



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MARIE GUERART DA SILVA DUTRA

**ESTOQUES DE BIOMASSA E DE CARBONO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL NA RESERVA ECOLÓGICA DE GUAPIAÇU**

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MARIE GUERART DA SILVA DUTRA

**ESTOQUES DE BIOMASSA E DE CARBONO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL NA RESERVA ECOLÓGICA DE GUAPIAÇU**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA



HOMOLOGAÇÃO Nº 16 / 2025 - DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)

Nº do Protocolo: 23083.037054/2025-10

Seropédica-RJ, 10 de julho de 2025.

**ESTOQUES DE BIOMASSA E DE CARBONO EM ÁREAS DE
RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA RESERVA ECOLÓGICA DE GUAPIAÇU**

MARIE GUERART DA SILVA DUTRA

APROVADA EM: 27 de junho de 2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO – UFRRJ

Orientador

Profª. Drª. RAFAELLA DE ANGELI CURTO – UFRRJ

Membro

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE – UFRRJ

Membro

(Assinado digitalmente em 10/07/2025 20:14)
 EMANUEL JOSE GOMES DE ARAUJO
 PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
 DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)
 Matrícula: 1978275

(Assinado digitalmente em 10/07/2025 14:05)
 MARCO ANTONIO MONTE
 PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
 DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)
 Matrícula: 1972555

(Assinado digitalmente em 10/07/2025 20:12)

RAFAELLA DE ANGELI CURTO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCAlg (12.28.01.00.00.00.29)
Matrícula: 1251203

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **16**, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO**, data de emissão: **10/07/2025** e
o código de verificação: **fb7ca4b84e**

À minha amada família, dedico esta conquista. Vocês são a razão e a força por trás desta realização. Minha imensa gratidão e eterno amor.

AGRADECIMENTOS

A finalização desta monografia é um momento de celebração, mas também de reconhecimento àqueles que tornaram esta conquista possível.

Aos meus pais, Adriana e Vandson, minha eterna gratidão e amor. Nada disso seria possível sem o apoio de vocês. Desde o início, vocês me incentivaram a seguir meus sonhos, me deram força nos momentos difíceis e me ensinaram a ser forte e resiliente. Tenho muito orgulho de vocês, e tudo o que alcancei até agora é reflexo do apoio e amor de vocês.

Ao meu irmão Matheus, meu melhor amigo, obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos. Compartilhamos alegrias, desafios e aprendizados, e saber que eu sempre pude contar com você fez toda a diferença. Sua presença me deu segurança e coragem para continuar.

Ao meu companheiro Emanuel, obrigada por caminhar ao meu lado com paciência, compreensão e tantos incentivos. Você sempre encontrou uma forma de estar presente, me apoiando e acreditando em mim, não só nos melhores momentos, mas também nas horas de cansaço e incerteza. Compartilhar essa conquista com você torna tudo ainda mais especial. Obrigada por estar sempre comigo. Amo você.

À minha família, especialmente às minhas avós Sônia e Vanda e aos meus primos Sheyenne e Yuri, obrigada por acreditarem em mim e por me acompanharem com tanto carinho.

Quero deixar registrada minha profunda gratidão ao meu orientador, professor Emanuel, por todo o apoio e dedicação ao longo dessa caminhada. Sou muito grata pelos ensinamentos compartilhados e por ter me acolhido no Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal, onde vivi experiências enriquecedoras, aprendi muito e conheci pessoas incríveis. Às amigas e amigos que fizeram parte dessa trajetória (Nádia, Naila, Sara, Brent e Mateus) meu sincero agradecimento pela companhia e, principalmente, o apoio de vocês.

À banca examinadora, composta pelo Prof. Marco Monte e pela Profa. Rafaella Curto, agradeço pela generosidade em aceitar o convite e pelas contribuições para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, minha gratidão pelo ensino público, gratuito e de qualidade, e por ter sido um espaço de aprendizado, amadurecimento e formação, tanto acadêmica quanto pessoal.

A todos os professores que fizeram parte da minha graduação, meu sincero agradecimento por cada ensinamento compartilhado.

Sem dúvida, a trajetória na UFRRJ me presenteou com amizades sinceras e puras que, sem elas, não seria possível alcançar todas estas conquistas. Às minhas grandes amigas/irmãs Maria e Helena, que me cuidaram e nunca me deixaram desistir, minha eterna gratidão e amor ao laço que criamos. Gratidão a minha amiga Joyce que me incentivou a seguir na área que mais me identifico, sem seus conselhos não estaria onde estou. Agradeço também aos meus amigos da Geologia, que foram minha família quando eu precisei.

À Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), pela parceria fundamental para a realização desta pesquisa, pelo acesso às áreas de estudo e pelo apoio logístico durante o trabalho de campo.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq), pelo suporte financeiro que permitiu a dedicação à pesquisa e o aprofundamento na vida acadêmica, contribuindo de forma significativa para minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa etapa da minha vida, meu muito obrigada.

RESUMO

Os estudos sobre o potencial de estoque e fixação de carbono em ecossistemas florestais, especialmente em áreas em processo de restauração, têm se tornado cada vez mais necessários diante do avanço das mudanças climáticas. Este trabalho teve como objetivo quantificar e avaliar os estoques de biomassa e carbono em áreas de restauração em diferentes idades, na Reserva Ecológica de Guapiaçu, RJ. A coleta de dados foi realizada em fevereiro de 2025 por meio de amostragem sistemática, com parcelas de 600 m² (20 m × 30 m), sendo alocadas 3, 5, 5 e 6 parcelas em áreas com 6, 11, 16 e 20 anos de restauração, respectivamente, considerando no mínimo 5% da área amostral de cada plantio. Foram mensuradas a circunferência à altura do peito (CAP) e altura total de todos os indivíduos com CAP ≥ 15,7 cm). A biomassa foi estimada a partir da equação proposta por Scolforo (2008), e o carbono, calculado utilizando o fator de conversão de 0,47. Foram também determinadas as distribuições de diâmetro (5 cm de amplitude), de altura (3 m de amplitude) e de carbono por classe diamétrica, bem como o incremento médio anual (IMA) e os intervalos de confiança (95%). Os resultados demonstraram que os estoques de carbono aumentam progressivamente com o tempo de restauração, passando de 32,65 Mg/ha (6 anos) para 67,31 Mg/ha (20 anos). A distribuição do carbono por classe diamétrica evidenciou que, embora o acúmulo inicial se concentre nas classes menores, a contribuição de indivíduos de maior porte torna-se mais expressiva nas áreas mais antigas, acompanhando o avanço sucessional e a complexidade estrutural crescente. O IMA foi maior nas áreas jovens (6 e 11 anos), indicando fase de rápido crescimento, e menor nas áreas mais antigas (16 e 20 anos), quando o desenvolvimento passa a priorizar indivíduos maiores. A análise estatística indicou que apenas a área de 6 anos apresentou estoque significativamente menor que as demais, reforçando a variabilidade natural do processo de regeneração. Todas as áreas avaliadas se enquadram no estágio médio de regeneração e ainda apresentam estoques inferiores aos de florestas maduras, mas já exercem papel relevante na mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Regeneração Florestal; Mata Atlântica; Mudança do Clima.

ABSTRACT

Studies on the carbon storage and sequestration potential of forest ecosystems, especially in areas undergoing restoration, have become increasingly necessary in the face of advancing climate change. This work aimed to quantify and evaluate biomass and carbon stocks in restoration areas at different ages, in the Guapiaçu Ecological Reserve, RJ. Data collection was carried out in February 2025 through systematic sampling, with 600 m² (20 m × 30 m) plots. 3, 5, 5, and 6 plots were allocated in areas with 6, 11, 16, and 20 years of restoration, respectively, considering at least 5% of the sample area of each plantation. Circumference at breast height (CAP) and total height were measured for all individuals with CAP ≥ 15.7 cm. Biomass was estimated using the equation proposed by Scolforo (2008), and carbon was calculated using a conversion factor of 0.47. The distributions of diameter (5 cm width), height (3 m width), and carbon by diameter class were also determined, as well as the mean annual increment (MAI) and 95% confidence intervals. The results demonstrated that carbon stocks increase progressively with restoration time, rising from 32.65 Mg/ha (6 years) to 67.31 Mg/ha (20 years). The distribution of carbon by diameter class showed that, although initial accumulation is concentrated in the smaller classes, the contribution of larger individuals becomes more significant in older areas, accompanying successional advancement and increasing structural complexity. The MAI was higher in young areas (6 and 11 years), indicating a phase of rapid growth, and lower in older areas (16 and 20 years), when development begins to prioritize larger individuals. Statistical analysis indicated that only the six-year-old area had significantly lower stocks than the others, reinforcing the natural variability of the regeneration process. All areas evaluated are in the intermediate stage of regeneration and still have lower stocks than mature forests, but they already play a significant role in mitigating climate change.

Keywords: Forest Regeneration; Atlantic Forest; Climate Change.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
1.1. Mudanças Climáticas e Florestas Tropicais	12
1.2. Restauração Florestal.....	13
1.3. Biomassa e Estoque de Carbono em Florestas	13
1.4. Dinâmica do Estoque de Carbono	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
1.1. Caracterização da área de estudo.....	15
1.2. Amostragem e coleta de dados	16
1.3. Biomassa da Parte Aérea e Estoque de Carbono	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
1.2. Distribuição Diamétrica e de Altura.....	18
1.3. Biomassa da Parte Aérea e Estoque de Carbono	21
1.4. Distribuição do Estoque de Carbono por Classe Diamétrica	23
1.5. Intervalo de Confiança (IC).....	25
1.6. Incremento Médio Anual (IMA)	27
5. CONCLUSÃO.....	28
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das áreas restauradas estudadas, incluindo localização, idade de restauração, número de parcelas amostradas e área total, área amostrada e porcentagem de área amostrada para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), RJ.	16
Tabela 2 - Estatísticas descritivas, valores mínimo, médio, máximo e coeficiente de variação (CV%) do diâmetro à 1,30 m do solo (DAP), altura (Ht) por indivíduo. O número de indivíduos por hectare (Nº) e área basal (G) para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.	18
Tabela 3 - Valores médios do carbono por indivíduo (C ind) biomassa seca da parte aérea (BPA), estoque de carbono (C), o estoque de carbono total da área (C total) e intervalo de confiança de carbono (IC), para as quatro áreas estudas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.	21
Tabela 4 - Incremento Médio Anual (IMA) calculado para as variáveis Biomassa Seca da Parte Aérea (BPA) e Carbono (C), em Mg/ha, calculados para as áreas de estudos na Reserva Ecológica de Guapiaçu.	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização geral das áreas de pesquisa na Reserva Ecológica de Guapiaçu, Cachoeiras de Macacu, RJ.....	15
Figura 2 - Mapa de localização das unidades amostrais para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.	16
Figura 3 - Distribuição diamétrica, com amplitude de 5 cm, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.	19
Figura 4 - Distribuição de altura, com amplitude de 3 metros, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.	20
Figura 5 - Distribuição do estoque de carbono (Mg/ha) por classe diamétrica, com amplitude de 5 centímetros, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.....	24
Figura 6 - Representação gráfica do intervalo de confiança (IC) em C Mg/ha para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.....	26

1. INTRODUÇÃO

A Terra é envolta pela atmosfera, uma camada invisível formada por gases como o nitrogênio e dióxido de carbono (CO₂). Esses gases exercem um papel fundamental na regulação da temperatura terrestre, formando o fenômeno tão discutido que é o efeito estufa (IPCC, 2023). O CO₂ é um dos principais gases de efeito estufa, pois ele retém e absorve o calor refletido da Terra e é fundamental para a regulação adequada da superfície terrestre (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2022; IPCC, 2023). Contudo, com o avanço industrial, as atividades humanas como o desmatamento e queima de combustíveis fósseis aumentaram significativamente as emissões de CO₂ na atmosfera, acarretando a elevação da temperatura média do planeta, dando início aos efeitos consequentes do aquecimento global (IPCC, 2023).

Atualmente, observamos as expressivas mudanças climáticas que ocorrem globalmente. No Brasil, as alterações no uso do solo e o desmatamento são dois dos principais fatores que contribuem para essas mudanças (SEEG, 2024). Essas alterações interferem diretamente no ciclo do carbono (FEARNSIDE, 2005) e a conservação, preservação e restauração dos ecossistemas florestais são estratégias importantes para mitigar esses efeitos, uma vez que esses ambientes atuam como grandes retentores de carbono atmosférico e fornecem diversos serviços ecossistêmicos (COSTANZA *et al.*, 1997).

A preocupação com as consequências do aquecimento global levou alguns países a se comprometerem com agendas, acordos e planos que compartilham o objetivo comum de enfrentar os desafios ambientais que ameaçam o planeta e o bem-estar humano. Eles buscam promover a sustentabilidade através da conservação da biodiversidade, do uso responsável dos recursos naturais e da mitigação da poluição e das mudanças climáticas (SILVA; DANTAS, 2024).

As florestas tropicais são de grande importância para a mitigação das alterações climáticas, aproximadamente 55% do carbono florestal global está estocado nesses ecossistemas (PAN *et al.*, 2011). O bioma Mata Atlântica, com sua extensão original estimada em cerca de 1,3 milhões de quilômetros quadrados (IBGE, 2019), possui atualmente apenas 12,4% de sua floresta original conservada, contemplando todos os fragmentos maduros com mais de três hectares (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024; RIBEIRO *et al.*, 2009). O desmatamento do bioma no período de 2022 a 2023 foi de 14.697 hectares, o que corresponde à perda de aproximadamente 40 hectares de mata por dia e à emissão de 7,032 milhões de toneladas de CO₂ equivalente na atmosfera (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024). Este bioma, intensamente fragmentado, é um dos mais biodiversos do mundo e desempenha papel fundamental na conservação da biodiversidade, no abastecimento de água e na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Nesse contexto, iniciativas de conservação e restauração em áreas protegidas, como a Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), localizada no estado do Rio de Janeiro, tornam-se essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Diante disso, fica evidente a importância de reflorestar, conservar e preservar os fragmentos florestais remanescentes, bem como compreender os processos ecológicos que ocorrem nesses ecossistemas.

A restauração florestal do bioma Mata Atlântica é uma prioridade global e uma alternativa importante para alcançar as metas do Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), do Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) e do Plano Clima para a mitigação das mudanças climáticas (BRASIL, 2008; BRASIL, 2017). Essas ferramentas políticas reconhecem a importância da restauração florestal como estratégia fundamental para mitigar as mudanças climáticas e reduzir o CO₂ atmosférico (BRANCALION *et al.*, 2019). A restauração florestal é uma ferramenta que desempenha um papel essencial na recuperação dos serviços ecossistêmicos, como a conservação do solo, a regulação dos ciclos hidrológicos e a fixação de carbono (RODRIGUES *et al.*, 2009), e tem sido amplamente discutida, especialmente após a

Organização das Nações Unidas (ONU) declarar o período de 2021 a 2030 como a “Década das Nações Unidas sobre Restauração de Ecossistemas”. Diante desse contexto e da crescente relevância da restauração florestal como estratégia climática e ambiental, o objetivo deste trabalho foi quantificar e avaliar os estoques de biomassa e carbono em áreas de restauração em diferentes idades, na Reserva Ecológica de Guapiaçu, RJ.

2. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. Mudanças Climáticas e Florestas Tropicais

Segundo o Intergovernmental Report of the Climate Change (IPCC), as atividades humanas exercem um impacto profundo no planeta, manifestando-se no aumento das temperaturas dos oceanos, da terra e da atmosfera. Desde 1971, é provável que essas ações sejam as principais impulsoradoras desse aquecimento. A influência humana, contudo, já aumentou a probabilidade de ocorrência de eventos extremos compostos desde a década de 1950, incluindo aumento na frequência de ondas de calor e secas simultâneas. Atualmente, esses eventos extremos, como precipitação intensa, enchentes e ciclones tropicais, têm se tornado mais comuns e intensos em diversas regiões do globo (IPCC, 2023).

Existe uma dualidade no papel em que as florestas tropicais desempenham frente às mudanças climáticas, por um lado são importantes reservatórios naturais de carbono e reguladores climáticos, mas por outro lado são contribuintes significativos na emissão de carbono através de ações humanas como desmatamento, degradação e queima, atividades estas que ocorrem frequentemente nesses ecossistemas. Conforme destacado pelo IPCC, 45% das áreas florestadas do mundo estão concentradas entre os trópicos de câncer e capricórnio, portanto, as florestas tropicais são essenciais na regulação climática, regional e global, além de serem os repositórios mais significativos de biomassa terrestre.

No entanto, as florestas tropicais estão sob crescente ameaça, os impactos negativos das alterações climáticas nesses ambientes elevam a mortalidade arbórea, reduzem o crescimento das árvores e limitam a capacidade de regeneração florestal. Observa-se também uma alteração na estrutura e composição de espécies das comunidades arbóreas, com tendências de transição para florestas mais secas em algumas regiões, como a Amazônia, e deslocamento altitudinal de espécies. Como consequência, apesar do efeito de fertilização pelo CO₂, o potencial das florestas tropicais como reservatório de carbono tem sido enfraquecido, especialmente na Amazônia, África e Ásia (IPCC, 2022).

Dentro do cenário das florestas tropicais, o bioma Mata Atlântica representa um caso particularmente crítico e relevante para as discussões sobre mudanças climáticas e conservação. Originalmente cobrindo vastas áreas da costa brasileira, este bioma é hoje um dos hotspots de biodiversidade mais ameaçados do planeta, restando apenas uma pequena fração de sua cobertura original, estimada em cerca de 12,4%, e intensamente fragmentada (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024; RIBEIRO; METZGER; MARTENSEN, 2009). Essa fragmentação histórica, resultado principalmente da expansão agrícola, urbanização e exploração madeireira, não apenas ameaça sua biodiversidade única, mas também compromete sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo a regulação hídrica e a fixação de carbono. Os fragmentos remanescentes são particularmente vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, como alterações nos padrões de chuva e aumento de eventos extremos, que podem intensificar a perda de biodiversidade e a degradação florestal (IPCC, 2022).

1.2. Restauração Florestal

A restauração florestal tem sido amplamente discutida, sendo considerada uma importante ferramenta no enfrentamento das mudanças climáticas e desempenhando um papel fundamental na conservação da biodiversidade e do solo, no ciclo hidrológico, na fixação de carbono atmosférico, como também na recuperação dos serviços ecossistêmicos e na utilização dos recursos de forma sustentável pelo ser humano (PAIXÃO, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2009). A definição mais comum para restauração ecológica é fornecida pela Society for Ecological Restoration Internattional (SER), sendo “o processo e prática de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído”. Essa prática está cada vez mais em evidência, pois a fixação do carbono ocorre predominantemente nas fases iniciais do povoamento, devido à alta taxa de acúmulo de biomassa (PREISKORN, 2011). Conforme ocorre o desenvolvimento da restauração, o carbono é fixado tanto na biomassa quanto no solo o que contribui para o equilíbrio do ciclo do carbono (GORDON; SANTOS; RODRIGUES, 2020; ROSA; MARQUES, 2022).

A restauração ecológica é um processo mais amplo que visa a recuperação de ecossistemas e a restauração florestal é uma importante ferramenta neste processo. Existem diferentes modelos de restauração florestal e, atualmente, os que são mais utilizados na Mata Atlântica tem como principal característica o consórcio de espécies pioneiras e não pioneiras no plantio, em uma mesma linha ou em linhas intercaladas. As espécies pioneiras apresentam um crescimento inicial mais acelerado e são de grande importância devido ao sombreamento que causam, o que facilita no desenvolvimento de espécies de crescimento lento, além de influenciar no controle de gramíneas (AMARAL, 2024).

1.3. Biomassa e Estoque de Carbono em Florestas

A quantificação da biomassa e do estoque de carbono em ecossistemas florestais é um tema central muito discutido, com particular importância frente aos desafios das mudanças climáticas globais (HOUGHTON, 2005; IPCC, 2019). A biomassa florestal refere-se à massa total de matéria orgânica viva, tanto acima quanto abaixo do solo (componentes aéreo e radicular), presente em uma determinada área de floresta em um dado momento (BROWN, 1997; IPCC, 2006). Estimar essa biomassa é o primeiro passo para calcular o estoque de carbono, uma vez que aproximadamente 47% a 50% da biomassa seca vegetal é composta por carbono (IPCC, 2006; THOMAS; MARTIN, 2012).

As florestas desempenham um papel fundamental no ciclo global do carbono, atuando como fixadores (absorvendo CO₂ da atmosfera através da fotossíntese e acumulando-o na biomassa e no solo) e grandes reservatórios (estocando carbono) ou, até mesmo, como fontes de carbono (liberando CO₂ através da respiração, decomposição e, principalmente, desmatamento e degradação) (PAN *et al.*, 2011). Portanto, a estimativa precisa dos estoques de carbono florestal é fundamental para a elaboração de inventários nacionais de gases de efeito estufa (GEE), para o desenvolvimento de políticas de conservação e manejo florestal sustentável, e para a implementação de mecanismos de mitigação das mudanças climáticas, como o REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal) (GIBBS *et al.*, 2007; IPCC, 2006).

Os métodos para estimar a biomassa florestal podem ser classificados em diretos e indiretos. O método direto envolve o corte, a pesagem e a secagem de árvores amostrais para determinar a biomassa real, sendo o mais preciso, porém destrutivo, oneroso e logicamente complexo, inviável para grandes áreas (BROWN, 1997; CHAVE *et al.*, 2004). Por essa razão, os métodos indiretos são os mais amplamente utilizados, baseando-se principalmente no uso de equações alométricas. Essas equações relacionam variáveis de fácil mensuração em inventários

florestais (como diâmetro à 1,30 m do solo e altura total da árvore) com a biomassa dos diferentes compartimentos da árvore (fuste, galhos, folhas, raízes) (CHAVE *et al.*, 2014; PICARD *et al.*, 2012), sendo o fuste, na maioria das árvores adultas, o compartimento que acumula a maior proporção da biomassa aérea e, consequentemente, do carbono estocado (BROWN, 1997; IPCC, 2006). Existem equações genéricas (pantropicais, por exemplo) e equações específicas para determinados biomas, tipos florestais ou espécies, sendo estas últimas geralmente mais precisas quando disponíveis (ALVES *et al.*, 1997; CHAVE *et al.*, 2014; NOGUEIRA *et al.*, 2014).

A aplicação dessas equações aos dados coletados em parcelas de inventário florestal permite estimar a biomassa por unidade de área (geralmente em Mg/ha). Posteriormente, multiplica-se o valor da biomassa pela fração de carbono correspondente (geralmente um valor padrão de 0,47 a 0,50, conforme diretrizes do IPCC, ou valores específicos se disponíveis) para obter o estoque de carbono (em Mg C/ha) (IPCC, 2006; PEARSON *et al.*, 2005). Além da biomassa viva, outros compartimentos importantes do ecossistema florestal armazenam carbono, como a madeira morta (em pé ou caída), a serapilheira e o carbono orgânico do solo, os quais também devem ser considerados para uma estimativa completa do estoque de carbono do ecossistema, seguindo metodologias e diretrizes específicas (IPCC, 2006).

1.4. Dinâmica do Estoque de Carbono

A dinâmica do estoque de carbono em ecossistemas florestais é um processo complexo, influenciado por uma série de fatores bióticos e abióticos, e sua compreensão é essencial para a mitigação das mudanças climáticas. Entre os elementos mais relevantes que afetam essa dinâmica, destacam-se a idade da floresta, os processos de sucessão ecológica, a densidade e diversidade das espécies arbóreas e o tipo de restauração (IPCC, 2021).

A idade da floresta e os estágios de sucessão ecológica são fatores que influenciam diretamente na capacidade de fixação e armazenamento de carbono. Florestas em diferentes estágios sucessionais apresentam taxas distintas de acúmulo de biomassa e, consequentemente, de carbono. Em geral, florestas jovens demonstram uma alta taxa de crescimento e, portanto, uma elevada capacidade de fixação de carbono (BROWN; LUGO, 1990). Nessas fases iniciais, a maior parte do carbono é acumulada na biomassa aérea, especialmente no tronco e galhos das árvores (THOMAS; MARTIN, 2012). À medida que a floresta avança para estágios intermediários, a taxa de crescimento individual de algumas árvores pode estabilizar ou diminuir, mas o aumento da biomassa total da floresta continua (TORRES; VILELA; SANQUETTA, 2014; SANQUETTA *et al.*, 2011). Portanto, essas florestas são grandes reservatórios de carbono, armazenando quantidades substanciais tanto na biomassa (acima e abaixo do solo) quanto na matéria orgânica do solo e serrapilheira, sendo fundamentais para a manutenção do equilíbrio do ciclo do carbono a longo prazo (LAL, 2005). A variação do estoque ao longo do tempo reflete essa trajetória, com um aumento significativo nos primeiros anos de crescimento, seguido de uma estabilização e, em alguns casos, uma leve diminuição da taxa de acúmulo em florestas muito antigas, mas com grandes estoques acumulados.

Plantios com maior diversidade de espécies e densidade adequada tendem a apresentar maior produtividade primária líquida e, consequentemente, maior capacidade de fixação de carbono (THOMAS; MARTIN, 2012). Espécies pioneiras, por exemplo, caracterizam-se por um crescimento inicial acelerado, contribuindo rapidamente para o acúmulo de biomassa e sombreamento do local, o que favorece o estabelecimento e desenvolvimento de espécies de crescimento mais lento e maior longevidade, que poderão armazenar mais carbono a longo prazo (RODRIGUES *et al.*, 2009).

Já o tipo de restauração, seja ela por sucessão natural ou por plantio ativo (reflorestamento), impacta diretamente a dinâmica do carbono. Enquanto a sucessão natural

pode ser um processo mais lento e dependente de fatores locais, o plantio ativo, especialmente com o consórcio de espécies pioneiras e não pioneiras, pode acelerar o processo de acúmulo de biomassa e carbono nas fases iniciais do povoamento (RODRIGUES *et al.*, 2009). A escolha da metodologia de restauração deve considerar o potencial de fixação de carbono e a recuperação dos serviços ecossistêmicos, garantindo a sustentabilidade e a efetividade das ações de mitigação climática (REZENDE *et al.*, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

1.1. Caracterização da área de estudo

Este trabalho foi realizado na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), onde a área é composta por uma Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), localizada no município de Cachoeiras de Macacu, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1). A REGUA abrange aproximadamente 8.000 hectares de terras protegidas, sendo 470 hectares destinados a projetos de restauração florestal (REGUA, 2024). O clima na região da REGUA é caracterizado pela ausência de estação seca bem definida com verões consistentemente chuvosos e invernos que, embora apresentem ligeira redução na precipitação, não configuram uma seca pronunciada (ALVARES, 2013). A vegetação nativa da região é classificada como Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, caracterizado por alta umidade, temperaturas elevadas e rica biodiversidade (VELOSO; RANGEL FILHO; LIMA, 1991).

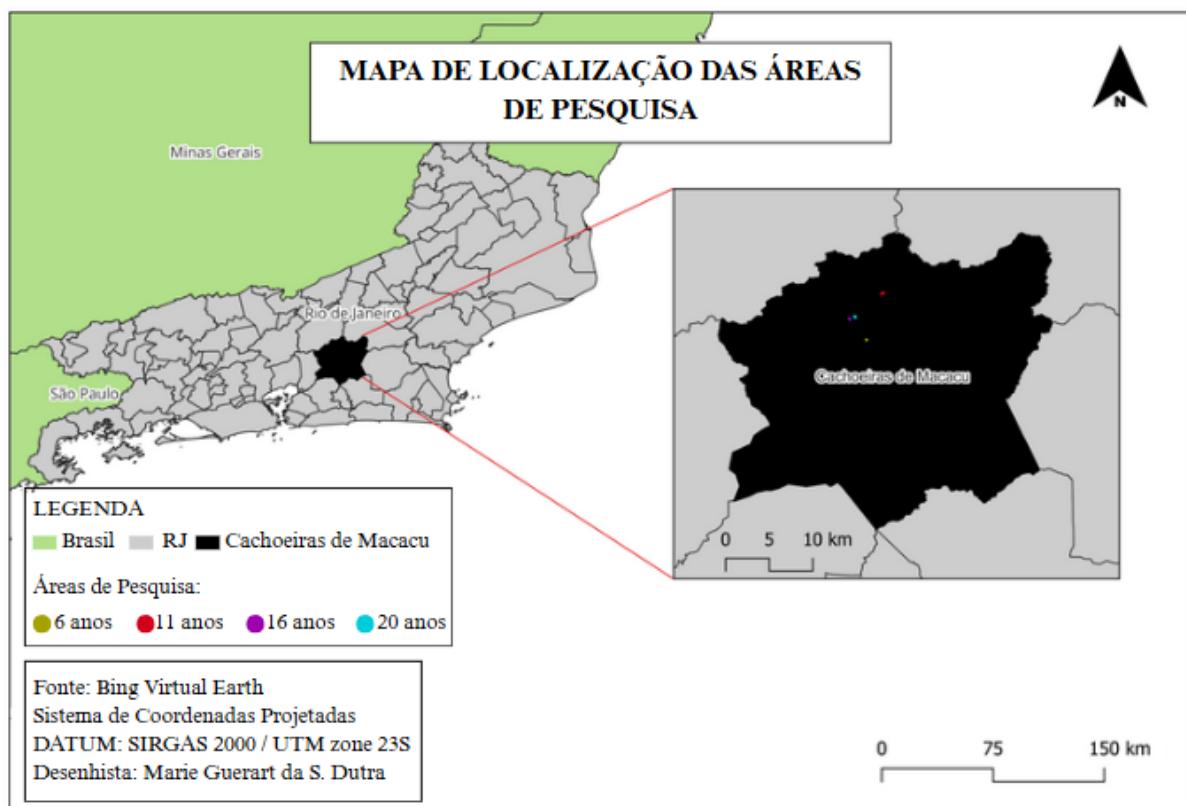


Figura 1 – Mapa de localização geral das áreas de pesquisa na Reserva Ecológica de Guapiaçu, Cachoeiras de Macacu, RJ.

1.2. Amostragem e coleta de dados

Os dados foram coletados em quatro áreas que foram submetidas a restauração florestal, por meio do plantio total, em diferentes idades (Tabela 1). A coleta foi realizada entre os dias 10 e 14 de fevereiro de 2025, por meio do processo de amostragem sistemática em cada área. Foram demarcadas 3, 5, 5 e 6 unidades amostrais de 600 m² (20 m x 30 m), nas áreas de 6, 11, 16 e 20 anos, respectivamente (Figura 2). Nas unidades amostrais foram mensurados todos os indivíduos arbóreos com circunferência à 1,30 m do solo (CAP) \geq 15,7 cm. Para cada indivíduo elegível, foram medidas a circunferência à altura de 1,30 metros do solo (CAP), com auxílio de fita métrica, posteriormente convertidos para diâmetro à altura de 1,30 metros do solo (DAP), e a altura total (Ht), obtidas com o hipsômetro Vertex 5.

Tabela 1 - Características das áreas restauradas estudadas, incluindo localização, idade de restauração, número de parcelas amostradas e área total, área amostrada e porcentagem de área amostrada para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), RJ.

Área	Idade (anos)	Número de Unidades Amostrais	Área Total (ha)	Área Amostrada (ha)	% da Área Amostrada
Boa Sorte	06	03	0,5	0,18	36
Fazenda Serra do Mar	11	05	3,85	0,30	7,8
Sede Alagados	16	05	1,49	0,30	20,1
Sede Alagados Monitorado	20	06	3,15	0,36	11,4

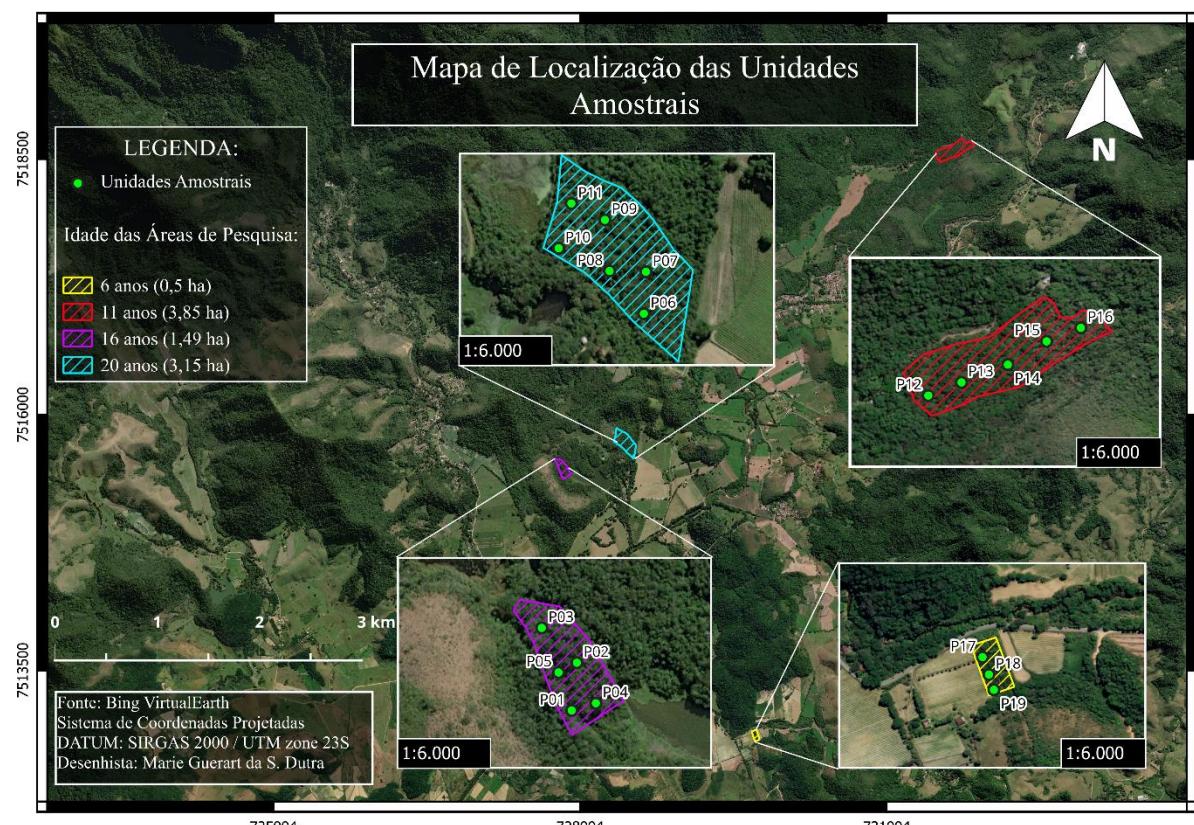


Figura 2 - Mapa de localização das unidades amostrais para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

1.3. Biomassa da Parte Aérea e Estoque de Carbono

Foi realizada estatística descritiva, utilizando valores mínimo, médio e máximo, e coeficiente de variação das variáveis diâmetro à 1,30 m do solo (DAP), altura total (Ht) e estoque de carbono por indivíduo, assim como o número de indivíduos por hectare e área basal para cada área estudada.

As distribuições diamétricas e de alturas das árvores amostradas nas quatro áreas foram realizadas com base na frequência de indivíduos por classe. Para isso, os dados foram organizados em classes de amplitude de 5 cm para DAP e de 3 m para Ht, com o número de classes variando conforme os valores máximos de diâmetro e altura de cada área. Também foi realizada a distribuição do estoque de carbono por classe diamétrica, com amplitude de 5 cm, em cada área. A partir dessa classificação, foram elaborados histogramas, permitindo a visualização do padrão de distribuição das árvores.

O estudo concentrou-se na biomassa da parte aérea arbórea (tronco e copa), não incluindo outros compartimentos, como serapilheira ou solo. A Biomassa Seca da Parte Aérea (BPA, em Mg) foi estimada para cada indivíduo utilizando a equação alométrica específica para Floresta Ombrófila Densa, em MG, proposta por Scolforo (2008). Esta equação considera as variáveis de entrada DAP (cm) e Ht (m). A equação apresenta coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj}\%$) de 97,66% e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) de 34,99%.

$$Ln(BPA) = -10,6409194002 + 2,1533324963 * Ln(DAP) + 0,8248143766 * Ln(Ht)$$

O estoque de carbono foi calculado utilizando o fator de conversão de 0,47 em relação a biomassa seca, conforme as diretrizes do IPCC (2006). Os valores foram então extrapolados para a parcela, hectare e área total, em sequência. Com os valores de carbono estimados, foi calculado o intervalo de confiança (IC) do estoque de carbono, expresso em Mg/ha. Esse IC foi determinado com base na média estimada, no erro de amostragem absoluto, adotando um nível de confiança de 95%. O intervalo representa a faixa de variação esperada para os valores reais do estoque de carbono por hectare, considerando a variabilidade observada entre as parcelas. Em seguida, foi realizado o teste t para duas amostras com variâncias diferentes para avaliar se existe diferença estatística entre as médias.

Também foi calculado o Incremento Médio Anual (IMA) para biomassa seca da parte aérea e estoque de carbono, em cada área estudada. Esses indicadores permitiram avaliar a dinâmica do crescimento e do acúmulo de carbono nas florestas em restauração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.1. Estatísticas Descritivas

Observa-se na Tabela 2, que os valores médios de DAP (12,13-15,41 cm), Ht (10,58-12,68 cm) e área basal (17,26-24,79 m²/ha), situam-se dentro do intervalo definido para o estágio intermediário de regeneração pela Resolução CONAMA nº 006/94 (DAP médio variando de 10 a 20 cm, altura média de 5 até 12 m e área basal média de 10 a 28 m²/ha).

A análise do diâmetro médio à altura do peito (DAP médio) variou de 12,13 cm na área de 16 anos a 15,41 cm na de 20 anos. Essa variação demonstra avanços estruturais mesmo que não sejam perfeitamente lineares ao longo do tempo. Valores semelhantes foram observados por Mores (2024), que registrou em área com 23 anos de restauração em Botucatu (SP), DAP médio de 14,7 cm. Silva *et al.* (2018), em Unidade de Conservação com vegetação característica

de Floresta Ombrófila Densa em Paracambi (RJ), encontraram DAP médio com valor semelhante ao do presente estudo (15,7 cm).

Em relação à altura média, o maior valor foi observado na área com 20 anos (12,68 m), e o menor, na área com 16 anos (10,69 m). Esse padrão de crescimento acompanha parcialmente o tempo de regeneração, embora também possa ser afetado por maior presença de indivíduos jovens, por condições edáficas, histórico de uso, como observado no baixo valor expressado pela área de 16 anos. Esta área está localizada próximo a trilhas, o que pode levar a perturbações e ao desenvolvimento menos acentuado da área. Mores (2024), em área com 23 anos de restauração, relatou altura média de 11,7 m, e Silva *et al.* (2018), em Floresta Ombrófila Densa, obtiveram média de 9,66 m, indicando que a vegetação das áreas analisadas pelos autores, assim como as do presente estudo, já se encontra em estágio intermediário de estrutura vertical, conforme Resolução CONAMA nº 006/94.

Os maiores valores de área basal (G) foram encontrados nas áreas de 11 e 20 anos (24,79 e 24,16, respectivamente). Esses valores indicam um adiantado grau de estruturação da vegetação. Em comparação, Mores (2024), em áreas restauradas da Mata Atlântica com 23 anos, encontrou área basal média de 24,25 m²/ha, mostrando que as áreas de restauração da REGUA, mesmo com idade inferior, apresentam padrões semelhantes de desenvolvimento. Já Cardoso *et al.* (2018), avaliando remanescentes de Floresta Ombrófila no Paraná, registraram áreas basais mais elevadas (33,5 a 41,6 m²/ha), assim como Silva *et al.* (2018), que obtiveram 23,9 m²/ha em área de Floresta Ombrófila Densa, majoritariamente com formação secundária, no Rio de Janeiro, o que reforça o contraste entre áreas restauradas e fragmentos mais conservados, e sinaliza o potencial estrutural que as áreas em regeneração podem ainda alcançar.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas, valores mínimo, médio, máximo e coeficiente de variação (CV%) do diâmetro à 1,30 m do solo (DAP), altura (Ht) por indivíduo. O número de indivíduos por hectare (Nº) e área basal (G) para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

Áreas de Estudo	DAP (cm)				Ht (m)				Nº ind/ha	G (m ² /ha)
	Mín	Médio	Máx	CV%	Mín	Média	Máx	CV%		
06 anos	5,0	13,87	44,28	51	3,0	10,58	21,3	34	911	17,26
11 anos	5,0	14,28	62,63	71	3,40	10,80	26,6	48	1007	24,16
16 anos	5,0	12,13	53,92	71	3,30	10,69	31,5	44	1207	20,88
20 anos	5,0	15,41	87,97	73	2,20	12,68	28,6	47	869	24,79

1.2. Distribuição Diamétrica e de Altura

A análise da distribuição diamétrica nas áreas de estudo da Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA) (Figura 3) evidencia um padrão típico de florestas tropicais, com maior concentração de indivíduos nas menores classes de diâmetro e decréscimo progressivo nas classes superiores. Esse comportamento, descrito como curva em "J invertido" ou exponencial negativa, reflete a dinâmica de recrutamento contínuo e a mortalidade seletiva das árvores, sendo característico tanto de florestas maduras quanto de formações em diferentes estágios sucessionais (HESS *et al.*, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2009).

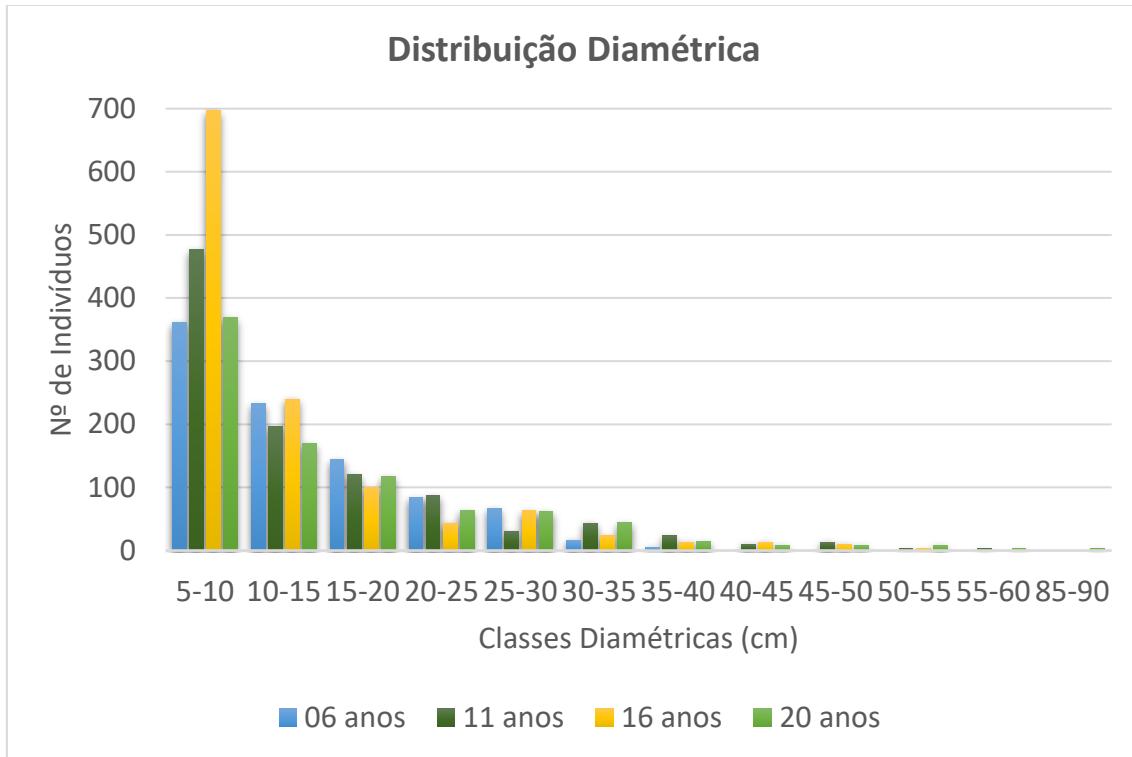


Figura 3 - Distribuição diamétrica, com amplitude de 5 cm, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

Na área Boa Sorte, com 6 anos de restauração, a distribuição está concentrada nas classes menores, com ausência de indivíduos acima de 45 cm de DAP, evidenciando uma comunidade jovem. Na Fazenda Serra do Mar (11 anos), observa-se a mesma tendência, embora com início da ocupação de classes superiores como 60-65 cm, sugerindo avanço na estruturação do povoamento.

Na área Sede Alagados, com 16 anos de regeneração, predominam indivíduos entre 5 e 15 cm de DAP (77,64%), o que confirma a persistência de árvores jovens. Ainda assim, a presença de alguns indivíduos acima de 50 cm indica o desenvolvimento gradual de uma estrutura mais complexa e a diferenciação de estratos superiores.

Por sua vez, a área Sede Alagados Monitorado, com 20 anos, apresenta a distribuição diamétrica mais desenvolvida entre as quatro. Embora o padrão de "J invertido" persista, há maior presença de árvores nas classes superiores, com indivíduos entre 40 e 90 cm de DAP, incluindo representantes nas classes de 85-90 cm. Isso sugere o progresso da sucessão ecológica e o início da consolidação de uma estrutura florestal mais estratificada (CHAZDON, 2008).

A forma da curva diamétrica, além de sua amplitude, é reconhecida como um indicador do estágio sucessional das florestas (CHAZDON, 2008). Brown e Lugo (1990) destacam que a distribuição exponencial negativa é típica de formações em sucessão, refletindo o recrutamento contínuo de novos indivíduos. Esses resultados são compatíveis com os padrões descritos por Guariguata e Ostertag (2001), que associam essa distribuição ao balanço entre recrutamento e competição interespecífica ao longo do tempo. A presença crescente de indivíduos em classes maiores nas áreas de 16 e 20 anos da REGUA reforça essa interpretação.

De forma semelhante, Paula e Soares (2011), ao estudarem a estrutura horizontal de uma Floresta Ombrófila Densa na Reserva Biológica de Sooretama (ES), identificaram o mesmo padrão de distribuição diamétrica, com predominância nas menores classes.

Assim, a comparação entre os dados da REGUA e os estudos citados indica que, mesmo em diferentes idades de regeneração, as áreas analisadas apresentam uma estrutura semelhante

com florestas tropicais secundárias em transição. A principal distinção em relação às florestas maduras ainda está na menor representatividade das classes de maior diâmetro, típicas de formações clímax. No entanto, a presença crescente de indivíduos de maior porte nas áreas mais antigas aponta para uma trajetória positiva em direção à maturidade estrutural e à complexidade de uma floresta desenvolvida (CHAZDON, 2008).

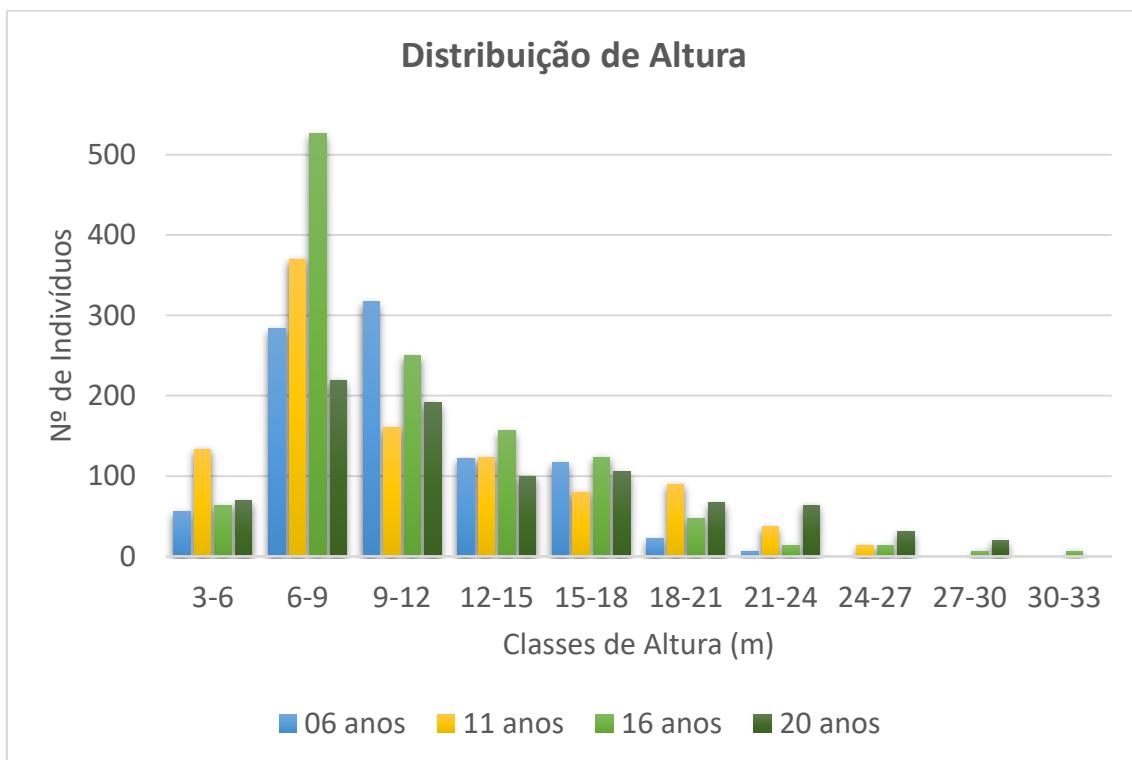


Figura 4 - Distribuição de altura, com amplitude de 3 metros, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

A análise da distribuição de altura nas quatro áreas de restauração da Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA) (Figura 4) revela padrões distintos de desenvolvimento estrutural ao longo do tempo, que refletem o avanço da sucessão ecológica.

No povoamento mais jovens, com 6 anos, a distribuição de altura é caracterizada por uma concentração significativa de indivíduos na classe de 9-12 metros, com menor representatividade nas classes adjacentes. Para o povoamento de 11 anos, o pico de indivíduos se desloca para a classe de 6-9 metros, embora ainda haja uma quantidade considerável na classe de 9-12 metros, e uma presença notável de indivíduos na classe de 3-6 metros. Essa predominância de indivíduos em classes de altura mais baixas nos primeiros anos é um comportamento esperado em florestas secundárias em estágios iniciais de sucessão, onde o recrutamento de espécies pioneiras e secundárias iniciais é intenso (CHAZDON, 2003). Tal padrão está em consonância com estudos em áreas de regeneração na Mata Atlântica, como o de Moura e Mantovani (2017) em Miracatu (SP), que observaram alta densidade de indivíduos jovens (5 a 9 metros de altura) em áreas com 8 anos de regeneração passiva.

No povoamento de 16 anos, a maior concentração de indivíduos permanece na classe de 6-9 metros (43,67%), com um pico acentuado, mas já se observa uma distribuição mais ampla, com maior representatividade em classes de altura superiores, como 15-18 metros, em comparação com as idades mais jovens. O povoamento de 20 anos (verde escuro) apresenta o pico de indivíduos na classe de 9-12 metros, mas o que se destaca é a amplitude da distribuição, que se estende até a classe de 30-33 metros. Essa dispersão das alturas, com a presença de

indivíduos de grande porte, é um forte indicativo do avanço da sucessão ecológica e do estabelecimento de uma estrutura florestal mais madura e estratificada, com maior complexidade vertical (CHAZDON, 2008).

As distribuições concentradas em classes de altura menores para distribuições mais amplas e com presença de indivíduos emergentes, reflete a dinâmica de crescimento e competição que ocorre ao longo da sucessão (CONNELL; SLATYER, 1977). O estudo de Campoe et al. (2013), que analisou a estrutura e dinâmica de plantios mistos no sudeste do Brasil com implicações para a restauração, corrobora a tendência de que a distribuição da altura tende a se diferenciar e o crescimento médio é contínuo, com períodos de maior e menor incremento, à medida que o povoamento se desenvolve. Os dados da REGUA demonstram essa progressão, evidenciando o desenvolvimento e a estruturação da floresta ao longo do tempo.

Em contraste, alguns estudos em áreas de regeneração passiva podem apresentar limitações na complexidade vertical, mesmo em idades avançadas. Por exemplo, Neves e Peixoto (2008) estudaram um remanescente com 20 anos de regeneração passiva na Reserva Biológica de Poço das Antas, RJ, e observaram uma predominância marcante de indivíduos de até 7 metros (80,3%) e ausência de um dossel contínuo, apesar da presença de árvores emergentes. Essa diferença em relação aos resultados da REGUA, onde o povoamento de 20 anos já exibe uma distribuição de altura mais ampla e indivíduos de grande porte, pode ser atribuída às diferentes metodologias de restauração e às condições ambientais específicas de cada local. No entanto, a ocorrência de indivíduos com alturas de 5 a 12 metros, como encontrado por Kurtz e Araújo (2000) em outra pesquisa no município de Cachoeiras de Macacu (Estação Ecológica Estadual do Paraíso), corrobora o padrão de predominância de indivíduos em classes de altura intermediárias em florestas tropicais.

Portanto, os dados da REGUA validam a trajetória esperada para a sucessão secundária em Floresta Ombrófila Densa, desde a dominância de indivíduos baixos em estágios jovens, como descrito por Moura e Mantovani (2017), até o surgimento gradual de indivíduos em estratos mais altos, refletindo maior complexidade estrutural, como evidenciado pelos dados da própria REGUA e pelos padrões de crescimento relatados por Campoe et al. (2013). Os achados de Neves e Peixoto (2008), por sua vez, destacam as limitações e a variabilidade do processo de regeneração mesmo após duas décadas, apontando que a presença de emergentes não implica, necessariamente, em uma estrutura plenamente estratificada, reforçando a importância de um monitoramento contínuo e da avaliação das estratégias de restauração.

1.3. Biomassa da Parte Aérea e Estoque de Carbono

A Tabela 3 apresenta os valores de carbono médio por indivíduo (C ind), estoques de biomassa seca da parte aérea (BPA), estoque de carbono (C), estoque total da área (C total) e intervalo de confiança (IC) para quatro áreas de estudo na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA).

Tabela 3 - Valores médios do carbono por indivíduo (C ind) biomassa seca da parte aérea (BPA), estoque de carbono (C), o estoque de carbono total da área (C total) e intervalo de confiança de carbono (IC), para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

Área	C ind (Mg/ind)	BPA (Mg/ha)	C (Mg/ha)	C total (Mg)	IC (Mg/ha)
06 anos	0,035	68,70	32,65	16,33	19,02 ≤ 32,65 ≥ 46,29
11 anos	0,055	118,02	55,47	213,54	38,63 ≤ 55,47 ≥ 72,30
16 anos	0,040	102,84	48,34	72,02	27,44 ≤ 48,34 ≥ 69,23
20 anos	0,077	143,21	67,31	212,02	53,63 ≤ 67,31 ≥ 80,99

O acúmulo de biomassa e carbono em ecossistemas florestais é diretamente ligado ao desenvolvimento de sua estrutura, refletido na distribuição de altura e diâmetro dos indivíduos (CHAZDON, 2008; LUGO; BROWN, 1992). A análise do estoque de carbono médio por indivíduo na REGUA indica um crescimento progressivo ao longo do tempo de regeneração. A área de 20 anos apresentou o maior valor (0,077 Mg/indivíduo), enquanto a área de 6 anos registrou os menores valores. Esse padrão de aumento do carbono com o avanço da idade e estrutura das áreas é um comportamento esperado em florestas em regeneração.

Os dados demonstram que a área com maior tempo de restauração (20 anos) apresenta o maior estoque de biomassa (143,21 Mg/ha) e de carbono (67,31 Mg/ha). Essa elevada capacidade de armazenamento de carbono é uma consequência direta da sua estrutura mais desenvolvida, caracterizada pela maior representatividade de indivíduos em classes de diâmetro mais elevadas e pela ampla distribuição de alturas, com a presença de árvores de grande porte. Em contraste, a área com apenas 6 anos de restauração apresenta estoques menores (68,70 Mg/ha e 32,65 Mg/ha), o que é esperado dada a predominância de indivíduos jovens e de menor porte, típicos dos estágios iniciais de sucessão (CHAZDON, 2003). Esse valor, por sua vez, é comparável ao registrado no estudo de Azevedo et al. (2018) para áreas de reflorestamento com idades semelhantes na própria REGUA, onde a área de 7 anos apresentou 38,29 C Mg/ha e a de 5 anos 25,78 C Mg/ha, evidenciando um padrão de crescimento gradual e consistente com o avanço da idade dos reflorestamentos e o consequente desenvolvimento de sua estrutura.

Poorter *et al.* (2016), em um estudo abrangente sobre florestas tropicais secundárias, observaram que o acúmulo de biomassa pode ser rápido nas duas primeiras décadas de regeneração, atingindo entre 100 a 150 Mg/ha em 20 anos, dependendo das condições locais de solo, clima e histórico de uso da terra. Os dados obtidos na REGUA estão em consonância com esses valores, demonstrando um acúmulo progressivo de biomassa ao longo do tempo. Mesmo nas áreas mais jovens (6 anos), os valores observados de biomassa aérea já indicam um bom desempenho de regeneração, e nas áreas mais antigas (20 anos), os estoques alcançam valores próximos ao limite superior do intervalo descrito na literatura, sugerindo uma recuperação florestal eficiente na região.

De forma semelhante, Azevedo *et al.* (2018), ao avaliarem estoques de carbono em áreas de restauração na Mata Atlântica, em outras áreas na Reserva Ecológica de Guapiaçu, registraram valores variando entre 21,85 C Mg/ha (3 anos) e 38,29 C Mg/ha (7 anos), além de um estoque de 138,94 C Mg/ha na mata nativa. Os valores obtidos na REGUA, especialmente na área com 20 anos de regeneração (67,31 C Mg/ha), posicionam-se dentro da faixa intermediária desses resultados, corroborando o padrão de acúmulo observado em outras áreas da Mata Atlântica sob processos de restauração, que se reflete na evolução da estrutura da floresta. No entanto, a diferença expressiva entre os estoques de carbono em florestas secundárias e na mata nativa reforça a observação de Chazdon (2014), de que florestas secundárias mesmo após 20 anos ainda não atingem os estoques de biomassa característicos de florestas maduras, que podem variar entre 250 e 400 Mg/ha. Isso se deve, em grande parte, à ausência ou menor proporção de árvores de diâmetro e altura muito grandes, que são os maiores contribuintes para a biomassa total em florestas maduras (LUGO; BROWN, 1992).

Os estoques de biomassa observados na REGUA estão de acordo com valores relatados em estudos de florestas tropicais secundárias em outros locais. Brown e Lugo (1990) documentaram que florestas secundárias tropicais entre 10 e 20 anos de idade apresentam estoques de biomassa variando entre 50 e 150 Mg/ha, assim como no estudo de Britez *et al.* (2006) onde foram encontrados, para Floresta Ombrófila Densa das terras baixas, valores que variam entre 64 e 175 Mg/ha, o que abrange os valores registrados nas áreas estudadas.

Apesar do acúmulo expressivo de biomassa nas primeiras décadas de regeneração, Chazdon (2014) ressalta que, mesmo com 20 anos de regeneração, as florestas secundárias

ainda não atingem os estoques característicos de florestas maduras. Nesse sentido, o estudo de Azevedo et al. (2018) também identificaram que a biomassa aérea viva da mata nativa na REGUA apresentou valores aproximadamente quatro vezes superiores aos observados nos reflorestamentos avaliados, reforçando o estágio intermediário de recuperação das áreas de regeneração analisadas, que ainda estão desenvolvendo sua estrutura para alcançar a complexidade de uma floresta madura.

A variação nos estoques de biomassa entre áreas com idades semelhantes pode ser explicada por diversos fatores ecológicos e históricos, que também influenciam o desenvolvimento estrutural (CHAZDON, 2008). Por exemplo, a Fazenda Serra do Mar, com 11 anos, apresentou valores de biomassa superiores aos da área Sede Alagados, com 16 anos. Essa inversão pode ser compreendida ao considerar que a área de 16 anos apresenta intensa frequencia de indivíduos jovens, o que influencia diretamente no estoque de biomassa. No entanto, diferenças nas características do solo, como a fertilidade e textura, assim como o histórico de uso anterior da terra, também podem afetar o ritmo de regeneração e, consequentemente, a velocidade de desenvolvimento da estrutura da floresta (POORTER *et al.*, 2016). Além disso, a composição das espécies presentes e o estágio sucessional em que a comunidade vegetal se encontra também desempenham um papel importante, pois espécies com diferentes estratégias de crescimento e porte contribuem de maneira distinta para o acúmulo de biomassa. Azevedo *et al.* (2018) também observaram que os estoques de carbono na REGUA foram quase o dobro dos verificados por Marchiori et al. (2016), em Floresta Ombrófila Densa Montana, Parque Estadual da Serra do Mar (SP), sugerindo eficiência na acumulação de carbono nas áreas de restauração da região.

1.4. Distribuição do Estoque de Carbono por Classe Diamétrica

A distribuição do estoque de carbono por classe diamétrica (Figura 5) é um indicador essencial da contribuição de diferentes portes de árvores para o armazenamento total de carbono em um ecossistema. Considerando que a equação alométrica utilizada para estimar o estoque de carbono relaciona diretamente as variáveis DAP e Ht, o porte do indivíduo é o principal fator que influencia o acúmulo de biomassa e, consequentemente, o estoque de carbono (BROWN, 1997). Assim, a forma como o carbono se distribui entre as classes diamétricas reflete a estrutura da população arbórea, especialmente a presença e o desenvolvimento de indivíduos de maior diâmetro e altura (ALVES *et al.*, 2010).

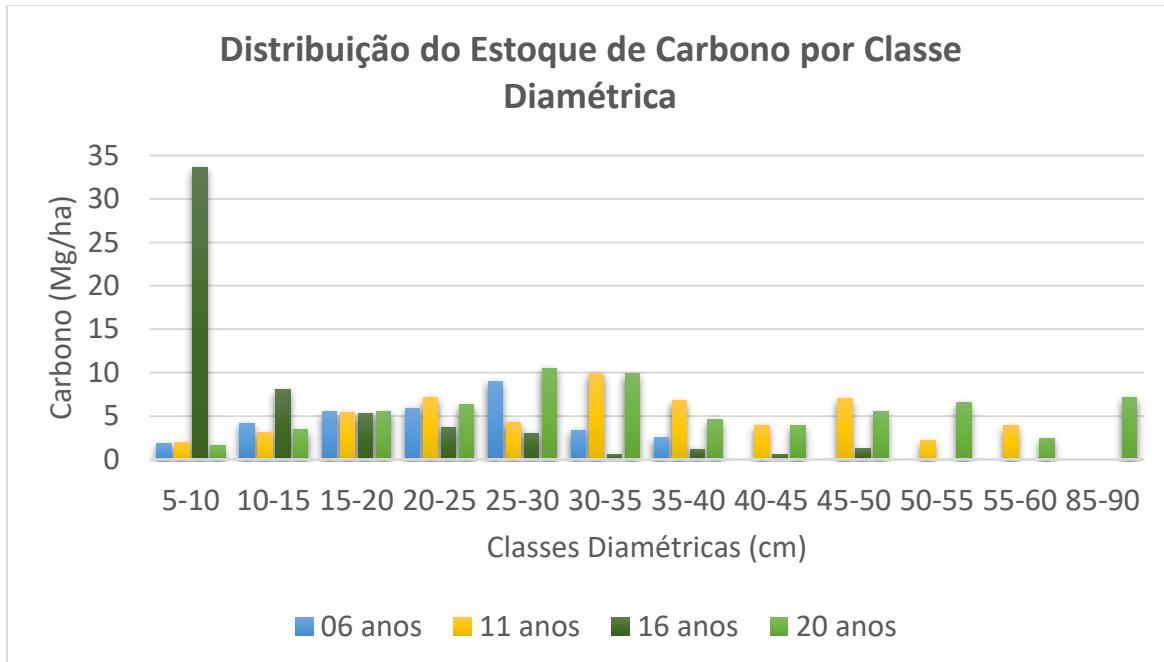


Figura 5 - Distribuição do estoque de carbono (Mg/ha) por classe diamétrica, com amplitude de 5 centímetros, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

Na área mais jovem (6 anos), o estoque de carbono por classe diamétrica é baixo, com valores máximos na classe de 25-30 cm (cerca de 2 Mg/ha). Embora o estoque total seja pequeno, a observação de carbono nessas classes de maior diâmetro, mesmo que com poucos indivíduos, indica que os indivíduos de maior porte, mesmo em menor frequência, já exercem um impacto contrastante no acúmulo de carbono. Esse comportamento, onde poucos indivíduos de grande diâmetro dominam o estoque de carbono mesmo em estágios iniciais da sucessão, é um padrão descrito por Santos, Camargo e Oliveira Junior (2018). Isso demonstra que, apesar da predominância de indivíduos jovens e de menor porte (como observado na distribuição de altura), a contribuição de indivíduos mais desenvolvidos para o estoque de carbono já se inicia.

Na área com 11 anos de regeneração, o acúmulo de carbono concentrou-se nas classes intermediárias, com pico em 30-35 cm (cerca de 10 Mg/ha). Esse padrão reflete o avanço da sucessão ecológica, onde a comunidade arbórea, que já apresentava indivíduos em classes de diâmetro superiores e com alturas mais elevadas que contribuem para esse acúmulo. Esse comportamento se assemelha ao observado por Oza (2021) em Floresta Ombrófila Densa, onde, após cerca de uma década de monitoramento, a biomassa acima do solo passou a se concentrar nas classes de 20 a 30 cm, indicando a transição para estágios mais estruturados da floresta.

De forma complementar, na área com 16 anos de regeneração, o maior acúmulo de carbono ocorreu de forma expressiva na classe diamétrica de 5-10 cm (em torno de 34 Mg/ha), seguido por contribuições menores em classes superiores. Essa concentração massiva de carbono na classe de 5-10 cm está diretamente ligada à elevada densidade de indivíduos jovens nessa faixa de diâmetro que, apesar do menor porte individual, contribuem significativamente para o estoque total devido ao seu grande número. Embora a distribuição de altura para 16 anos mostre um pico em 6-9 metros, a alta densidade de indivíduos nessa classe de diâmetro é o fator determinante para o acúmulo de carbono. Este padrão de alta concentração de biomassa em classes de menor diâmetro em estágios iniciais, com posterior redistribuição para classes superiores à medida que a floresta se desenvolve, é um comportamento comum na sucessão florestal (LUGO; BROWN, 1993).

Por fim, na área com 20 anos de regeneração, a distribuição do carbono por classe diamétrica é a mais ampla e equilibrada entre as idades, com contribuições significativas em diversas classes, incluindo as de maior diâmetro. Embora o pico de indivíduos esteja na classe de 9-12 metros de altura e 5-10 cm de diâmetro, há intensa contribuição para o acúmulo de carbono em classes diamétricas superiores a 50 cm, com destaque para a classe de 85-90 cm (cerca de 8 Mg/ha), indicando avanço importante na complexidade estrutural da floresta. Essa contribuição das classes de maior diâmetro para o estoque de carbono total é um reflexo direto da presença de indivíduos de grande porte, que, apesar de menos numerosos, armazenam uma quantidade substancial de biomassa (GIBBS *et al.*, 2007). Esse comportamento, mesmo diante da diferença no estágio de conservação, reforça o papel das grandes árvores como principais responsáveis pelo armazenamento de carbono na maioria dos ecossistemas florestais maduros (BROWN; LUGO, 1990; MALHI *et al.*, 1999).

1.5. Intervalo de Confiança (IC)

Os intervalos de confiança obtidos para o estoque de carbono, representados na Tabela 3 (item 1.3) e Figura 6, nas diferentes áreas de estudo da Reserva Ecológica de Guapiaçu evidenciam a variabilidade natural do processo de regeneração florestal ao longo do tempo e a heterogeneidade desses ecossistemas (CHAZDON, 2008; LUGO; BROWN, 1992). De modo geral, as áreas com maior tempo de regeneração apresentam não apenas valores médios mais elevados de carbono, mas também intervalos de confiança deslocados para patamares superiores, refletindo o acúmulo progressivo de biomassa e o desenvolvimento estrutural da floresta (POORTER *et al.*, 2016).

A área Sede Alagados Monitorado, com 20 anos de regeneração, apresentou o maior valor central de carbono (67,31 C Mg/ha), com um intervalo de confiança entre 53,63 e 80,99 C Mg/ha. Este é o maior valor dentre todas as áreas estudadas, o que é consistente com a sua estrutura mais desenvolvida, caracterizada pela maior proporção de indivíduos em classes de diâmetro e altura elevadas, ou seja, pela presença de árvores de grande porte. A contribuição significativa de carbono nas classes diamétricas superiores a 50 cm, incluindo a classe de 85-90 cm (Figura 5), é um reflexo direto dessa estrutura mais madura, onde indivíduos de maior porte armazenam substancialmente mais carbono. Por outro lado, a área Boa Sorte, com apenas 6 anos, apresentou o menor valor central (32,65 C Mg/ha), com um intervalo de confiança entre 19,02 e 46,29 C Mg/ha, demonstrando o estágio inicial de acúmulo de carbono, onde predominam indivíduos jovens e de menor porte, com o estoque concentrado nas classes diamétricas iniciais (Figura 5).

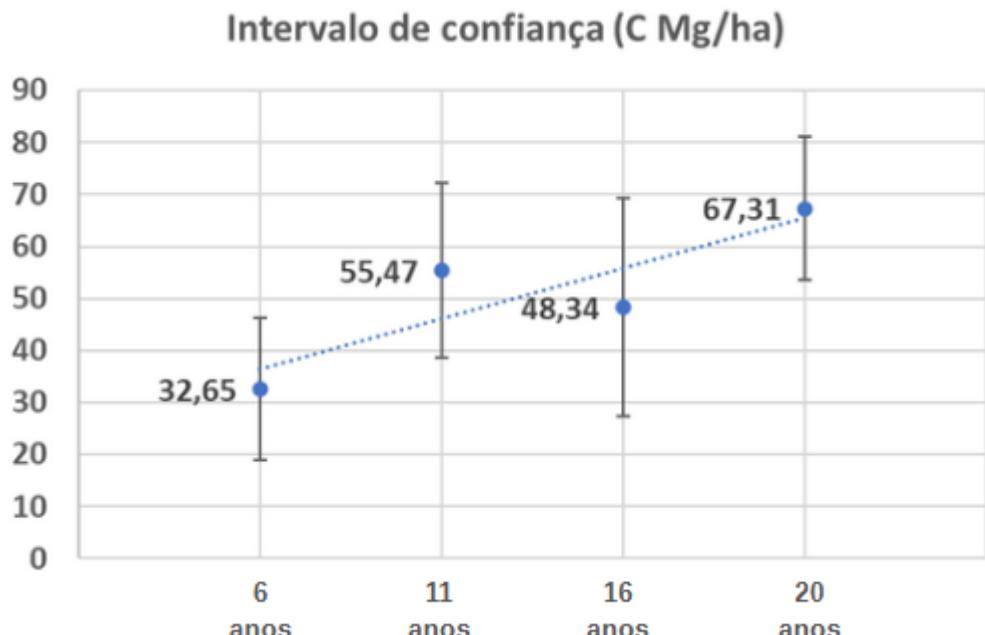


Figura 6 - Representação gráfica do intervalo de confiança (IC) em C Mg/ha para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

A área de 11 anos teve um valor central intermediário de 55,47 Mg/ha, com intervalo de 38,63 a 72,30 Mg/ha, enquanto a área de 16 anos apresentou valor central de 48,34 Mg/ha, com intervalo entre 27,44 e 69,23 Mg/ha. Apesar da variação entre os valores centrais, a sobreposição dos intervalos de confiança entre as áreas de 11, 16 e 20 anos sugere que as médias de estoque de carbono não são estatisticamente diferentes entre si, o que foi corroborado pelos testes t para duas amostras com variâncias diferentes ($p > 0,05$ para essas comparações). No entanto, a área de 06 anos apresentou um estoque de carbono significativamente menor em comparação às áreas de 11 e 20 anos ($p < 0,05$ para ambas as comparações), indicando um menor acúmulo de carbono nos primeiros anos de regeneração.

Essa sobreposição entre as idades mais avançadas, apesar da tendência de aumento nos valores médios, pode ser atribuída à heterogeneidade estrutural dentro de cada povoamento, onde a presença de clareiras, diferentes taxas de crescimento das espécies ou variações microclimáticas podem influenciar o acúmulo de biomassa (FINEGAN, 1996). Por exemplo, a área de 16 anos, apesar de mais velha, apresentou uma concentração massiva de carbono na classe diamétrica de 5-10 cm (Figura 5), refletindo uma alta densidade de indivíduos jovens que, embora contribuam para o estoque total, podem não ter o mesmo impacto no deslocamento da média para patamares muito superiores em comparação com áreas com maior proporção de indivíduos em classes intermediárias ou grandes. A ausência de diferença estatística entre 11, 16 e 20 anos, apesar da tendência de aumento, pode também refletir a variabilidade inerente a sistemas em regeneração e a necessidade de um maior número de amostras para detectar diferenças mais sutis em estágios mais avançados (MAGURRAN, 2004).

Estes resultados seguem o mesmo padrão observado em estudos de regeneração florestal em outras regiões tropicais. Brown e Lugo (1990) já haviam descrito que, em florestas secundárias tropicais com idades entre 10 e 20 anos, os estoques de biomassa e, consequentemente, de carbono, variam amplamente em função das condições ecológicas e do histórico de uso da terra. Chazdon (2014) complementa ao destacar que, mesmo após 20 anos de regeneração, as florestas secundárias ainda não atingem os estoques típicos de florestas maduras, que podem acumular de 250 a 400 Mg/ha de biomassa, o que corresponde

aproximadamente a 112,5 a 200 C Mg/ha, indicando que o potencial de acúmulo segue ativo por várias décadas.

Os valores centrais de carbono encontrados nas áreas estudadas na REGUA indicam um estágio intermediário de recuperação, compatível com o tempo de regeneração. A amplitude dos intervalos de confiança reflete também a heterogeneidade das áreas, já que fatores locais influenciam diretamente o acúmulo de carbono (CHAZDON, 2008; POORTER *et al.*, 2016). Diferenças nas características do solo, como fertilidade e capacidade de retenção de água, o histórico de uso anterior, a composição de espécies, o estágio sucessional da vegetação e as eventuais intervenções de manejo são determinantes para essa variabilidade. Mesmo áreas com idades semelhantes podem apresentar estoques diferenciados em função dessas variáveis.

1.6. Incremento Médio Anual (IMA)

Os valores de Incremento Médio Anual (IMA) de biomassa seca da parte aérea (BPA) e de carbono (C) calculados para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (Tabela 4) indicam padrões relevantes sobre o desenvolvimento florestal e a dinâmica de acúmulo de carbono ao longo do tempo de restauração. O IMA reflete a taxa de crescimento da floresta e, consequentemente, a velocidade com que a biomassa e o carbono são adicionados ao sistema, sendo diretamente influenciado pela estrutura da comunidade arbórea (CHAZDON, 2008).

Tabela 4 - Incremento Médio Anual (IMA) calculado para as variáveis Biomassa Seca da Parte Aérea (BPA) e Carbono (C), em Mg/ha, calculados para as áreas de estudos na Reserva Ecológica de Guapiaçu.

Áreas de Estudo	IMA BPA Mg/ha	IMA C Mg/ha
Boa Sorte (06 anos)	11,45	5,44
Fazenda Serra do Mar (11 anos)	10,73	5,07
Sede Alagados (16 anos)	6,43	3,04
Sede Alagados Monitorado (20 anos)	7,16	3,37

Nas áreas mais jovens, Boa Sorte (06 anos) e Fazenda Serra do Mar (11 anos), observou-se os maiores valores de IMA, com 11,45 Mg/ha/ano de BPA (5,44 Mg/ha/ano de C) e 10,73 Mg/ha/ano de BPA (5,07 Mg/ha/ano de C), respectivamente. Esse comportamento está de acordo com o que é observado nas fases iniciais de sucessão florestal, nas quais ocorre um crescimento acelerado da vegetação, especialmente pela dominância de espécies pioneiras de rápido crescimento e elevada capacidade de acúmulo de biomassa (POORTER *et al.*, 2016; FINEGAN, 1996). Durante essa fase, as espécies pioneiras apresentam alta taxa fotossintética, favorecendo o rápido acúmulo de biomassa e carbono (POORTER *et al.*, 2016). Esse alto IMA inicial é consistente com a predominância de indivíduos jovens e de rápido crescimento observada nas distribuições de diâmetro e altura dessas áreas (Figuras 3 e 4), que, embora de menor porte individual, contribuem para um rápido ganho de biomassa. Segundo Feldpausch *et al.* (2005), áreas de florestas secundárias na Amazônia podem acumular entre 6 e 11 Mg/ha/ano de biomassa durante as primeiras décadas de regeneração. Apesar de um bioma diferente, esse padrão é compatível com o encontrado na REGUA, onde o incremento médio de biomassa nas áreas de 6 e 11 anos se alinha com esses valores.

Por outro lado, nas áreas com 16 e 20 anos de restauração, observa-se uma redução nos valores do Incremento Médio Anual. Na área de 16 anos, o IMA foi de 6,43 Mg/ha/ano para BPA (3,04 Mg/ha/ano de C), enquanto na área de 20 anos os valores foram de 7,16 Mg/ha/ano de BPA (3,37 Mg/ha/ano de C). Essa diminuição do IMA, apesar do aumento contínuo do estoque total de carbono, é um padrão esperado e reflete a progressão da sucessão florestal e as

mudanças na estrutura da floresta (CHAZDON, 2014; GUARIGUATA; OSTERTAG, 2001). À medida que as áreas restauradas acumulam indivíduos com maior porte e densidade de madeira, a taxa de crescimento individual pode diminuir, e a competição por recursos se intensifica, levando a uma redução no incremento médio por área (CHAZDON, 2008). A presença crescente de indivíduos em classes de diâmetro e altura maiores (Figuras 3 e 4), bem como a redistribuição do estoque de carbono para essas classes mais desenvolvidas (Figura 5), indica que a floresta está investindo em crescimento de indivíduos maiores e mais densos, o que, embora aumente o estoque total, pode resultar em um IMA menor em comparação com a fase inicial de rápido adensamento de indivíduos pequenos.

É importante destacar que, embora o IMA tenda a diminuir com o avançar do tempo de restauração, o estoque total de biomassa e carbono continua aumentando, porém a uma taxa decrescente, o que é consistente com os modelos de desenvolvimento florestal encontrados na literatura (GUARIGUATA; OSTERTAG, 2001; CHAZDON, 2014). Esse padrão evidencia a importância das florestas em restauração, não apenas pela sua capacidade de fixar carbono rapidamente nos primeiros anos, mas também por sua função de longo prazo no armazenamento desse carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, os valores observados estão dentro dos intervalos registrados em outros estudos em áreas de restauração na Mata Atlântica, que apontam incrementos médios variando entre 4 e 12 Mg/ha/ano para biomassa, dependendo do estágio sucessional, das condições edáficas e do histórico de uso da área (ZANINI, 2019). Isso reforça que as áreas estudadas estão respondendo positivamente aos processos de restauração, contribuindo tanto para a recomposição florestal quanto para os serviços ecossistêmicos, como a fixação de carbono.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que as áreas de restauração florestal na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA) apresentam avanços estruturais e ecológicos consistentes ao longo do tempo, refletindo uma trajetória sucessional positiva. A análise das distribuições de diâmetro e altura evidenciou uma transição de florestas jovens, dominadas por indivíduos de menor porte, para formações mais complexas, com o surgimento e a crescente representatividade de árvores maiores.

O acúmulo de carbono e biomassa acompanha diretamente essa evolução estrutural. Os estoques totais de carbono aumentam progressivamente com a idade, sendo a área de 20 anos a de maior valor. A distribuição do carbono por classe diamétrica revelou que, embora o acúmulo inicial se concentre em classes menores, a contribuição de indivíduos de maior porte torna-se cada vez mais relevante nas áreas mais antigas. Essa dinâmica é impulsionada pelas taxas de crescimento, com o Incremento Médio Anual (IMA) sendo maior nas áreas jovens (6 e 11 anos) devido ao rápido adensamento, e diminuindo nas áreas mais antigas (16 e 20 anos) à medida que a floresta investe em indivíduos maiores e mais densos.

A análise dos Intervalos de Confiança confirmou que a área de 6 anos possui um estoque de carbono significativamente menor em comparação às áreas de 11 e 20 anos. No entanto, não foram detectadas diferenças estatísticas significativas entre as áreas de 11, 16 e 20 anos, o que destaca a variabilidade natural dos processos de regeneração e a heterogeneidade estrutural, mesmo em estágios mais avançados.

As áreas de restauração da REGUA encontram-se em um estágio intermediário de recuperação, com todas se enquadrando no estágio médio de regeneração. Os estoques de carbono, embora ainda inferiores aos de florestas maduras, reforçam o papel estratégico da restauração florestal na mitigação das mudanças climáticas. A metodologia utilizada mostrou-

se eficaz para o monitoramento, e o estudo ressalta a importância de manter o acompanhamento contínuo dessas áreas para compreender a dinâmica de longo prazo e o potencial de acúmulo de carbono, recomendando-se a inclusão de outros compartimentos do ecossistema em futuras pesquisas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, D. S. et al. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, v. 3, n. 5, p. 451-461, 1997.
- AMARAL, G. M. do et al. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE RESTAURAÇÃO DE UM FRAGMENTO DE MATA CILIAR EM SANTA MARIA-RS. *REVISTA FOCO*, v. 17, n. 6, p. e5379-e5379, 2024.
- AZEVEDO, A. D. de et al. ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL DA MATA ATLÂNTICA. *Floresta*, v. 48, n. 2, 2018.
- AZEVEDO, C. P. de; COSTA, G. C.; LIMA, A. T. M.; SILVA, A. C. da; SOUZA, A. L. de. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal na Reserva Ecológica de Guapiaçu, Rio de Janeiro. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1629-1640, out./dez. 2018.
- BRASIL. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC**. Brasília: Governo Federal, 2008.
- BRASIL, M. M. A. **Planaveg: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa**. MMA, Brasília-DF, 2017.
- BRANCALION, P. H. S. et al. Oportunidades globais de restauração em paisagens de florestas tropicais. *Science Advances*, v. 5, n. 7, p. eaav3223, 2019.
- BRITEZ, R. M. de et al. **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na Floresta Atlântica do Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006.
- BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. *FAO Forestry Paper*, 134. Rome: FAO, 1997.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, Cambridge, v. 6, n. 1, p. 1–32, 1990.
- CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P. Stand structure and dynamics of a mixed-species plantation in southeastern Brazil: implications for restoration. *Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 1-10, 2013.

CARDOSO, D. J. et al. **Estoque de biomassa arbórea em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista e área de transição: inferências sobre estágio sucessional.** Colombo: Embrapa Florestas, 2018.

CHAVE, J. et al. Propagação de erros e escalonamento para estimativas de biomassa de florestas tropicais. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 359, n. 1443, p. 409-420, 2004.

CHAVE, J. et al. Allometric models for estimating tropical tree aboveground biomass. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.

CHAZDON, R. L. Beyond species richness: assembling tree communities in fragmented tropical landscapes. **Science**, v. 320, n. 5874, p. 1482-1485, 2008.

CHAZDON, R. L. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 6, n. 1-2, p. 51-71, 2003.

CHAZDON, R. L. **Second growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation.** Chicago: The University of Chicago Press, 2014.

CONNELL, J. H.; SLATYER, R. O. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. **The American Naturalist**, v. 111, n. 982, p. 1119-1144, 1977.

COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253-260, 1997.

DIAS, S. de M. **Estoque de carbono em um trecho de floresta ombrófila densa no Parque Nacional do Itatiaia-RJ, Brasil.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2020.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.

FINEGAN, B. Pattern and process in secondary rain forest succession. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 11, n. 3, p. 119-124, 1996.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Global carbon budget 2022. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 11, p. 4811-4900, 2022.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2022-2023.** São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica/INPE, 2024. 64 p.

GIBBS, H. K. et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. **Environmental Research Letters**, v. 2, n. 4, p. 045023, 2007.

GORDON, D. C.; SANTOS, L. C.; RODRIGUES, R. R. Carbon stock in different compartments of a restored tropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 475, 118430, 2020.

GUARIGUATA, M. R.; OSTERTAG, R. Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. **Forest Ecology and Management**, v. 148, p. 185-206, 2001.

HESS, A. F. et al. Dinâmica da distribuição diamétrica de algumas espécies de Sapotaceae após exploração florestal na Amazônia Oriental. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 337-345, 2010.

HOUGHTON, R. A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. **Global Change Biology**, v. 11, n. 6, p. 945-958, 2005.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil 2016-2018**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 4 – agriculture, forestry and other land use**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Edited by H. S. Eggleston et al. Hayama, Japan: IGES – Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Edited by E. Calvo Buendia et al. Geneva, Switzerland: IPCC, 2019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by V. Masson-Delmotte et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by H.-O. Pörtner et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2023: synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team: H. Lee; J. Romero (Eds.). Geneva: IPCC, 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cross-Chapter Paper 7: Tropical forests. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (Eds.). **Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 2803-2841.

KURTZ, B. C.; ARAÚJO, D. S. D. Composição florística e estrutura do componente arbóreo de um trecho de Mata Atlântica na Estação Ecológica Estadual do Paraíso, Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro, Brasil. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 51, n. 78/79, p. 69-111, 2000.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, n. 1-3, p. 242-258, 2005.

LUGO, A. E.; BROWN, S. Management of tropical secondary forests of Latin America: some insights from long-term studies. **Environmental Management**, v. 17, n. 5, p. 565-573, 1993.

LUGO, A. E.; BROWN, S. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. **Forest Ecology and Management**, v. 54, n. 1-4, p. 239-255, 1992.

MAGURRAN, A. E. **Measuring biological diversity**. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D.; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell & Environment**, v. 22, n. 6, p. 715-740, 1999.

MARCHIORI, N. M. et al. Tree community composition and aboveground biomass in a secondary Atlantic Forest, Serra do Mar State Park, São Paulo, Brazil. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 4, p. 501 - 514, 2016.

MORAES, A. P. P. et al. Estimativa do estoque volumétrico e acúmulo de biomassa e carbono em uma floresta ombrófila densa na Floresta Nacional de Carajás. **Biodiversidade Brasileira**, v. 15, n. 1, p. 13-24, 2025.

MORES, G. J. **Biomassa arbórea e carbono em áreas de restauração da Mata Atlântica**. 2024. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2024.

MOURA, C. de; MANTOVANI, W. Regeneração natural da floresta ombrófila densa após oito anos de abandono de atividades agrícolas em Miracatu, Vale do Ribeira, SP. **Revista do Instituto Florestal**, v. 29, n. 1, p. 91-119, 2017.

NEVES, G. M. da S.; PEIXOTO, A. L. Florística e estrutura da comunidade arbustivo-arbórea em fragmento florestal com 20 anos em regeneração, Reserva Biológica de Poço das Antas, Silva Jardim, RJ. **Rodriguésia**, v. 59, n. 3, p. 471–487, 2008.

NOGUEIRA, L. R. et al. Allometric equations for estimating tree biomass in restored mixed-species Atlantic Forest stands. **Biota Neotropica**, v. 14, n. 2, p. e20130084, 2014.

OZA, E. F. et al. Dinâmica da biomassa arbórea em uma floresta ombrófila montana preservada da Mata Atlântica no ES. In: **Anais do Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica / Congresso Fluminense de Pós-Graduação**, v. 1, 2020. p. 132456.

PAIXÃO, L. R. R. S. **Efeito de diferentes estratégias de restauração florestal sobre a regeneração natural de áreas degradadas no município de São Luís – MA**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019.

PAN, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011.

PAULA, A. de; SOARES, J. J. Estrutura horizontal de um trecho de floresta ombrófila densa das terras baixas na Reserva Biológica de Sooretama, Linhares, ES. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 321-334, 2011.

PEARSON, T. R. H.; BROWN, S.; BIRDSEY, R. A. **Measurement guidelines for the analysis of carbon in forests**. General Technical Report NRS-1. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2005.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Rome: FAO; Montpellier: CIRAD, 2012.

POORTER, L. et al. Biomass resilience of neotropical secondary forests. **Nature**, v. 530, p. 211-214, 2016.

PREISKORN, G. M. **Composição florística, estrutura e quantificação do estoque de carbono em florestas restauradas com idades diferentes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2011.

REGUA. RESERVA ECOLÓGICA DE GUAPIAÇU. **Sobre a REGUA**. REGUA, 2024. Disponível em: <https://regua.org/sobre-a-regua/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

REZENDE, R. S. et al. Carbon stock in different compartments of a restored tropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 429, p. 118-126, 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009.

ROSA, C. M. da; MARQUES, M. C. M. How are biodiversity and carbon stock recovered during tropical forest restoration? **Journal for Nature Conservation**, v. 65, 126115, 2022.

SANTOS, F. G.; CAMARGO, P. B. de; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de. Estoque e dinâmica de biomassa arbórea em Floresta Ombrófila Densa na FLONA Tapajós: Amazônia Oriental. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 1049-1059, 2018.

SCOLFORO, J. R. et al. Equações para o peso de matéria seca das fisionomias, em Minas Gerais. In: **Inventário Florestal de Minas Gerais: Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fitofisionomias da Flora Nativa**. 2008.

SEEG. SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissões de GEE no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SILVA, A. L. da; DANTAS, M. B. Tutela do meio ambiente: um estudo sobre a proteção constitucional e a jurisdição constitucional ambiental. **Engenharia Ambiental**, v. 28, n. 136, jul. 2024.

SILVA, L. C. et al. Estoques de biomassa e carbono em unidade de conservação no Bioma Mata Atlântica. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 2, p. 243-251, 2018.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

THOMAS, S. C.; MARTIN, A. R. Carbon content of tree tissues: a synthesis. **Forests**, v. 3, n. 2, p. 332-352, 2012.

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **The Paris Agreement**. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 12 jun. 2025.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

ZANINI, A. M. **Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na Mata Atlântica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.