



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

JULYANA MARQUES LOBÃO DE ALMEIDA

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

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
DEZEMBRO – 2025



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

JULYANA MARQUES LOBÃO DE ALMEIDA

**BIOMASSA E CARBONO DE ESPÉCIES ARBÓREAS 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
DEZEMBRO – 2025

BIOMASSA E CARBONO DE ESPÉCIES ARBÓREAS EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA RESERVA ECOLÓGICA DE GUAPIAÇU

JULYANA MARQUES LOBÃO DE ALMEIDA

APROVADA EM: 04 de dezembro de 2025

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **EMANUEL JOSE GOMES DE ARAUJO**
Data: 11/12/2025 12:53:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO - UFRRJ
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **MARCO ANTONIO MONTE**
Data: 12/12/2025 10:43:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE - UFRRJ
Membro

Documento assinado digitalmente
 **RAFAELLA DE ANGELI CURTO**
Data: 11/12/2025 12:59:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RAFAELLA DE ANGELI CURTO - UFRRJ
Membro

À minha família, que foi silêncio
quando precisei de calma, voz quando me
faltou coragem e abraço quando o mundo
pesou. Esta conquista é nossa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à Espiritualidade, por me acompanhar até aqui. Em meio a tantas incertezas e dúvidas ao longo desta caminhada, senti em todos os momentos a Sua presença me fortalecendo e mostrando que era possível seguir em frente. Sem essa fé, muitos passos teriam parecido impossíveis.

À minha família, expresso minha profunda gratidão. O apoio, o amor e a compreensão de vocês foram fundamentais. Cada palavra de incentivo, cada gesto de cuidado e cada demonstração de confiança se transformaram em combustível para que eu não desistisse, mesmo nos momentos mais difíceis. Em especial minha mãe, Marise, minha base, por todo suporte, amor e carinho.

Aos meus avós paternos, agradeço o carinho e amor deixado. A ausência de vocês foi sentida em toda esta caminhada, mas também se transformou em força para que eu seguisse em frente e me orgulhasse de cada pequena conquista.

Ao meu melhor amigo, Gustavo César, agradeço o companheirismo, por cada palavra de apoio, pelos ensinamentos, pelos incentivos e por estar ao meu lado até nas maiores loucuras. Esta conquista também é sua, meu Bem.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Instituto de Floresta, deixo meu reconhecimento por ter sido o espaço que me acolheu e me proporcionou não apenas conhecimento acadêmico, mas também amadurecimento pessoal e as amizades. Foram anos de desafios, aprendizados e experiências que certamente levarei para além da vida acadêmica.

Ao meu orientador, registro minha gratidão pela dedicação, paciência e disponibilidade em cada orientação. Sua experiência foi essencial para a concretização deste trabalho. Obrigado por acreditar em mim e me guiar.

À banca examinadora, pela disponibilidade e contribuições ao aprimoramento desta pesquisa.

Ao Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal, agradeço o acolhimento, pelas conversas e pelos campos. Registro meu muito obrigado à equipe de coleta de dados, em especial ao Mateus, cuja colaboração foi decisiva para a qualidade e a viabilidade deste estudo, bem como aos demais colegas que atuaram com empenho em cada etapa.

À REGUA e à sua equipe, deixo meu sincero agradecimento pelo apoio e pela parceria que tornaram possíveis atividades fundamentais para a realização desta pesquisa, contribuindo com acesso, logística e conhecimento do território.

Aos amigos do grupo PET, agradeço a parceria construída ao longo desses anos. Os aprendizados compartilhados, as conversas, os debates e até mesmo os momentos de descontração me ensinaram muito mais do que os livros poderiam oferecer. Guardarei cada um de vocês com carinho e gratidão.

Ao quarto 33 do Alojamento F1, ficam as memórias das conversas sem nexos, das confraternizações em plena semana e os puxões de orelha. Beatriz, Jessika, Mariana, Nicole e Victória, obrigada por transformarem essa experiência em algo leve, divertido e inesquecível.

Aos amigos em especial, Anna Júlia, André, Henrique e Isaac, agradeço pelo companheirismo, pelos almoços e lanches da tarde, pelas risadas, incentivo e pela presença constante nos momentos em que mais precisei. A amizade de vocês tornou esta jornada mais alegre, mais significativa e muito menos solitária.

Por fim, deixo meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Cada gesto, por menor que pareça, teve sua importância nesta conquista. Este trabalho é fruto não apenas do meu esforço, mas também do carinho, da amizade e do apoio que recebi ao longo desta trajetória

RESUMO

Este estudo quantifica a biomassa aérea e o estoque de carbono de espécies Florestal em quatro áreas de restauração da Mata Atlântica na Reserva Ecológica de Guapiaçu, Cachoeiras de Macacu, RJ, com 6, 11, 16 e 21 anos. Foram amostradas 19 parcelas retangulares de 20 × 30 m, incluindo todas as árvores com DAP $\geq$ 5 cm. A biomassa foi estimada por equações alométricas ajustadas à Floresta Ombrófila Densa e o estoque de carbono foi obtido como 47% da biomassa seca. Ao longo da cronosequência observaram-se aumentos em diâmetro, altura e biomassa média por indivíduo, além de distribuição diamétrica em J invertido, com maior participação nas classes intermediárias e superiores nas áreas mais antigas. A família Fabaceae apresentou a maior contribuição para o estoque, com destaque para *Anadenanthera peregrina*, *Plathymenia reticulata* e, nos estágios avançados, *Cariniana legalis*. Como diretrizes de manejo recomendam-se o controle precoce de competidoras, enriquecimentos funcionais para acelerar a complexidade estrutural e o monitoramento contínuo a fim de consolidar o dossel e estabilizar os estoques de carbono. A restauração conduz estágio intermediário de regeneração, com a família Fabaceae estruturando o dossel e sustentando a substituição de espécies pioneiras por secundárias de maior porte e espécies clímax, mantendo o acúmulo contínuo de biomassa e carbono ao longo do tempo.

Palavras-chave: Estoque; Inventário de carbono; Mata Atlântica

ABSTRACT

This study quantifies aboveground biomass and carbon stock of forest species in four Atlantic Forest restoration areas in the Guapiaçu Ecological Reserve, Cachoeiras de Macacu, RJ, aged 6, 11, 16 and 21 years. Nineteen rectangular plots of 20×30 m were sampled, including all trees with $DBH \geq 5$ cm. Biomass was estimated using allometric equations adjusted for Dense Ombrophilous Forest, and carbon stock was obtained as 47% of dry biomass. Along the chronosequence, increases were observed in diameter, height and mean biomass per individual, as well as an inverted J-shaped diameter distribution, with greater participation of intermediate and upper classes in the oldest areas. The Fabaceae family showed the greatest contribution to the stock, with emphasis on *Anadenanthera peregrina*, *Plathymenia reticulata* and, in advanced stages, *Cariniana legalis*. As management guidelines, early control of competing species, functional enrichment to accelerate structural complexity and continuous monitoring are recommended in order to consolidate the canopy and stabilize carbon stocks. Restoration is leading the area to an intermediate stage of regeneration, with the Fabaceae family structuring the canopy and supporting the replacement of pioneer species by larger secondary and climax species, maintaining the continuous accumulation of biomass and carbon over time.

Keywords: Stock; Carbon inventory; Atlantic Forest

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Biomassa Florestal e Ciclo do Carbono	2
2.2 Importância e Serviços Ecossistêmicos da Mata Atlântica	3
2.3 Restauração Florestal e Florística.....	4
2.4 Dinâmica Sucessional e Sequestro de carbono.....	5
2.5 Métodos de Estimativa de Biomassa e Carbono em Florestas Tropicais Restauradas 6	
3. MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1 Caracterização da Área de Estudo	7
3.2 Amostragem e Coleta de Dados	8
3.3 Escolha das Equações.....	8
3.4 Estimativa de Biomassa da Parte Aérea e Carbono.....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
4.1 Estatísticas Descritivas por Idade de Restauração.....	11
4.2 Estoque de Biomassa e Carbono por Espécie.....	13
4.3 Distribuição Diamétrica.....	15
4.4 Contribuição das Famílias para o Estoque de Biomassa	16
5. CONCLUSÃO	17
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das áreas restauradas estudadas, incluindo 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..... 8

Tabela 2 - Equações indicadas por meio da plataforma Tropical Biomass & Carbon para estimativa da biomassa da parte aérea, R^2 , amplitude de DAP e Syx 10

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Mapa de localização das áreas de pesquisa e das unidades amostrais na REGUA, Cachoeiras de Macacu, RJ, abrangendo quatro áreas de estudo. 7
- Figura 2** - Relação entre o diâmetro à altura do peito (DAP) e a biomassa média por indivíduo das espécies na área de restauração florestal da Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ. 12
- Figura 3** - Valores médios por idade de biomassa (Mg.ha^{-1}) e carbono (Mg.ha^{-1}) nas quatro áreas de restauração da REGUA, Cachoeiras de Macacu, RJ. 12
- Figura 4** - Distribuição diamétrica, com amplitude de 5 cm, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ. 15
- Figura 5** - Famílias botânicas com maiores estoques de biomassa acima do solo (t. ha^{-1}) por idade de restauração (6, 11, 16 e 21 anos) nas áreas de restauração da REGUA, Cachoeiras de Macacu, RJ. 17

1. INTRODUÇÃO

A biomassa florestal constitui um dos principais indicadores do funcionamento dos ecossistemas e da capacidade de estocagem de carbono, contribuindo para o balanço global desse elemento e, de forma indireta, para a mitigação das mudanças climáticas (Bais, 2008; Tanizaki, 2000; IPCC, 2023). Em termos gerais, a biomassa pode ser compreendida como a quantidade de material vegetal presente na floresta, distribuída entre a vegetação viva acima do solo, a fração morta depositada na superfície, o sistema radicular e a matéria orgânica do solo, de modo que o estoque total resulta da soma desses compartimentos ao longo do perfil florestal (Bais, 2008). Como grande parte desse material é constituída de carbono fixado pela fotossíntese, o acúmulo de biomassa está diretamente associado ao crescimento das plantas, à idade dos povoamentos e à sua capacidade fotossintética (Tanizaki, 2000).

A perda de biomassa decorrente das ações antrópicas torna-se um fator crítico para o balanço de carbono. No Brasil, a supressão da vegetação nativa por meio da mudança de uso do solo, sobretudo em biomas tropicais, figura entre os principais fatores responsáveis pelo aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, comprometendo o equilíbrio do ciclo do carbono (SEEG, 2024; CGEE, 2008).

A Mata Atlântica é um dos biomas que melhor exemplifica essa situação. Reconhecida como um *hotspot* mundial de biodiversidade (Myers *et al.*, 2000), abriga uma grande variedade de espécies endêmicas e exerce funções ecológicas vitais. No entanto, é também um dos ecossistemas mais ameaçados do planeta. Atualmente, apenas 12,4% de sua cobertura original permanece preservada, distribuída em fragmentos isolados e sujeitos a diferentes pressões ambientais (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024). Esse alto grau de fragmentação compromete sua capacidade de prover serviços ecossistêmicos e aumenta sua vulnerabilidade às mudanças climáticas (Lira; Portela; Tambosi, 2021). Além disso, estudos recentes indicam que alterações no regime de chuvas, cada vez mais intensas no Brasil, podem afetar diretamente a dinâmica de biomassa e carbono nesses ecossistemas (Monteiro Junior, 2024).

Nesse contexto, a restauração florestal surge como ferramenta estratégica não apenas para recuperar áreas degradadas, mas também para ampliar a capacidade de estocagem de biomassa e carbono. Florestas em regeneração apresentam elevada capacidade de sequestro de carbono nas primeiras décadas de desenvolvimento, mesmo que não alcancem os valores observados em florestas maduras (Brown; Lugo, 1990; Chazdon *et al.*, 2016). Além disso, áreas restauradas promovem a conectividade entre fragmentos, aumentando a resiliência ecológica e a manutenção da biodiversidade em longo prazo (Hoffmann *et al.*, 2025). Embora áreas restauradas com maior diversidade de espécies tendam, em geral, a estocar mais carbono via incremento de biomassa (Forrester, 2014), essa relação não é linear ao longo do tempo, podendo variar de forma acentuada com a idade do plantio. Nos estágios iniciais da restauração, sistemas com menor número de espécies podem apresentar maiores taxas de acúmulo de biomassa em curto prazo quando comparados a sistemas mais diversos, como observado em diferentes contextos de restauração florestal (Capellesso *et al.*, 2021).

Ao mesmo tempo, a quantificação da biomassa em áreas de restauração apresenta importantes gargalos metodológicos. Em geral, os modelos utilizados relacionam variáveis fáceis de medir em campo, como diâmetro, altura, área basal, volume ou densidade da madeira, com a biomassa, o que facilita a aplicação em inventários florestais, mas nem sempre representa bem a alta diversidade e a heterogeneidade estrutural de plantios de restauração com múltiplas espécies nativas (Brown, 1997). Nessas condições, muitas vezes é necessário recorrer a equações generalistas, o que tende a diminuir a acurácia das estimativas e pode gerar erros relevantes na quantificação de biomassa e carbono, já que pequenas diferenças na arquitetura das árvores podem alterar significativamente os resultados (Fearnside, 1996).

Apesar dos avanços metodológicos, ainda são poucos os estudos que investigam de forma integrada como a identidade das espécies, os grupos ecológicos e a idade dos plantios influenciam os estoques de biomassa e carbono em restaurações. Na Mata Atlântica, a maior parte das pesquisas foca na quantificação desses estoques ou na comparação entre áreas restauradas e remanescentes nativos, sem detalhar o papel combinado da composição florística, da estrutura das comunidades e do tempo de restauração nessa variação (Gardon; Santos; Rodrigues *et al.*, 2020).

Nesse sentido, A Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), localizada no município de Cachoeiras de Macacu, no estado do Rio de Janeiro, é um exemplo concreto de iniciativa voltada para a recuperação da Mata Atlântica. Criada em 1996, a REGUA protege mais de 7 mil hectares, dos quais cerca de 500 ha correspondem a áreas em processo de restauração florestal em diferentes idades de desenvolvimento (Locke; Costa, 2025). Essa diversidade de estágios sucessionais possibilita avaliar como a dinâmica de crescimento das espécies arbóreas influencia a capacidade de armazenamento de biomassa e carbono, configurando-se como um verdadeiro “laboratório natural” para estudos ecológicos e climáticos (Azevedo, 2012).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo estimar e analisar os estoques de biomassa e carbono de espécies florestais arbóreas em plantios de restauração florestal na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biomassa Florestal e Ciclo do Carbono

A biomassa florestal é reconhecida como um dos principais indicadores do funcionamento dos ecossistemas e da capacidade de estocagem de carbono, pois expressa o resultado cumulativo da fixação de CO₂ atmosférico pelas plantas ao longo do tempo (Bais, 2008; Tanizaki, 2000; IPCC, 2023). Em florestas naturais e plantadas, a quantidade de biomassa por hectare reflete a interação entre clima, solo, composição florística, idade do povoamento e manejo adotado, de modo que variações nessas condições se traduzem em diferenças significativas nos estoques de carbono. Assim, o monitoramento da biomassa florestal tem sido amplamente utilizado como indicador-chave para avaliar o papel das florestas na mitigação das mudanças climáticas e na provisão de serviços ecossistêmicos associados ao ciclo biogeoquímico do carbono (Bais, 2008; IPCC, 2023).

Conceitualmente, biomassa florestal pode ser entendida como a quantidade total de matéria orgânica de origem vegetal existente em um dado sítio, englobando a vegetação viva e morta, acima e abaixo do solo (Bais, 2008). Nesse contexto, distinguem-se compartimentos como biomassa aérea viva (fuste, galhos, folhas), necromassa lenhosa e foliar depositada sobre o solo, sistema radicular e matéria orgânica do solo, cuja soma compõe o estoque total de biomassa e, por consequência, de carbono (Bais, 2008; Tanizaki, 2000). Como parcela expressiva dessa biomassa é constituída por carbono fixado pela fotossíntese, o acúmulo ao longo do tempo está diretamente associado ao crescimento em diâmetro e altura das árvores, à densidade da madeira e à dinâmica de mortalidade e recrutamento que caracterizam cada estágio sucessional (Tanizaki, 2000; IPCC, 2023).

A fotossíntese representa o principal fluxo de entrada de carbono nos ecossistemas, enquanto a respiração autotrófica e heterotrófica, a decomposição da serrapilheira e da madeira morta e a ocorrência de incêndios florestais correspondem aos fluxos de saída, devolvendo carbono à atmosfera (Tanizaki, 2000; IPCC, 2023; Friedlingstein *et al.*, 2022). Quando o balanço entre esses processos é positivo, a floresta atua como sumidouro de carbono, aumentando seus estoques de biomassa e de matéria orgânica do solo; quando o balanço é negativo, em função de desmatamento, degradação ou distúrbios de alta intensidade, o

ecossistema passa a funcionar como fonte líquida de emissões (IPCC, 2023; Friedlingstein *et al.*, 2022). Dessa forma, a magnitude e a estabilidade da biomassa florestal condicionam o papel do ecossistema no contexto do aquecimento global.

Em escala regional e global, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas destaca que a manutenção e a expansão dos estoques de biomassa florestal são componentes essenciais das estratégias de mitigação, exigindo estimativas robustas de biomassa e de carbono para subsidiar inventários nacionais e políticas públicas (IPCC, 2006; IPCC, 2023). A literatura ressalta que esses estoques variam amplamente entre biomas, formações sucessionais e sistemas de uso da terra, o que demanda métodos de quantificação compatíveis com as características estruturais e florísticas das florestas tropicais (Brown, 1997; IPCC, 2006). Nesse sentido, a compreensão da biomassa florestal inserida no ciclo do carbono fornece base conceitual e quantitativa para avaliar o potencial de sequestro em áreas naturais, degradadas e em restauração, conectando os resultados de campo às discussões sobre mudanças climáticas e gestão sustentável dos recursos florestais (IPCC, 2023; Pan *et al.*, 2013).

2.2 Importância e Serviços Ecossistêmicos da Mata Atlântica

Entre os biomas brasileiros, a Mata Atlântica apresenta elevada capacidade de estocagem de carbono e à vasta biodiversidade que abriga (Cunha *et al.*, 2009; Azevedo *et al.*, 2018). Originalmente, cobria mais de 1,3 milhão de km² ao longo de 17 estados, mas hoje restam apenas 12,4% de sua área original (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024). Essa intensa fragmentação reduz a capacidade de regulação climática e hidrológica, comprometendo a integridade ecológica do bioma (Lira; Portela; Tambosi, 2021). Além das perdas ambientais, a degradação da Mata Atlântica compromete serviços essenciais à sociedade, como o abastecimento de água, o controle de erosão e a manutenção da fertilidade dos solos (Joly *et al.*, 2014).

A intensificação do efeito estufa, resultante do aumento das concentrações atmosféricas de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos nitrosos (N₂O), é consequência direta das atividades humanas (IPCC, 2023). A queima de combustíveis fósseis, a conversão do uso da terra e o desmatamento são as principais fontes de emissão desses gases, que alteram o balanço energético global, promovendo elevação da temperatura média, variações nos regimes de precipitação e aumento da frequência de eventos climáticos extremos (Friedlingstein *et al.*, 2022). No Brasil, o desmatamento e as mudanças no uso do solo são responsáveis por mais de 40% das emissões totais de gases de efeito estufa (SEEG, 2024), demonstrando o impacto direto da perda de vegetação nativa sobre o equilíbrio climático.

As florestas tropicais atuam como grandes sumidouros de carbono, absorvendo CO₂ atmosférico e armazenando-o em sua biomassa e no solo (Pan *et al.*, 2013). Além disso, influenciam a formação de chuvas, regulam o microclima e garantem a estabilidade térmica regional. Quando degradadas, perdem grande parte dessa capacidade, liberando carbono e intensificando o aquecimento global (Brancalion *et al.*, 2018). Por outro lado, áreas em processo de restauração ou regeneração natural recuperam progressivamente essas funções, contribuindo para o restabelecimento dos ciclos biogeoquímicos e para a mitigação climática (Azevedo *et al.*, 2018; Araújo; Moreira; Neves, 2020).

A recuperação de fragmentos florestais da Mata Atlântica também fortalece a conectividade ecológica entre remanescentes, permitindo o fluxo gênico e a movimentação da fauna, fatores essenciais para a resiliência das populações frente às mudanças climáticas (Hoffmann *et al.*, 2025). Estudos mostram que florestas restauradas aumentam significativamente a infiltração hídrica, a ciclagem de nutrientes e a diversidade de espécies, funcionando como filtros ecológicos que reduzem vulnerabilidades ambientais (Rozendaal *et al.*, 2019). Assim, a restauração florestal não deve ser compreendida apenas como recomposição de cobertura

vegetal, mas como ferramenta estratégica para recuperar a funcionalidade ecológica da paisagem.

A valoração dos serviços ecossistêmicos da Mata Atlântica tem ganhado relevância nas políticas ambientais, por meio de instrumentos como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e os programas de neutralização de carbono (Brancalion; Holl, 2020). Essas iniciativas reconhecem economicamente o papel das florestas na mitigação climática e incentivam proprietários e comunidades a manter ou restaurar ecossistemas nativos. A contabilização do carbono estocado na biomassa e no solo tem se tornado parâmetro central para monitorar a eficiência de projetos de restauração e subsidiar políticas públicas sustentáveis (Hoffmann *et al.*, 2025).

A Mata Atlântica destaca-se por sua capacidade de combinar alta produtividade biológica com funções ecossistêmicas críticas. A diversidade de espécies, aliada à complexidade estrutural, garante não apenas o sequestro de carbono, mas também a estabilidade e durabilidade dos estoques (Poorter *et al.*, 2016). Além disso, o bioma contribui para a estabilidade climática regional ao regular a temperatura, proteger nascentes e favorecer a recarga de aquíferos, prestando benefícios diretos às populações humanas e à economia (MEA, 2005). Dessa forma, os serviços prestados por esse ecossistema têm valor não apenas ambiental, mas também estratégico para o desenvolvimento sustentável.

2.3 Restauração Florestal e Florística

O sucesso dos programas de restauração depende fortemente do uso de espécies nativas com diferentes estratégias ecológicas. O plantio misto de espécies pioneiras e tardias, comum na Mata Atlântica, tem se mostrado eficiente na recuperação estrutural e funcional da floresta (Rodrigues *et al.*, 2009). Para Resende *et al.* (2022) as espécies pioneiras promovem cobertura inicial e reduzem a erosão, enquanto as secundárias e clímax aumentam a biomassa e a estabilidade do ecossistema a longo prazo. Esse arranjo ecológico favorece o acúmulo gradual de biomassa e carbono, acelerando o restabelecimento dos serviços ecossistêmicos e reforçando a importância do planejamento ecológico das espécies utilizadas (Rodrigues *et al.*, 2009).

No estado do Rio de Janeiro, estudos conduzidos por Azevedo *et al.* (2018) e Araújo, Moreira e Neves (2020) demonstram que áreas restauradas há mais de 15 anos na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA) e no entorno do Parque Estadual dos Três Picos atingem entre 70 e 90% do estoque de carbono de florestas secundárias maduras. Essa constatação reforça o potencial das ações de restauração em contextos tropicais, especialmente quando há manejo técnico e monitoramento contínuo (Azevedo *et al.*, 2018; Araújo; Moreira; Neves, 2020). Em escala de bioma, revisões recentes mostram que florestas restauradas na Mata Atlântica e em outras formações brasileiras podem alcançar estoques de biomassa e carbono cada vez mais próximos aos de florestas maduras à medida que o tempo de restauração aumenta, com ganhos expressivos após a segunda década de regeneração (Mores *et al.*, 2025).

A restauração florestal também se destaca como instrumento de integração socioambiental. Iniciativas baseadas em pagamento por serviços ambientais (PSA) têm recompensado produtores rurais e comunidades locais pela conservação e recuperação de áreas nativas, associando benefícios econômicos à mitigação climática (Brancalion; Holl, 2020). Essa abordagem amplia a adesão social aos programas de restauração e reforça a importância da governança participativa. Além disso, a restauração oferece co-benefícios, como o aumento da biodiversidade funcional, a proteção de mananciais e o fortalecimento da resiliência ecológica frente aos extremos climáticos (Hoffmann *et al.*, 2025).

A literatura evidencia que o aumento da biomassa e do carbono é diretamente proporcional ao tempo de restauração e à diversidade de espécies empregadas (Azevedo *et al.*, 2018; Dutra, 2025). Assim, compreender a dinâmica temporal e ecológica desses processos é fundamental

para otimizar o planejamento de novas áreas restauradas e maximizar o potencial de sequestro de carbono do bioma.

2.4 Dinâmica Sucessional e Sequestro de carbono

A sucessão ecológica em florestas tropicais determina o ritmo de acúmulo de biomassa e, por consequência, dos estoques de carbono por hectare. Em áreas restauradas jovens, dominadas por espécies pioneiras, os estoques na biomassa aérea ainda são modestos, mas crescem rapidamente com o fechamento do dossel e o aumento do diâmetro das árvores. Para a Mata Atlântica do Rio de Janeiro, estimativas por estágios sucessionais indicam cerca de 20,8 Mg C ha⁻¹ em floresta secundária em estágio médio e aproximadamente 61,8 Mg C ha⁻¹ em estágio avançado, evidenciando o salto de carbono ao longo da trajetória sucessional (Diniz *et al.*, 2015).

À medida que a floresta avança para estágios intermediários e tardios, a substituição por espécies secundárias aumenta a longevidade do estoque e a densidade da madeira. Em fragmentos secundários maduros da Mata Atlântica, os estoques de carbono do componente arbóreo têm sido reportados tipicamente entre cerca de 56 e 110 Mg C ha⁻¹, patamar compatível com sistemas mais estruturados e que ilustra a aproximação à condição-alvo em programas de restauração (Fonsêca *et al.*, 2024).

Para balizar as áreas restauradas frente a referências de florestas primárias ou muito bem conservadas, estudos em florestas montanas da Mata Atlântica no norte do estado do Rio de Janeiro reportam ampla variação do carbono na biomassa aérea, de aproximadamente 50 até 165 Mg C ha⁻¹, a depender da fisionomia, do relevo e do histórico de perturbação. Esses números ajudam a situar a distância entre os estoques atuais das áreas em restauração e aqueles observados em remanescentes mais maduros (Cunha *et al.*, 2009).

A dinâmica temporal do incremento também é relevante para a discussão dos estoques por hectare. Em cronossequências da Mata Atlântica, o crescimento do estoque de carbono na biomassa aérea ao longo da sucessão secundária mantém-se em faixas anuais consistentes, com magnitude suficiente para que áreas de 20 a 30 anos se aproximem de valores de florestas secundárias tardias, dependendo das condições do sítio e do uso anterior do solo (Villanova *et al.*, 2019).

Além da idade, a composição e a diversidade funcional explicam parte importante da variação entre áreas. Glebas mais diversas costumam usar melhor luz, água e nutrientes e, assim, acumular mais biomassa; por outro lado, pastagens antigas ou solos compactados podem retardar a trajetória de recuperação. Para comparabilidade entre trabalhos, é importante especificar o compartimento quantificado (apenas biomassa aérea, ou total incluindo raízes, necromassa e solo), o fator de conversão biomassa→carbono adotado e se a necromassa foi considerada, pois esses aspectos podem alterar de maneira substancial os valores reportados (Fonsêca *et al.*, 2024).

No âmbito metodológico, recomenda-se o uso de equações alométricas adequadas ao bioma e à faixa de diâmetro das árvores amostradas, informando claramente o modelo utilizado e o teor de carbono assumido para a biomassa seca. Essas decisões metodológicas sustentam a robustez das estimativas e facilitam a comparação entre estudos e idades de restauração (Miranda; Melo; Sanquetta, 2011).

Em síntese, a literatura regional aponta um gradiente coerente: áreas restauradas jovens iniciam na ordem de dezenas de Mg C ha⁻¹ na biomassa aérea e, com o avanço sucessional, podem alcançar patamares acima de 60–100 Mg C ha⁻¹, aproximando-se dos valores observados em fragmentos secundários maduros; por sua vez, remanescentes primários ou muito bem conservados podem superar 100 Mg C ha⁻¹ apenas na fração aérea, servindo como referência para discutir o potencial de estoques por hectare e a trajetória necessária até a condição-alvo no

território analisado (Diniz *et al.*, 2015; Cunha *et al.*, 2009; Fonsêca *et al.*, 2024; Villanova *et al.*, 2019).

2.5 Métodos de Estimativa de Biomassa e Carbono em Florestas Tropicais Restauradas

2.5.1 Métodos Diretos

A estimativa direta, também chamada de método destrutivo, consiste no abate de árvores em parcelas previamente delimitadas e na medição da biomassa sem necessidade de modelos. Após a derrubada, os indivíduos são separados em compartimentos como fuste, galhos, folhas e, quando o estudo exige, raízes (Azevedo, 2018). Cada parte é pesada ainda úmida no campo, e subamostras são secas em estufa para determinar a matéria seca, permitindo calcular a biomassa seca por árvore e extrapolar os valores por hectare a partir do inventário da parcela (Sanquetta, 2002). Embora forneça alta acurácia por dispensar equações, o procedimento é caro, demorado, exige equipe e infraestrutura adequadas e causa impacto ecológico, sendo pouco viável em áreas em restauração. Além disso, a legislação ambiental brasileira restringe fortemente sua aplicação, especialmente na Mata Atlântica (Burger; Delitti, 1999; Vieira *et al.*, 2008).

Por essas limitações, o método destrutivo é usado principalmente para gerar dados de referência e apoiar a construção, calibração e validação de equações alométricas e fatores de expansão. O IPCC destaca que, quando não há recursos ou amostras suficientes para modelos específicos, podem ser adotadas equações desenvolvidas em outras regiões, mas recomenda o abate de algumas árvores sempre que possível para reduzir incertezas e ajustar os resultados às condições locais (Brown, 1997; IPCC, 2006). A conversão de biomassa para carbono é feita aplicando uma fração de carbono sobre a biomassa seca, geralmente entre 0,47 e 0,50, conforme as diretrizes do IPCC (Brown, 1997; IPCC, 2006). Estudos que empregaram esse procedimento em diferentes formações florestais demonstram sua utilidade como base para estimativas e validações (Schumacher; Hoppe; Barbieri, 2002; Watzlawick, 2003; Vogel; Schumacher; Trüby, 2006).

2.5.2 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos estimam biomassa e carbono sem abate, combinando medições dendrométricas com modelos (Azevedo *et al.*, 2018). A forma mais comum usa equações alométricas individuais que relacionam diâmetro à altura do peito, altura total e densidade básica da madeira à biomassa acima do solo, com melhor desempenho quando se emprega a densidade específica da espécie e modelos calibrados para trópicos úmidos, Mata Atlântica ou formações secundárias em restauração (Zanne *et al.*, 2009; Chave *et al.*, 2014).

De acordo com Sanquetta (2002), outro método de estimativa indireta é apartir do sensoriamento remoto complementa essas estimativas ao permitir análises em larga escala, incluindo ALS e LiDAR, que fornecem informações sobre altura e diferentes estratos do dossel, além de sensores ópticos multiespectrais e radares em bandas L e P, capazes de captar variações foliares e manter sensibilidade à biomassa em níveis intermediários e altos (NÆSSET, 1997). Como a biomassa depende de fatores como tipo florestal, idade, composição de espécies, estrutura, distúrbios e condições regionais de clima, solo e chuvas, a integração com SIG e a calibração com parcelas de campo são essenciais para extrapolações confiáveis, sobretudo em áreas de restauração (Brown; Gillespie; Lugo, 1989).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

O presente estudo foi conduzido na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), situada no município de Cachoeiras de Macacu, estado do Rio de Janeiro, (Figura 1). A Reserva possui aproximadamente 7.000 hectares, dos quais parte encontra-se inserida no Parque Estadual dos Três Picos (PETP), a maior unidade de conservação de proteção integral do estado. Desse total, cerca de 500 hectares correspondem a áreas destinadas a projetos de restauração florestal, implantados em diferentes períodos desde a criação da reserva (Locke; Costa, 2025).

A REGUA está inserida na bacia hidrográfica do rio Guapiaçu, afluente do rio Macacu, sistema que desempenha papel essencial no abastecimento hídrico da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (REGUA, 2024). Os solos predominantes são Argissolos e Cambissolos, desenvolvidos sobre rochas cristalinas em relevo montanhoso, caracterizados por boa drenagem e elevada suscetibilidade à erosão (Lima, 2016).

O clima local é classificado como Af, segundo Köppen, típico das florestas tropicais úmidas, sem estação seca definida (Azevedo, 2018). As temperaturas médias anuais situam-se em torno de 24 °C, e a precipitação anual supera 2.000 mm, com maior concentração de chuvas no verão e diminuição no inverno, embora sem um período seco estabelecido (Alvares *et al.*, 2013). A vegetação nativa corresponde à Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, ecossistema de alta umidade e notável biodiversidade (Veloso; Rangel Filho; Lima, 1991).

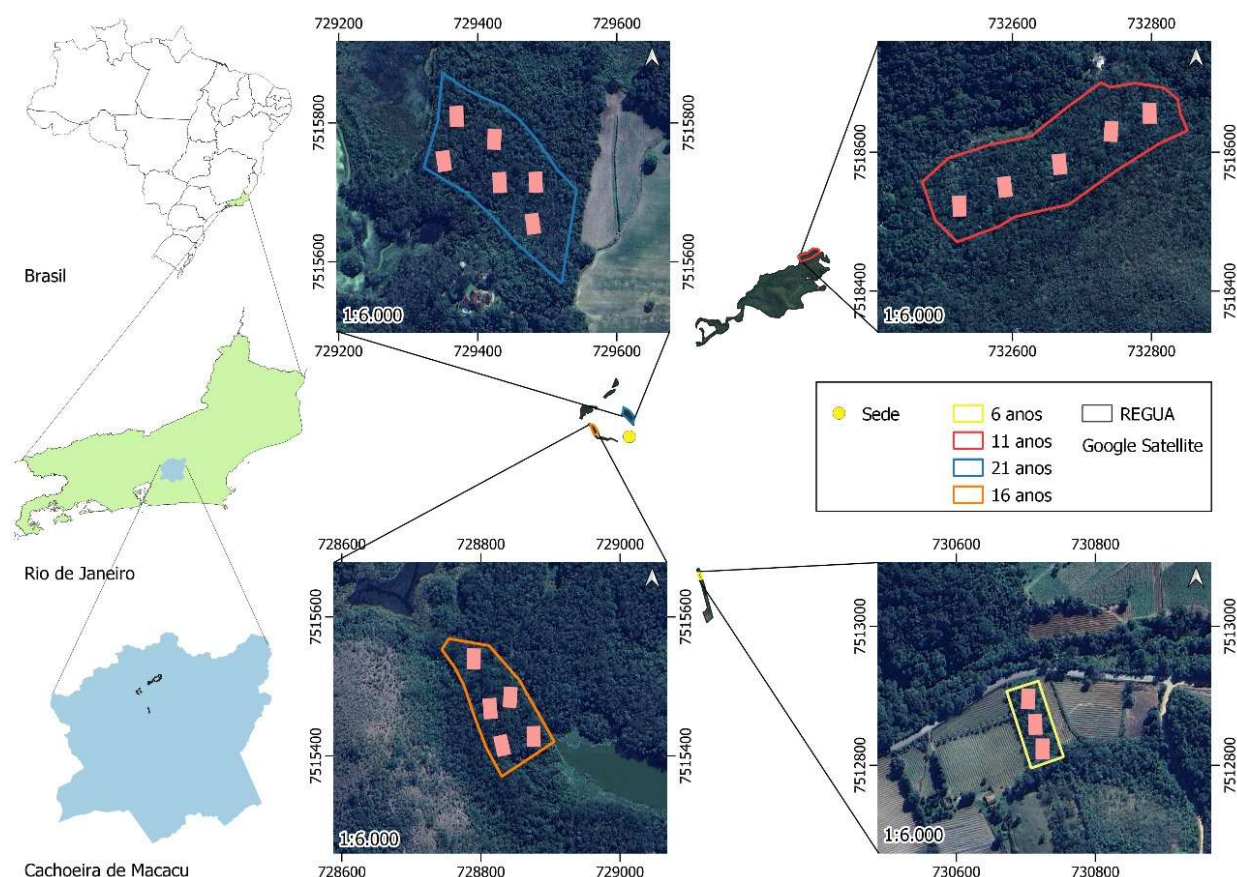


Figura 1 - Mapa de localização das áreas de pesquisa e das unidades amostrais na REGUA, Cachoeiras de Macacu, RJ, abrangendo quatro áreas de estudo.

3.2 Amostragem e Coleta de Dados

A amostragem foi realizada em quatro áreas de restauração florestal localizadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), correspondentes a plantios implantados em diferentes períodos, de modo a representar um gradiente temporal de 6 a 21 anos de restauração. Todas as áreas avaliadas estão situadas em relevo predominantemente plano, implantadas em regime de plantio total, com espaçamento de 3×2 m, sob as mesmas condições de manejo silvicultural, o que possibilita isolar a influência do tempo de restauração sobre a estrutura do povoamento, o acúmulo de biomassa e o estoque de carbono.

Os dados utilizados nesse estudo, foram obtidos a partir inventário de campo realizado na área. Em cada área foram demarcadas unidades amostrais retangulares de 20×30 m (600 m^2), dispostas de forma sistemática ao longo do terreno, totalizando 19 parcelas distribuídas nas quatro idades de restauração (Tabela 1).

Nas unidades amostrais foram identificados taxonomicamente e mensurados todos os indivíduos arbóreos com circunferência à altura do peito (CAP) $\geq 15,7$ cm, medida a 1,30 m do solo, correspondente ao diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 5 cm, seguindo critérios convencionais de inventário florestal. O CAP foi medido com fita métrica Vonder e a altura total (Ht) foi obtida utilizando o hipsômetro Vertex^R 5 para árvores com altura superior a 12 m, e por meio de vara de manobra para indivíduos com altura inferior a 12 m. Os indivíduos que não puderam ser identificados em campo foram coletados e posteriormente identificados em laboratório, com o auxílio de chaves taxonômicas.

Tabela 1 - Características das áreas restauradas estudadas, incluindo 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 parcelas 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
Monitorado	21	06	3,15	0,36	11,4

3.3 Escolha das Equações

Inicialmente, os dados coletados em campo, referentes ao diâmetro à altura do peito (DAP), altura total das árvores e identificação botânica das espécies, foram organizados em planilha eletrônica, com cada indivíduo representado em uma linha e suas variáveis dendrométricas e taxonômicas distribuídas em colunas específicas. Em seguida, essa base foi inserida na plataforma digital Tropical Biomass & Carbon, desenvolvida para compilar e operacionalizar equações de biomassa florestal disponíveis para diferentes formações do Brasil (David *et al.*, 2022). A ferramenta atua como um compêndio de equações alométricas, cruzando as informações de DAP, altura e tipologia florestal definida pelo usuário, de modo a identificar automaticamente quais modelos são compatíveis com o conjunto de variáveis informadas e com o tipo de floresta selecionado.

Para este estudo, foi selecionada na plataforma a tipologia “Floresta Ombrófila Densa da Mata Atlântica”, garantindo que as estimativas de biomassa acima do solo fossem calculadas apenas com equações desenvolvidas para condições ecológicas semelhantes às da área de estudo. A partir dessa seleção, a Tropical Biomass & Carbon retornou um conjunto de equações alométricas recomendadas para essa formação, as quais foram aplicadas aos dados de DAP e altura registrados em campo. Ao todo, foram identificadas 10 equações alométricas de diferentes autores, que serviram de base para a estimativa da biomassa aérea dos indivíduos amostrados (Tabela 2), permitindo comparar resultados entre modelos e reduzir incertezas associadas ao uso de uma única equação.

3.4 Estimativa de Biomassa da Parte Aérea e Carbono

Para cada árvore amostrada, foi calculada a biomassa seca da parte aérea (BPA, em kg) com base em cada uma das 10 equações selecionadas. Em seguida, obteve-se a média aritmética da biomassa estimada por equação e, posteriormente, a média da biomassa por espécie, permitindo avaliar o potencial de acúmulo de biomassa em nível taxonômico.

A partir dos valores médios de biomassa por indivíduo, a biomassa por hectare (Kg/ha) foi estimada por extrapolação da densidade de indivíduos amostrados. O estoque de carbono (C) foi determinado aplicando-se o fator de conversão de 0,47 sobre a biomassa seca, conforme as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2006):

$$C = 0,47 \times BPA$$

Em que: C é o estoque de carbono na biomassa aérea seca, em kg; 0,47 é o fator de conversão de biomassa seca para carbono; BPA é a biomassa aérea seca, em kg.

As médias de biomassa e carbono foram agrupadas por espécie, família botânica e grupo ecológico (pioneiras, secundárias iniciais e tardias), de acordo com as informações do Portal Re flora (JBRJ, 2025). Essa classificação permitiu relacionar o comportamento de acúmulo de biomassa e carbono com as estratégias ecológicas das espécies.

Para cada espécie, foi calculado o Incremento Médio Anual (IMA) de carbono, considerando o tempo de restauração da área, conforme a expressão:

$$IMA = \frac{(C_{total})}{I}$$

Em que: IMA é o incremento médio anual de carbono (Kg/ano); C_{total} é o estoque total de carbono (Kg); I é a idade da restauração (anos).

Esse indicador foi utilizado para identificar as espécies com maior eficiência de crescimento e potencial de sequestro de carbono.

Os resultados foram posteriormente organizados e as 10 espécies com maiores valores médios de biomassa foram listados, permitindo determinar quais espécies apresentaram maior contribuição para o estoque total de biomassa e carbono em cada idade de restauração.

Além disso, foram elaboradas distribuições de frequência por classe diamétrica (amplitude de 5 cm) e por espécie, a fim de identificar o padrão de contribuição de cada classe e espécie para o estoque total. A partir dessas distribuições, foram construídos gráficos de dispersão e histogramas para ilustrar a relação entre DAP e carbono, evidenciando as variações entre espécies e entre equações utilizadas.

Tabela 2 - Equações indicadas por meio da plataforma Tropical Biomass & Carbon para estimativa da biomassa da parte aérea, R^2 , amplitude de DAP e Syx .

ID	Referência	Equação	Amplitude DAP (cm)	R^2	Syx (%)
1	Scolforo <i>et al.</i> (2008)	$BPA = \exp(-10,9240 + 2,1188 * \log(DAP) + 0,9848 * \log(Ht)) * 1000$	05-40	0,97	30,8
2	Scolforo <i>et al.</i> (2008)	$BPA = \exp(-10,5678 + 2,0679 * \log(DAP) + 0,8722 * \log(Ht)) * 1000$	05-40	0,97	32,0
3	Scolforo <i>et al.</i> (2008)	$BPA = \exp(-10,6409 + 2,1533 * \log(DAP) + 0,8248 * \log(Ht)) * 1000$	05-40	0,97	35,0
4	Uller <i>et al.</i> (2019)	$BPA = \exp(-2,3702 + 2,5179 * \log(DAP))$	05-56	0,87	6,4
5	Uller <i>et al.</i> (2019)	$BPA = \exp(-3,0780 + 1,0681 * \log(DAP^2) + 0,6616 * \log(Ht))$	05-56	0,86	7,1
6	Uller <i>et al.</i> (2019)	$BPA = \exp(-3,4062 + 0,9774 * \log((DAP^2) * Ht))$	05-56	0,86	7,8
7	Colmanetti <i>et al.</i> (2018)	$BPA = \exp(-2,245 + 2,388 * \log(DAP))$	05-69	0,94	-
8	Junior <i>et al.</i> (2014)	$BPA = \exp(-1,890 + 1,127 * \log(DAP^2))$	02-34	-	-
9	Junior <i>et al.</i> (2014)	$BPA = \exp(-2,541 + 0,883 * \log((DAP^2) * Ht))$	02-34	-	-
10	Moreira-Burguer and Delitti (2010)	$BPA = \exp(-2,052 + 0,801 * \log(DAP^2 * Ht))$	02-68	0,94	11,3

R^2 = Coeficiente de determinação; Syx = Erro Padrão da Estimativa (%); BPA = Biomassa da parte aérea; DAP = Diâmetro à altura do peito - 1,30 m do solo (cm); Ht = Altura total (m).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatísticas Descritivas por Idade de Restauração

Conforme apresentado na Tabela 3, observa-se tendência geral de aumento do diâmetro à altura do peito (DAP) e da altura total com o avanço da idade de restauração. O DAP médio evoluiu de 10,28 cm aos 6 anos para 11,47 cm aos 11 anos, sofreu leve redução para 10,62 cm aos 16 anos e voltou a crescer, atingindo 13,37 cm aos 21 anos. A altura média, por sua vez, apresentou padrão de incremento mais contínuo, passando de 9,39 m aos 6 anos para 9,94 m aos 11 anos, 10,51 m aos 16 anos e alcançando 12,12 m aos 21 anos. A riqueza de espécies variou de 33 a 56 espécies ao longo da cronossequência, com 33 espécies aos 6 anos, 50 aos 11 anos, 42 aos 16 anos e 56 espécies aos 21 anos, indicando aumento da diversidade florística nas idades mais avançadas.

A biomassa média por fuste aumentou de 51,93 kg aos 6 anos para 75,96 kg aos 11 anos, apresentou redução para 65,81 kg aos 16 anos e, em seguida, elevou-se de forma mais expressiva, atingindo 115,61 kg aos 21 anos. Essa queda intermediária pode estar associada à estrutura populacional e à dinâmica de recrutamento e mortalidade, uma vez que, nas idades de 11 e 16 anos, a densidade de indivíduos alcançou 1003 e 1203 ind/ha, respectivamente, sugerindo possível efeito de auto-desbaste em função da maior competição intraespecífica. Aos 21 anos, a densidade foi de 861 ind/ha, acompanhada do maior valor de biomassa média, o que é compatível com a permanência de indivíduos dominantes mais robustos após a mortalidade de árvores menores. Em conjunto, os valores médios de DAP e altura situam-se na faixa característica de florestas em estágio intermediário de regeneração, conforme os critérios da Resolução CONAMA nº 006/94, com a altura média aos 21 anos próxima ao limite superior estabelecido para esse estágio.

Tabela 3 - Valores mínimos, médios e máximos do diâmetro à altura do peito (DAP) e da altura total (Ht), biomassa e carbono médios por fuste (kg), número de espécies (n°), número de indivíduos por ha (N°) nas quatro áreas de restauração florestal da REGUA, Cachoeiras de Macacu – RJ.

Área de estudo	DAP (cm)			Ht (m)			Biomassa -----Kg-----	Carbono	n°	N° ind/ha
	Mín	Médio	Máx	Mín	Médio	Máx				
6 anos	1,81	10,28	44,28	2,40	9,39	21,30	51,93	24,41	33	905
11 anos	2,23	11,47	47,43	2,70	9,94	26,60	75,96	35,70	50	1.003
16 anos	2,01	10,62	46,47	1,80	10,51	31,50	65,81	30,93	42	1.203
21 anos	2,13	13,37	49,34	1,80	12,12	28,60	115,61	54,34	56	861

De acordo com Brown e Lugo (1990) e com Guariguata e Ostertag (2001), é esperado que, em florestas secundárias, o ganho de diâmetro e altura venha acompanhado da redução da densidade de árvores, à medida que a competição interespecífica se intensifica. Esse comportamento é coerente com o que se observa para a Mata Atlântica e com resultados de outros estudos sobre sucessão secundária (Chazdon, 2008; Rodrigues *et al.*, 2009; Dutra, 2025).

Na Figura 2, as relações alométricas confirmaram associação monotônica entre diâmetro e acúmulo de biomassa em todas as idades, com maior dispersão nas classes superiores à medida que a restauração avança, coerente com a heterogeneidade microssítial e com o avanço da idade; tal comportamento é esperado quando se utilizam equações não destrutivas baseadas em DAP e altura (Brown, 1997; Paula; Soares, 2011; Chave *et al.*, 2014).

Quando expressos por hectare, os estoques médios apresentaram aumento entre 6 e 11 anos, leve redução aos 16 anos e nova elevação aos 21 anos, com valores de biomassa de 75,2; 114,2; 104,2 e 124,7 Mg.ha^{-1} e de carbono de 35,3; 53,7; 49,0 e 58,6 Mg.ha^{-1} para 6, 11, 16 e 21 anos, respectivamente (Figura 3). Sendo esse um comportamento compatível com o balanço entre mortalidade competitiva, fechamento do dossel e aumento da área basal dos remanescentes, frequentemente observado em sínteses de Mata Atlântica, nas quais o acúmulo é mais acelerado nas primeiras décadas e desacelera com a estabilização estrutural, sem interromper o aumento do estoque total (Cunha, Gama-Rodrigues e Vasconcelos, 2009; Diniz *et al.*, 2015; Chazdon, 2014; Dutra, 2025). Com base nos estoques por hectare e em IMA, estimaram-se incrementos médios anuais de carbono de aproximadamente 21,9; 10,5; 6,0 e 7,4 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ nas mesmas idades respectivamente, reproduzindo o padrão de IMAs mais altos nas fases jovens e desaceleração subsequente descrito para sucessão secundária neotropical (Poorter *et al.*, 2016).

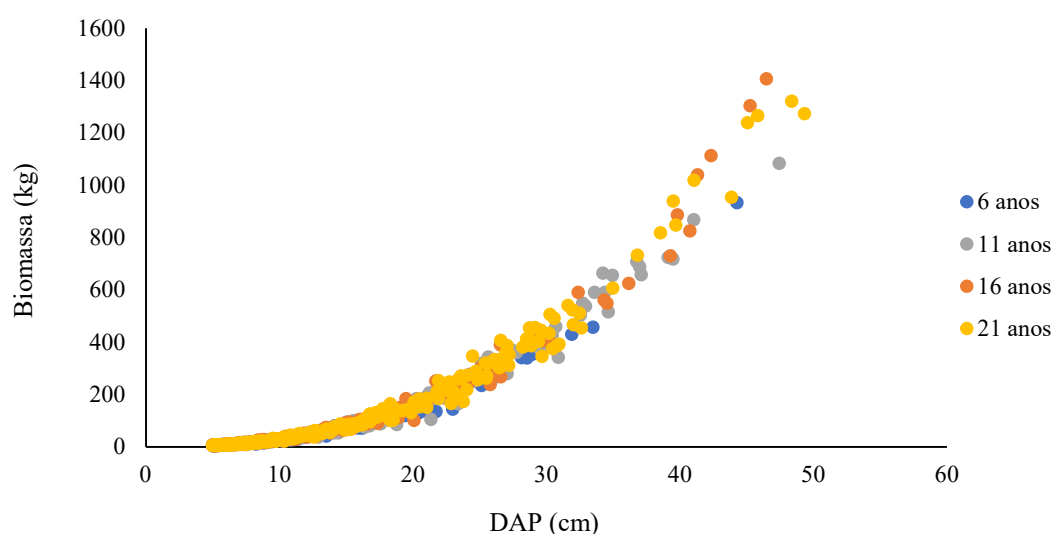


Figura 2 - Relação entre o diâmetro à altura do peito (DAP) e a biomassa média por indivíduo das espécies na área de restauração florestal da Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

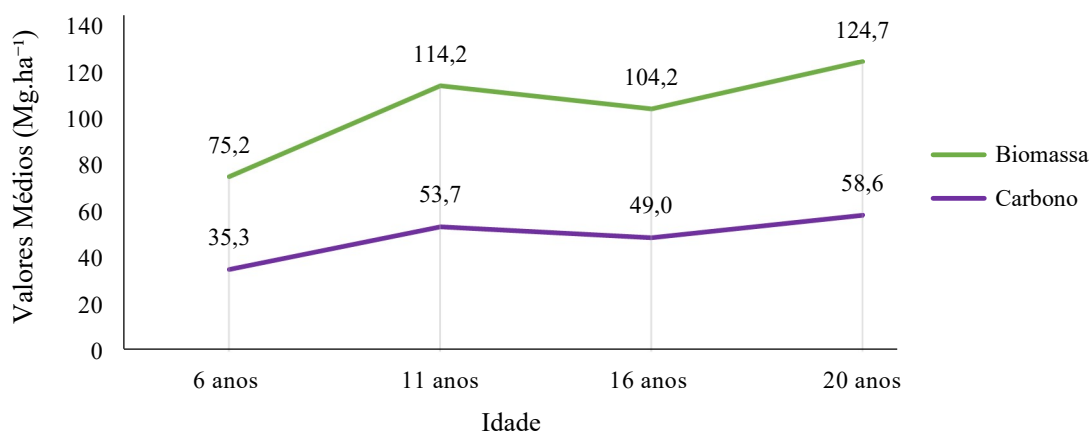


Figura 3 - Valores médios por idade de biomassa (Mg.ha^{-1}) e carbono (Mg.ha^{-1}) nas quatro áreas de restauração da REGUA, Cachoeiras de Macacu, RJ.

4.2 Estoque de Biomassa e Carbono por Espécie

A Tabela 4 mostra que o acúmulo de biomassa da parte aérea e estoque de carbono acompanha o avanço da restauração e que o protagonismo muda entre grupos funcionais ao longo do gradiente etário. Aos 6 anos, o estoque é majoritariamente sustentado por secundárias iniciais e pioneiras de crescimento rápido, com destaque para *Joannesia princeps* (BPA ~ 340,2 kg; C ~ 159,9 kg; IMA ~ 26,6 kg.ano⁻¹), além de *Ceiba speciosa* e *Guazuma ulmifolia* (BPA ~ 210–209 kg; IMA ~ 16,4–16,3 kg.ano⁻¹). Aos 11 anos, cresce a participação das secundárias iniciais de maior porte: *A. peregrina* (BPA ~ 404 kg; C ~ 190 kg; IMA ~ 17,3 kg.ano⁻¹) e *Piptadenia gonoacantha* (BPA ~ 380 kg; C ~ 179 kg; IMA ~ 16,3 kg.ano⁻¹) lideram, ainda com presença de *Joannesia princeps*, como na área de 6 anos, e com *Sparattosperma leucanthum* surgindo como espécie nova na lista. Em 16 anos, consolida-se a dominância de secundárias com alta BPA por indivíduo, sobretudo *A. peregrina* (~ 649 kg) e *P. reticulata* (~ 612 kg), enquanto a contribuição relativa das pioneiras diminui. Aos 21 anos, destacam-se indivíduos de maior porte, como *Cariniana legalis* (BPA ~ 1.321 kg; C ~ 621 kg; IMA ~ 31,0 kg.ano⁻¹) e *J. spinosa* (BPA ~ 807 kg; C ~ 379 kg; IMA ~ 19,0 kg.ano⁻¹), acompanhadas por *P. reticulata* (~ 528 kg) e *Cassia grandis* (~ 468 kg). Em todas as idades, Fabaceae reúne várias das espécies com maior BPA (*A. peregrina*, *P. reticulata*, *P. gonoacantha*), reforçando seu papel estruturador no acúmulo de biomassa.

Tabela 4 – Valores médios de biomassa seca da parte aérea (BPA), estoque de carbono (C) e incremento médio anual (IMA) e grupo ecológico (pioneiras, secundárias iniciais e tardias) das 10 espécies que apresentaram maiores valores médios de biomassa nas áreas de restauração florestal da REGUA.

Área/Família	Espécie	$\overline{H_T}$	$\overline{DAP}$	$\overline{BPA}$	$\overline{C}$	IMA	nº	GE
Boa sorte (6 anos)		-----Kg-----						
Euphorbiaceae	<i>Joannesia princeps</i> Vell.	17,7	28,1	340,2	159,9	26,6	1	P
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	12,7	21,0	209,9	98,6	16,4	19	P
	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	13,0	19,5	208,6	98,07	16,3	4	P
Fabaceae	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	15,7	21,1	200,3	94,1	15,6	4	P
	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	15,2	16,1	98,9	46,5	7,7	2	SI
	<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	12,4	14,7	85,4	40,1	6,6	9	SI
	<i>Inga edulis</i> Mart.	11,7	14	65,3	30,7	5,1	4	P
	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr.	11,4	11,3	47,61	22,38	3,73	6	SI
Caricaceae	<i>Jacaratia spinosa</i> (Aubl.) A.DC.	8,0	23	143,18	67,30	11,22	1	P
Lecythidaceae	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	9,9	12	46,52	21,86	3,64	2	C
outros								
Fazenda Serra do Mar (11 anos)								
Fabaceae	<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	21,4	27,9	403,97	189,86	17,26	2	SI
	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr.	17,7	26,9	380,23	178,71	16,25	6	SI
	<i>Piptadenia paniculata</i> Benth.	17,4	21,6	192,92	90,67	8,24	1	SI
	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	14,3	19,3	134,77	63,34	5,76	1	P
Euphorbiaceae	<i>Joannesia princeps</i> Vell.	19,3	24,9	304,94	143,32	13,03	4	P
Bignoniaceae	<i>Sparattosperma leucanthum</i> (Vell.) K.Schum.	13,2	17,6	210,84	99,10	9,01	13	SI
Caricaceae	<i>Jacaratia spinosa</i> (Aubl.) A.DC.	14,4	23,4	203,85	95,81	8,71	1	P
Cannabaceae	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	14,6	19,8	193,74	91,06	8,28	3	P
Anacardiaceae	<i>Spondias mombin</i> L.	10,8	12,9	144,20	67,77	6,16	2	SI
Urticaceae	<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	16,0	16,2	130,98	61,56	5,60	23	P
Outros								

Sede Alagados (16 anos)									
Fabaceae	<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	24,2	30,9	649,31	305,17	17,95	6	SI	
	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	22,4	33,8	611,65	287,48	16,91	5	SI	
	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr.	16,1	18,3	183,00	86,01	5,06	6	SI	
	<i>Inga vera</i> Willd.	17,4	18,3	142,83	67,13	3,95	1	SI	
	<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Allemão ex Benth.	19,1	16,9	140,22	65,90	3,88	2	ST	
	<i>Inga cylindrica</i> (Vell.) Mart.	17,4	18,3	118,73	55,80	3,28	1	SI	
Euphorbiaceae	<i>Joannesia princeps</i> Vell.	16,2	22,5	280,93	132,04	7,77	3	P	
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	12,9	23,1	185,84	87,34	5,14	1	P	
Lauraceae	<i>Nectandra membranacea</i> (Sw.) Griseb.	13,2	17,3	159,33	74,89	4,41	9	ST	
Phytolaccaceae	<i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	12,8	15	115,69	54,37	3,20	10	SI	
Outros									
Monitorado (21 anos)									
Lecythidaceae	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	25,0	48,4	1320,68	620,72	31,04	1	C	
Caricaceae	<i>Jacaratia spinosa</i> (Aubl.) A.DC.	24,0	38,3	807,26	379,41	18,97	1	P	
Fabaceae	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	20,1	28,4	527,80	248,07	12,40	6	SI	
	<i>Cassia grandis</i> L.f.	23,0	30,2	467,84	219,88	10,99	2	P	
Melastomataceae	<i>Pleroma granulosum</i> (Desr.) D. Don	17,0	32,6	454,17	213,46	10,67	1	P	
Rubiaceae	<i>Genipa americana</i> L.	21,3	27,7	384,43	180,68	9,03	3	SI	
Bignoniaceae	<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	22,0	26,1	333,03	156,53	7,83	1	ST	
Espécie 33	Espécie 33	25,7	22	293,74	138,06	6,90	1	ND*	
Primulaceae	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	21,3	23,7	289,04	135,85	6,79	10	SI	
Myrtaceae	<i>Eugenia pisiformis</i> Cambess.	21,0	24,7	288,08	135,40	6,77	1	ST	
Outros									

Em que: $\overline{BP\bar{A}}$: Média da biomassa seca da parte aérea; $\bar{C}$: Valor médio de Carbono; IMA: Incremento médio anual de carbono; n°: Número de indivíduos ; P: Pioneira; SI: Secundária inicial; ST: Secundária tardia; C: Clímax.

Conforme Dutra (2025), na bacia do Guapiaçu/REGUA os estoques de carbono na biomassa aérea aumentam dos plantios jovens para idades intermediárias e avançadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Azevedo *et al.* (2018), que observaram crescimento do estoque com a idade de restauração e contraste marcado em relação à floresta madura local. No plano teórico e de síntese, Chazdon (2014) descreve a sucessão secundária como um processo de auto-desbaste, substituição funcional (pioneiras em secundárias/tardias) e fechamento progressivo do dossel; isso explica porquê, mesmo com oscilação de médias em idades intermediárias, a BPA e o C tendem a aumentar no agregado. A presença, aos 21 anos, de indivíduos com IMAs ainda elevados é compatível com o padrão neotropical de “poucos muito grandes” que alavancam o estoque total nas fases de reorganização e consolidação estrutural (Chazdon *et al.*, 2016; Poorter *et al.*, 2016).

A composição específica confirma alternância funcional ao longo do tempo. Aos 6 anos, destacam-se pioneiras e secundárias iniciais de rápido crescimento, como *Joannesia princeps*, *Ceiba speciosa* e *Guazuma ulmifolia*, capazes de gerar alto incremento por abundância e porte (Chazdon, 2014; Poorter *et al.*, 2016). Aos 11 anos, espécies como *Anadenanthera peregrina* e *Piptadenia gonoacantha* elevam a biomassa média por indivíduo, refletindo combinações mais eficientes de DAP e altura (Rozendaal *et al.*, 2019). Aos 16 anos, ganham protagonismo secundárias/tardias com maior densidade, como *A. peregrina* e *Plathymenia reticulata*, e aos 21 anos surgem indivíduos de grande porte, como *Cariniana legalis*, consolidando o estoques.

4.3 Distribuição Diamétrica

A distribuição diamétrica das quatro áreas amostradas na Reserva Ecológica de Guapiaçu apresenta o padrão clássico de florestas tropicais, com maior concentração de indivíduos nas menores classes de diâmetro e declínio progressivo em direção às classes superiores. Esse comportamento, conhecido como curva em J invertido ou distribuição exponencial negativa, expressa a reposição contínua de indivíduos e a mortalidade seletiva ao longo do tempo, sendo típico tanto de florestas maduras quanto de formações em diferentes estágios sucessionais (Hess *et al.*, 2010; Rodrigues *et al.*, 2009).

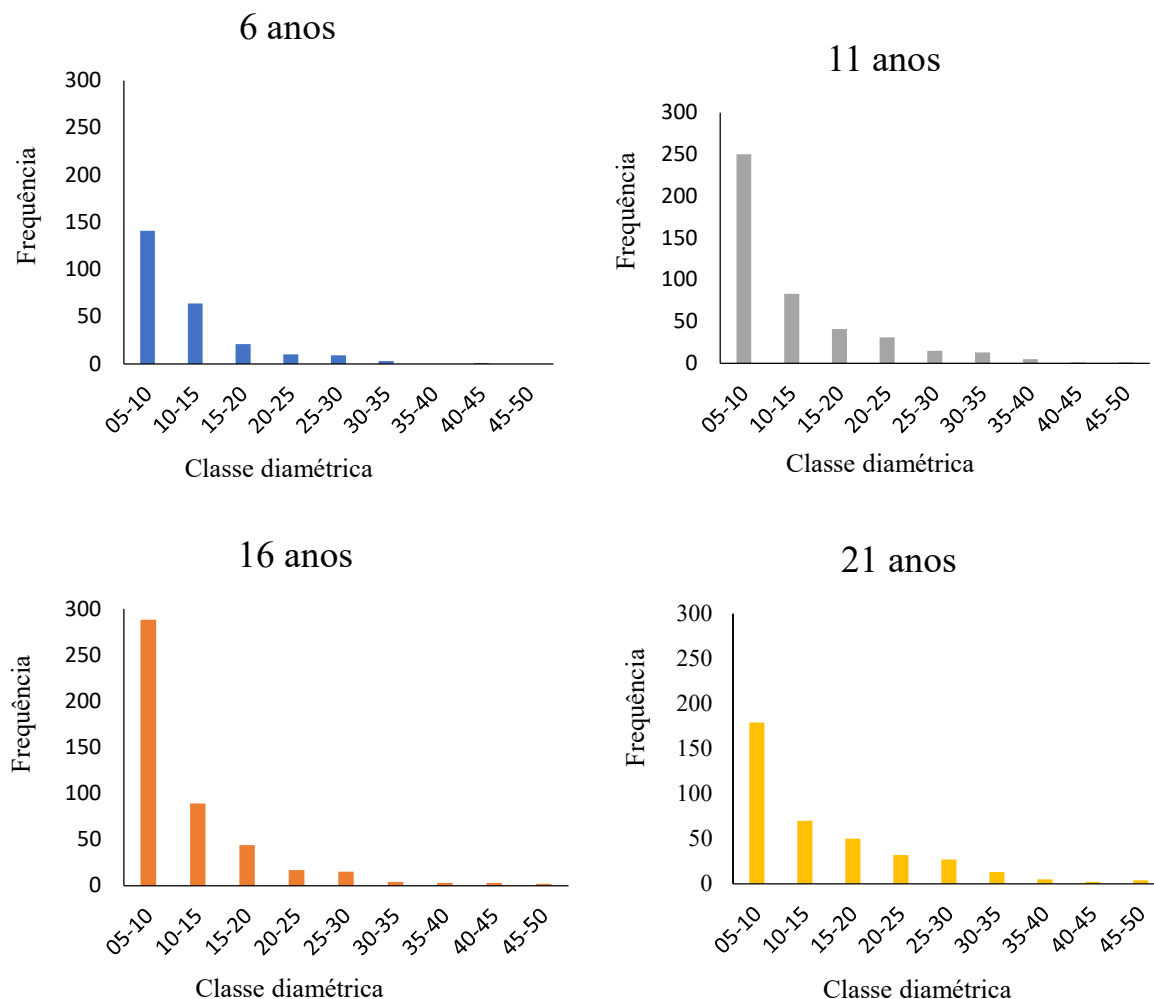


Figura 4 - Distribuição diamétrica, com amplitude de 5 cm, para as quatro áreas estudadas na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), Cachoeiras de Macacu, RJ.

Na área com 6 anos, as classes de 5 a 10 cm e de 10 a 15 cm reúnem 141 e 64 indivíduos, respectivamente, correspondem a 82,3 % do total; até 20 cm de DAP a proporção alcança 90,8 % (249 indivíduos no total). Não há registros acima de 45 cm e ocorre apenas um indivíduo entre 40 e 45 cm, possivelmente remanescente da área, reforçando o caráter inicial do povoamento.

Com 11 anos, o padrão se mantém, mas com aumento da ocupação das classes intermediárias. As duas menores classes somam 333 indivíduos, equivalentes a 75,7 % do total, e 85,0 % concentram-se até 20 cm de DAP (440 indivíduos). Já há presença nas classes de 35 a 40, 40 a 45 e 45 a 50 cm, ainda em baixa frequência (5, 1 e 1 indivíduo), indicando início de formação de estratos superiores.

Aos 16 anos, continua dominada por árvores finas, porém com sinais claros de avanço estrutural. As classes de 5 a 15 cm totalizam 377 indivíduos, 81,1 % do total, e 90,5 % situam-se até 20 cm de DAP (465 indivíduos). Há indivíduos nas classes de 35 a 50 cm, inclusive 3 entre 40 e 45 cm e 2 entre 45 e 50 cm.

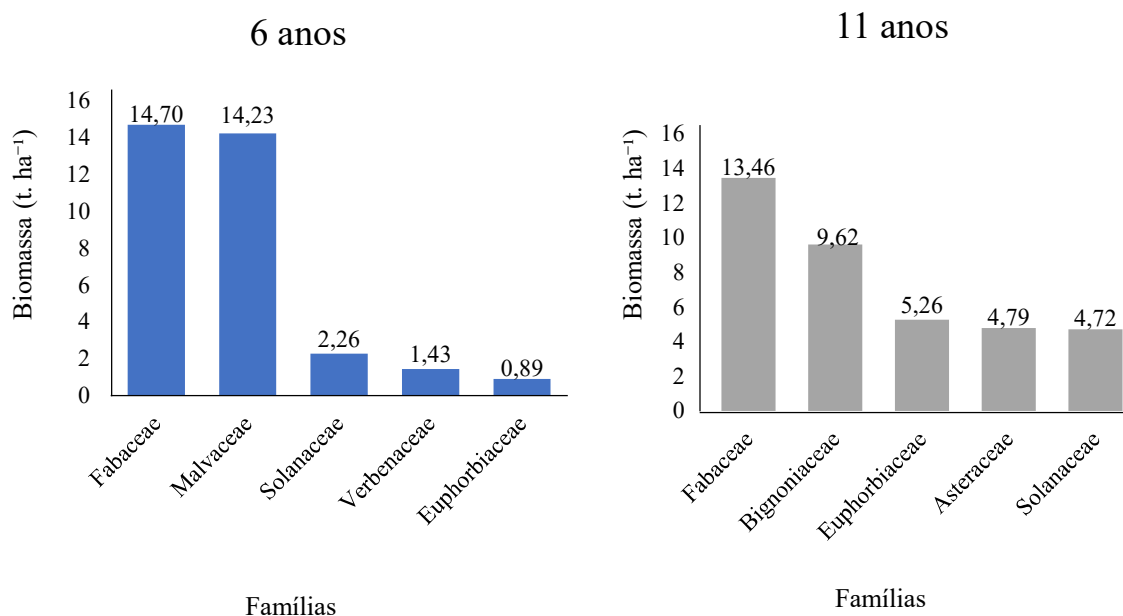
Na Monitorado, com 21 anos, observa-se menor densidade espacial quando comparado com as outras. As classes de 5 a 15 cm concentram a maioria dos indivíduos, o que se é esperado, reforçando o padrão de J invertido, 65,2 % (179 e 70), mas a participação de classes intermediárias é maior que nas áreas mais jovens: 50 indivíduos em 15 a 20 cm, 32 em 20 a 25 cm e 27 em 25 a 30 cm. Notam-se árvores nas classes de 35 a 50 cm, incluindo quatro indivíduos entre 45 e 50 cm (382 indivíduos no total).

A distribuição exponencial negativa, típica de áreas de floresta natural, resulta do balanço entre recrutamento e mortalidade e tende a persistir com o avanço da sucessão, enquanto cresce gradualmente a participação de classes de maior diâmetro (Brown; Lugo, 1990; Guariguata; Ostertag, 2001). Os resultados obtidos na REGUA são consistentes com estudos em Floresta Ombrófila Densa, nos quais prevalecem as menores classes de DAP e aumento de árvores de maior diâmetro à medida que a estrutura se complexifica (Paula e Soares, 2011; Dutra 2025).

Os resultados mostram a trajetória de ganho estrutural ao longo do gradiente etário, com aumento dos valores médios de DAP entre 6 e 21 anos, acompanhado por elevação da biomassa média por indivíduo e do carbono médio (Figura 3). As diferenças entre idades observadas aqui são consistentes com faixas reportadas para a Mata Atlântica/Neotrópicos em idades equivalentes, com variações explicadas por solo, clima e histórico de uso (Cunha et al., 2009; Azevedo et al., 2018).

4.4 Contribuição das Famílias para o Estoque de Biomassa

A família Fabaceae domina o estoque em todas as idades e concentra os maiores valores absolutos, reforçando seu papel estruturante no acúmulo de biomassa acima do solo. Aos 6 anos, Malvaceae ainda apresenta contribuição expressiva; aos 11 anos, Bignoniaceae e Euphorbiaceae ampliam sua participação; aos 16 anos, a dominância de Fabaceae se intensifica e as demais famílias passam a registrar valores muito inferiores, sinalizando possível filtragem ambiental e competição mais acirrada; aos 21 anos, além de Fabaceae, sobressaem Meliaceae, Primulaceae, Lauraceae (Figura 5).



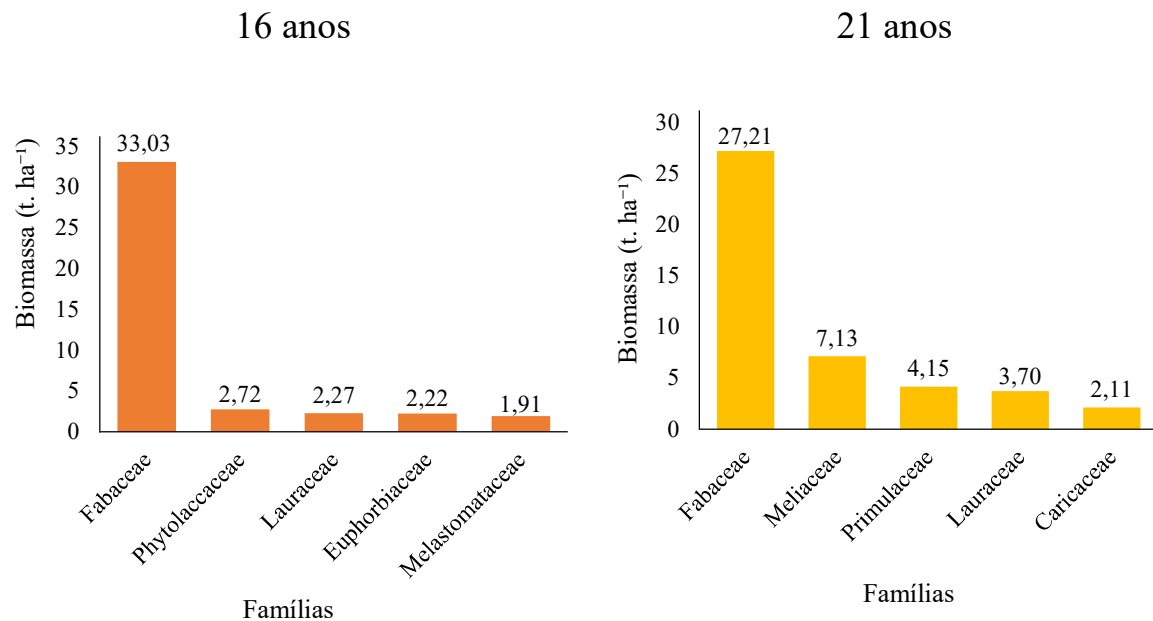


Figura 5 - Famílias botânicas com maiores estoques de biomassa acima do solo (t. ha⁻¹) por idade de restauração (6, 11, 16 e 21 anos) nas áreas de restauração da REGUA, Cachoeiras de Macacu, RJ.

Os padrões encontrados para a biomassa nas diferentes idades foram coerentes com encontrados por Azevedo *et al.* (2018), resultados mostraram que a maior parte da biomassa aérea estava concentrada em espécies da família Fabaceae, muitas delas pioneiras, que chegaram a representar mais de 50% da biomassa viva nas áreas restauradas. Esses autores destacam que Fabaceae cresce rápido, fixa nitrogênio e ajuda a enriquecer o solo, o que favorece o acúmulo de biomassa e a regeneração de outras espécies. Isso ajuda a explicar por que, no meu estudo, Fabaceae domina a biomassa nas idades mais jovens (6 e 11 anos) e continua com valores muito altos mesmo nas idades mais avançadas.

Por outro lado, Silva *et al.* (2018), encontrou em floresta de formação secundária, estoques elevados de biomassa e carbono, com forte participação de espécies secundárias e de diferentes famílias, e não de um único grupo dominante. Algo semelhante começa a aparecer aos 16 e 21 anos, quando famílias como Meliaceae, Lauraceae e outras passam a contribuir mais para a biomassa, embora Fabaceae ainda seja a principal. Assim, os resultados sugerem uma trajetória coerente com a literatura: primeiro um forte papel de Fabaceae na fase de rápido acúmulo de biomassa e, com o avanço da idade, uma participação maior de outras famílias típicas de estágios sucessionais mais avançados.

5. CONCLUSÃO

A família Fabaceae se destaca em todas as idades avaliadas, reunindo várias das espécies com maior biomassa por indivíduo e estoque de carbono, o que reforça seu papel estruturador do dossel e central na dinâmica de restauração da área.

Ao longo do gradiente etário, observa-se uma clara substituição de espécies pioneiras e secundárias iniciais de rápido crescimento, como *Joannesia princeps*, *Ceiba speciosa* e *Guazuma ulmifolia*, por secundárias de maior porte, como *Anadenanthera peregrina*, *Piptadenia gonoacantha* e *P. reticulata*, culminando na maior contribuição de espécies de características clímax, como *Cariniana legalis*, na fase mais avançada.

Os valores de incremento médio anual indicam que, nos estágios jovens, o ganho de biomassa é impulsionado por espécies de crescimento rápido, enquanto nas idades intermediárias e avançadas o IMA se mantém em níveis relevantes graças a secundárias de maior porte e a espécies clímax, que sustentam o acúmulo contínuo de biomassa e carbono.

Em conjunto, esses resultados mostram que a restauração está conduzindo a área a estágios sucessionais mais maduros, com aumento consistente da biomassa, consolidação estrutural do dossel e maior eficiência no sequestro de carbono ao longo do tempo.

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.

ARAÚJO, Y. R. V.; MOREIRA, Z. C. G.; NEVES, A. I. das. Estoque de carbono e de biomassa em vegetação com diferentes estágios de regeneração e alterações antrópicas em área urbana. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 46-61, 2020.

AZEVEDO, A. D. de. **Composição florística e estoque de carbono em áreas de recuperação da Mata Atlântica na bacia do rio Guapiaçu, Cachoeiras de Macacu, RJ**. 2012. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

AZEVEDO, A. D. de; FRANCELINO, M. R.; CÂMARA, R.; PEREIRA, M. G.; LELES, P. S. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 2, p. 183-194, 2018.

BAIS, C. R. **Tamanho de parcelas para quantificação de biomassa e carbono em uma Floresta Ombrófila Densa na Mata Atlântica**. Dissertação de Mestrado. ESALQ, USP. Piracicaba, SP. p.74, 2008.

BRANCALION, P. H. S. *et al.* Maximizing biodiversity conservation and carbon stocking in restored tropical forests. **Conservation Letters**, [S. l.], v. 11, n. 4, e12454, 2018.

BRANCALION, P. H. S.; HOLL, K. D. Guidance for successful tree planting initiatives. **Journal of Applied Ecology**, [S. l.], v. 57, n. 12, p. 2349-2361, 2020.

BRASIL, **Resolução CONAMA Nº 6, de 04 de maio de 1994**. Determina a apresentação de parâmetros mensuráveis para análise dos estágios de sucessão ecológica da Mata Atlântica. Diário oficial da União, Brasília, Nº101, 30 de maio de 1994, Seção 1, páginas 7913-7914.

BROWN, S.; GILLESPIE, A.J.R.; LUGO, A.E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science**, Bethesda, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989

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.

BURGER, D. M.; DELITTI, W. B. C. Biomassa da Mata Ciliar do Rio Mogi Guaçu. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 429-435, 1999.

CAPELLESSO, E. S. et al. Co-benefits in biodiversity conservation and carbon stock during forest regeneration in a preserved tropical landscape. **Forest Ecology and Management**, v. 492, 2021.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Manual de capacitação sobre mudança do clima e projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Brasília: CGEE, 276 p, 2008.

CHAVE, J. *et al.* Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.

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

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

CHAZDON, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, [S. l.], v. 2, n. 5, e1501639, 2016.

CUNHA, G. de M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; VASCONCELOS, S. S. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em florestas montanas da Mata Atlântica na região norte-fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1175-1185, 2009.

DAVID, H. C. *et al.* The tropical biomass & carbon project: an application for forest biomass and carbon estimates. **Ecological Modelling**, [S. l.], v. 472, p. 110067, 2022.

DINIZ, A. R. *et al.* Biomassa, estoques de carbono e de nutrientes em estádios sucessionais da Floresta Atlântica, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 443-451, 2015.

DUTRA, M. G. da S. **Estoques de biomassa e de carbono em áreas de restauração florestal na Reserva Ecológica de Guapiaçu**. 2025. 35 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2025.

FEARNSIDE, P.M. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 80, n. 1-3, p. 21-34, 1996.

FRIEDLINGSTEIN, P. *et al.* Global carbon budget 2022. **Earth System Science Data**, [S. l.], 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, p. 64, 2024.

FORRESTER, D. I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. **Forest Ecology and Management**, v. 312, p. 282–292, 2014

FONSECA, N. C. *et al.* Carbon stock in aboveground biomass and necromass in the Atlantic Forest: an analysis of data published between 2000 and 2021. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 96, n. 1, e20220761, 2024.

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

GARDON, F. R.; SANTOS, R. F. DOS; RODRIGUES, R. R. Brazil's forest restoration, biomass and carbon stocks: A critical review of the knowledge gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 462, 2020

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

HOFFMANN, J. A. *et al.* Restoring forest landscape connectivity: why, where, and how? In: LAPIN, K.; OETTEL, J.; BRAUN, M.; KONRAD, H. (eds.). **Ecological connectivity of forest ecosystems**. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 265-295, 2025.

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. **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.

JOLY, C. A. *et al.* Biodiversity conservation research, training, and policy in São Paulo State. **Biota Neotropica**, [S. l.], v. 14, n. 1, e20130045, 2014.

LIMA, J. A. de S.; PEREZ, D. V. **Sucessão florestal sob influência do solo no Guapiaçu/RJ**. 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1019674/sucessao-florestal-sob-influencia-do-solo-no-guapiacurj>. Acesso em: 20 out. 2025.

LIRA, P. K.; PORTELA, R. de C. Q.; TAMBOSI, L. R. Land-cover changes and an uncertain future: will the Brazilian Atlantic Forest lose the chance to become a hopespot? In: MARQUES, M. C. M.; GRELLE, C. E. V. (eds.). **The Atlantic Forest: history, biodiversity, threats and opportunities of the mega-diverse forest**. Cham: Springer, p. 233-251, 2021.

LOCKE, M.; NUNES, M. F. S. Q. da C. Indicadores ambientais como ferramenta de avaliação da gestão sustentável: o caso da Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA)-RJ. **Gestão e Gerenciamento**, [S. l.], n. 35, ago. 2025.

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.

MIRANDA, D. L. C. de ; MELO, A. C. G. de; SANQUETTA, C. R. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamentos de restauração. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 679-689, 2011.

MONTEIRO JUNIOR, J. J. **Efeito das mudanças no padrão de precipitação na área total e biomassa da Mata Atlântica e Caatinga**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências - Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024.

MORES, G. J. *et al.* Biomass and carbon stocks in restored Atlantic Forests: a systematic review. **Restoration Ecology**, Hoboken, v. 33, n. 4, e70231, 2025. DOI: 10.1111/rec.70231.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, [S. l.], v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, p. 246-253, 1997.

PAN, Y. *et al.* The structure, distribution, and biomass of the world's forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, [S. l.], v. 44, n. 1, p. 593-622, 2013.

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**, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 321-334, 2011.

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

REGUA. RESERVA ECOLÓGICA DE GUAPIAÇU. **Sobre a REGUA**. REGUA, 2024. Disponível em: <https://regua.org/sobre-a-regua/>. Acesso em: 22 set. 2025.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**, 2025. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/consulta/>. Acesso em: 09 set. 2025.

RESENDE, A. F. *et al.* Forest restoration. In: LEVIN, S. A. (ed.). **Encyclopedia of biodiversity**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, p. 1-41, 2022.

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**, [S. l.], v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009.

ROZENDAAL, D. M. A. *et al.* Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. **Science Advances**, Washington, v. 5, n. 3, eaau3114, 2019.

SANQUETTA, C.R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILLIOTO, M.A.B.; GOMES, F.S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 119-140

SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; BARBIERI, S. **Quantificação da biomassa e do conteúdo de nutrientes no corte raso de uma floresta de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze. na região de Quedas do Iguaçu-PR**: relatório de pesquisa. Santa Maria: UFSM, 2002.

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: 22 set. 2025.

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.

TANIZAKI, K; MOULTON, T. P. **A fragmentação da Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro e a perda de biodiversidade**. In: BERGALLO, H. G.; ROCHA, C. F. D.; ALVES, M. A. S.; VAN SLUYS, M. (Org). A fauna ameaçada de extinção do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: EDUERJ, p.23-35, 2000.

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.

VIEIRA, S. A. *et al.* Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 21-29, 2008.

VILLANOVA, P. H. *et al.* Carbon stock growth in a secondary Atlantic Forest. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 43, n. 4, e430402, 2019.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma Floresta Estacional Decidual em Itaara, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 419-425, 2006.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite IKONOS II**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ZANNE, A. E. *et al.* Global wood density database. **Dryad Digital Repository**, 2009. DOI: 10.5061/dryad.234. Disponível em: <https://datadryad.org/dataset/doi:10.5061/dryad.234>. Acesso em: 23 nov. 2025.