e pessimista, respectivamente. Esses resultados sugerem uma correlação entre as mudanças climáticas projetadas e a diminuição da AGB em grande parte do bioma, independentemente do cenário futuro considerado.

Figura 3.2- Potencial de Variação da Biomassa Acima do Solo (AGB) sob cenários climáticos contrastantes, fundamentados em modelos de previsão do clima otimista (SSP1-2.6) e pessimista (SSP5-8.5) para o período de curto prazo (2021-2040) no bioma Amazônia. Os efeitos do desmatamento e do fogo não estão incluídos nos dois cenários futuros analisados.



As regiões com limitada capacidade adaptativa ocupam aproximadamente 1,5 milhões de km<sup>2</sup> sob o cenário SSP1-2.6, enquanto, para o cenário SSP5-8.5, a área estimada é de cerca de 1,6 milhões de km<sup>2</sup>. As análises demonstram que as perdas de AGB são predominantemente localizadas nas regiões norte e sudoeste sob o cenário SSP1-2.6. No cenário SSP5-8.5, além dessas áreas, significativas reduções de AGB são observadas também nas regiões nordeste e sul (Fig. 3.2).

A Figura 3.2 destaca regiões que demonstram capacidade de incremento da AGB. No cenário SSP1-2.6, a média de AGB é estimada em 176,66 Mg/ha<sup>-1</sup>, enquanto no cenário SSP5-8.5, a média é de 159,87 Mg/ha<sup>-1</sup>. Assim, observa-se que, no cenário otimista, a média de AGB é aproximadamente 10,5% superior à projetada no cenário pessimista.

O mapeamento realizado sob o cenário SSP1-2.6 indica que as áreas com potencial de recuperação da AGB estão primordialmente localizadas nas regiões noroeste e sudeste do bioma, abrangendo a bacias dos rios Negro, Xingu e Tapajós. Nota-se que, neste cenário, os ganhos de AGB estão distribuídos por diversos fragmentos ao longo do bioma. Em contraste, no cenário

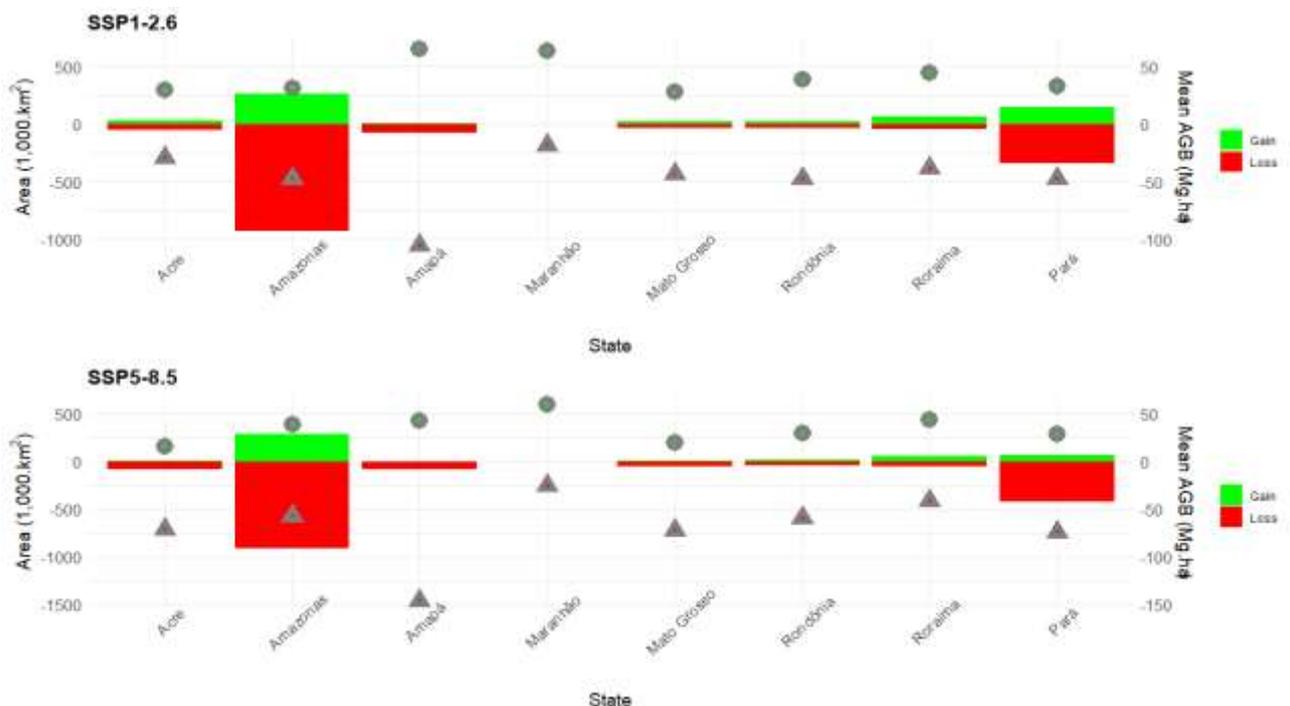
SSP5-8.5, embora os ganhos de AGB se concentrem nas mesmas regiões, eles apresentam uma distribuição espacial mais restrita e dispersa na paisagem (Fig. 3.2). Em suma, os resultados enfatizam a consistência dos padrões espaciais na identificação de áreas na Amazônia susceptíveis a variações na AGB, reiterando a importância de estratégias proativas de manejo e conservação diante das projeções de mudanças climáticas.

### 3.3.2 Análise do Ganho de AGB nos Estados Amazônicos

Os resultados da figura 3.3 apresentam dois cenários de emissões de gases de efeito estufa (SSP1-2.6 e SSP5-8.5) para a área e AGB nos estados da Amazônia brasileira. A análise abrange ganhos e perdas de área (em 1.000 km<sup>2</sup>) e AGB médio (em Mg.ha).

As variações nos ganhos e perdas de AGB entre os estados amazônicos são significativas em ambos os cenários. No cenário SSP1-2.6, Amazonas perdeu cerca de 1.000 km<sup>2</sup> de área e 80 Mg.ha de AGB, enquanto Roraima teve um pequeno ganho de 50 km<sup>2</sup> e 5 Mg.ha de AGB. No cenário SSP5-8.5, o Amazonas continuou perdendo 1.000 km<sup>2</sup> e 90 Mg.ha de AGB. O Pará também enfrentou perdas moderadas de 200 km<sup>2</sup> e 50 Mg.ha no cenário SSP1-2.6, aumentando para 500 km<sup>2</sup> e 60 Mg.ha no cenário SSP5-8.5 (Fig. 3.3).

Figura 3.3 - Análise Comparativa de Ganhos e Perdas de AGB nos Cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 para Diferentes Estados Amazônicos.



Os gráficos mostram a variação na área Y1 (em mil km<sup>2</sup>) e na média de AGB Y2 (em Mg.ha) sob dois cenários de mudança climática: SSP1-2.6 (gráfico superior) e SSP5-8.5 (gráfico

inferior). Barras vermelhas indicam perda de área e AGB, enquanto barras verdes indicam ganho (Fig.3.3).

No cenário SSP1-2.6, os estados do Amapá, Maranhão e Roraima se destacaram com os maiores ganhos médios de AGB, registrando 65 Mg.ha, 64 Mg.ha e 45 Mg.ha, respectivamente. No entanto, o mesmo cenário mostrou perdas significativas, com Amapá, Rondônia e Amazonas apresentando perdas médias de -106 Mg.ha, -48 Mg.ha e -47 Mg.ha, respectivamente (Fig.3.3).

No cenário SSP5-8.5, os ganhos médios de AGB foram consideravelmente menores em comparação com SSP1-2.6, com Maranhão e Roraima liderando com ganhos de 60 Mg.ha e 43 Mg.ha, respectivamente. Por outro lado, as perdas de AGB foram mais pronunciadas neste cenário, com Amapá, Pará e Mato Grosso sofrendo perdas médias de -146 Mg.ha, -74 Mg.ha e -72 Mg.ha, respectivamente (Fig.3.3).

Na figura 3.3, em termos de ganho de área de AGB (em km<sup>2</sup>), o Amazonas foi o destaque positivo em ambos os cenários analisados. No cenário SSP1-2.6, liderou com o maior ganho de 262 km<sup>2</sup>, seguido por Pará com 143 km<sup>2</sup> e Roraima com 61 km<sup>2</sup>. No cenário SSP5-8.5, o Amazonas manteve sua liderança com 284 km<sup>2</sup>, seguido por Pará com aproximadamente 70 km<sup>2</sup> e Roraima com 54 km<sup>2</sup>. Assim, enquanto o Amazonas teve um pequeno aumento de 22 km<sup>2</sup> na área de AGB no cenário pessimista, Pará e Roraima experimentaram perdas de 73 km<sup>2</sup> e 7 km<sup>2</sup>, respectivamente, em comparação com o cenário SSP1-2.6.

No cenário SSP1-2.6, Amazonas e Pará foram os estados que mais perderam área de AGB (em km<sup>2</sup>), com perdas significativas de 933 km<sup>2</sup> e 345 km<sup>2</sup>, respectivamente. No cenário SSP5-8.5, o Amazonas também se destacou com uma perda de área de AGB de 910 km<sup>2</sup> (Fig.3.3).

A Tabela S3 mostra as mudanças projetadas em ganho e perda de AGB, juntamente com a área total de floresta intacta, nos estados amazônicos sob dois cenários climáticos (SSP1-2.6 e SSP5-8.5) para o período 2021-2040. Ela destaca variações significativas entre os estados: enquanto alguns, como Amazonas e Pará, exibem ganhos substanciais de AGB apesar das perdas, outros experimentam perdas mais pronunciadas em comparação com os ganhos. Os dados ressaltam a complexa interação entre os cenários climáticos e a dinâmica florestal regional, fornecendo insights cruciais para estratégias de manejo sustentável e conservação na região amazônica (ver Tab. S3 - Apêndice de Informações Suplementares).

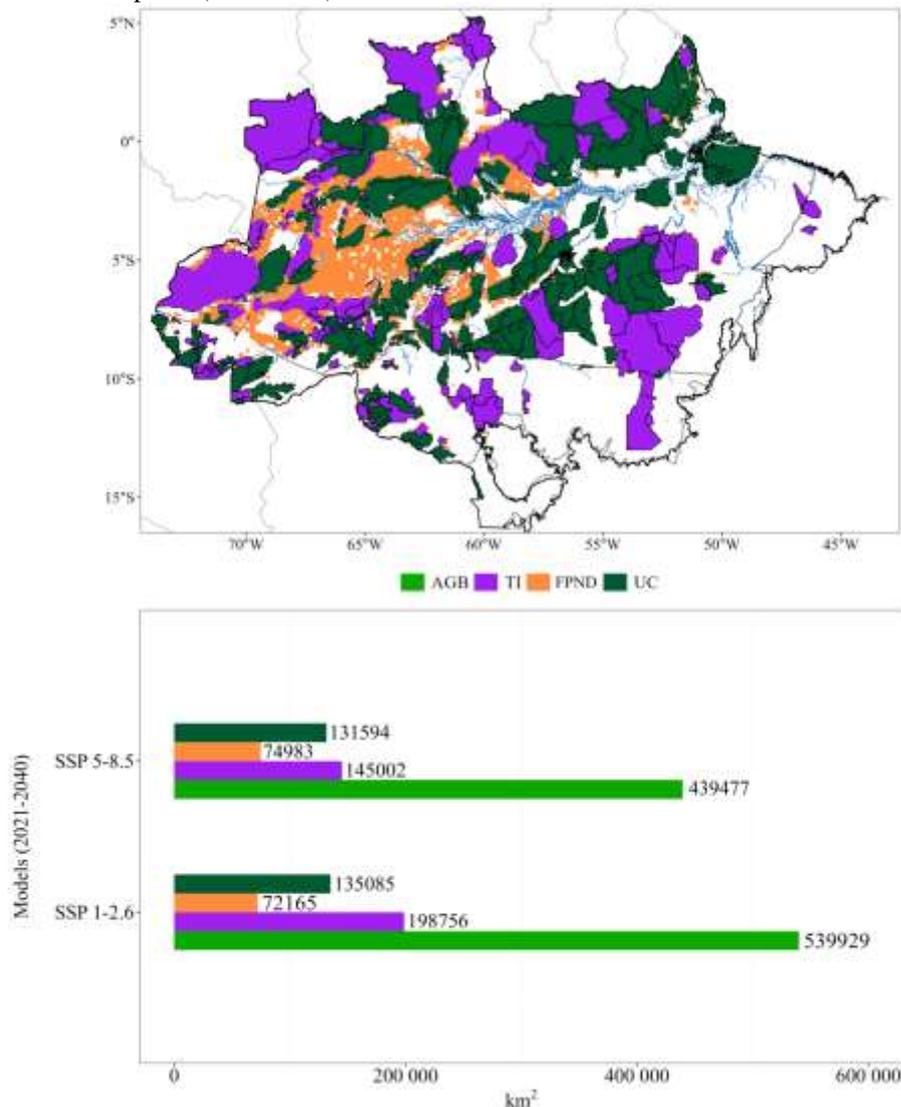
### 3.3.3 Análise do Ganho de AGB nas Áreas Protegidas

Esta seção examina as áreas protegidas da Amazônia e seu potencial de ganho em AGB em um horizonte temporal de curto prazo (2021-2040), sob dois cenários climáticos distintos: o mais otimista, SSP1-2.6, e o mais pessimista, SSP5-8.5. As áreas protegidas em análise compreendem UC's, TI's e FPND.

Na análise da área de estudo, verifica-se que 20% das UC's apresentam um aumento na AGB sob o cenário SSP1-2.6. Por outro lado, no cenário SSP5-8.5, que assume maiores emissões de carbono e menores esforços de mitigação, a fração de UC's com ganho de AGB diminui para 19%. Para as TI's, observa-se que 19% delas tiveram ganho de AGB no cenário SSP1-2.6, que reduz para 14% (SSP5-8.5). Em relação às FPND, aguardando designação para conservação ou uso sustentável, aproximadamente 22% delas exibem ganhos de AGB no cenário SSP1-2.6, aumentando ligeiramente para 23% no cenário SSP5-8.5.

A figura 3.4 ilustra os cenários climáticos de ganho de AGB nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 para o período de curto prazo (2021-2040) no bioma Amazônia, destacando as informações das áreas protegidas. Essa visualização gráfica é fundamental para compreender a distribuição espacial dos ganhos de AGB e como eles variam entre diferentes tipos de áreas protegidas e cenários climáticos.

Figura 3.4 - Cenários climáticos de ganho de biomassa no bioma e nas suas áreas protegidas no cenário (SSP1-2.6) e (SSP5-8.5) para período de curto prazo (2021-2040) no bioma Amazônia.



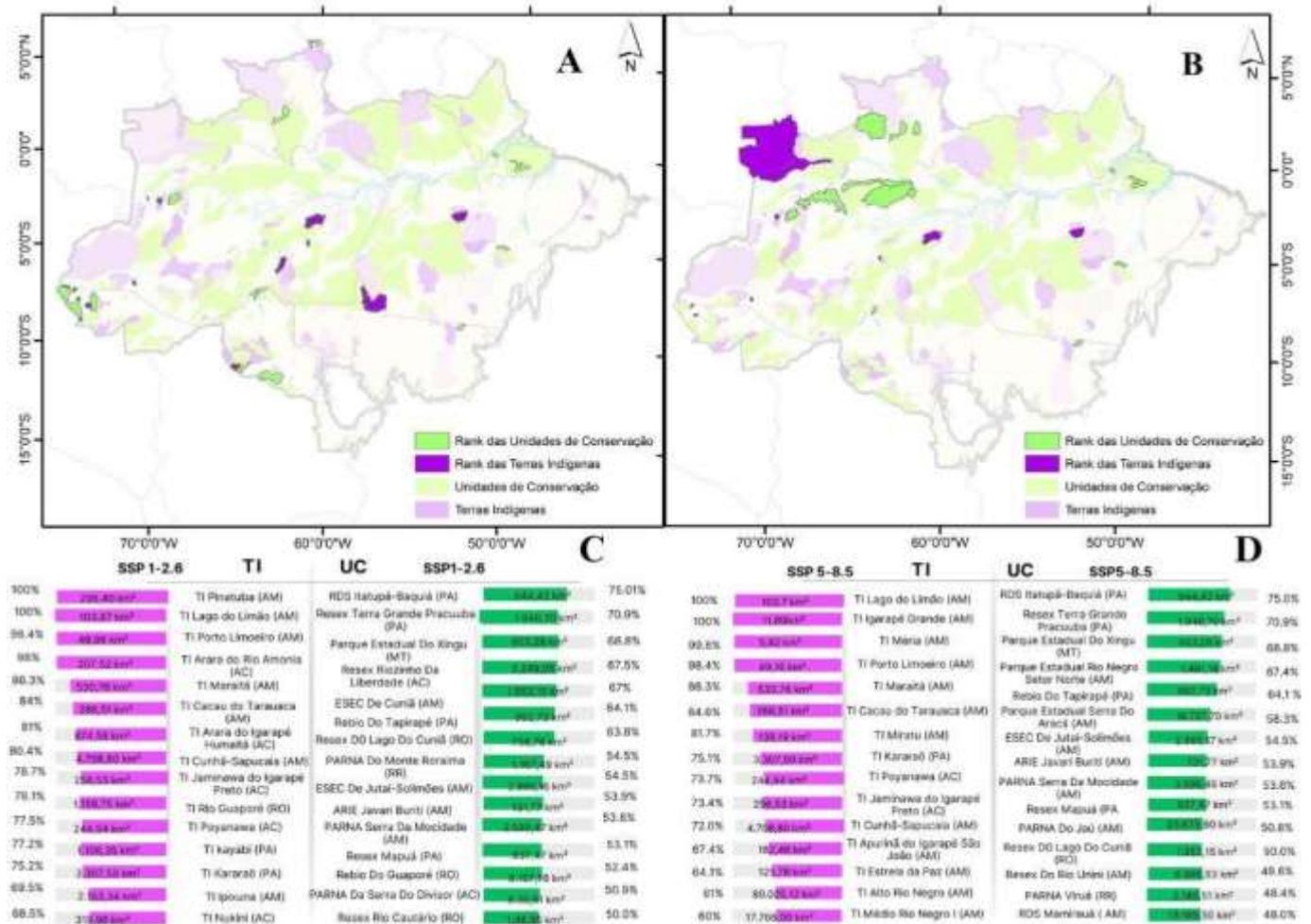
Os resultados indicam que as áreas protegidas, abrangendo cerca de 98% das regiões florestais examinadas, desempenham um papel crucial na conservação e no aumento da AGB, especialmente sob o cenário SSP1-2.6, onde os ganhos são cerca de 23% maiores que no cenário SSP5-8.5. A curto prazo, os ganhos de AGB no cenário SSP1-2.6 são estimados em 539.929,12 km<sup>2</sup>, distribuídos em 135.084,79 km<sup>2</sup> em UC's, 198.755,65 km<sup>2</sup> em TI's e 72.165,27 km<sup>2</sup> em FPND. Para o SSP5-8.5, o ganho de AGB é estimado em 439.476,66 km<sup>2</sup>, com distribuição de 131.594,45 km<sup>2</sup> em UC's, 145.001,78 km<sup>2</sup> em TI's e 74.982,56 km<sup>2</sup> nas FPND (Fig. 3.4).

Nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, as TI's emergem como áreas com maior proporção dos ganhos de AGB, com aproximadamente 37% e 33%, respectivamente. Em seguida, as UC's acompanham com 25% no SSP1-2.6 e 30% (SSP5-8.5). Por fim, as FPND registram proporções menores, 13% (SSP1-2.6) e 17% (SSP5-8.5). Esses resultados enfatizam o papel significativo das TI's na conservação e no aumento da AGB, seguidas pelas UC's, independentemente do cenário considerado (Fig. 3.4).

#### 3.3.4 Desempenho adaptativo de áreas protegidas sob diferentes cenários climáticos

O estudo do desempenho adaptativo de áreas protegidas na Amazônia, sob diferentes cenários climáticos, revela insights importantes sobre a capacidade dessas áreas em se adaptar e responder às mudanças climáticas. A análise, centrada na figura 3.5, compara o desempenho adaptativo de UC's e TI's em termos de ganho de AGB sob dois cenários climáticos: um otimista, SSP1-2.6, que pressupõe ações eficazes de mitigação das mudanças climáticas, e um pessimista, SSP5-8.5, que antecipa um aumento significativo nas emissões de gases de efeito estufa..

Figura 3.5- Distribuição da delimitação das Áreas protegidas no cenário SSP1-2.6 (A) e SSP5-8.5 (B), para o período de curto prazo (2021-2040), na Amazônia. Apresentação do Ranking das 15 UC's e TI's com maior capacidade adaptativa para ganho de AGB em suas respectivas áreas para cenário SSP1-2.6 (C) e SSP5-8.5 (D).



A distribuição espacial das áreas protegidas, conforme ilustrado na Figura 3.5 (A e B), mostra uma notável diferença entre os dois cenários. No cenário otimista SSP1-2.6, as áreas protegidas, especialmente as TI's, estão bem distribuídas, com uma presença significativa próxima à fronteira agrícola que se estende ao longo de toda a borda da Amazônia. Em contraste, no cenário pessimista SSP5-8.5, as áreas protegidas tendem a se concentrar mais no extremo ocidental da Amazônia, particularmente nos estados do Acre e do Amazonas, indicando uma preferência por regiões menos afetadas pela intervenção humana.

Ao analisar os tamanhos e os ganhos de AGB das 15 UC's e TI's sob os cenários climáticos SSP1-2.6 e SSP5-8.5, notamos que as dimensões dessas áreas protegidas são bastante similares entre as duas categorias. No entanto, quando focamos nos resultados de ganho de AGB, emerge uma distinção notável. Especificamente nas TI's, duas delas conseguiram um feito impressionante, atingindo 100% de ganho de AGB, marca essa não observada em nenhuma das UC's. Este dado sugere uma maior eficácia das TI's na conservação de suas florestas primárias (Fig. 3.5).

Dentre as UC's, duas se destacam notavelmente: a Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) Itatupã-Baquijá e a Reserva Extrativista (Resex) Terra Grande-Pracuuba, ambas situadas no

estado do Pará. Essas UC's alcançaram as primeiras posições no ranking em ambos os cenários, SSP1-2.6 e SSP5-8.5, com ganhos de 75% e 70,9%, respectivamente, em termos de AGB (Fig. 3.5-C e D).

Ao comparar o desempenho agregado das 15 TI's e UC's no cenário SSP1-2.6, observa-se que as TI's conseguiram um ganho total de 78% em AGB, enquanto as UC's alcançaram 56%. Já no cenário SSP5-8.5, a diferença entre as duas categorias de áreas protegidas se estreita para 9 pontos percentuais, com as UC's registrando um ganho de 53% e as TI's, 62%. Esses resultados indicam que, ao longo do tempo, as TI's demonstraram uma capacidade superior de aumentar a AGB, conforme ilustrado nas figuras 3.5C e 3.5D.

### 3.4 Discussão

A análise do impacto das mudanças climáticas sobre a Amazônia, especialmente no que tange à AGB, revela um cenário preocupante para o futuro da maior floresta tropical do mundo. Este estudo, alinhado às projeções do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (GCM do CMP5), sugere perdas significativas de AGB, com implicações diretas para o armazenamento de carbono e, conseqüentemente, para os esforços de mitigação dos GEE's.

A relação entre AGB e atributos climáticos reflete uma resposta rápida da floresta às novas condições climáticas. No entanto, estas previsões não têm em conta acontecimentos climáticos extremos, como tempestades e secas severas, ou a ocorrência de incêndios florestais, que podem alterar significativamente a estrutura florestal. Por exemplo, Restrepo-Coupe *et al.* (2023) descobriram que uma floresta perto de Santarém levou vários anos a recuperar após a seca de 2015. Portanto, as previsões podem subestimar as variações reais na biomassa.

A previsão de que as regiões sul e leste da Amazônia sofrerão as maiores perdas, potencialmente levando à substituição da floresta tropical por vegetação de características mais secas, ressalta a urgência de ações voltadas à conservação e ao manejo sustentável (Arruda *et al.*, 2024). A diminuição do armazenamento de carbono na AGB, apontada por Bunker *et al.* (2005), e a projeção de que as perdas quase dobrarão em relação aos ganhos (Walker *et al.*, 2020), evidenciam a magnitude do desafio que enfrentamos.

Gomes e cols. (2019) indicam que quase metade das espécies de árvores da Amazônia estarão em risco de extinção até 2050 devido ao aquecimento global, especialmente no leste, no sul e em grande parte do sudoeste. Essa ameaça à biodiversidade pode impactar os AGB na região, reduzindo a diversidade vegetal, alterando os ciclos de nutrientes, modificando os padrões de crescimento e aumentando a vulnerabilidade a distúrbios naturais (Esquivel-Muelbert *et al.*, 2019; Uribe *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023).

No cenário SSP1-2.6, as perdas de AGB concentram-se principalmente nas cabeceiras dos afluentes da bacia amazônica, particularmente ao norte nos estados do Pará e Amapá, e na porção ocidental, ao longo da bacia do rio Solimões no estado do Amazonas. No cenário SSP5-8.5, as perdas acentuadas de AGB são evidenciadas ao longo dos rios Madeira e Tapajós, localizados a sudoeste da bacia, evidenciando um impacto negativo sobre a manutenção das principais bacias afluentes do rio Amazonas, afetando assim a integridade tanto do bioma quanto da unidade hidrográfica de forma. Pontes *et al.* (2019) ao comparar os cenários de cobertura de solo preservado com aqueles com 15% a mais de desmatamento, constatou que houve um aumento médio nas descargas na bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas, ou seja, mudanças na vegetação afetam a qualidade das água e reduz significativamente a transferência de água para a atmosfera por evapotranspiração.

Destacando a importância da escala e do contexto regional na avaliação do crescimento do AGB, os cenários analisados revelam uma diferença significativa entre o ganho médio de AGB por hectare e o ganho de área absoluta (km<sup>2</sup>) nos estados amazônicos. No cenário SSP1-2.6, Amapá, Maranhão e Roraima apresentaram altos ganhos médios de AGB por hectare, mas estes não se traduziram em grandes ganhos absolutos de área. Por outro lado, o Amazonas liderou em ganho de área, mostrando uma expansão territorial significativa, porém não alcançou os maiores ganhos de AGB entre os cenários analisados. No cenário SSP5-8.5, embora os ganhos de área tenham sido menores, o Amazonas também se destacou. Isso indica que a relação entre ganho de AGB por hectare e ganho de área em km<sup>2</sup> varia dependendo do cenário analisado.

A análise da distribuição do ganho de AGB por área por estado na região amazônica, juntamente com a avaliação dos valores absolutos de AGB nas áreas de incremento (Fig. 3.3), destaca variações nas diferentes respostas das florestas de cada estado às projeções futuras de mudança climática, com alguns estados apresentando ganhos de AGB mais significativos em comparação com outros. Por exemplo, apesar de possuir extensas áreas de floresta intacta, o Amazonas pode mostrar uma proporção menor de ganhos de AGB. No cenário pessimista, Roraima apresenta ganhos de área de AGB consideravelmente menores em comparação com o Amazonas, destacando uma diferença de aproximadamente cinco vezes a favor deste último. Isso revela informações cruciais para a conservação e gestão florestal e fornece dados essenciais para aprimorar estratégias voltadas para a preservação deste ecossistema.

Os resultados obtidos nos diferentes cenários (Fig.3.2 e Tab. 3.1) fornecem subsídios valiosos para o desenvolvimento de políticas e estratégias voltadas à conservação e a implementação de projetos de restauração florestal.

Por isso, a identificação e priorização das áreas com potencial para ganhos de AGB são estratégias-chaves para enfrentar os desafios globais associados às crises climáticas, reforçando a

necessidade de abordagens adaptadas localmente para a conservação da AGB na Amazônia. Identificar essas áreas com potencial de ganho de AGB é uma ferramenta estratégica para orientar políticas de conservação, fornecendo informações sobre resiliência e potencial de regeneração, além do papel significativo das florestas tropicais no ciclo global de carbono e, por extensão, na mitigação das mudanças climáticas (Arruda *et al.*, 2024).

A distribuição espacial dos ganhos de AGB, especialmente sob os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, revela a importância das áreas protegidas, como TI's e UC's, na conservação da biodiversidade e no armazenamento de carbono. No entanto, a eficácia dessas áreas está ameaçada tanto por mudanças climáticas severas quanto por pressões antropogênicas, incluindo políticas de proteção florestal enfraquecidas e interesses econômicos predatórios (Moraes *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2023).

A vulnerabilidade das áreas protegidas, exacerbada por secas e estiagens, destaca a necessidade de uma gestão adaptativa que considere a variabilidade climática e a intensificação dos usos da terra. A conservação dessas áreas não é apenas uma questão de preservação ambiental, mas também um imperativo para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, incluindo a regulação hídrica da bacia amazônica (Lapola *et al.*, 2023; Fassoni-Andrade *et al.*, 2021).

Diante da projeção de que 37% das áreas protegidas no Brasil serão afetadas, com danos mais significativos às TI's (Arruda *et al.*, 2024), torna-se evidente a necessidade de repensar e fortalecer as estratégias de conservação. A eficácia proporcionalmente maior das TI's no aumento de AGB sublinha o papel vital das comunidades indígenas na preservação da biodiversidade e na adaptação às mudanças climáticas (Ferrante; Fearnside, 2020; Qin *et al.*, 2023), revelando não apenas a importância das áreas protegidas na conservação da biodiversidade e no combate às mudanças climáticas, mas também destaca o papel crucial das TI's na preservação efetiva das florestas primárias. A superioridade das TI's em termos de ganho de AGB reforça a necessidade de políticas de conservação que reconheçam e valorizem suas contribuições únicas à saúde ecológica do planeta.

Portanto, a reavaliação das políticas públicas de preservação ambiental se faz urgente, especialmente em face das tendências de desmatamento e das pressões por flexibilização das proteções legais. A conservação da Amazônia deve ser vista como uma prioridade global, dada a sua importância para a biodiversidade, o clima e os povos indígenas. A sinergia entre áreas protegidas, políticas de conservação e ações de mitigação das mudanças climáticas é fundamental para assegurar a resiliência da Amazônia e sua capacidade de contribuir para a estabilidade climática global.

Os resultados do estudo destacam a importância das áreas protegidas na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, atuando não apenas como reservatórios de biodiversidade e

carbono, mas também como reguladores hidrológicos, devendo ser conservados, pois, alterações nas áreas protegidas podem causar diminuição na transferência de água para a atmosfera por evapotranspiração (Pontes *et al.*, 2019). Sua distribuição estratégica ao longo de cursos d'água desempenha um papel vital na preservação de regiões de recarga aquática e no fornecimento de água durante períodos de seca, além de servirem como áreas naturais de alagamento durante cheias (Souza Junior *et al.*, 2019; Pontes *et al.*, 2019; Toreti, *et al.*, 2023).

A análise enfatiza a necessidade de estratégias de gestão e conservação adaptativas, que levem em consideração os diferentes cenários climáticos projetados. Tais estratégias são fundamentais para garantir a resiliência das áreas protegidas frente às mudanças climáticas, maximizando seu papel na conservação da biodiversidade e na mitigação dos impactos climáticos. A compreensão detalhada dos potenciais ganhos de AGB em diferentes cenários climáticos é crucial para o planejamento eficaz e a tomada de decisões informadas na gestão ambiental e na conservação da Amazônia.

A metodologia empregada neste estudo demonstra o potencial de aplicação em outras regiões de florestas tropicais, fornecendo uma estrutura para estimar mudanças na biomassa florestal sob vários cenários de mudanças climáticas e apoiando estratégias de conservação e mitigação globalmente.

### **3.5 Conclusão**

Este estudo proporcionou uma análise detalhada e crítica sobre o impacto das mudanças climáticas na AGB na Amazônia, alinhando-se aos objetivos propostos de avaliar as perdas projetadas de AGB sob diferentes cenários climáticos e identificar áreas com potencial de ganho de AGB como estratégia para orientar políticas de conservação. Os resultados obtidos revelam um cenário preocupante, no qual as regiões sul e leste da Amazônia enfrentam as maiores ameaças, com projeções indicando uma possível substituição da floresta tropical por vegetação de características mais secas. Esta transformação não só comprometeria a biodiversidade única da região, mas também reduziria significativamente o armazenamento de carbono, exacerbando os desafios globais relacionados às mudanças climáticas.

A análise espacial dos ganhos e perdas de AGB sob os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 evidenciou a importância crítica das áreas protegidas, como TI's e UC's, no combate à perda de biodiversidade e na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, a vulnerabilidade dessas áreas às mudanças climáticas severas e às pressões antropogênicas destaca a necessidade urgente de fortalecer as políticas de conservação e proteção florestal, além de adotar uma gestão adaptativa que considere a variabilidade climática e os impactos humanos.

Os resultados deste estudo sublinham a eficácia proporcionalmente maior das TI's no aumento de AGB, ressaltando o papel fundamental das comunidades indígenas na conservação da

biodiversidade e na adaptação às mudanças climáticas. A projeção de que 37% das áreas protegidas no Brasil serão afetadas, com danos mais significativos às TI's, reforça a necessidade de repensar e fortalecer as estratégias de conservação, assegurando não apenas a preservação ambiental, mas também a manutenção dos serviços ecossistêmicos vitais.

Conclui-se, portanto, que a conservação da Amazônia deve ser uma prioridade global, dada sua importância insubstituível para a biodiversidade, o clima e os povos indígenas. A sinergia entre áreas protegidas, políticas de conservação robustas e ações efetivas de mitigação das mudanças climáticas é indispensável para garantir a resiliência da Amazônia. Este estudo reitera a urgência de ações integradas que abordam tanto a conservação da biodiversidade quanto a luta contra as mudanças climáticas, assegurando assim a estabilidade climática global e a preservação da riqueza natural e cultural da Amazônia para as gerações futuras.

## REFERÊNCIAS

- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, v. 43, n. 6, p. 1223-1232, 2006.
- ANJOS, L. J. S.; DE TOLEDO, P. M. Measuring resilience and assessing the vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America. *PLoS ONE*, v. 13, n. 3, e0194654, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0194654.
- ARRUDA, D. M. *et al.* Amazonian vegetation types and indigenous lands threatened by upcoming climate change: Forecast impact for Brazilian biomes. *Austral Ecology*, v. 49, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/aec.13369>.
- BOUCHER, O. *et al.* Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 7, e2019MS002010, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.
- BRIENEN, R.. *et al.* Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, v. 519, p. 344-348, 2015. DOI: 10.1038/nature14283.
- BRUNSDON, C.; FOTHERINGHAM, A. S.; CHARLTON, M. E. Geographically weighted regression: a method for exploring non-spatial statistics. *Geographical Analysis*, v. 28, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x>
- BUNKER, D. E. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science*, v. 310, n. 5750, p. 1029-1031, 2005.
- CHAVE, J.. *et al.* Tree allometry and enhanced estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Ecology*, v. 145, p. 87-99, 2005.
- COX, P. M. *et al.* Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 137-156, 2004.

- DINIZ-FILHO, J. A. F. *et al.* Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. *Ecography*, v. 32, p. 897-906, 2009. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2009.06196.x.
- DUBAYAH, R. O. *et al.* Above-ground biomass density at the GEDI L4A footprint level, version 2.1. Oak Ridge: ORNL DAAC, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/2056>.
- ESQUIVEL-MUELBERT, A. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 2018. DOI: 10.1111/gcb.14413.
- FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, v. 59, n.4, e2020RG000728, 2021.
- FERRANTE, L.; FEARNSTIDE, P. M. Brazil threatens Indigenous lands. *Science*, v. 368, n. 6490, p. 481-482, 2020.
- FLORES, B. M. *et al.* Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 114, n. 17, p. 4442-4446, 25 abr. 2017.
- FLORES, B. M.; MONTOYA, E.; SAKSCHEWSKI, B. Transições críticas no sistema florestal amazônico. *Nature*, v. 626, p. 555-564, 2024. DOI: 10.1038/s41586-023-06970-0.
- FRANKLIN, J. *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Texas, USA: Department of Geography and the Environment, University of Texas, USA, 2010.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO (FUNAI). *Base de dados cartográfica: limites*. Disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/indios-no-brasil/terras-indigenas>. Acesso em: 16 out. 2020.
- GALBRAITH, D. *et al.* Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 647-665, 2010.
- GALBRAITH, D. *et al.* Residence times of woody biomass in tropical forests. *Plant Ecology & Diversity*, v. 6, n. 1, p. 139-157, 2013. DOI: 10.1080/17550874.2013.770578.
- GANADE, G.; ADAMS, C.; MELO, F.; FERREIRA, J. Capítulo 6: Benefícios da restauração de paisagens e ecossistemas. In: CROUZEILLES, R.; RODRIGUES, R. R.; STRASSBURG, B. B. N. *Relatório temático sobre restauração de paisagens e ecossistemas*. São Carlos: Editora Cubo, 2019. p. 77. DOI: 10.4322/978-85-60064-91-5.
- GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021. DOI: 10.1038/s41586-021-03629-6.
- GOMES, V. H. F. *et al.* Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. *Nature Climate Change*, v. 9, p. 547-553, 2019. DOI: 10.1038/s41558-019-0500-2.
- HIGGINS, S. I.; CONRADI, T.; MUHOKO, E. Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends. *Nature Geoscience*, v. 16, p. 147-153, 2023. DOI: 10.1038/s41561-022-01114-x.

- IBÁÑEZ, I. *et al.* Forest resilience under global environmental change: Do we have the information we need? A systematic review. *PLoS ONE*, v. 14, n. 9, e0222207, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0222207.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). *Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/todas-as-unidades-de-conservacao>. Acesso em: Dez. 2023.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Prodes digital*. São José dos Campos, SP, 2023. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>. Acesso em: 20 Jun. 2023.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *AR6 climate change 2021: the physical science basis*, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- LAPOLA, D. M. *et al.* The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, n. 6630, 2023. DOI: 10.1126/science.abp8622.
- LOPEZ-GONZALEZ, G. *et al.* Amazon forest biomass measured in inventory plots. Plot data from "Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites". 2014. Disponível em: <https://forestplots.net>. DOI: 10.5521/FORESTPLOTS.NET/2014\_1.
- MORAES, I.; AZEVEDO-RAMOS, C.; PACHECO, J. Public forests under threat in the Brazilian Amazon: Strategies for coping shifts in environmental policies and regulations. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 4, p. 1–7, 2021.
- MOURA, R. *et al.* *Desmatamento zero no Pará: desafios e oportunidades*. Belém: Imazon, 2017. 84 p.
- NOBRE, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 113, p. 10759–10768, 2016.
- PONTES, P. R. M. *et al.* The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. *Journal of Environmental Management*, v. 235, p. 489–499, 2019.
- PAN, Y. *et al.* The structure, distribution, and biomass of the world's forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 44, p. 593-622, 2013. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914.
- POTAPOV, P. *et al.* The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*, v. 3, n. 1, e1600821, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1600821.
- PINHO, P. *et al.* Projections of Brazilian biomes resilience and socio-environmental risks to climate change. *Journal of Environmental Management*, v. 11, n. 3, p. 225–259, 31 dez. 2020.
- QIN, Y. *et al.* Forest conservation in Indigenous territories and protected areas in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, v. 6, n. 3, p. 295–305, 2023.

- RESTREPO-COUBE, N. *et al.* Asymmetric response of Amazon forest water and energy fluxes to wet and dry hydrological extremes reveals onset of a local drought-induced tipping point. *Global Change Biology*, v. 29, n. 21, p. 6077-6092, 2023. DOI: 10.1111/gcb.16933.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). *Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF*. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/>.
- SILVA-BEZERRA, F. G. *et al.* New land-use change scenarios for Brazil: Refining global SSPs with a regional spatially-explicit allocation model. *PLoS ONE*, v. 17, n. 4, e0256052, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0256052.
- SOUZA JUNIOR, C. M. *et al.* Long-term annual surface water change in the Brazilian Amazon biome: Potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. *Water*, v. 11, p. 566, 2019. DOI: 10.3390/w11030566.
- SUN, M. *et al.* Evaluation of NASA's GEDI Lidar Observations for biomass estimation in temperate and tropical forests. *Forests*, v. 13, n. 10, p. 1686, 2022.
- SULLIVAN, M. J. P. *et al.* Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science*, v. 368, n. 6493, p. 869-874, 2020. DOI: 10.1126/science.aaw7578. PMID: 32439789.
- SWART, N. C. *et al.* The Canadian earth system model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 11, p. 4823–4873, 2019.
- TATEBE, H. *et al.* Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, v. 12, p. 2727–2765, 2019. DOI: 10.5194/gmd-12-2727-2019.
- TAVARES, J. V. *et al.* Basin-wide variation in tree hydraulic safety margins predicts the carbon balance of Amazon forests. *Nature*, v. 617, n. 7959, p. 111–117, 2023.
- TORETI, A. *et al.* Drought in the Amazon basin. *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, 2023. DOI: 10.2760/756827. JRC136439.
- TUANMU, M. N.; JETZ, W. A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modelling. *Global Ecology and Biogeography*, v. 23, n. 9, p. 1031–1045, 2014. DOI: 10.1111/geb.12182.
- URIBE, M. R. *et al.* Net loss of biomass predicted for tropical biomes in a changing climate. *Nature Climate Change*, p. 1–6, 2023. DOI: 10.1038/S41558-023-01600-Z.
- VOLDOIRE, A. *et al.* Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 11, n. 7, p. 2177–2213, 2019. DOI: 10.1029/2019MS001683.
- WALKER, W. S. *et al.* The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 117, n. 6, p. 3015–3025, 2020.
- WU, T. *et al.* The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 4, p. 1573–1600, 2019. DOI: 10.5194/gmd-12-1573-2019.

## CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL

A tese revelou que as projeções climáticas futuras têm o potencial de impactar a AGB na Amazônia até o final do século, considerando diferentes cenários de mudanças climáticas. Foram identificadas as áreas mais suscetíveis à perda de AGB sob esses cenários, com perdas predominando em mais de 75-80% das porções intactas das florestas amazônicas, essenciais para compreender os possíveis impactos nas florestas. Além disso, foram destacadas áreas com potencial ganho de AGB na Amazônia Brasileira, buscando identificar áreas de refúgio ou recuperação da biomassa.

A distribuição espacial revelou uma tendência predominante de redução da AGB na Amazônia, independentemente do cenário climático, especialmente nas regiões nordeste, próximas ao escudo das Guianas e na Amazônia central-leste. As estimativas projetadas indicaram valores de AGB abaixo da média atual, prevendo um declínio geral da vegetação ao longo do tempo, com média de 177,61 Mg/ha<sup>-1</sup> até 2040 e 140,43 Mg/ha<sup>-1</sup> até o final do século, com perdas máximas podendo alcançar 474 Mg/ha<sup>-1</sup> em cenários pessimistas para o final do século.

A perda de AGB terá implicações significativas para o ecossistema e para a sociedade, exigindo ações urgentes de conservação, restauração e políticas climáticas para mitigar os impactos das mudanças climáticas e proteger a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos oferecidos pela floresta amazônica. É crucial fortalecer políticas de conservação, práticas de manejo sustentáveis, capacitações e investimentos financeiros para maximizar o potencial de ganho de AGB.

Os padrões de estimativa de ganho de AGB ocorreram na região noroeste e sudeste da Amazônia Brasileira, especialmente nas bacias dos rios Negro, Xingu e Tapajós, com variações distintas entre os estados amazônicos. Isso destaca a importância das políticas de conservação e mitigação como ferramentas essenciais para enfrentar os desafios climáticos na região.

As áreas protegidas, especialmente as TI's, desempenham um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, promovendo a preservação da AGB e a conservação da biodiversidade. É fundamental fortalecer sua proteção e integrá-las em programas de conservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas, ajustando políticas para enfrentar condições climáticas adversas.

Para tanto, é imperativo o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o reflorestamento e a restauração ecológica nas áreas com potencial aumento de AGB, alinhadas com as metas nacionais e internacionais de redução de emissões de carbono. Nesse sentido, a salvaguarda e implementação eficaz da política REDD+ são fundamentais, visando não apenas reduzir a perda de florestas, mas também promover a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais.

As fragilidades das áreas protegidas, incluindo as TI's, exigem atenção especial nas políticas públicas, fortalecendo sua gestão integrada de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Investimentos direcionados, capacitação das comunidades locais e monitoramento eficaz são essenciais para assegurar que essas áreas desempenhem seu papel na conservação da biodiversidade e na adaptação aos efeitos das mudanças climáticas, contribuindo para a resiliência da Amazônia diante dos desafios futuros.

Portanto, é essencial implementar um conjunto de políticas públicas robustas para mitigar os impactos das mudanças climáticas e proteger a biodiversidade da Amazônia. Primeiramente, é necessário fortalecer políticas de conservação para proteger áreas intactas, especialmente nas regiões mais suscetíveis à perda AGB. Além disso, é importante desenvolver programas de reflorestamento e restauração ecológica nas áreas com potencial de aumento de AGB, alinhados com metas nacionais e internacionais de redução de emissões de carbono.

As áreas protegidas, incluindo as TI's, devem ser integradas em programas de conservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas, com proteção e gestão reforçadas. A implementação eficaz da política REDD+ é vital para reduzir a perda de florestas e promover a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais.

Investimentos em capacitação das comunidades locais e em monitoramento eficaz são necessários para garantir que essas áreas cumpram seu papel na conservação e adaptação climática. Incentivar práticas de manejo florestal sustentável e maximizar o potencial de ganho de AGB contribuirá para a sustentabilidade ambiental e o bem-estar humano na região.

Por fim, apoiar a pesquisa e o monitoramento contínuos permitirá uma compreensão mais profunda das dinâmicas da AGB e informará políticas públicas baseadas em evidências científicas. Essas políticas são fundamentais para preservar a resiliência da Amazônia diante dos desafios climáticos futuros, promovendo a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das comunidades locais.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. P. D.; VIEIRA, I. C. G.; ASSIS, T. O.; DALLA-NORA, E. L.; TOLEDO, P. M.; OLIVEIRA, S. R. A.; BATISTELLA, M.; COELHO, A. S.; SAVAGET, E. K.; ARAGÃO, L. E. O. C.; NOBRE, C. A.; OMETTO, J. P. H. Land use change emission scenarios: Anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, v. 22, n. 5, p. 1821–1840, 2016. DOI: 10.1111/gcb.13134.
- ALMEIDA, C. A.; VALERIANO, D. M.; ESCADA, M. I. S.; RENNÓ, C. D. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. *Acta Amazônica*, v. 40, n. 2, p. 289-302, 2010.
- ALMEIDA, C.; SILVA, M.; LOBO, F. de L.; FARIAS, T. P.; GOMES, A.; COSTA, L. C.; ESCADA, M. I. S. Terraiclass: classificação dos padrões de uso e cobertura da terra da Amazônia Legal. In: EMILIO, T.; LUIZÃO, F. (orgs.). *Cenários para a Amazônia: clima, biodiversidade e uso da terra*. Manaus: Editora INPA, 2014. p.137-147.
- ALMEIDA, C. A.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A. R. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. *Acta Amazonica*, v. 46, n. 3, p. 291–302, 2016.
- ARRUDA, D. M. *et al.* Amazonian vegetation types and indigenous lands threatened by upcoming climate change: forecast impact for Brazilian biomes. *Austral Ecology*, v. 49, n. 1, p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/aec.13369>.
- ARTAXO, P.; DIAS, M. A. F. S.; NAGY, L.; LUIZÃO, F. J.; CUNHA, H. B.; QUESADA, C. A. N.; MARENGO, J. A.; KRUSCHE, A. Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da floresta Amazônica. *Ciência e Cultura*, v. 66, n. 3, p. 41-46, 2014.
- ARTAXO, P. Interações entre o funcionamento da floresta amazônica e o clima. In: WORKSHOP INPA: AS DIMENSÕES CIENTÍFICAS, SOCIAIS E ECONÔMICAS DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. Manaus, 2018. *Anais[...]*. Disponível em: <http://www.fapesp.br/eventos/amazon-workshop/pt>. Acesso em: 03 set. 2021.
- ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. Deter-ing deforestation in the Amazon: environmental monitoring and law enforcement. *American Economic Journal: Applied Economics*, v. 15, n. 2, p. 125–156, 1 Abr. 2023.
- BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Climate benefits of intact Amazon forests and the biophysical consequences of disturbance. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2019. DOI: 10.3389/ffgc.2019.00047.
- BARBER, C. P.; COCHRANE, M. A.; SOUZA, C. M.; LAURANCE, W. F. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas. *Biological Conservation*, v. 177, p. 203–209, 2014. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.07.004.
- BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 19, p. 71-86, 2005.
- BROWN, S.; ZARIN, D. What does zero deforestation mean. *Science*, v. 342, p. 805–807, 2013.

- CHAGAS, G. F. B. das *et al.* Impactos da redução da pluviometria na biomassa aérea da Floresta Amazônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 72–79, jan. 2012.
- CHAZDON, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, v. 2, n. 5, 2016. DOI: 10.1126/sciadv.1501639.
- CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA-UNFCCC. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2024. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA-UNFCCC. *Plataforma Durban de ação reforçada* (decisão 1/CP.17) - Adoção de um protocolo, outro instrumento legal, ou um resultado acordado com força legal sob a Convenção aplicável a todas as Partes, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2021.
- COX, P. M.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 137–156, 2004.
- CROUZEILLES, R. *et al.* Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration. *Conservation Letters*, v. 13, n. 3, 18 fev. 2020.
- DINIZ-FILHO, J. A. F.; BINI, L. M.; RANGEL, T. F.; LOIOLA F.D.; HOF, C.; NOGUÉS-BRABO, D.; ARAUJO, M.B. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. *Ecography*, v. 32, p. 897–906, 2009. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2009.06196.x.
- ELIAS, F. *et al.* Assessing the growth and climate sensitivity of secondary forests in highly deforested Amazonian landscapes. *Ecology*, v. 101, n. 3, 2020. DOI: 10.1002/ecy.2954.
- ESQUIVEL-MUELBERT, A. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 2018. DOI: 10.1111/gcb.14413.
- ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: Significantly under-predicted by tropical SST. *Scientific Reports*, v. 7, p. 5811, 2017.
- FLORES, B. M. *et al.* Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, n. 17, p. 4442–4446, 25 Abr. 2017.
- FLORES, B. M.; MONTOYA, E.; SAKSCHEWSKI, B. Transições críticas no sistema florestal amazônico. *Nature*, v. 626, p. 555–564, 2024. DOI: 10.1038/s41586-023-06970-0.
- FORZIERI, G.; DAKOS, V.; MCDOWELL, N. G.; RANDANE, A.; CESCATTI, A. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, v. 608, n. 7923, p. 534–539, 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-04959-9.
- GALBRAITH, D. *et al.* Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 647–665, Jul. 2010.

- GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. DOI: 10.1038/s41586-021-03629-6.
- GOMES, V. H. F. *et al.* Espécies de árvores amazônicas ameaçadas pelo desmatamento e pelas mudanças climáticas. *Nature Climate Change*, v. 9, p. 547–553, 2019. DOI: 10.1038/s41558-019-0500-2.
- GOMES, V. H. F., VIEIRA, I. C. G., SALOMÃO, R. P.; TER STEEGE, H. Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. *Nature Climate Change*, v.9, p.547-55, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0500-2>.
- HOLL, K. D.; BRANCALION, P. H. S. Tree planting is not a simple solution. *Science*, v. 368, n. 491, p. 580–581, 2020. DOI: 10.1126/science.aba8232.
- HUNTINGFORD, C.; ZELAZOWSKI, P.; GALBRAITH, D.; MERCADO, L. M.; SITCH, S.; FISHER, R.; LOMAS, M.; WALKER, A. P.; JONES, C. D.; BOOTH, B. B. B.; MALHI, Y.; HEMMING, D.; KAY, G.; GOOD, P.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; ATKIN, O. K.; LLOYD, J.; GLOOR, E.; COX, P. M. Simulated resilience of tropical rainforests to CO<sub>2</sub>-induced climate change. *Nature Geoscience*, v. 6, n. 4, p. 268–273, 2013. DOI: 10.1038/ngeo1741.
- IBÁÑEZ, I.; ACHARYA, K.; JUNO, E.; KAROUNOS, C.; LEE, B. R.; MCCOLLUM, C.; *et al.* Resiliência florestal sob mudanças ambientais globais: temos as informações de que precisamos? Uma revisão sistemática. *PLoS ONE*, v. 14, n. 9, e0222207, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0222207.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE. *Prodes digital*. São José dos Campos, SP. 2023. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/prodes-digital/prodes.php>. Acesso: 20 jun. 2021.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C *et al.* Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific Reports*, 2016. DOI: 10.1038/srep33130.
- LAPOLA, D. M.; PINHO, P.; BARLOW, J.; ARAGÃO, L. E. O. C. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, n. 6630, 27 Jan. 2023.
- LEWIS, S. L.; MARK, M. A. Defining the anthropocene. *Nature*, v. 519, n. 7542, p. 171-180, 2015. DOI: 10.1038/nature14258.
- LI, M.; LI, Y.; LI, C.; LIU, Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 19 Jun. 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-67024-3.
- LIU, Y. Y. *et al.* Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. *Nature Climate Change*, v. 5, p. 470–474, 2015. DOI: 10.1038/nclimate2581.
- LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point: Last chance for action. *Science Advances*, v. 5, n. 12, p. 4-6, 2019. DOI: 10.1126/sciadv.aba2949.
- MALHI, Y. *et al.* Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, p. 20610–20615, 2009. DOI: 10.1073/pnas.0804619106.

- MAPBIOMAS. *Mapas de uso e cobertura da terra*. 2021. Disponível em: [https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR). Acesso em: 18 ago. 2023.
- MARENGO, J. A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*, v. 6, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA. *Potencial de Regeneração Natural da Vegetação no Brasil*. World Resources Institute – WRI Brasil. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 10 mai. 2021.
- MORAES, I.; AZEVEDO-RAMOS, C.; PACHECO, J. Public Forests Under Threat in the Brazilian Amazon: Strategies for Coping Shifts in Environmental Policies and Regulations. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 4, n. May, p. 1–7, 2021.
- MOURA, R. *et al.* *Desmatamento Zero no Pará: desafios e oportunidades*. Belém: Imazon, 2017. p. 84.
- NOBRE, C. *O futuro climático da Amazônia, relatório de avaliação científica*. São José dos Campos, Brasil: ARA; CCST-INPE; INPA, 2014. 42p. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/uploads/2014/10/Futuro-Climatico-da-Amazonia.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2021.
- NOBRE, C. A.; BORMA, L. D. S. “Tipping points” for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 1, p. 28–36, 2009. DOI: 10.1016/j.cosust.2009.07.003.
- NOBRE, I.; NOBRE, C. Projeto “Amazônia 4.0”: definindo uma terceira via para a Amazônia. *Futuribles*, v. 2, p. 7–20, 2019.
- NOBRE, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need for a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 113, p. 10759–10768, 2016.
- NUNES, S. *et al.* Compensating for past deforestation: Assessing the legal forest surplus and deficit of the state of Pará, eastern Amazonia. *Land Use Policy*, v. 57, p. 749–758, 2016. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.04.022.
- O’NEILL, B. C. *et al.* IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 28–37, 2017.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS-IPCC. *Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 1–151, 2014.
- PAN, Y. *et al.* The structure, distribution, and biomass of the world’s forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 44, p. 593–622, 2013. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914.
- PHILLIPS, O. L. *et al.* Changes in the biomass, dynamics, 1980–2002. In: PHILLIPS, O. L. *et al.* *Amazon and global change*. [S.l.: s.n.], 2009, p. 373–387. (Geophysical Monograph Series 186).

- QIN, Y. *et al.* Forest conservation in Indigenous territories and protected areas in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, v. 6, n. 3, p. 295–305, 2023.
- RAMOS, A. Influence of PPCDAM in combating deforestation in the Brazilian legal Amazon. *Innovation & Technological Development*, v. 1, n. 1, p. 99–122, 2020.
- REID, A. J. *et al.* Post-2015 Sustainable Development Goals still neglecting their environmental roots in the Anthropocene. *Environmental Science & Policy*, v. 77, p. 179–184, 2017.
- ROCHA, M. A.; SALVI, R. F. Repensando a Tipologia de Modelos em Geografia. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 21, p. 146–154, 2017.
- RORATO, A. C. *et al.* Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon Indigenous Lands. *Environmental Science & Policy*, v. 129, p. 19–36, Mar. 2022.
- SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v. 34, 2007. DOI: 10.1029/2007GL029695.
- SANTOS, D. J. *et al.* Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, n. 3, p. 57–73, 2020. DOI: 10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933.
- SATHLER, D.; ADAMO, S. B.; LIMA, E. E. C. Deforestation and local sustainable development in Brazilian Legal Amazonia: an exploratory analysis. *Ecology and Society*, v. 23, n. 2, p. 30/1–30/15, 2018.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE DO PARÁ-SEMAS. *REDD++*. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/wp-content/uploads/2021/02/GUIAINFO.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2021.
- SENA, E. T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A. L. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 1261–1275, 2013.
- STRAND, J. *et al.* Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. *Nature Sustainability*, v. 1, n. 11, p. 657–664, 2018. DOI: 10.1038/s41893-018-0175-0.
- SILVA, V. C. S. DA; *et al.* Marked non-compliance with deforestation embargoes in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 5, p. 054033, Abr. 2022.
- SILVA-BEZERRA, F. G. *et al.* New land-use change scenarios for Brazil: Refining global SSPs with a regional spatially explicit allocation model. *PLoS ONE*, v. 17, n. 4, e0256052, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0256052.
- SILVA-JR, C. H. L. *et al.* Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. *Scientific Data*, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2020. DOI: 10.1038/s41597-020-00600-4.
- SMITH, C.; BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*, p. 1–6, Mar. 2023.

SONG, X. P. *et al.* Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. *Nature Sustainability*, v. 4, p. 784–792, 2021. DOI: 10.1038/s41893-021-00729-z.

SAATCHI, S. S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, n. 24, p. 9899–9904, 2011.

TAVARES, J. V. *et al.* Basin-wide variation in tree hydraulic safety margins predicts the carbon balance of Amazon forests. *Nature*, v. 617, n. 7959, p. 111–117, 1 Maio 2023.

THOMPSON, I. D. *et al.* Forest biodiversity, carbon and other ecosystem services: relationships and impacts of deforestation and forest degradation (Chapter 2). *In: PARROTTA, J. A.; WILDBURGER, C.; MANSOURIAN, S. (eds.). Understanding relationships between biodiversity, carbon, forests, and people: the key to achieving REDD+ objectives. A global assessment report prepared by the Global Forest Expert Panel on Biodiversity, Forest Management, and REDD+. IUFRO World Series v. 31. Vienna, 2012. p. 161.*

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME-UNEP. *Land restoration has tremendous potential to help the world limit climate change and achieve its aims for sustainable development.* In its latest study, the International Resource Panel finds positive spin-offs to support all 17 Sustainable Development Goals agreed to by the world's nations as part of the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2019. Disponível em: <https://www.resourcepanel.org/reports/land-restoration-achieving-sustainable-development-goals>. Acesso em: 15 mai. 2021.

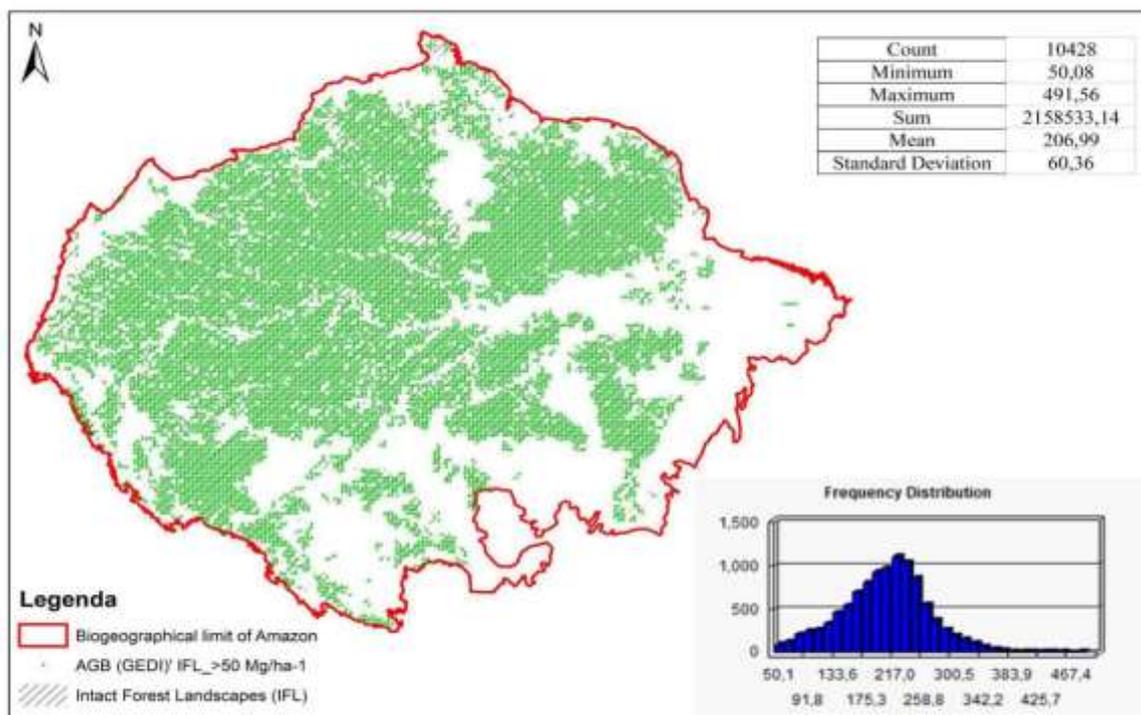
URIBE, M. R.; COE, M. T.; CASTANHO, A. D.; MENDONÇA, M. N.; DENIS, V.; BOLANOS, P. M. Net loss of biomass predicted for tropical biomes in a changing climate. *Nature Climate Change*, v. 13, p. 1–8, 6 Fev. 2023. DOI: 10.1038/s41558-023-01600-z.

ZEMP, D. C.; SCHLEUSSNER, C. F.; BARBOSA, H. M. J.; HIROTA, M.; MONTADE, V.; SAMPAIO, G.; STAAL, A.; WANG-ERLANDSSON, L.; RAMMIG, A. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, v. 8, e 14681, 2017. DOI: 10.1038/ncomms14681.

## APÊNDICE A - INFORMAÇÕES DE SUPORTE

Para reduzir as incertezas na estimativa de AGB foram utilizados dois filtros para mitigar o impacto da influência humana: O Global Consensus Land Cover (GLCC, v2), que fornecem informações sobre cobertura da terra com resolução de 1 km, e está disponível em <https://www.earthenv.org/landcover>. Neste estudo, a camada de dados da vegetação cultivada e manejada juntamente com a camada Urbano/Construído foram utilizadas para retirar o efeito da antropização e gerar uma máscara florestal sem a presença dessas duas coberturas (Tuanmu *et al.*, 2014). Outro produto adotado foi Intact Forest Landscapes (IFL) disponível em <https://intactforests.org/data.ifl.html>, que possui estimativas muito mais conservadora da área de floresta estruturalmente intacta, sem sinais de atividade humana significativa, e grandes o suficiente para que toda a biodiversidade nativa pudesse ser mantida (Potapov *et al.*, 2017). Essa abordagem é adequada para avaliar a integridade climática das florestas (Baker *et al.*, 2019). Em seguida, para eliminar os outliers dos dados da AGB, outro filtro foi aplicado para remover os pontos cuja AGB encontrava-se abaixo de  $50 \text{ Mg/ha}^{-1}$ , com intuito de desconsiderar vegetações herbáceas e arbustivas.

Figura S1- Distribuição e Informações de AGB



## Resumo das principais características dos cinco modelos de circulação geral (GCM) do CMIP6

### Summary of key features of CMIP6's five general circulation models (GCM)

When building the climate database, five best models were chosen to form the *ensemble*, using the *True Skill Statistic (TSS)* metric that measures quality by combining sensitivity and specificity (Allouche; Tsoar; Kadmon, 2006). In order to establish a threshold, only models with TSS values equal to or greater than 0.6 were considered to compose the *ensemble*. The consensus distribution model was derived by the arithmetic mean between the best models from different approaches (Table 1) (Diniz-Filho *et al.*, 2009).

Tabela S1- Resumo das principais características dos cinco modelos de circulação geral (GCM) do CMIP6 utilizados para avaliar a distribuição futura das condições climáticas. Um *ensemble* multi-model foi gerado com base em todos os GCM's.

GCM	ECS*	TCR*	REFERENCE
BCC-CSM2-MR	3.000	1.700	Wu <i>et al.</i> (2019)
MIROC-ES2L	2.700	1.600	Hajima <i>et al.</i> (2020)
CNRM-CM6-1	4.800	2.100	Voldoire <i>et al.</i> (2019)
CNRM-ESM2-1	4.800	1.900	Séférián <i>et al.</i> (2019)
MIROC6	2.600	1.600	Tatebe <i>et al.</i> (2019)
<b>Multi-model averaging</b>	<b>3.580</b>	<b>1.780</b>	
<b>S.D.</b>	<b>1.123</b>	<b>0.216</b>	

\*Sensibilidade ao Clima de Equilíbrio (ECS - °C) e Resposta ao Clima Transiente (TCR - °C) para cada GCM usado no estudo com base nos dados de Meehl *et al.* (2020).

A partir dos dados de AGB e das variáveis bioclimáticas foi explorado o diagrama de dispersão para avaliar se as variáveis independente analisadas têm impacto real na variável dependente (Fig. 2). A Figura 2A apresenta a relação AGBxBIO1 (Temperatura Média Anual (°C)), a Figura 2B a relação de AGBxBIO7 (Amplitude Anual de Temperatura (°C)), Figura 2C a AGBxBIO12 (Precipitação Acumulada (mm/ano) e a Figura 2D com a AGBx BIO15 (Sazonalidade da Precipitação (%)).

Figura S2A- A relação AGBxBIO1 (Temperatura Média Anual (°C))

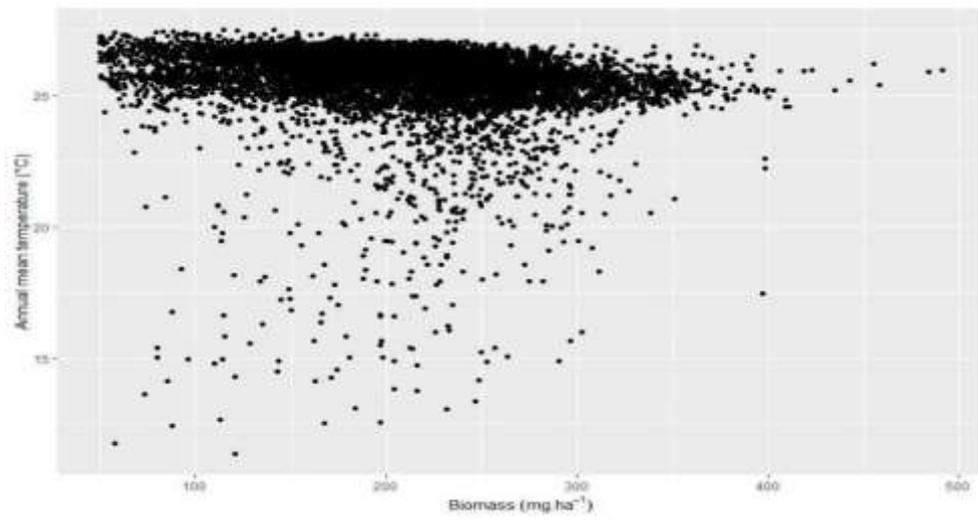


Figura S2B- A relação de AGBxBIO7 (Amplitude Anual de Temperatura (°C))

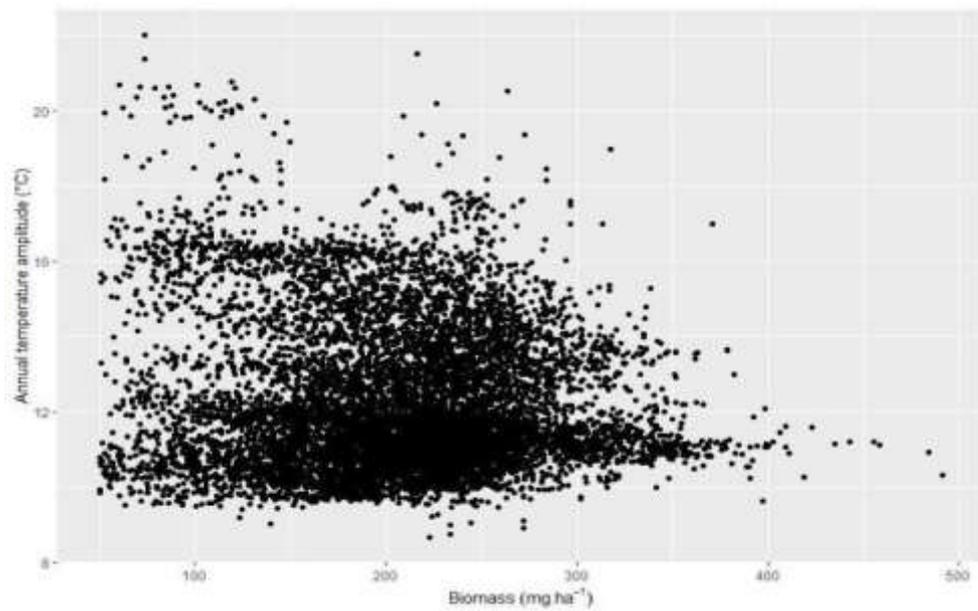


Figura S2C- A relação de AGBx BIO12 (Precipitação Acumulada (mm/ano))

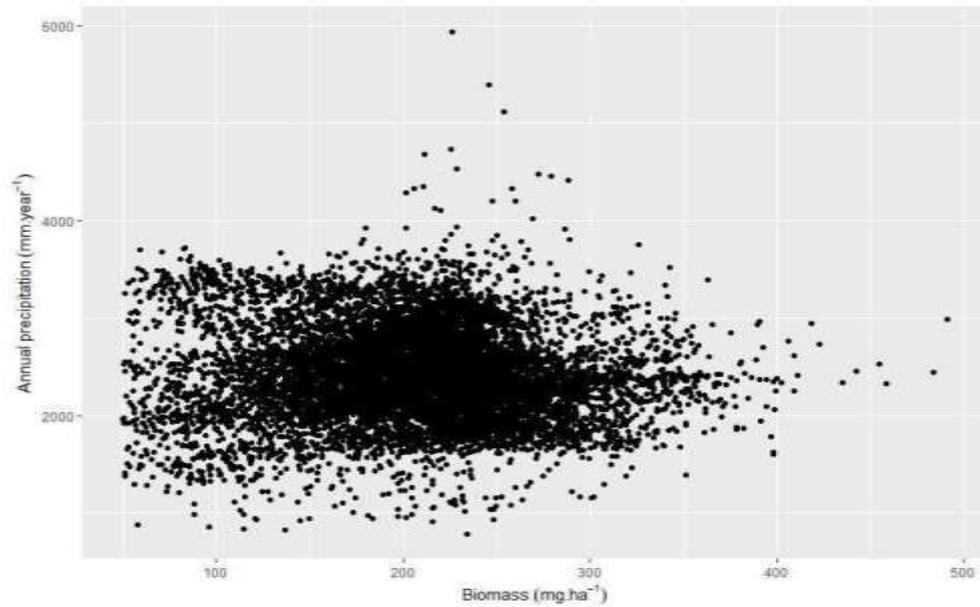
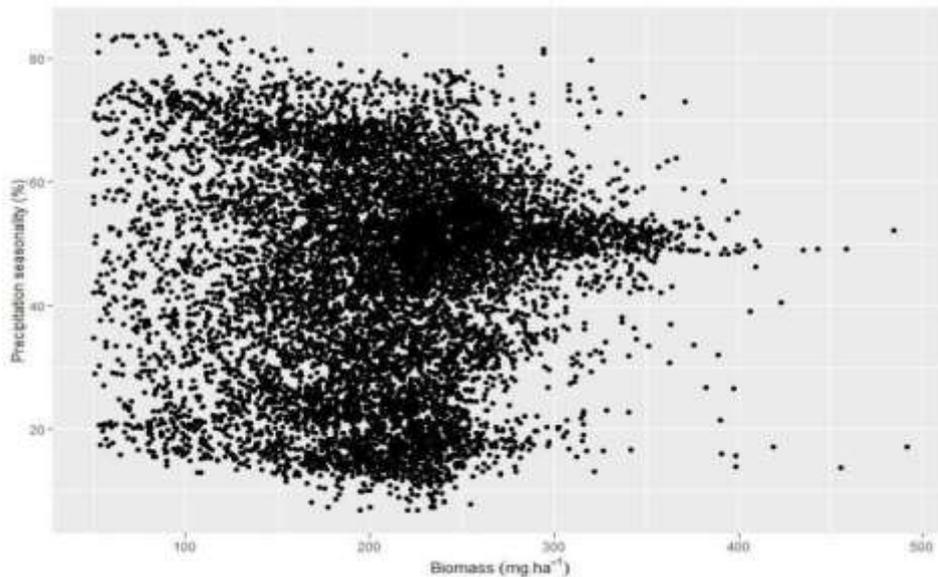


Figura S2D- A relação de AGBx BIO15 (Sazonalidade da Precipitação (%)).



Na avaliação da exposição de AGB com às condições climáticas atuais, foi realizado o teste estatístico de análises de regressão linear para avaliar a significância estatística dos coeficientes, os padrões encontrados entre cada variável independente e a variável dependente, suas relações lineares (positiva ou/e negativa), além da importância das variáveis na determinação dos padrões em grande escala (Tab. S2).

Tabela S2- Teste estatístico de análises de regressão linear

<b>Fórmula Utilizada: Modelo de Regressão Linear</b>	AGBGEDI ~ BIO1 + BIO7 + BIO12 + BIO15
<b>Resumo do Modelo:</b>	Residuals: Min 1Q Median 3Q Max -260.345 -36.326 4.285 38.011 287.088 Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(> t ) (Intercept) 558.0764 13.8725 40.229 < 2e-16 *** bio1 -9.6291 0.4696 -20.504 < 2e-16 *** bio7 -9.0101 0.4220 -21.350 < 2e-16 *** bio12 -0.0063 0.0016 -3.912 9.21e-05 *** bio15 0.4669 0.0523 8.933 < 2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
<b>Estatísticas do Modelo:</b>	Residual standard error: 58.35 on 10423 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.06595 Adjusted R-squared: 0.06559 F-statistic: 184 on 4 and 10423 DF, p-value: < 2.2e-16

Para BIO1, um aumento na temperatura média anual está associado a uma redução na AGB, com um coeficiente estimado de -9.6291 e um forte valor de t-value -20.504, indicam uma relação estatisticamente significativa e negativa entre temperatura e AGB. Em BIO7, um aumento na precipitação anual está associado a uma redução na AGB, com um coeficiente estimado de -9.0101, também indicando uma relação estatisticamente significativa e negativa entre precipitação e AGB. Para BIO12, um aumento na precipitação durante a estação mais seca está associado a uma pequena redução na AGB, com um coeficiente estimado de -0.0063, sugerindo uma relação negativa, porém com um efeito muito pequeno em comparação com outras variáveis. Em relação a BIO15, um aumento na variação da precipitação anual está associado a um aumento na AGB, com um coeficiente estimado de 0.4669, indicando uma relação estatisticamente significativa e positiva entre variação na precipitação e AGB.

Outra informação importante é o p-value do modelo < 2.2e-16, extremamente baixo, que indica uma confiança nos resultados do estudo, visto que, são estatisticamente significativos e não são simplesmente o resultado do acaso, o que aumenta a credibilidade das conclusões tiradas a partir desses resultados.

O modelo empregado posteriormente foi o de Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) empregado para examinar a relação entre a variável AGB (GEDI) e as variáveis independentes. Este método é preferido porque ajusta um modelo de regressão para cada ponto no conjunto de dados, levando em conta a proximidade geográfica das observações, para isso, atribui pesos maiores às observações mais próximas do ponto onde a regressão é calculada e, pesos menores às observações mais distantes (Brunsdon *et al.*, 1996). A GWR, segundo os autores, é

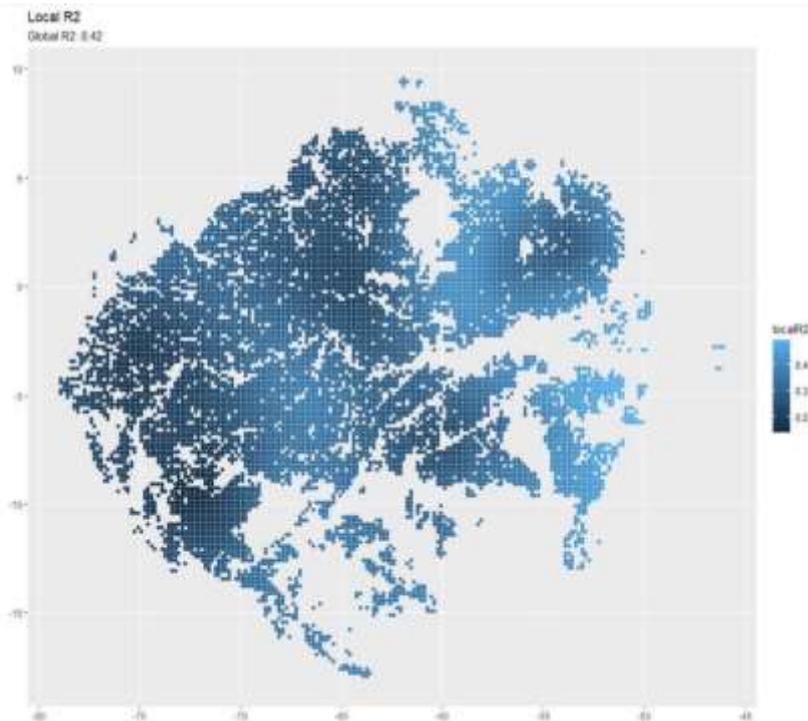
particularmente útil para modelar processos espacialmente heterogêneos, ou seja, processos que variam em suas características de uma região para outra.

Em essência, a GWR ajusta um modelo de regressão para cada região do conjunto de dados, usando a localização geográfica das demais observações para ponderar as estimativas dos parâmetros. Esses valores são apresentados na tabela 3, onde as informações estatísticas do modelo GWR e da qualidade do ajuste do modelo explicam a variabilidade na AGB em relação às variáveis bioclimáticas. O parâmetro de adaptação usado no modelo é um fator importante, pois é quem controla o alcance da influência espacial das observações vizinhas no ajuste do modelo, com valor de 0.07. Além disso, o coeficiente de determinação global apresenta um Global R<sup>2</sup> de 0.4174803, sugerindo que aproximadamente 41,75% da variabilidade na AGB é explicada pelas variáveis independentes (Fig. 3). Isso significa que essas variáveis bioclimáticas estão contribuindo significativamente para a variação observada na AGB, e que o modelo está capturando uma parcela considerável dessa variação.

Tabela S3- Teste estatístico de análises de GWR.

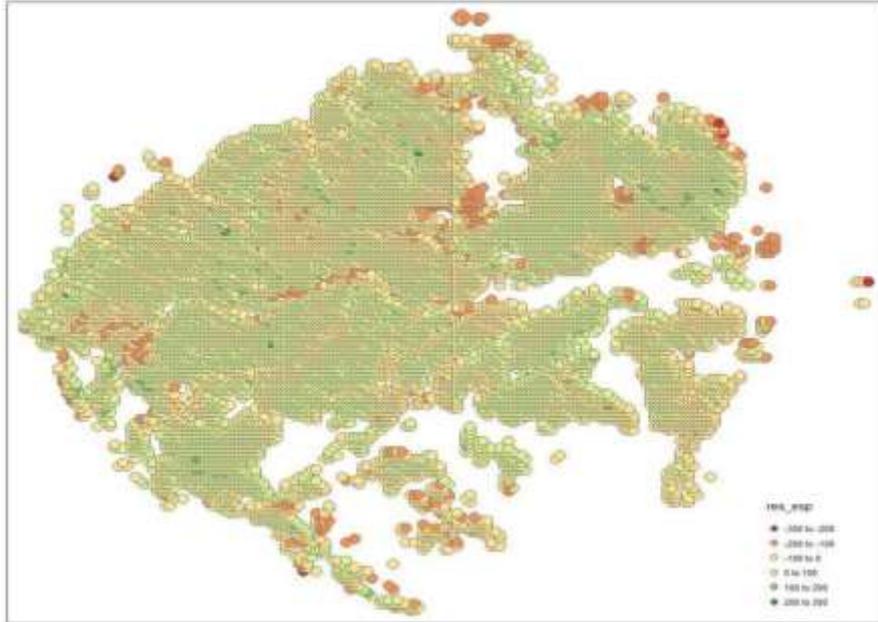
Modelo de Regressão Geograficamente Ponderada (GWR)	agbgedi ~ bio1 + bio7 + bio12 + bio15,
Resumo do Modelo	Tipo de Ponderação Espacial: Gaussiana (gwr.Gauss) Coordenadas Geográficas: longlat Parâmetro de Adaptação: 0.07 Matriz de Chapéu Calculada: hatmatrix
Estatísticas do Modelo:	Global R <sup>2</sup> : 0.4174803 coeficiente de determinação

Figura S3- Variação espacial dos coeficiente de determinação global.



Após a execução do modelo, foram analisados os resíduos espaciais para avaliar a presença de variabilidade espacial não explicada pelo modelo. A figura S4 ilustrou a distribuição dos resíduos. Os resíduos indicam a presença de valores mais positivos, indicando que o modelo mais subestimou os valores observados em muitas áreas, enquanto os resíduos negativos sugerem o oposto, contudo, os valores foram baixos. Essa distribuição dos resíduos ao longo do espaço fornece informações adicionais sobre a precisão e adequação do modelo para explicar a variabilidade observada.

Figura S4- Distribuição espacial dos resíduos espaciais.



### Dados de Biomassa Florestal em campo

Utilizou-se um conjunto de dados único de 413 parcelas de campo localizadas em toda a América do Sul tropical, compiladas como parte da Rede Amazônica de Inventários Florestais da *Amazon Forest Inventory Network* (RAINFOR) <https://forestplots.net/pt/utilizando-o-forestplots/no-campo>, com dados utilizando modelos regionais de altura e densidade de madeira no nível do tronco (derivado de dados de espécies) em Mg ha<sup>-1</sup> (Mitchard *et al.*, 2014; Lopez-Gonzalez *et al.*, 2014). Os dados foram do "Kdhp", no qual, se baseia em um modelo alométrico descrito por Chave *et al.* (2005) que utiliza três parâmetros que relacionam altura e diâmetro para calcular a AGB.

Para validação da AGB entre as variáveis observadas (RAINFOR) (Mitchard *et al.*, 2014; Lopez-Gonzalez *et al.*, 2014) e Modelado (AGB atual) foi utilizado índices estatísticos para avaliar a precisão e confiabilidade do modelo de estimativa de AGB, em comparação com os valores observados obtidos em parcelas do inventário florestal. Ao todo foram um conjunto de 159 dados para nossa área de estudo. A tabela S4 apresenta estatísticas básicas para as variáveis de AGB observadas e modeladas.

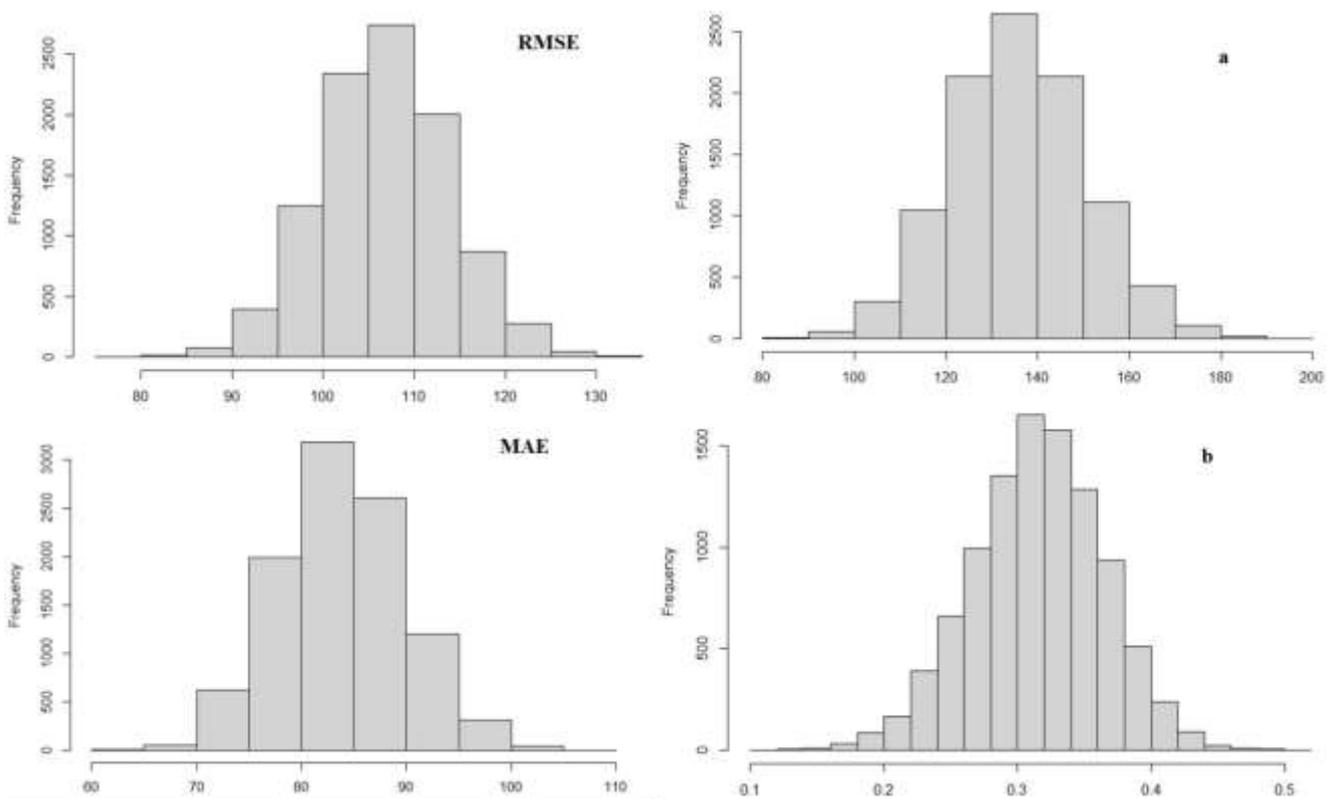
Tabela S4 - Estatística Básica da AGB observadas e modeladas.

Variável	Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
AGB Observados	287,09	273,28	6740,79	82,11	70,16	590,41
AGB Modelados	237,73	226,40	3807,53	61,70	80,74	355,05

Foi utilizado a técnica de bootstrap devido ao número limitado de dados, o que poderia tendenciar a distribuição exata de uma estatística de interesse. Por isso, foram realizadas 10.000 réplicas usando a técnica de bootstrap (técnica de reamostragem que envolve a geração de múltiplas amostras a partir da amostra original, permitindo estimar a distribuição amostral de um estimador estatístico).

Com esse método foram calculados a variabilidade das inferências estatísticas (Figura S1), tais como: a distribuição de frequência do intercepto da regressão linear simples (a), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), a distribuição do coeficiente angular (b) e o Erro Quadrático Médio (MSE).

Figura S5- Validação de modelos e estimadores.



### Painel Superior Esquerdo: RMSE

Este histograma ilustra a distribuição dos valores de RMSE. O RMSE mede a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre os valores previstos e observados. Valores mais baixos de RMSE indicam melhor desempenho do modelo. A distribuição dos valores de RMSE parece estar centrada em torno de 100, com a maioria dos valores variando entre aproximadamente 90 e 120.

### **Painel Inferior Esquerdo: MAE**

Este histograma mostra a distribuição dos valores de MAE. O MAE mede a média das diferenças absolutas entre os valores previstos e observados. Valores mais baixos de MAE indicam melhor desempenho do modelo. A distribuição dos valores de MAE parece estar centrada em torno de 85, com a maioria dos valores variando entre aproximadamente 70 e 100.

### **Painel Inferior Direito: Coeficiente Angular da Regressão Linear Simples (b)**

Este histograma ilustra a distribuição dos valores do coeficiente angular (b) da regressão linear simples. A distribuição dos valores do coeficiente angular parece estar centrada em torno de 0,3, com a maioria dos valores variando entre aproximadamente 0,2 e 0,4.

### **Painel Superior Direito: Intercepto (constante) da Regressão Linear Simples (a)**

Este histograma mostra a distribuição de frequência dos valores do intercepto, indicando que a maioria está centrada em torno de 140, com a maioria dos valores variando entre aproximadamente 120 e 160.

### **Mudanças Climáticas Projetadas na Região Amazônica Sob os Cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5**

A Figura S2 apresenta mapas de diferentes variáveis climáticas projetadas para a região amazônica sob dois cenários de mudança climática (SSP1-2.6 e SSP5-8.5). Cada mapa exibe uma variável bioclimática específica: temperatura média anual (BIO1), precipitação anual (BIO12), variação anual da temperatura (BIO7) e sazonalidade da precipitação (BIO15).

Os resultados mostram que o cenário SSP5-8.5 projeta mudanças climáticas mais significativas em comparação com o cenário SSP1-2.6. Em relação à temperatura média anual, há um aumento de até 1,92°C no SSP5-8.5, comparado a até 1,68°C no SSP1-2.6. A precipitação anual mostra uma redução maior no cenário SSP5-8.5, variando de -267,92 mm a 71,01 mm, enquanto no SSP1-2.6 varia de -180,01 mm a 74,22 mm. A variação anual da temperatura também é maior no cenário SSP5-8.5, variando de 0,43°C a 1,86°C, comparado a 0,28°C a 1,57°C no SSP1-2.6. Além disso, a sazonalidade da precipitação é mais pronunciada no SSP5-8.5, variando de 3,63 a 10,60 no coeficiente de variação, enquanto no SSP1-2.6 varia de 2,91 a 7,29. Essas mudanças indicam um aumento na variabilidade climática e em condições extremas, com potenciais impactos significativos no ecossistema amazônico e nas condições climáticas regionais.

Figura S6-Mapas de diferentes variáveis climáticas projetadas para a região Amazônica sob dois cenários de mudanças climáticas (SSP1-2.6 e SSP5-8.5). Nos painéis A-D, representando o cenário SSP1-2.6, os mapas mostram: temperatura média anual (BIO1) no painel A, precipitação anual (BIO12) no painel B, faixa de temperatura anual (BIO7) no painel C e sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação) (BIO15) no painel D. Nos painéis E-H, representando o cenário SSP5-8.5, os mapas mostram: (BIO1) no painel E, (BIO12) no painel F, (BIO7) no painel G, e (BIO15) em painel H.

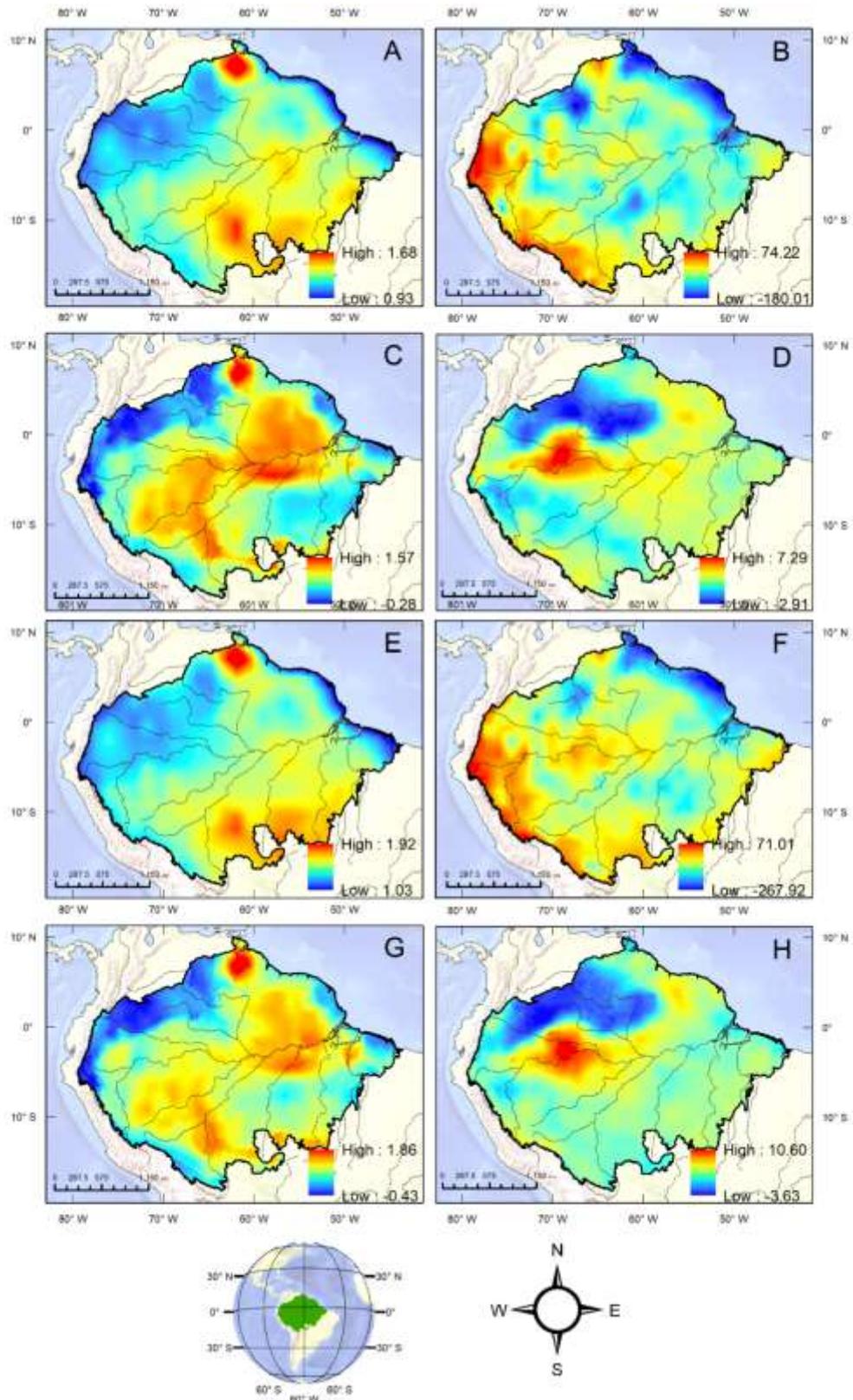


Tabela S5 - Ganho e perda de biomassa aérea (AGB) e área florestal total para cada estado da região Amazônica nos dois cenários climáticos (SSP1-2.6 e SSP5-8.5) para o período 2021 a 2040

(continua)

<b>TOTAL DE GANHO DE AGB (Mg)</b>		
<b>Estado</b>	<b>Cenário 126 (2021-2040)</b>	<b>Cenário 585 (2021-2040)</b>
Acre	78,332,358.300	6,089,555.225
Amazonas	809,601,140.638	1,083,346,620
Amapá	26,224,336.292	10,049,968.991
Maranhão	10,484,342.302	4,091,689.414
Mato Grosso	65,798,944.627	19,655,842.415
Rondônia	70,372,480.299	37,517,548.572
Roraima	272,111,876.996	237,064,669.900
Pará	465,828,895.841	196,277,568.823
<b>TOTAL DE PERDA DE AGB (Mg)</b>		
<b>Estado</b>	<b>Cenário 126 (2021-2040)</b>	<b>Cenário 585 (2021-2040)</b>
Acre	-160,742,868.740	-554,660,263.831
Amazonas	-4,421,521,705.702	-5,183,372,429.002
Amapá	-840,827,643.072	-1,182,505,483.092
Maranhão	-624,991.334	-3,325,561.352
Mato Grosso	-152,322,503.104	-350,160,750.620
Rondônia	-162,421,400.092	-233,667,205.310
Roraima	-184,447,212.605	-221,395,317.334
Pará	-1,626,090,457.098	-3,091,797,497.116
<b>TOTAL DE ÁREA DE FLORESTA INTACTA (km²)</b>		
<b>Estado</b>	<b>Cenário 126 (2021-2040)</b>	<b>Cenário 585 (2021-2040)</b>
Acre	81,857.267	81,857.336
Amazonas	1,195,404.910	1,195,409.379
Amapá	83,695.633	83,695.633
Maranhão	1,988.343	1,988.343
Mato Grosso	58,688.799	58,688.728
Rondônia	52,318.285	52,318.636
Roraima	108,861.082	108,861.738
Pará	487,525.889	487,525.825

A variabilidade nos dados da RAINFOR, devido ao pequeno tamanho das parcelas (apenas 1 ha), pode desafiar a correlação precisa com as previsões do GEDI. Contudo, a utilização de dados RAINFOR destaca uma consistência fundamental na metodologia, garantindo uma análise robusta da biomassa florestal.

Figura S7- Gráfico de dispersão de AGB (RAINFOR) versus AGB (previsto)

