



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

BRUNA MARIA DA SILVA BASTOS

**ESTOQUE DE CARBONO NA MADEIRA DE DIFERENTES DENSIDADES
BÁSICAS EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA**

BELÉM-PA

2024

BRUNA MARIA DA SILVA BASTOS

**ESTOQUE DE CARBONO NA MADEIRA DE DIFERENTES DENSIDADES
BÁSICAS EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, como parte das exigências do curso de mestrado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Ciências Florestais.

Orientadora: Dra. Gracialda Costa Ferreira

Co-orientador: Dr. Thiago de Paula Protásio

BELÉM-PA

2024

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

- B327e Bastos, Bruna Maria da Silva
ESTOQUE DE CARBONO NA MADEIRA DE DIFERENTES DENSIDADES BÁSICAS EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA / Bruna Maria da Silva Bastos. - 2024.
65 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2024.
Orientador: Profa. Dra. Gracialda Costa Ferreira
Coorientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio.
1. Fixação de carbono. 2. Estoque de biomassa. 3. Propriedade física. I. Ferreira, Gracialda Costa, *orient.* II. Título
-

BRUNA MARIA DA SILVA BASTOS

**ESTOQUE DE CARBONO NA MADEIRA DE DIFERENTES DENSIDADES
BÁSICAS EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, como parte das exigências do curso de mestrado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Ciências Florestais.

Data da Aprovação: 20/ 02 /2024

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **GRACIALDA COSTA FERREIRA**
Data: 20/03/2024 14:59:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Gracialda Costa Ferreira - Orientadora
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Documento assinado digitalmente
 **LINA BUFALINO**
Data: 20/03/2024 16:50:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Lina Bufalino - 1º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Documento assinado digitalmente
 **MARCELA GOMES DA SILVA**
Data: 20/03/2024 18:02:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcela Gomes da Silva - 2º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Documento assinado digitalmente
 **JULIANA LIVIAN LIMA DE ABREU**
Data: 20/03/2024 17:20:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Juliana Livian Lima de Abreu - 3º Examinador
Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade.- SEMAS

A Deus, pela vida e bênçãos infinitas

Agradeço

*À minha mãe Maria do Socorro da Silva Bastos e meu pai José Ferreira Bastos (in
memorian)*

Dedico

À minha família

Anderson Carvalho & André Carvalho

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo de maravilhoso que proporciona em minha vida.

À virgem Maria por sua imensa intercessão.

À minha família por incentivar e ser minha base em tantos momentos, em especial a minha mãe Maria Bastos e irmã Brena Bastos, minhas protetoras e amigas. Sempre me apoiam quando penso que tudo está perdido e me dão forças para seguir. Agradeço à Deus pela vida e saúde delas.

Aos amigos que a Universidade proporcionou-me, Rayssa, Italo, Suellen, Paulo, Vália, Gustavo, Jhonathan, Rafaela Ceretta, Sarah, Valter, Leila, Soany, Alana, Thainá, Lena, Júlia, Nathalia, Beatriz, Mie, Tayssa, Sr. Alfredo, Sr. Roxo e a todos que não citei, mas sabem de sua importância, pelo companheirismo, carinho, conversas, risadas e muitas coisas que aconteceram nesses últimos dois anos, levarei vocês para o resto da vida em meu coração.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Gracialda Costa Ferreira pela paciência, compreensão e por transmitir tanta segurança. E por nunca se recusar ao atendimento, mesmo em horários não comerciais.

Ao meu Coorientador, prof. Dr. Thiago de Paula Protásio, pela facilidade de transmitir seus conhecimentos e auxiliar para que este trabalho desse certo.

Ao querido prof. Dr. Michael Douglas pela amizade e colaborações valiosas neste estudo. Que Deus o abençoe.

À empresa Blue Timber, pelo fornecimento do material para essa pesquisa e parceria, desde a coleta ao transporte do material. E pelas amizades que fiz em campo.

A CAPES pela concessão de bolsa para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal Rural da Amazônia pela oportunidade de realização da pós-graduação para obtenção de título de mestre.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, toda a equipe envolvida, que colaboram para o crescimento do programa na UFRA.

Agradeço de todo o coração a todos que me acompanharam nessa jornada, em busca da qualificação profissional e colaboraram direta e indiretamente com a minha formação.

O tamanho dos seus sonhos deve sempre exceder a sua capacidade de alcançá-los. Se os seus sonhos não te assustam, eles não são grandes o suficiente.”

Ellen Johnson-Sirleaf

RESUMO

O carbono está presente nas árvores desde os tempos remotos, quantificar o seu estoque no xilema secundário e casca de espécies florestais nativas na Amazônia, colabora para o avanço em pesquisas e nas mitigações das mudanças climáticas. A densidade básica e a estrutura química da madeira são características que podem trazer estas informações, por estarem diretamente relacionada a diversos usos, sendo um fator de qualidade importante na seleção das espécies. Neste contexto, esta pesquisa objetiva determinar o teor de carbono (C) estocado na madeira de doze principais espécies colhidas em planos de manejo florestal no Estado do Pará, provendo informações detalhadas que possam contribuir com a literatura. As espécies selecionadas constam nas Autorização de Exploração Florestal (AUTEF) de uma Unidade de Manejo Florestal sob contrato de concessão florestal, na Floresta Estadual do Paru - PA. As 12 espécies representam os maiores valores de volume colhidos para fins comerciais nos últimos 3 anos. Para cada espécie foram selecionadas três (3) árvores, com diâmetro à altura do peito de 50-150 cm, totalizando 36 árvores (12 espécies x 3 árvores). De cada árvore, foram obtidos discos com 10 cm de espessura, na posição da base da árvore (0%). Os discos foram levados para o laboratório de Taxonomia de Árvores da Universidade Federal Rural da Amazônia para as análises de densidade básica e teor de C. De cada disco foram retiradas duas cunhas opostas, uma para determinar a DB e a outra para o teor de C. Os dados de DB da madeira foram testados quanto a normalidade e homocedasticidade de variância pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, ambos ao nível de 5% de probabilidade. Utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) para verificar a existência de diferença entre a densidade básica das espécies. A determinação da densidade da madeira indicou que 66,7% das espécies tem densidade alta (acima de $0,730 \text{ g.cm}^{-3}$), enquanto duas obtiveram a categoria de baixa densidade ($\leq 0,550 \text{ g.cm}^{-3}$) e outras duas com densidade média ($\geq 0,730 \text{ g.cm}^{-3}$). Os valores médios para a densidade básica, entre as espécies variaram de $0,38 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$ para *Cedrela odorata* L. e *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose, respectivamente. Observou-se uma amplitude nos resultados de teor de carbono. As espécies como *A. leiocarpa* (61,30%), *M. elata* (55,22%) e *Mezilaurus synandra* (55,53%) têm uma porcentagem muito alta de teor de carbono na casca em relação ao carbono estocado na madeira. Isso indica que estas espécies podem armazenar uma quantidade significativa de carbono em sua casca. Já o maior teor de carbono na madeira foi em *H. serratifolius* (62,97%) diferindo significativamente das outras espécies, enquanto o menor valor foi para *Micropholis venulosa* (43,96%). O teor de C estocado na madeira difere entre espécies e também entre a madeira e a casca de uma mesma espécie, e o uso de uma taxa fixa, sub ou superestima o C na madeira das árvores da floresta Amazônica.

Palavras-chave: fixação de carbono, estoque de biomassa, propriedade física.

ABSTRACT

Carbon has been present in trees since ancient times, quantifying its stock in the secondary xylem and bark of native forest species in the Amazon contributes to advancements in research and climate change mitigation. Basic density and wood chemical structure are characteristics that can provide this information, as they are directly related to various uses, being an important quality factor in species selection. In this context, this research aims to determine the carbon content (C) stored in the wood of twelve main species harvested in forest management plans in the State of Pará, providing detailed information that may contribute to the literature. The selected species are listed in the Forest Exploration Authorizations (AUTEF) of a Forest Management Unit under forest concession contract, in the Paru State Forest, in the State of Pará. The 12 species represent the highest volume values harvested for commercial purposes in the last 3 years. For each species, three (3) trees were selected, with a diameter at breast height of 50-150 cm, totaling 36 trees (12 species x 3 trees). From each tree, discs with 10 cm thickness were obtained in the field, at the tree base position (0%). The discs were taken to the Tree Taxonomy Laboratory of the Federal Rural University of the Amazon for basic density and C content analyses. From each disc, two opposite wedges were removed, one to determine the basic density and the other for the C content. The wood basic density data were tested for normality and variance homoscedasticity by the Shapiro-Wilk and Bartlett tests, respectively, both at the 5% error probability level. The non-parametric Kruskal-Wallis test ($p < 0.05$) was used to verify the existence of difference between the basic density of the species. The wood density determination indicated that 66.7% of the species have high density (above 0.730 g.cm^{-3}), while two obtained low density category ($\leq 0.550 \text{ g.cm}^{-3}$) and two others with medium density ($\geq 0.730 \text{ g.cm}^{-3}$). The average values for basic density, among species, ranged from 0.38 g.cm^{-3} to 0.92 g.cm^{-3} for *Cedrela odorata* L. and *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose, respectively. A range of results was observed for carbon content. Species such as *A. leiocarpa* (61.30%), *M. elata* (55.22%), and *Mezilaurus synandra* (55.53%) have a very high percentage of carbon content in the bark compared to carbon stored in the wood. This indicates that these species can store a significant amount of carbon in their bark. Conversely, the highest carbon content in wood was found in *H. serratifolius* (62.97%), differing significantly from other species, while the lowest value was for *Micropholis venulosa* (43.96%). The C content stored in wood differs between species and also between wood and bark of the same species, and the use of a fixed rate underestimates or overestimates the C stored in the wood of Amazon forest trees.

Key-words: carbon fixation, biomass stock, physical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração esquemática do ciclo do carbono nas árvores.	17
Figura 2 - Ilustração esquemática da porcentagem de carbono nas diferentes partes das árvores.	19
Figura 3 - Localização da floresta pública do Paru sob concessão florestal no Estado do Pará.	26
Figura 4 - Coleta de amostras: a) Fuste no pátio de estocagem; b) Disco de madeira com 10 cm de espessura; c) confecção de cunhas para pesquisa.	29
Figura 5 – Amostras em cunhas: a) Cunhas; b) subamostras das cunhas.	31
Figura 6 – Procedimento laboratorial para determinação da densidade da madeira.	32
Figura 7 - Procedimentos para determinação da densidade básica da madeira: a) Amostras submergidas em água para saturação; b) Pesagem na balança semi-analítica c) Cunhas em estufa para secagem.....	32
Figura 8 – Procedimento laboratorial para a determinação do teor de carbono pelo método direto.....	33
Figura 9 - Procedimento para determinar o teor de carbono: a) Retiradas de lascas de madeira com estilete; b) Lascas de madeiras; c) Moinho analítico básico IKA11 de três facas d) Peneiras de 40 e 60 mesh.	34
Figura 10 – Análise de teor de carbono: a) material em cadinhos; b) Equipamento para determinação do teor de carbono, analisador elementar vario PYRO cube; c) local de inserção dos cadinhos; d) computador acoplado.	35
Figura 11 – Valores médios de densidade básica obtidos para a madeira das espécies em estudo.	37
Figura 12 - Biplot do componente principal da densidade básica da madeira (g cm^{-3}), diâmetro à 1,30 m do solo (cm) e altura comercial (m) para 36 árvores de 12 espécies florestais nativas da Amazônia.....	41
Figura 13 – Teor de Carbono na madeira e na casca das doze espécies estudadas.....	43
Figura 14 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as características dendrométricas e análise elementar para as doze espécies estudadas.....	47
Figura 15 - Diagrama das análises laboratoriais para determinação da densidade básica e teor de carbono na madeira pelo método direto.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de madeira das espécies selecionadas, oriundas de planos de manejo no Estado do Pará.	25
Tabela 2 - Números de árvores inventariadas, colhidas e valores de volume por metro cúbico inventariado e colhido na área de efetivo manejo UPA 3 = 3.535,2631.	27
Tabela 3 - Espécies mais exploradas no manejo florestal da área da UMF III da FLOTA do Paru.	28
Tabela 4 – Espécies amazônicas amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Blue Timber, Monte Alegre, Pará, Brasil.	30
Tabela 5 - Classificação da densidade básica da madeira.	33
Tabela 6 - Comparação dos valores médios de densidade básica encontrados neste estudo com os dados da literatura	38
Tabela 7 – Estimativas de carbono exportado em doze espécies florestais, comparando os valores reais de carbono com as estimativas baseadas na literatura.	48
Tabela 8 – Médias do teor de carbono nas diferentes classes de densidade básica.	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS	14
2.1 Questões científicas e Hipóteses	14
2.2 Objetivo Geral	14
2.3 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 A floresta e os serviços ecossistêmicos	14
3.2 Estoque de carbono na madeira	16
3.3 Como o dióxido de carbono age causando o efeito estufa?	17
3.3.1 Influência do estoque de C no ambiente	20
3.3.2 Influência da densidade básica	21
3.4 Contribuição do manejo florestal na diminuição das taxas de incremento de CO₂	22
3.5 Produção de madeira de doze espécies no Estado do Pará	24
4 MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Ocorrência das espécies na área de estudo	27
4.2 Coleta de dados	28
4.3 Determinação da densidade básica da madeira	31
4.4 Determinação do teor de carbono	33
4.6 Análises estatísticas	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Densidade básica da madeira para as doze espécies florestais nativas da Amazônia	36
5.2 Percentual de carbono estocado nas doze espécies florestais estudadas	42
5.3 Efeitos de espécie e das características de crescimento no estoque de carbono	46
6 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
APÊNDICES	65

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as florestas ocupam aproximadamente 58,5% de seu território, sendo que a floresta Amazônica, predominantemente composta por Floresta Ombrófila Densa, representa uma parcela significativa desse total. Além de serem um dos ecossistemas mais complexos e biodiversos do mundo, as florestas tropicais desempenham um papel crucial na regulação do clima global, na provisão de recursos naturais e na prestação de serviços ecossistêmicos para os seres humanos (SFB, 2019).

As florestas tropicais apresentam uma grande biodiversidade representando um dos ecossistemas mais complexos do mundo (REZENDE *et al.*, 2018; ZWIENER *et al.*, 2021). Além do mais, tais florestas desempenham um importante papel ecológico, social e econômico atuando na regulação climática (CARLUCCI; MARCILIO-SILVA; TOREZAN, 2021), suprindo recursos naturais e prestando vários serviços ecossistêmicos para os seres humanos (LOVERIDGE *et al.*, 2021).

No âmbito das discussões globais quanto às mudanças climáticas, países desenvolvidos e emergentes concordam que as florestas possuem um papel fundamental para a redução das emissões dos Gases do Efeito Estufa – GEE (FAO, 2010). Estudos mostram que as florestas tropicais têm uma capacidade significativa de absorver e armazenar carbono, contribuindo assim para a mitigação dessas mudanças globais. O nível de CO₂ armazenado na biomassa das florestas, compreende uma absorção líquida de 7,6 bilhões de toneladas por ano (HARRIS *et al.*, 2021).

O estudo de estoque de carbono das árvores é essencial para predizer a quantidade de teor de carbono na biomassa vegetal das florestas, e, assim, poder ser utilizada como ferramenta na implementação de projetos de carbono, além de uso nas demais medidas de mitigação às mudanças climáticas, sobretudo no processo de compra de crédito de carbono (ARAÚJO; SILVA; ROCHA; SANQUETTA, 2021).

A produção de oxigênio e a estocagem de carbono ocorrem por meio da fotossíntese, quando os compostos de carbono assimilados são estocados nas árvores na forma de madeira, folhas, e raízes, enquanto o oxigênio é liberado para a atmosfera. Nesse sentido, as florestas são importantes para o equilíbrio do estoque global de carbono (MIRANDA, 2008). A quantidade do carbono orgânico existente nas florestas é importante, uma vez que, durante a permanência dessas áreas verdes, encontra-se um grande acúmulo de carbono fixado que deixa de estar presente na atmosfera.

O aumento da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa despertou preocupações de cientistas e líderes mundiais. Em função disso, este tema vem sendo alvo de discussão em

diversas conferências pelo mundo, com a finalidade de estabelecer metas para conter essas emissões (DALLAGNOL *et al.*, 2013). A partir deste cenário, torna-se evidente a importância da preservação das florestas nativas, do florestamento e do reflorestamento como alternativas para a diminuição da concentração de gases poluentes atmosféricos (BARBOSA *et al.*, 2013). Isso justifica-se devido ao fato de as florestas realizarem a captura e fixação do carbono, favorecendo-a dessa forma, e à comercialização de créditos de carbono (GORGENS *et al.*, 2005).

Mendoza *et al.* (2012), trabalhando com quantificação de carbono em *Simarouba amara* Aubl, *Tabebuia impetiginosa* (Mart. ex DC.) Standl, e *Tectona grandis* L.F, verificaram que o teor de carbono no lenho não variou em função dos compartimentos das árvores (raiz, troncos e galhos), e que a *S. amara* apresentou o maior percentual (45,37%), seguida de *T. impetiginosa* (44,44%) e *T. grandis* (41,27%).

Já o estudo realizado por Silva *et al.* (2014), que analisou padrões de teores de carbono em diferentes espécies florestais e seus compartimentos, encontrou em 334 amostras de *Eucalyptus*, diferenças entre os valores para os seguintes compartimentos avaliados: casca (40,93%), folhas (48,46%), galho morto (43,79%), galho vivo (43,77%), madeira (43,24%) e raiz (42,59%).

Com a finalidade de retardar o aumento desenfreado do desmatamento, principalmente na Amazônia, o governo brasileiro instituiu as Unidades de Conservação (UCs), visando proteger, a biodiversidade, os serviços ambientais e as populações locais (NEPSTAD *et al.*, 2006; VITEL; FEARNSSIDE; GRAÇA, 2009). Juntamente com as UCs, criou-se o sistema de concessão de florestas públicas, permitindo o manejo dos recursos florestais madeireiros e não madeireiros dessas áreas, que mesmo protegidas pela legislação, encontram-se vulneráveis devido à antropização ao entorno destas áreas (SILVA, 2014).

A prática do manejo florestal é considerada uma boa alternativa para garantir a continuidade da produção de madeira. Não sendo necessária a alteração de uso de solo nas áreas manejadas, estas atividades proporcionam melhorias na qualidade de vida da população local, uma vez que o extrativismo gera emprego e renda (ÂNGELO *et al.*, 2014). Diante da importância econômica e social, a floresta amazônica presta serviços ambientais, atuando na manutenção da biodiversidade, do ciclo hidrológico, no armazenamento de carbono na forma de biomassa e na diminuição de emissão de gases poluentes (SILVA, 2014).

2 QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS

2.1 Questões científicas e Hipóteses

Q1: O teor de carbono na madeira varia entre a madeira e casca das árvores?

Q2: O teor de carbono varia entre doze espécies de uma floresta?

Q3: O percentual de carbono estocado na madeira e na casca difere entre espécies e classes de densidade?

H1: O xilema secundário e a casca apresentam diferentes teores de carbono.

H2: Espécies madeireiras, de diferentes classes de densidade da madeira, apresentam diferença no estoque de carbono.

2.2 Objetivo Geral

Determinar o estoque de carbono (C) para a madeira de doze espécies colhidas em planos de manejo florestal no Estado do Pará.

2.3 Objetivos específicos

- Analisar a variabilidade interespecífica do teor de carbono de doze espécies arbóreas da Amazônia.
- Analisar a variabilidade do teor de carbono entre a madeira e a casca de doze espécies arbóreas da Amazônia.
- Determinar o estoque de carbono (C), considerando a densidade e o teor de carbono da madeira das diferentes espécies.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A floresta e os serviços ecossistêmicos

Os ecossistemas florestais são constituídos de comunidades de plantas, animais e microrganismos que habitam uma área do ambiente e realizam interações como uma única unidade funcional. A formação pode ocorrer por comunidades terrestres como os campos naturais, florestas e/ou aquáticas como os rios, lagos e oceanos, e possuem diferentes graus de alteração em função das atividades humanas (EMBRAPA, 2010).

A definição de serviços ecossistêmicos (SEs) remota ao final dos anos 1960 e 1970 (HERMANN; SCHLEIFER; WRBK, 2011). Porém, a abordagem veio à tona a partir do Projeto Milênio. Solicitado pelo secretário-geral das Nações Unidas (ONU) Kofi Annan, em 2000, o projeto foi conduzido entre 2001 e 2005, envolvendo mais de 1.300 cientistas e 95 países e apresentou objetivo de avaliar as consequências que as mudanças nos ecossistemas trazem para o bem-estar humano e as bases científicas para subsidiar ações necessárias para melhorar a preservação e o uso sustentável desses ecossistemas (ASSOCIAÇÃO ECOSSISTÊMICA DO MILÊNIO, 2005; KUMAR, 2010).

As perspectivas de discussão sobre a importância dos serviços ecossistêmicos crescem à medida que as áreas florestais passam por grandes degradações, direcionando a uma necessidade e apelos internacionais que visam o controle dessas ações negativas (SANTOS, 2021). As florestas do mundo são responsáveis pelo fornecimento da maioria dos serviços ecossistêmicos, principalmente as áreas que possuem maiores extensões e continuidade preservada (TICKTIN, 2004; MAASS *et al.*, 2005). Esses serviços naturais são gerados a partir do equilíbrio e conectividade entre os fragmentos florestais.

As florestas são reservatórios de carbono, que possuem papel importante no contexto das mudanças climáticas. A alta capacidade de absorver dióxido de carbono atmosférico está entre os serviços que regulam as condições ambientais (ROMERO *et al.*, 2020). Estas florestas são de grande importância para o equilíbrio do estoque de carbono global, pois armazenam em suas árvores e no solo mais carbono do que a atmosfera (HOUGHTON, 1994; IPCC, 2000).

As florestas tropicais respondem por aproximadamente metade da produtividade primária de serviços ecossistêmicos do planeta; estoca cerca 90% do total de carbono nos ecossistemas terrestres; removem aproximadamente 30% do carbono introduzidos na atmosfera pelas atividades antrópicas anualmente (PAN *et al.*, 2013; BRANDO *et al.*, 2019); e retroalimentam as nuvens auxiliando no processo de formação de chuvas e controlam a temperatura em escala regional (NOBRE *et al.*, 2016).

A comunidade científica tem receio que as mudanças globais relacionadas ao clima e atividades antrópicas ameacem a existência (LOVEJOY; NOBRE, 2018) e os serviços prestados pelas florestas tropicais (BRANDO *et al.*, 2020). As florestas tropicais americanas, por exemplo, a Amazônia, lideram o ranking das taxas de perdas anuais absolutas de florestas com cerca de 39.900 Km², seguidas pelas florestas asiáticas com 22.000 Km² e africanas com 11.000 Km² (MALHI *et al.*, 2014).

O Estado do Amazonas, até o ano de 2010, possuía a maior extensão de Áreas Protegidas da Amazônia, com 798.808 km² de Unidades de Conservação (UCs) e Terras Indígenas (TI), seguido pelo Pará, com 686.384 km². Em termos relativos, o Amapá possuía a maior proporção de Áreas Protegidas (70,4%), seguido por Roraima, (58,2%) e Pará (55%). Por outro lado, os Estados com a menor proporção de Áreas Protegidas eram o Mato Grosso (19,8 %) e o Tocantins (21,4%) (IMAZON, 2012).

Na região Amazônica, a criação de áreas protegidas é uma importante estratégia para conservar os recursos naturais, e um dos pilares da política de redução do desmatamento (NOLTE *et al.*, 2013) que fez do Brasil um dos campeões mundiais em redução de emissões de gases do efeito estufa ($\approx 38\%$) entre 2005 e 2012 (ARAUJO; BARRETO, 2015; COHN *et al.*, 2014; FERREIRA; VENTICINQUE; ALMEIDA, 2005).

Esta região apresenta 27% de seu território protegido por UCs. As Terras Indígenas (TIs) na Amazônia Brasileira cobrem uma fração significativa da região, abrigando 173 etnias. Além de fundamentais para a reprodução física e sociocultural dos povos indígenas, são áreas importantes para a conservação da biodiversidade regional e global (CRISSOSTOMO *et al.*, 2015). Apesar desses evidentes benefícios prestados pelas TIs para o meio ambiente amazônico, o papel delas para a mitigação da mudança do clima e equilíbrio climático da região ainda é pouco reconhecido, mas destaca-se que as florestas sob a guarda dos povos indígenas na Amazônia Brasileira representam um imenso armazém de carbono de aproximadamente 13 bilhões de toneladas (CRISOSTOMO *et al.*, 2015).

3.2 Estoque de carbono na madeira

Os seres humanos apresentam carbono em suas moléculas orgânicas e a sociedade, a economia e os meios de transporte são constituídos em carbono (WHITE, 2016). Este elemento flui entre cada reservatório terrestre em uma troca chamada de ciclo biogeoquímico de carbono. Entretanto, após o período industrial, tem ocorrido um desequilíbrio nesse ciclo, o qual vem promovendo um dos mais sérios problemas que enfrentamos hoje: a mudança climática global (BERNER; LASAGA, 1989; STEPHENSON *et al.*, 2014; FISCHER, 2018).

Ocorre variação na proporção de carbono nos componentes da biomassa em função da espécie e idade da árvore. O carbono é um constituinte essencial de moléculas de glicose, manose, xilose, arabinose, unidades de fenil, fenil-propano, dentre vários outros compostos (SJÖSTRÖM, 1993). Essas são as unidades monoméricas básicas de importantes elementos macroscópicos que compõem a madeira: celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. (PEDRAZZI *et al.*, 2019).

A estrutura química da madeira apresenta a celulose e as hemiceluloses, polissacarídeos que desempenham a função de sustentar a parede celular, e a lignina, composto aromático, tridimensional, que na planta é essencial para o transporte de água e nutrientes dentro da estrutura vascular e confere sustentação e resistência (SOARES *et al.*, 2018; TAIZ; ZEIGER, 2013). A celulose, o principal componente da madeira, quimicamente é definida como um carboidrato complexo, é uma molécula linear não-ramificada polissacarídeo, formada por grandes cadeias de moléculas de glicose. Estes polímeros formam a parede celular da madeira e são responsáveis pela maioria das suas propriedades físicas, mecânicas e químicas (LEPAGE *et al.*, 1986).

Os componentes macromoleculares são responsáveis pela composição da parede celular, os extrativos, por outro lado, possuem baixo peso molecular e são tipicamente associados à biodegradabilidade, cor e flamabilidade da madeira. Quanto aos constituintes micromoleculares básicos, os principais elementos encontrados são: o carbono (49 a 50%),

oxigênio (44 a 45%), hidrogênio (6%) e nitrogênio (0,1 a 1,0%) (SOARES *et al.*, 2018; TAIZ; ZEIGER, 2013).

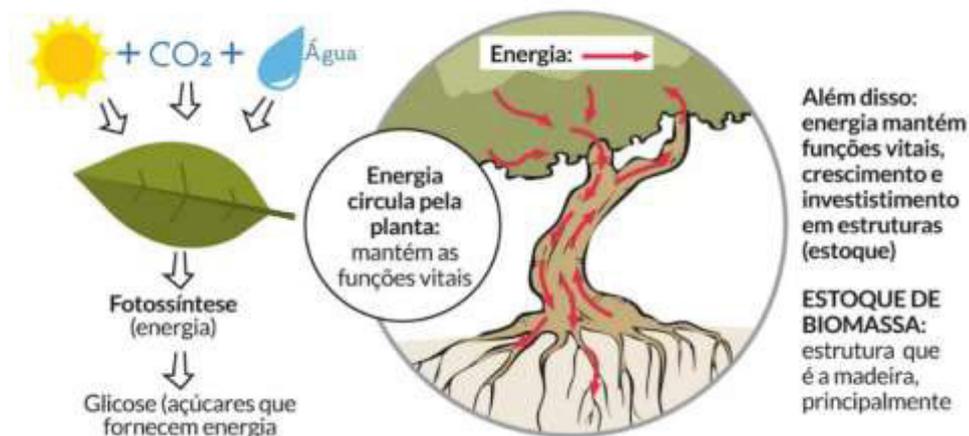
Para compreendermos melhor como as florestas funcionam, apesar de existirem diversos estudos com estimativa de estoque de carbono, realizar um estudo detalhado com a utilização da determinação da densidade básica para as madeiras e a partir do mesmo material realizar análises laboratoriais de teor de carbono é um trabalho que requer tempo e custos. Talvez, por este motivo existam mais pesquisas utilizando estimativas. Saber a quantidade de carbono presente na madeira de espécies nativas, promove um avanço na literatura e colabora para um melhor entendimento do comportamento das florestas ao realizarem a captura e fixação do carbono, além de auxiliar na capacidade de estocagem de carbono por espécie.

3.3 Como o dióxido de carbono age causando o efeito estufa?

Sabemos que um dos principais gases do efeito estufa (GEEs) é o dióxido de carbono (CO₂). De acordo com o quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em 2014, os gases derivados de carbono (CO₂ e CH₄) contribuíram com 91% das emissões globais de GEEs. Através da medição da abundância de todos os gases retentores de calor, o IPCC calculou que o CO₂ tem a maior força radiativa (RF), devido à sua propriedade de absorção de radiação infravermelha (IR). Este composto de carbono promove uma perturbação do equilíbrio da energia incidente e emergente do planeta, causando o aquecimento da superfície terrestre (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2006; MEEHL, 2007).

As plantas desempenham a função, primeiramente, de assimilar o CO₂ atmosférico através da fotossíntese, e transformar em açúcares. Essa energia circula pela planta para desempenhar suas funções vitais de crescimento e desenvolvimento (Figura 1). Nas florestas que estão em processo de crescimento, o montante de carbono sequestrado aumenta, estabilizando quando elas chegam a maturidade (BRASIL, 2012). Normalmente, cerca de metade dos produtos fotossintéticos brutos produzidos (GPP) são gastos por plantas em respiração autotrófica (Ra) para síntese e manutenção de células vivas, liberando CO₂ de volta para a atmosfera. Os produtos restantes de carbono (GPP - Ra) entram na produção primária líquida (NPP): folhagem, galhos, caules, raízes e órgãos reprodutivos de plantas (CANNELL; DEWAR, 1994).

Figura 1 – Ilustração esquemática do ciclo do carbono nas árvores.



Fonte: DILLY, 2021.

O xilema secundário desempenha uma função importante no estoque de carbono, e requer menor consumo energético e contribui para redução da emissão de GEE. O carbono sequestrado pelas florestas pode ser mantido na estrutura da madeira, desde que esse material não apodreça nem seja queimado (FOGGIATO, 2021).

O dióxido de carbono juntamente com outras moléculas, contribui para o efeito estufa na atmosfera. A energia provinda do sol é refletida pela superfície da terra e, nesse processo, é transformada em um comprimento de onda mais facilmente interceptado pelos GEEs, aprisionando o calor dentro da atmosfera, em vez de deixá-lo refletir no espaço. Assim, a contribuição do CO₂ para o efeito estufa varia entre 10 e 25% dependendo da localização, imediatamente atrás do vapor de água (NIBERT; GROPENGIESSER, 2014).

Quantificar o estoque de carbono presente nas florestas é uma ferramenta importante, para a implementação de projetos de carbono e outras medidas para diminuir os impactos relacionado às alterações climáticas em nível mundial, e processos de compra de crédito de carbono. O dióxido de carbono é considerado o gás de maior relevância no aumento do efeito estufa, fato atribuído à sua elevada concentração na atmosfera (KUMAR *et al.*, 2018).

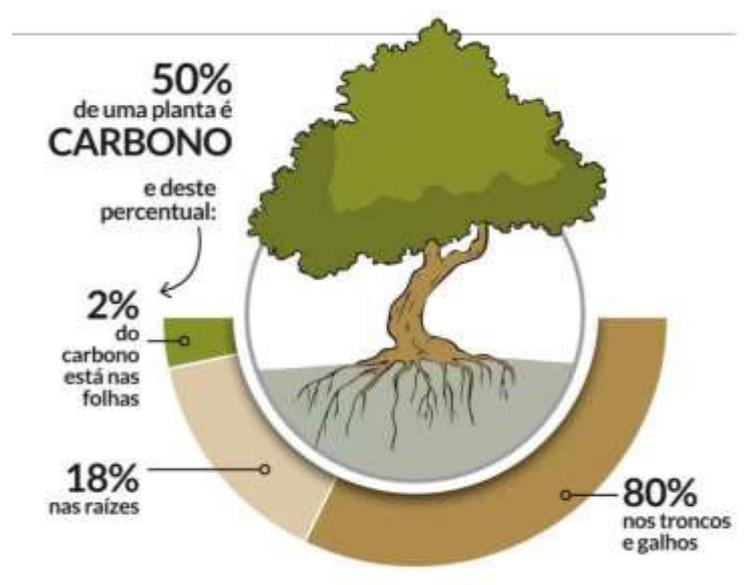
A estimativa da produtividade e o acúmulo de biomassa acima do solo em florestas tropicais é um cálculo que apresenta dificuldades, devido às suas particularidades como a diversidade de espécies arbóreas, variação na densidade da madeira e a arquitetura das árvores (CLARK *et al.*, 2001; KELLER; PALACE; HURTT, 2001; KETTERING *et al.*, 2001; CUMMINGS *et al.*, 2002). No entanto, vários estudos têm gerado alternativas para essas estimativas destacando os modelos alométricos consistentes utilizados sobretudo em florestas de terra firme da Amazônia (CUMMINGS *et al.*, 2002; CHAMBERS *et al.*, 2001; CHAVE *et al.*, 2005).

As metodologias para determinação da quantidade de carbono acumulado em povoamentos florestais, de modo geral, são baseadas no emprego de fatores e equações de

biomassa, a partir de dados de inventário florestal, como diâmetro, altura, volume, ou até mesmo densidade média, por espécie ou tipo florestal, que após estimarem a biomassa, permitem obter o carbono por meio de sua multiplicação pelo conteúdo do elemento presente na mesma (HIGUSHI *et al.*, 2004; CHAVE *et al.*, 2005; SOARES *et al.*, 2011; LINDNER; KARJALAINEN, 2007).

O carbono constitui aproximadamente 50% da massa seca das árvores e, deste percentual, cerca de 2% está presente nas folhas, 18% nas raízes e 80% nos troncos e galhos (Figura 2) (ALMEIDA; CAMPELO JÚNIOR; DILLY, 2021; FINGER, 2010). O processo de fixação de carbono, que pode ser usado pelo solo, oceano e florestas, é um dos mecanismos utilizados para minimizar os efeitos da emissão de gases CO₂ e para vegetação, funciona como um sumidouro de carbono, por meio do processo de fotossíntese, em que as plantas retiram o carbono presente na atmosfera e a introduzem em sua biomassa (MOGNON, 2011).

Figura 2 - Ilustração esquemática da porcentagem de carbono nas diferentes partes das árvores.



Fonte: DILLY (2021).

Estimativas errôneas de estoque de carbono podem ser evitadas se forem empregados teores de carbono determinados por analisadores elementares. Esse método possibilita determinações precisas da concentração de carbono na biomassa, porém as análises tem alto custo (SILVA *et al.*, 2015).

As informações sobre o teor e estoque de carbono por espécie apresentam uma grande relevância, visto que projetos voltados à restauração e a fixação de carbono empregando a

vegetação nativa podem ser baseados em espécies ou grupos funcionais que apresentem maior capacidade de estocar carbono (WATZLAWICK *et al.*, 2011).

A literatura tem demonstrado a importância de conhecer as espécies nativas e as técnicas de implantação e manejo como formas de se obter melhores resultados no seu estabelecimento e sustentabilidade, uma vez que tais práticas aumentam o desempenho fisiológico das plantas, devido a minimização do estresse ambiental (CAMPOE; STAPE; MENDES, 2010).

Santos *et al.* (2016), ao avaliarem os estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN, encontraram a grande diferença de porcentagem de carbono entre as espécies, afirmando que nenhuma espécie atingiu o valor de 50%.

3.3.1 Influência do estoque de C no ambiente

As florestas são importantes para a redução da concentração dos gases de efeito estufa. O conhecimento do potencial de estocagem de carbono nas florestas pode servir de subsídio para ações de redução da concentração dos gases na atmosfera, impulsionando o reflorestamento em áreas degradadas. Entretanto, existe variação na quantidade de carbono estocado pelas diferentes formações florestais encontradas nos biomas brasileiros (SANTOS *et al.*, 2016).

O estoque de carbono tem forte relação com a absorção do carbono atmosférico (CO₂) promovido pelas árvores através da fotossíntese, que fixam o carbono em sua estrutura interna, culminando com a produção de biomassa liberando oxigênio para o ambiente (TRUGILHO *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2015).

Este processo de sequestrar e fixar carbono foi lançado pela convenção do clima da ONU como instrumento de flexibilização dos compromissos de redução das emissões de GEE dos países com metas de redução (KEITH *et al.*, 2010). A interação complexa entre clima, solo e árvores, contribui com balanço de carbono da Amazônia (BESSA, 2019).

As medições diretas de fluxo de CO₂ com a técnica de covariância de vórtices indicam que as florestas tanto podem ser fontes, como sumidouros de carbono, dependendo, em parte, de quando tenha ocorrido o último distúrbio (HOUGHTON; HALL; GOETZ, 2009). Pode-se afirmar, portanto, que ela desempenha um papel ambíguo já que o tema ainda é uma incógnita no meio científico. Entretanto, é indiscutível o papel estratégico da região amazônica como provedora de serviços ecossistêmicos, que beneficia diretamente outras regiões do Brasil, da América do Sul e de outras partes do planeta (BESSA, 2019). Diferentemente de outros setores, onde o carbono faz uma viagem apenas de ida para a atmosfera, as florestas funcionam como

uma via de mão dupla, absorvendo carbono enquanto crescem ou se mantêm, e soltando quando degradadas ou desmatadas (HARRIS *et al.*, 2021).

Dentre as preocupações com o planeta, tem-se o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e o seu potencial em alterar o clima global, como um dos principais agravantes atualmente. Grande parte dessas emissões são originadas pela queima de combustíveis fósseis, porém a queima de florestas tropicais apresenta uma elevada contribuição para as emissões de carbono. O potencial das florestas tropicais capaz de afetar o fluxo de carbono para a atmosfera é enorme (GRAÇA, 1997; PHILLIPS; BRIENEN; RAINFOR, 2017).

A preservação e a restauração das florestas têm grande importância para conter a perda da biodiversidade, mitigar o avanço das mudanças climáticas e, assim, atingir as metas de desenvolvimento sustentável (WATSON *et al.*, 2018). Nos últimos 50 anos, as florestas intactas conjuntamente com os oceanos removeram cerca de 55% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono para a atmosfera (CIAIS *et al.*, 2013).

O Brasil, possui duas grandes categorias de UCs, as áreas de proteção integral, destinadas à preservação da biodiversidade, e as reservas de uso sustentável, que buscam equilibrar a conservação com o uso sustentável dos recursos naturais (MMA, 2022). O país possui Terras Indígenas (TIs) e territórios quilombolas que existem como santuários para povos indígenas e populações tradicionais, respectivamente (SOARES-FILHO *et al.*, 2010).

A contribuição das unidades de conservação para a economia nacional tem grande importância para reduzir as emissões de carbono por desmatamento evitado no Brasil. Estima-se que ao evitar um desmatamento de 18,6 milhões de hectares, as UCs contribuíram para a conservação de mais de 10,5 Giga toneladas (Gt) CO₂ eq. Este número corresponde a 4,6 vezes o total das emissões brasileiras de GEEs para o ano de 2016 e o estoque de carbono estimado teve o valor total em R\$ 130,2 bilhões de reais (MEDEIROS; YOUNG, 2018).

3.3.2 Influência da densidade básica

A densidade da madeira é uma característica complexa e resultante da combinação de diversos fatores ambientais. Existem vários estudos voltados para a sua relação com as dimensões das fibras, particularmente espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira primaveril e outonal e arranjo dos elementos anatômicos. A densidade é um importante contribuinte na determinação das demais propriedades da madeira, tais como resistências físicas e mecânicas que caracterizam diferentes espécies madeireiras (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

A densidade básica da madeira é calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado do xilema secundário. É uma propriedade com a capacidade de caracterizar madeiras

para diversos usos, apresenta métodos de fácil determinação, baixo custo e se correlaciona com as características físicas e mecânicas da madeira, que são pontos positivos deste atributo (SCANAVACA JÚNIOR; GARCIA, 2017).

Diferentes madeiras apresentam diferentes densidades, o que influencia diretamente nos seus usos potenciais (CARNEIRO, 2020). Ocorre variação da densidade básica dentro da árvore, tanto na direção radial, da medula para a casca, quanto no sentido base para o topo, assim é imprescindível sua análise como subsídio ao entendimento de sua qualidade e admite que a densidade da “substância madeira” é constante de $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ (BOWYER; SHMULSKY; HAYGREEN, 2007; FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971; OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005).

As espécies de crescimento rápido tendem a ter menor densidade de madeira e maior área foliar específica devido ao baixo investimento nos tecidos e metabolismo acelerado, enquanto para espécies que apresentam crescimento mais lento, ocorre o contrário, possuem maior densidade básica e menor área foliar (POORTER; BONGERS, 2006).

Santos *et al.* (2013), ao estudarem o potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte, conseguiram analisar 8 espécies. Destas, a madeira de *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. apresentou maior valor de densidade (970 kg m^3), seguido de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret (900 kg m^3) e os menores valores para as madeiras de *Aspidosperma pyrifolium* Mart. (620 kg m^3) e *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B.Gillett (290 kg m^3). Os mesmos autores concluíram que isso evidencia a grande variabilidade entre as densidades básicas das espécies e sua concentração de carbono.

Lima *et al.* (2020), ao estudarem a variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*, encontraram valores que indicam forte correlação da densidade básica com estoque de carbono ($r=0,9893$) e densidade energética da madeira ($r=0,9798$).

Sabe-se que as espécies apresentam características próprias, mesmo que estas tenham a mesma estrutura celular, porém a forma, tamanho e arranjo são diferenciados, o que influencia nas propriedades da madeira e as tornam únicas, e, dessa forma, o estudo destas características promovem um melhor entendimento quanto ao teor de carbono presente na madeira.

3.4 Contribuição do manejo florestal na diminuição das taxas de incremento de CO₂

O surgimento do termo ‘Manejo Florestal Sustentável’ teve início em meados da década de 1950, época quando realizaram-se os primeiros inventários florestais na Amazônia (HIGUCHI *et al.*, 2007). Em 1987, o conceito teve evolução, conciliando com um olhar mais amplo para o desenvolvimento sustentável, desenvolvido pela Comissão Mundial sobre Meio

Ambiente e Desenvolvimento. Em 1992 foi sancionada pela Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento dentre os princípios sobre florestas (SHVIDENKO *et al.*, 2005; ALBUQUERQUE, 2009).

Manejo florestal pode ser definido como “a aplicação de informações biológicas, técnicas e econômicas no controle das operações florestais, a fim de manter o nível de rendimentos líquidos dos detentores no máximo possível, considerando todos os seus objetivos e responsabilidades”, combinando produção com a conservação de muitos outros produtos não madeireiros, serviços ambientais, funções ecológicas da floresta e aspectos socioeconômicos (EMBRAPA, 2022).

O Manejo Florestal Sustentável (MFS) é uma atividade econômica de produção sustentável, em que a floresta é conservada, não havendo desmatamento da área, sendo apenas colhidas as árvores já adultas, garantido a perpetuação das espécies manejadas, a sua renovação, para nova exploração futura, em ciclos sucessivos. Um dos aspectos resultantes do manejo florestal é que este podem diminuir as taxas de incremento de CO₂ na atmosfera com a redução do desmatamento e aumento do florestamento, e podem ser consideradas oportunidades de negócios, desde que avaliadas no aspecto privado (EMBRAPA, 2022).

Nas florestas tropicais o manejo florestal sustentável deve ter enfoque não só em produtos madeireiros, mas também em todos os bens e serviços gerados pela floresta, para que seja economicamente atrativo. Caso contrário, o saldo sempre será negativo tanto para o meio ambiente quanto para o homem (ALBURQUEQUE, 2009).

O Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) é regido pelo Decreto N° 5.975, de 30 de novembro de 2006, e consiste na administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, considerando-se a utilização de produtos florestais madeireiros e não madeireiros, assim como bens e serviços da floresta (BRASIL, 2006b). Dessa forma, é possível atender à demanda por produtos florestais madeireiros e não madeireiros e, ao mesmo tempo, reduzir os danos causados aos espécimes remanescentes, e garantir a perpetuidade dos recursos naturais, além de preconizar a adoção de práticas para minimizar os danos da Exploração florestal durante a retirada de madeira da floresta (RODRIGUES, 2020).

A Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006, do Ministério do Meio Ambiente (MMA), define os "Procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal". De acordo com o documento, as intensidades máximas de corte a serem autorizadas pelo órgão ambiental competente são de 30m³/ha para o PMFS, em um ciclo de corte de 35 anos (ciclo de corte), e diâmetro mínimo de corte (DCM) de 50cm. Cada hectare de floresta possui em média 200 árvores maduras e 1000 árvores jovens. Com o manejo sustentável, é

possível retirar de quatro a seis árvores adultas por hectare, que em média representam de 15 a 30m³ (MMA, 2006).

As atividades do manejo florestal promovem, além dos benefícios ambientais, melhorias na qualidade de vida da população local, por meio da geração de emprego e renda, sendo um incentivo para a economia formal (ÂNGELO *et al.*, 2014). A prática de manejar a floresta é reconhecida em todo o mundo, como mecanismo capaz de manter a floresta de forma sustentável. Entretanto, para a real efetivação do manejo, deve haver ações de fiscalização e monitoramento, além de difusão de conhecimento e incentivos advindos da sociedade (SILVA *et al.*, 2009).

O manejo adequado dos povoamentos florestais é importante para que eles sejam transformados em sequestradores de carbono, sendo esta, a principal alternativa para a área remanescente da floresta amazônica. O manejo florestal sustentável oferece duas possibilidades para benefícios em relação ao sequestro de carbono da atmosfera para mitigação dos efeitos do aquecimento global: estocando carbono em produtos de madeira, enquanto a floresta manejada cresce novamente, e por meio de mudanças nas práticas de exploração, que podem reduzir o dano à floresta remanescente e a consequente emissão de carbono (SANTOS, 1996).

3.5 Produção de madeira de doze espécies no Estado do Pará

Espécies florestais de porte arbóreo que ocorrem nas florestas amazônicas, produzem madeira muito apreciada pelo mercado, principalmente da construção civil, em função do conforto térmico, acústico e de ambiência que promovem nas estruturas onde são utilizadas e também pelas propriedades tecnológicas de durabilidade, flexibilidade e outras sensoriais (cor, texturas, cheiros etc.) que ampliam o interesse, a cada dia maior para a produção e comercialização destas madeiras, fomentando a economia de base florestal.

Diversas espécies vêm figurando entre as mais comercializadas das florestas amazônicas, nas últimas cinco a seis décadas de produção madeireira na Amazônia a partir de planos de manejo florestal. Mas destas, um grupo formado por 15 a 20 espécies vem mantendo o interesse do mercado em função das suas propriedades e características ao longo de todo este período. Neste estudo, estamos avaliando doze destas espécies, quanto as características físicas (densidade básica da madeira) e química elementar (teor de carbono estocado na madeira), buscando compreender o efeito da retirada das árvores destas espécies no estoque de carbono armazenado nas florestas manejadas.

Dados obtidos do SISFLORA/SEMAS-PA, reunidos ao longo de dez anos (2006-2016), apontam a movimentação de mais 7,7 milhões de m³ de madeira, no Estado do Pará para as espécies estudadas. Deste total, cerca de 4 milhões de m³ foram de *Manilkara elata* (Alémão

ex Miq.) Monach., seguido de 1,3 milhão de m³ de *Hymenaea courbaril* L. (Tabela 1). Isso representa pouco mais de 69 % da produção total de madeira, somente com estas duas espécies.

Tabela 1 - Produção de madeira das espécies selecionadas, oriundas de planos de manejo no Estado do Pará.

Espécies	Volume (m³)
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F Macbr.	64.178,79
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	436.168,75
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	198.349,56
<i>Cedrela odorata</i> L.	10.607,92
<i>Hymenaea courbaril</i> L. var. <i>courbaril</i>	1.288.298,87
<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	11.712,13
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	4.068.728,21
<i>Mezilaurus synandra</i> (Mez) Kosterm	26.508,75
<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	11.712,13
<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	226.103,38
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	11.039,71
<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	651.158,90
Total	7.004.567,11

Fonte: Autora (2024).

Dados indicam que 1 ha de floresta estoca entre 170 e 200 toneladas de Carbono ao longo das árvores. No entanto, destaca-se que o Carbono estocado nas árvores que tem sua madeira colhida e disponibilizada para o mercado florestal fica fixado na madeira e, não retorna para a atmosfera, mesmo após a madeira ser processada.

Na unidade de manejo florestal em estudo, dados obtidos do inventário florestal realizado na UPA III apontaram o estoque de 111.508,6515 m³ proveniente de 23.772 árvores, com DAP acima de 40 cm. Desse total, foram selecionados para colher da floresta 62.113,0962 m³, o equivalente a 17,75 m³.ha⁻¹.

4 MATERIAL E MÉTODOS

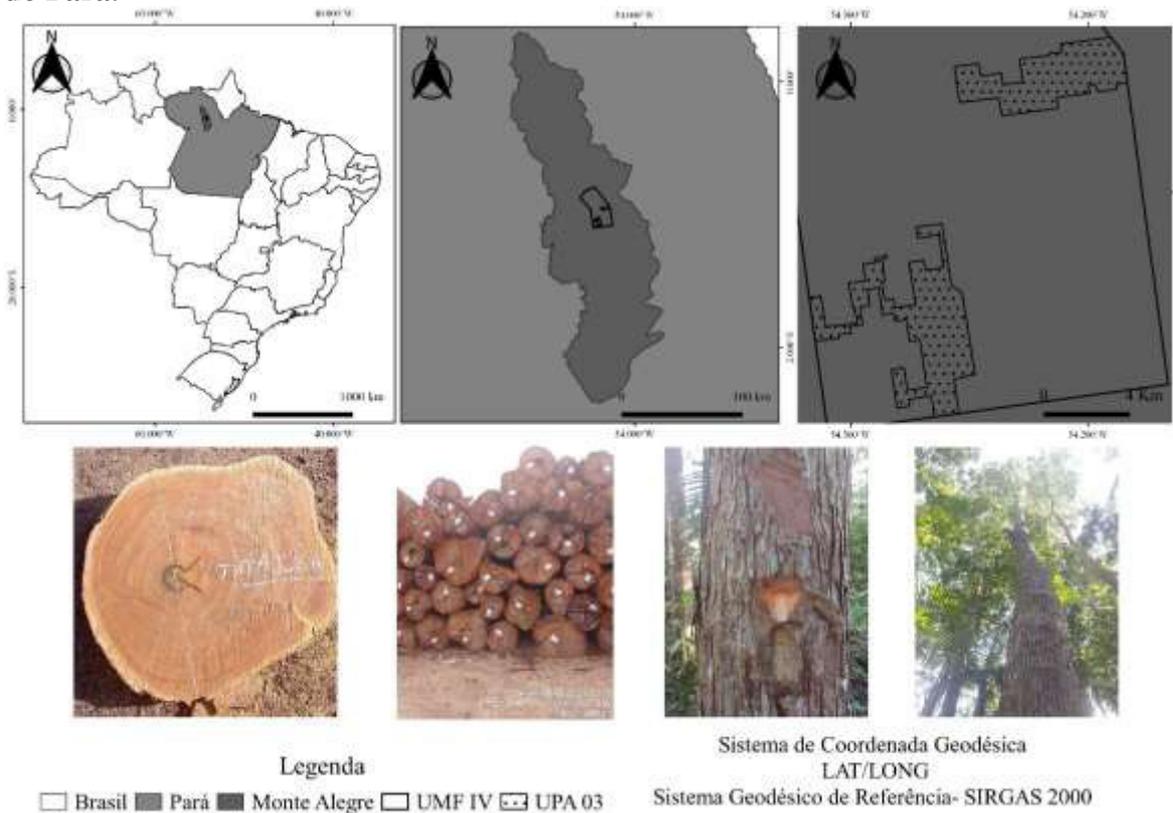
4.1 Área de estudo

A Floresta Estadual (FLOTA) do Paru localiza-se na Calha Norte, na margem esquerda do rio Amazonas, e abrange cinco municípios, são eles: Almeirim (58%), Monte Alegre (18%), Alenquer (18%), Óbidos (4%) e Prainha (2%) no Estado do Pará, (MESQUITA, 2014). Essa região abriga o maior bloco de Unidades de Conservação e Terras Indígenas do mundo.

A FLOTA do Paru é uma Unidade de Conservação (UC) de uso sustentável com 3.612.914,00 ha criada pelo Governo do Estado do Pará (Decreto 2.608/2006), conforme as

diretrizes do Macrozoneamento Ecológico-Econômico (MZEE) e a Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) (IMAZON, 2011). A FLOTA do Paru limita-se, ao norte, com a Reserva Biológica (Rebio) Maicuru; ao sul, com a Floresta Nacional (FLONA) da Mulata; a sudeste, com a Estação Ecológica (ESEC) do Jari; a leste, com a Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Rio Uiratapura; a oeste, com a FLOTA do Trombetas; e a noroeste, com a Terra Indígena (TI) Zo'ê e a Esec Grão-Pará (Figura 3) (IMAZON, 2011).

Figura 3 - Localização da floresta pública do Paru sob concessão florestal no Estado do Pará.



Fonte: Autora (2024).

O clima na região é caracterizado como tropical de monção, cuja temperatura varia entre 18° C e 30° C. A média mensal de chuvas é de 215 mm, com o período mais chuvoso de janeiro a junho e uma variação média de 50 a 150 mm. Apresenta umidade relativa do ar que varia de 84%, em maio, a 64% em outubro (IMAZON, 2011).

O solo de maior predominância na FLOTA é o argissolo vermelho amarelo (76%), seguido do tipo latossolo vermelho amarelo (20%), neossolos litólicos (4%), latossolo amarelo (<1%) e neossolo quartzarênico hidromórfico (<1%) (restante da área). Há registros de que 90% da FLOTA tem altitudes superiores a 100 m, com maiores concentrações entre 150 e 500 m. As áreas com altitudes mais elevadas (> 600 metros) somam apenas 1% e estão localizadas no sul

da FLOTA. As formações geomorfológicas predominantes são relevo dissecado do topo convexo (63%) e relevo dissecado do topo aguçado (16%) (IMAZON, 2011).

4.2 Ocorrência das espécies na área de estudo

Na área da UPA 3 da empresa Blue Timber na FLOTA do Paru foram inventariadas 23.772 árvores associadas a 50 nomes vulgares, acima de 40 cm de DAP. Deste total, foram selecionadas para o corte 11.204 árvores de 28 espécies, com DAP acima de 50 cm que representam 47% do total de árvores inventariadas. Deste total, doze espécies (Tabela 2), somando 7.784 indivíduos (69,5% do total de árvores selecionadas) foram incluídas neste estudo.

Das espécies em estudo *Pouteria pachycarpa* Pires representa o maior número de árvores inventariadas, com total de 4.049 árvores e maior volume inventariado de aproximadamente 16 mil m³. Deste total, 2.335 árvores foram colhidas somando 11 mil m³ (3,054 m³.ha⁻¹). Em seguida, *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach., com 2.329 árvores inventariadas, e aproximadamente 14.000 m³ de volume inventariado, foram colhidas 1.385 árvores somando quase 9.700 m³ de volume extraído (Tabela 2).

A menor quantidade de árvores e volume manejados na UPA foi de *Hymenolobium elatum* Ducke, com 128 árvores e 800 m³ de volume inventariados, dos quais foram colhidos 20 indivíduos com aproximadamente 211 m³ de volume (Tabela 2).

Tabela 2 - Números de árvores inventariadas, colhidas e valores de volume por metro cúbico inventariado e colhido na área de efetivo manejo UPA 3 = 3.535,2631.

Espécies	Nº árvores inventariadas	Árvores cortadas	Volume inventariado (m ³)	Volume extraído (m ³)
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F.-Macbr.	538	243	2.790,53	1.612,77
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	692	287	3.851,81	1.966,31
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	1.016	683	5.845,66	4.707,51
<i>Cedrela odorata</i> L.	395	151	1.560,77	818,491
<i>Hymenaea courbaril</i> L. var. <i>courbaril</i>	211	135	1.734,75	1.250,06
<i>Hymenolobium elatum</i> Ducke	128	20	799,857	211,763
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	2.329	1.515	13.840,72	9.698,58
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez	410	105	1.729,43	670,848
<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	1.173	737	9.899,39	7.407,33
<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	4.049	2.335	15.926,39	10.796,01
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	1.425	1.017	7.686,50	6.610,15
<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	886	556	3.094,99	2.398,91
Total	13.252	7.784	68.760,80	48.786,989

Fonte: Autora (2024).

Estes dados apontam que as doze espécies representam 3,75 ind.ha⁻¹ e 19,45 m³.ha⁻¹. Considerando os dados de colheita destas espécies, a atividade de manejo representou uma retirada de 57,8% das árvores e 70,02% do volume inventariado.

4.2 Coleta de dados

A coleta das amostras de madeira foi realizada na Unidade de Produção Anual - UPA 3/2021 de 3.535,2631 hectares, em setembro de 2022, durante o período da safra de madeiras. Foram incluídas no estudo 12 espécies, que têm registro de colheita de madeira nos últimos 3 anos (Tabela 3).

Tabela 3 - Espécies mais exploradas no manejo florestal da área da UMF III da FLOTA do Paru.

N	Nomes científicos	Nome popular	Família
1	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	Garapeira	Fabaceae
2	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	Muiracatiara	Anacardiaceae
3	<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	Tatajuba	Moraceae
4	<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro	Meliaceae
5	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá	Fabaceae
6	<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	Angelim-Pedra	Fabaceae
7	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba	Sapotaceae
8	<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez	Itaúba	Lauraceae
9	<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	Curupixá	Sapotaceae
10	<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	Goiabão	Sapotaceae
11	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Ipê-roxo	Bignoniaceae
12	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	Ipê-amarelo	Bignoniaceae

Fonte: Autora (2024).

De cada espécie, foram obtidas amostras de madeira de três árvores, totalizando 36 árvores (12 espécies x 3 árvores), das quais foram retirados discos com 10 cm de espessura na região da base (0%) da árvore, abrangendo as regiões do cerne, alborno e casca (Figura 4). Após a seleção da árvore no pátio de estocagem (figura 4a), com o auxílio de um motosserra para cortar a madeira, retirou-se duas cunhas opostas (figura 4c), uma para a análise de densidade básica e a outra cunha para a análise elementar de teor de carbono.

Figura 4 - Coleta de amostras: a) Fuste no pátio de estocagem; b) Disco de madeira com 10 cm de espessura; c) confecção de cunhas para pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

Foram identificadas 12 espécies de 7 famílias botânicas, das quais, foram depositadas amostras de corpos de prova de madeira para cada árvore, com dimensões de 2 cm x 2 cm x 3 cm, que auxiliaram à identificação no acervo da Xiloteca Felisberto Camargo da Universidade Federal Rural da Amazônia (Tabela 4).

Tabela 4 – Espécies amazônicas amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Blue Timber, Monte Alegre, Pará, Brasil.

N	Família	Nome comercial	Nome Científico	Nº da Árv.	X-UFRA
1			<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	4513	X-778
2	Moraceae	Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	14427	X-780
3			<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	25494	X-779
4			<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. Ex DC.)	8280	X-787
5		Ipê-roxo	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. Ex DC.)	8786	X-788
6	Bignoniaceae		<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. Ex DC.)	8276	X-789
7			<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	4353	X-805
8		Ipê-amarelo	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	4369	X-806
9			<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	25043	X-807
10			<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	17821	X-781
11		Angelim	<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	4613	X-782
12		Pedra	<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	4277	X-783
13			<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	18481	X-790
14	Fabaceae	Garapeira	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	25063	X-791
15			<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	14401	X-792
16			<i>Hymenaea courbaril</i> L.	21295	X-793
17		Jatoba	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	21305	X-794
18			<i>Hymenaea courbaril</i> L.	18568	X-795
19			<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	13949	X-796
20		Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	8427	X-797
21			<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	25372	X-798
22			<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	25404	X-811
23	Sapotaceae	Goiabão	<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	21264	X-812
24			<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	21267	X-813
25			<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	13909	X-802
26		Curupixá	<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	4421	X-803
27			<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	8410	X-804
28			<i>Astronium lecointei</i> Ducke	13948	X-784
29	Anacardiaceae	Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	17845	X-785
30			<i>Astronium lecointei</i> Ducke	25592	X-786
31			<i>Cedrela odorata</i> L.	14449	X-808
32	Meliaceae	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	25029	X-809
33			<i>Cedrela odorata</i> L.	8224	X-810
34			<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. Ex Mez	9620	X-799
35	Lauraceae	Itauba	<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. Ex Mez	4487	X-800
36			<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. Ex Mez	4847	X-801

Em que: X - UFRA = Código de Registro da Xiloteca Felisberto Camargo da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, Brasil.

4.3 Determinação da densidade básica da madeira

Para a determinação da densidade básica, utilizou-se uma cunha de cada disco de madeira, usando um motosserra para cortar as amostras de madeira, representando as regiões do cerne até a casca da madeira, com aproximadamente 0,10 cm de altura e 0,15 cm de largura, para posterior análise laboratorial.

Para manuseio adequado dos equipamentos de laboratório, com auxílio de uma serra fita, as cunhas foram fragmentadas em tamanhos que variaram de 4 a 12 corpos de prova. No total obtiveram-se 256 subamostras (Figura 5b). Este processo foi utilizado a partir de adaptação da Norma Brasileira 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003), devido os discos apresentarem diâmetros que variavam de 50 a 150 cm.

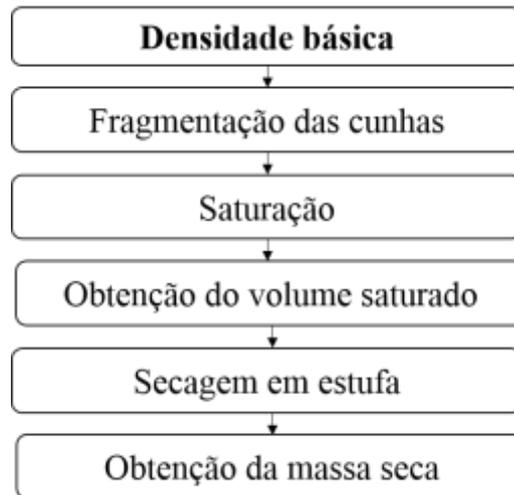
Figura 5 – Amostras em cunhas: a) Cunhas; b) subamostras das cunhas.



Fonte: Autora (2024).

Foi empregado o método da balança hidrostática, recomendado pela norma NBR 11941 (ABNT, 2003). O método consiste em submergir a amostra até total saturação (Figura 6). Para a pesagem, utilizou-se uma balança digital semi-analítica, na qual o material foi imerso na água em um becker de vidro de 4 L, sem tocar as laterais do recipiente.

Figura 6 – Procedimento laboratorial para determinação da densidade da madeira.



Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, o material foi totalmente seco em uma estufa de circulação forçada de ar a temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 10 dias até atingir massa constante. Após este período, obteve-se a massa seca de cada cunha, pesando-as em uma balança semi-analítica (Figura 7).

Figura 7 - Procedimentos para determinação da densidade básica da madeira: a) Amostras submergidas em água para saturação; b) Pesagem na balança semi-analítica c) Cunhas em estufa para secagem.



Fonte: Autora (2024).

Após esta etapa, calculou-se a massa específica básica definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, conforme (Equação 1).

(1)

$$Db = \frac{Ms}{Vs}$$

Em que: Db = Densidade básica (g.cm³); Ms = Massa seca (g); Vs = Volume saturado (m³).

A densidade da madeira foi classificada, de acordo com os estudos de Melo *et al.* (1990); Silveira, Rezende e Vale (2005); Coradin *et al.* (2010); e Silveira *et al.* (2013) que classificam as madeiras de baixa, média e alta densidade (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação da densidade básica da madeira.

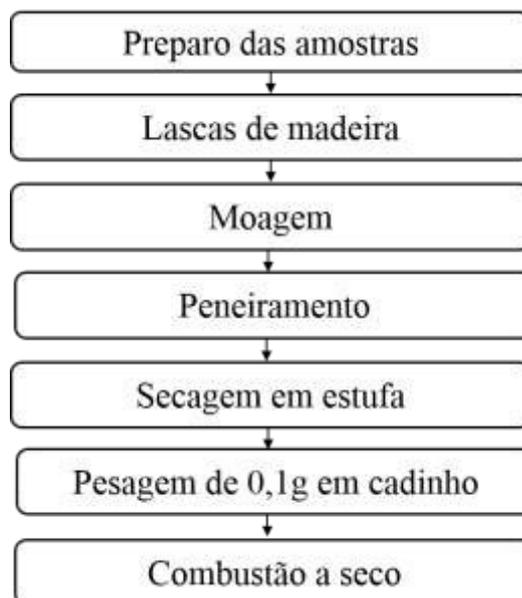
Classificação	Faixas de densidade básica
Baixa	$\leq 0,550 \text{ g cm}^{-3}$
Média	$0,550 - 0,720 \text{ g cm}^{-3}$
Pesada ou Alta	$\geq 0,730 \text{ g cm}^{-3}$

Fonte: Adaptado, CORADIN *et al.* (2010).

4.4 Determinação do teor de carbono

Para a realização dos procedimentos laboratoriais de determinação do teor de carbono, utilizou-se as segundas cunhas opostas de cada disco, que foram transformadas manualmente em pequenas lascas (Figura 8).

Figura 8 – Procedimento laboratorial para a determinação do teor de carbono pelo método direto.



Fonte: Autora (2024).

Na sequência, as amostras foram moídas até a consistência de pó, empregando-se moinho analítico básico IKA11 de três facas, e peneiras metálicas de seleção de partículas de 40 mesh e 60 mesh (Figura 9). No procedimento de moagem foram tomados devidos cuidados para não haver contaminação das amostras, realizando-se a limpeza do moinho a cada amostra e preservando o material em local livre de umidade.

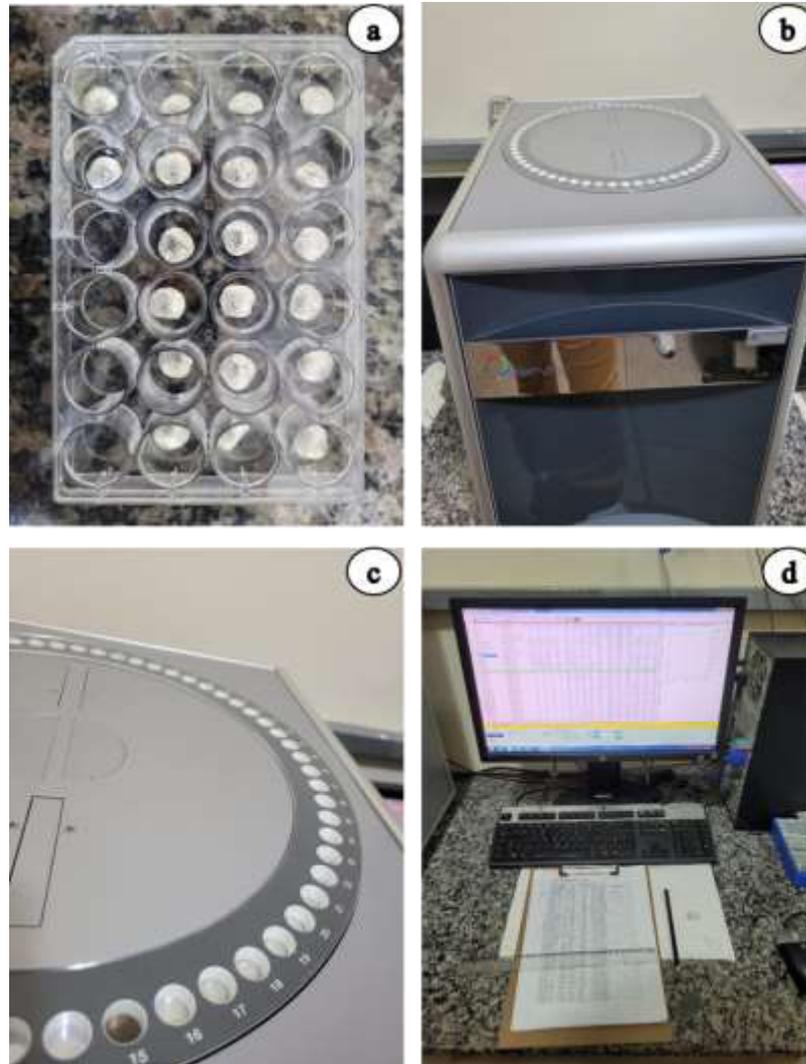
Figura 9 - Procedimento para determinar o teor de carbono: a) Retiradas de lascas de madeira com estilete; b) Lascas de madeiras; c) Moinho analítico básico IKA11 de três facas d) Peneiras de 40 e 60 mesh.



Fonte: Autora (2024).

O material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de 65° C até atingir massa constante. Posteriormente, para a determinação dos teores de carbono, foi utilizado a pesagem de cada amostra (0,1 g) em cadinhos de porcelana e, levadas ao equipamento para determinação do teor de carbono, analisador elementar vario PYRO cube, que junto possui um computador acoplado (Figura 10) (ARAÚJO *et al.*, 2021; MARCENE *et al.*, 2006).

Figura 10 – Análise de teor de carbono: a) material em cadinhos; b) Equipamento para determinação do teor de carbono, analisador elemental vario PYRO cube; c) local de inserção dos cadinhos; d) computador acoplado.



Fonte: Autora (2024).

4.6 Análises estatísticas

Os dados de densidade básica da madeira foram testados quanto a normalidade e homocedasticidade de variância pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, ambos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os pressupostos não foram atendidos, mesmo após transformações Log, raiz quadrada e Box Cox, por isso utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) para verificar a existência de diferença entre a densidade básica das espécies. Posterior ao resultado significativo, as medianas foram comparadas pelo teste de Friedman ($p < 0,05$) com correção de Bonferroni.

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para reduzir a dimensionalidade dos dados, incluindo as variáveis densidade básica da madeira (DB), diâmetro à 1,30 m do solo (DAP) e altura comercial (Hc). Os componentes principais (PC1 e

PC2) foram derivados para capturar a maior parte da variabilidade presente nos dados. As variáveis foram estandarizadas com o intuito de minimizar as diferenças dimensionais.

Observou-se o coeficiente de correlação de Pearson entre as características dendrométricas e análise elementar para as doze espécies estudadas. Considera-se que duas variáveis possuem associação entre si quando o coeficiente de correlação foi significativo a 5% de probabilidade.

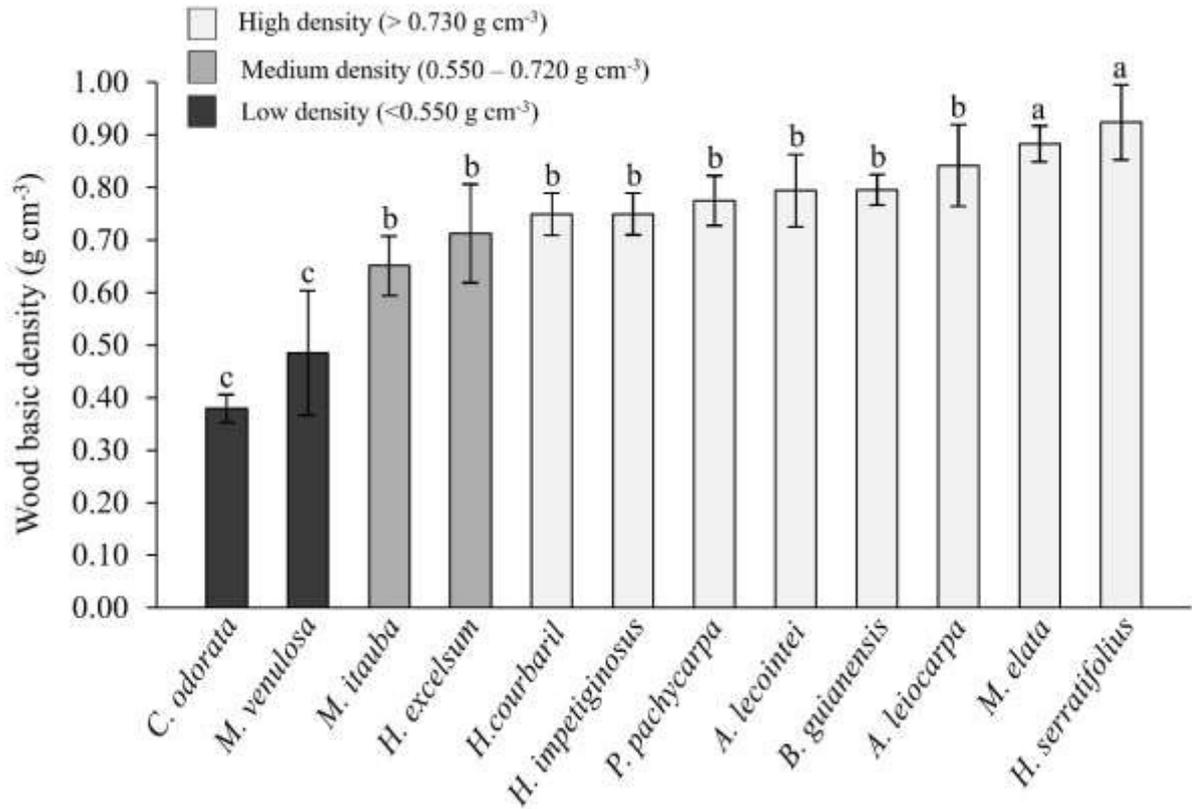
As análises estatísticas e gráficos foram realizadas com auxílio dos pacotes “agricolae” (MENDIBURU, 2021), factoextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2020), FactoMineR (SEBASTIEN; JOSSE; HUSSON, 2008) e “ggplot2” (WICKHAM, 2016) por meio do Software R v.4.3.0 (R CORE TEAM, 2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade básica da madeira para as doze espécies florestais nativas da Amazônia.

A determinação da densidade da madeira indicou que 66,7% das doze espécies têm densidade alta (acima de $0,730 \text{ g cm}^{-3}$), 16,6% apresentam baixa densidade ($< 0,550 \text{ g cm}^{-3}$) e 16% densidade média (Figura 11). Os valores médios para a densidade da madeira, entre as espécies, variaram de $0,38 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,92 \text{ g cm}^{-3}$ para *Cedrela odorata* L. e *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose, respectivamente (Figura 11). Os menores valores médios foram registrados para *Micropholis venulosa* (Mart. & Eichler) Pierre ($0,53 \text{ g cm}^{-3}$) e *Cedrela odorata* L. ($0,38 \text{ g cm}^{-3}$), os quais não diferiram significativamente entre si ($p > 0,05$) e estão incluídos na mesma classe de densidade.

Figura 11 – Valores médios de densidade básica obtidos para a madeira das espécies em estudo.



Fonte: Autora (2024).

Os maiores valores de densidade da madeira obtidos foram para *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose (0,92 g cm⁻³; p -valor = 0,6853) seguida de *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. (0,88 g cm⁻³; p -valor = 0,6853) e *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr. (0,84 g cm⁻³; p -valor = 0,1974), todas na classe de alta densidade. Nesta mesma classe, estão *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr. (0,84 g cm⁻³), *Astronium lecointei* Ducke (0,79 g cm⁻³), *Bagassa guianensis* Aubl. (0,80 g cm⁻³) e *Pouteria pachycarpa* Pires (0,77 g cm⁻³) para as quais os valores foram estatisticamente semelhantes ($p > 0,05$).

Embora *Hymenolobium excelsum* Ducke (0,71 g cm⁻³), esteja na classe de densidade média, seu valor de densidade não diferiu estatisticamente dos valores de *Pouteria pachycarpa* Pires, *Hymenaea courbaril* L. (0,75 g cm⁻³) e *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (0,75 g cm⁻³) (Figura 11).

Foram observadas as densidades básicas das madeiras para as 12 espécies e estes resultados foram comparados com dados da literatura em uma tabela com seus respectivos, nomes científicos, densidade em gramas por centímetro cúbico (g cm⁻³), localidade de onde foram feito o estudo e sua fonte de consulta (Tabela 6).

Tabela 6 - Comparação dos valores médios de densidade básica encontrados neste estudo com os dados da literatura

Espécie	DB (g cm⁻³) encontrada	DB (g cm⁻³) literatura	Localidade do estudo	Fonte de consulta
<i>Handroanthus serratifolius</i>	0,92	0,89	Belém-PA	LPF/SFB
		0,82	Porto Acre-AC	ROMERO, 2020
<i>Manilkara elata</i>	0,88	0,87	Floresta Nacional do Jamari-RO	LPF/SFB
		0,89	Santarém-PA	Araújo <i>et al.</i> , 2015
<i>Apuleia leiocarpa</i>	0,84	0,75	Tucumã-PA	LPF/SFB
		0,77	Porto Acre-AC	ROMERO, 2020
<i>Astronium lecointei</i>	0,79	0,69	Marabá-PA	Junior <i>et al.</i> , 2020
		0,75	Belém-PA	LPF/SFB
		0,82	Porto Acre-AC	ROMERO, 2018
<i>Bagassa guianensis</i>	0,80	0,70	Belém-PA	LPF/SFB
		0,69	-	Corassa <i>et al.</i> , 2013
		0,79	Marabá-PA	Júnior <i>et al.</i> , 2020
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	0,75	0,79	São Paulo-SP	Jainierie;Chimelo, 1989
		0,79	-	Jankowsky <i>et al.</i> , 1990
		0,79	-	REMADE
		0,73	Buriticupu-MA	LPF/SFB
<i>Pouteria pachycarpa</i>	0,77	0,74	Brasília-DF	MARTINS, 2008
		0,79	Manaus-AM	NOGUEIRA; NELSON; FEARNSSIDE,2005
<i>Hymenea courbaril</i>	0,75	0,76	Curuá-una-PA	LPF/SFB
		0,76	Porto Acre-AC	ROMERO, 2020
		0,63	Juruti-PA	LIMA, 2022
<i>Hymenolobium excelsum</i>	0,71	0,73	Piracicaba-SP	ANDRADE; JANKOWSKY, 2015
		0,69	Feliz Natal-MG	Santos <i>et al.</i> 2017
<i>Mezilaurus itauba</i>	0,65	0,70	Santarém-PA	LPF/SFB
		0,67	Curuá-una-PA	LPF/SFB
		0,60	Manaus-AM	NOGUEIRA; NELSON; FEARNSSIDE,2005
<i>Micropholis venulosa</i>	0,48	0,39	Floresta Nacional do Jamari-RO	LPF/SFB
		0,43	Porto Acre-AC	ROMERO, 2020
		0,44	Patos-PB	BATISTA, 2020

Fonte: Autora (2024).

A comparação dos valores de densidade básica da madeira obtidos neste estudo com os dados da literatura, observou-se que os valores médios de todas as espécies foram aproximados aos encontrados neste estudo. Por exemplo, os valores médios de densidade para *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr., *Astronium lecointei* Ducke, *Bagassa guianensis* Aubl., *Cedrela odorata* L., *Hymenaea courbaril* L., *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach., *Micropholis venulosa* (Mart. & Eichler) Pierre e *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose foram semelhantes aos encontrados neste estudo, com valores de $0,75 \text{ g cm}^{-3}$, $0,75 \text{ g cm}^{-3}$, $0,70 \text{ g cm}^{-3}$, $0,39 \text{ g cm}^{-3}$, $0,76 \text{ g cm}^{-3}$, $0,87 \text{ g cm}^{-3}$, $0,67 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,89 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Essa consistência sugere que os resultados obtidos neste estudo estão alinhados com os dados disponíveis na literatura, fortalecendo a confiabilidade das medições realizadas e contribuindo para um melhor entendimento da densidade básica das espécies arbóreas estudadas.

As variações nos resultados encontrados entre as espécies podem ser atribuídas às diferenças na estrutura anatômica da madeira. Estudos anteriores demonstraram que características como a quantidade de elementos de vasos e a espessura da parede das fibras estão diretamente relacionadas à densidade da madeira (ALMEIDA, 2006).

As discrepâncias nos resultados entre as espécies podem estar intrinsecamente relacionadas à estrutura anatômica da madeira de cada uma. Conforme observado por Oliveira e Silva (2003), a densidade da madeira está diretamente ligada à quantidade de elementos dos vasos e à espessura da parede das fibras, onde um aumento na espessura da parede das fibras ou na quantidade de fibras em relação à quantidade de vasos pode resultar em um aumento na densidade do xilema secundário. Estudos realizados por Silva (2002) e Silva et al. (2007) também corroboraram essa relação, destacando que a espessura da parede das fibras afeta o diâmetro do lúmen e a quantidade de espaços vazios na madeira, sendo que quanto maior o diâmetro, menor será a densidade da madeira.

A anatomia da madeira é uma disciplina que analisa os diferentes tipos de células estruturais que compõem o lenho, considerando sua organização, funções e peculiaridades (BOTOSSO, 2011). Essas características anatômicas exercem influência direta sobre outras propriedades da madeira, como suas características físicas, químicas e mecânicas, sendo essencial compreendê-las para determinar os usos adequados da madeira (ZOBEL, 1989). Portanto, a análise da estrutura anatômica da madeira é fundamental para a definição de sua aplicação final, uma vez que essas características têm um impacto significativo no desempenho da madeira em diversas aplicações tecnológicas, incluindo aspectos químicos, físicos e de resistência mecânica (BOTOSSO, 2011).

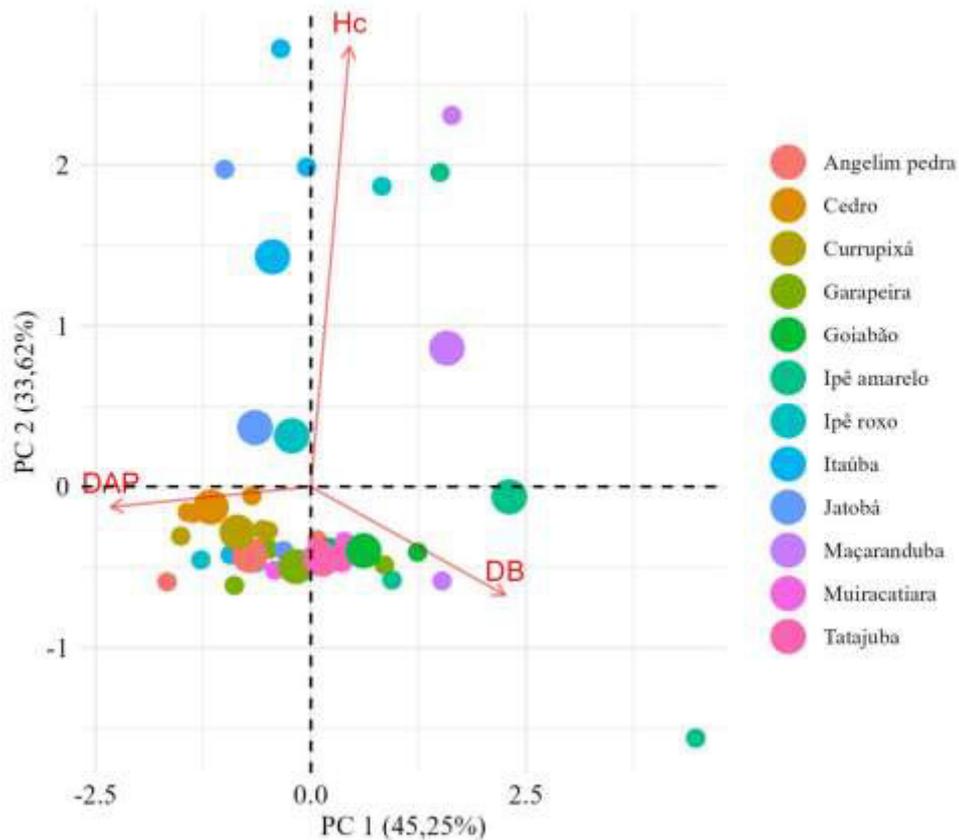
Os valores aproximados encontrados em diversas literaturas comparando as densidades básicas com diferentes espécies deste estudo, deve-se à diferença de habitat, considerando a

diferença dos tipos de solos e o clima (BAKER *et al.*, 2004; MALHI, 2006; MULLER-LANDAU, 2004). Oliveira *et al.*, (2012) analisaram a densidade básica em diferentes fitofisionomias do Cerrado em Minas Gerais, observaram que a variação da densidade pode ser explicada pela variação de fatores edáficos, topográficos, clima sazonal, condições hídricas, fenologia e forma de dispersão das espécies e a incidência de fogo. Barcellos (2007) relatou em seu estudo que fatores genéticos, ambientais e fisiográficos também podem influenciar na massa específica da madeira. Ao longo de uma mesma árvore ocorre a variação da densidade, assim como entre indivíduos de uma mesma espécie (VALE *et al.*, 1999).

A Amazônia abriga uma rica diversidade de espécies florestais madeireiras, sendo diferenciadas quanto a sua estrutura anatômica, propriedades físicas, químicas e mecânicas (Alves *et al.*, 2012). Dessa forma é necessário fazer um estudo criterioso das estruturas para melhor identificação da madeira, já que cada espécie apresenta características individuais, as quais determinam o seu uso para uma ou outra finalidade (Alves *et al.*, 2012).

Observou-se que 78,27% da variância total dos dados foi explicada pelas duas componentes principais, ou seja, existem informações relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nessas variáveis latentes. A análise mostrou os autovetores das componentes principais 1 e 2 e a correlação entre as variáveis originais e as componentes principais (Figura 12).

Figura 12 - Biplot do componente principal da densidade básica da madeira (g cm^{-3}), diâmetro à 1,30 m do solo (cm) e altura comercial (m) para 36 árvores de 12 espécies florestais nativas da Amazônia.



Fonte: Autora (2024).

Na Análise de Componentes Principais (PCA), observou-se que o Componente Principal 1 (PC1) é responsável por 45,25% da variância total dos dados relacionados aos elementos climáticos, mostrando a influência dos fatores ambientais nas árvores. Dados de PC1 com o Componente Principal 2 (PC2), representa que esta combinação é responsável por 78,27% da variância total dos dados.

O PC1 contém elevadas correlações das variáveis originais e indica uma correlação positiva entre a densidade básica (DB) e a altura comercial da planta (Hc), enquanto o Diâmetro à Altura do Peito (DAP) apresentou uma correlação negativa com essas variáveis. A PCA também evidenciou a dissimilaridade entre as espécies estudadas, oferecendo uma visão abrangente das relações complexas entre os elementos climáticos e as características das plantas.

O PC1 apresentou uma correlação positiva entre a densidade básica (DB) e a altura total da planta (Hc), sugerindo que espécies com maior densidade básica tendem a apresentar uma maior altura. Por outro lado, o Diâmetro à Altura do Peito (DAP) mostrou uma correlação

negativa com ambas as variáveis, indicando que plantas com maior DAP podem ter uma densidade básica menor e altura total reduzida.

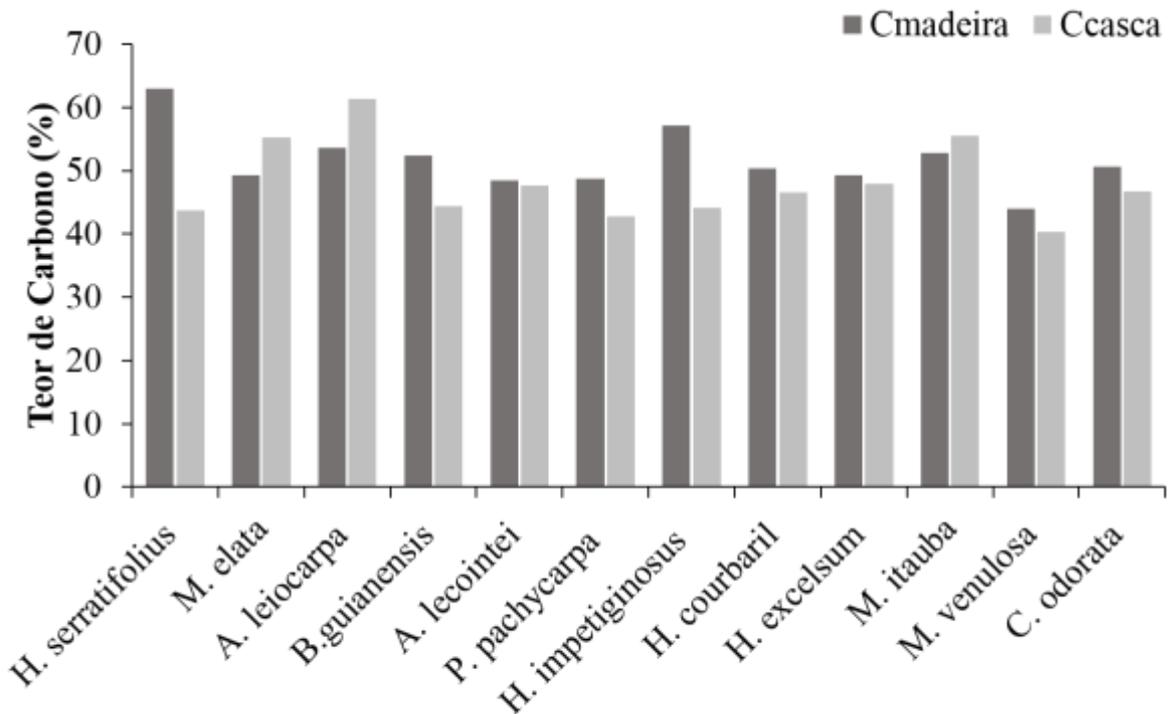
A análise da PCA não apenas apontou essas correlações, mas também permitiu uma visão detalhada da dissimilaridade entre as espécies estudadas. Essa abordagem permitiu compreender sobre as complexas interações entre os elementos climáticos e as características específicas das plantas em questão.

5.2 Percentual de carbono estocado nas doze espécies florestais estudadas

Os dados da análise elementar revelaram uma variação significativa nos teores de carbono armazenados tanto na madeira quanto na casca das espécies analisadas (Figura 13). Notavelmente, a espécie *H. serratifolius* apresentou o maior teor de carbono na madeira, atingindo 62,97%, o que foi significativamente diferente das demais espécies. Por outro lado, a espécie *M. venulosa* registrou o menor teor de carbono na madeira, com 43,96%, evidenciando uma ampla variação interespecífica nesse aspecto.

Quanto aos resultados de carbono na casca, observou-se que espécies como *A. leiocarpa* (61,30%), *M. itauba* (55,53%) e *M. elata* (55,22%) apresentaram valores consideravelmente elevados em comparação com o carbono armazenado na madeira. Isso sugere que essas espécies têm a capacidade de acumular uma quantidade significativa de carbono em suas cascas. Por outro lado, as demais espécies mostraram uma proporção de carbono na casca abaixo de 50%. Por exemplo, *H. impetiginosus* (44,06%), *H. serratifolius* (43,77%), *P. pachycarpa* (42,76%) e *M. venulosa* (40,35%) exibiram uma proporção menor de carbono na casca em comparação com a madeira (Figura 13).

Figura 13 – Teor de Carbono na madeira e na casca das doze espécies estudadas.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados de carbono na casca podem ter várias implicações, incluindo uma capacidade reduzida de armazenar carbono na casca, em comparação com outras espécies que apresentam proporções mais equilibradas do carbono entre a casca e a madeira. No entanto, é importante ressaltar que a casca desempenha outras funções além do armazenamento de carbono, como proteção contra danos físicos, patógenos e pragas, e seu papel na ecologia da árvore pode variar de acordo com a espécie e o ambiente em que ela está inserida.

Algumas espécies florestais podem desempenhar um papel mais importante na regulação do ciclo do carbono devido à sua alta porcentagem de casca, enquanto outras podem ter uma contribuição relativamente menor nesse aspecto. Quando uma espécie de árvore apresenta uma porcentagem maior de carbono na casca, isso geralmente indica uma composição química específica da casca, que pode ser influenciada por vários fatores, como a estrutura celular, a presença de substâncias químicas e as propriedades físicas da casca (KLOCK, 2013).

Hoppe (2003) em *Platanus x acerifolia* (Ailton) Wild, Caldeira *et al.* (2003) em *Acacia mearnsii* e Machado *et al.* (2006) em *Mimosa scabrella* encontraram maiores teores nas folhas

e menores na casca. D'Almeida (1988) destacou que isso ocorre devido ao fato de que os componentes químicos existentes na casca possuem pequeno número de compostos de longas cadeias de carbono em sua composição.

Neste estudo a determinação do teor de carbono na madeira das espécies estudadas indicou que algumas espécies têm um teor de carbono na madeira acima de 50%. *H. serratifolius* (62,97%), seguida de *H. impetiginosus* (57,07%), *A. leiocarpa* (53,62%), *M. itauba* (52,82%) e *B. guianensis*, (52,40%). O teor mais elevado de carbono na madeira pode influenciar na utilização dessas espécies em setores que demandam materiais mais densos e resistentes. Além disso, essas espécies podem ter um papel relevante na captura e armazenamento de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Outras seis espécies apresentaram teor de carbono na madeira em torno de 50%, que são: *C. odorata* (50,68%), *H. courbaril* (50,36%), *M. elata* (49,28%), *H. excelsum* (49,25%), *P. pachycarpa* (48,77%) e *A. lecointei* (48,51%).

A madeira de *H. serratifolius* possui alta densidade, juntamente com um teor de carbono de 63%, sugerindo para a espécie características específicas que a tornam notável em termos de composição e propriedades da madeira. A alta densidade indica que a madeira de *H. serratifolius* é mais pesada em comparação com madeiras de baixa densidade. Essa característica pode conferir à madeira resistência, durabilidade e a capacidade de suportar cargas pesadas, tornando-a adequada para aplicações em que a força é essencial, como na construção ou na fabricação de móveis resistentes.

Um teor de carbono de 63% é relativamente alto e pode contribuir para a resistência e longevidade da madeira. Essa combinação de alta densidade e teor de carbono elevado torna *H. serratifolius* uma escolha valiosa em setores onde a resistência estrutural é essencial. Pode ser utilizada em projetos que exigem madeira de alta qualidade, como construção pesada, fabricação de peças estruturais, ou em situações onde a durabilidade é uma prioridade.

Silva *et al.* (2015), ao avaliar o estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus*, em São Paulo, por meio do método destrutivo, verificaram que o lenho, componente da árvore que mais contribuiu para a quantidade total de biomassa, e conseqüentemente carbono, contribuiu com 74,0% do carbono presente na biomassa total mensurado, seguido da casca, com 17,3%, dos galhos vivos com 4,9%, dos galhos secos com 1,1% e folhas com 2,8%.

Gatto *et al.* (2011), estudando a contribuição dos compartimentos da árvore para o estoque de biomassa total em um povoamento de *Eucalyptus* spp. ao Centro–Leste de Minas Gerais com 120 meses de idade, verificaram que a madeira, o componente de maior interesse

comercial, correspondeu, em média, a 64,7% da biomassa total, seguida pelo sistema radicular com 13,5%, serapilheira com 9,7%, casca com 7,3%, galhos com 3,3 e folhas com 1,5%.

M. venulosa tem madeira de baixa densidade e o teor de carbono na madeira está abaixo de 44%, isso mostra que outros componentes, como o teor de lignina, podem estar presentes em proporções relativamente mais leves. Essa composição pode permitir à madeira características específicas, como leveza e talvez flexibilidade, tornando-a adequada para certas aplicações que demandam materiais mais leves e menos densos.

Os valores baixos de densidade obtidos para *M. venulosa*, indicam característica de dureza que a torna adequada para trabalhos de corte. Isso é um exemplo de como as propriedades da madeira pode ser variada e complexa, com diferentes características se destacando em diferentes contextos.

Watzlawick *et al.* (2011) observaram diferenças entre o teor de carbono de trinta e oito espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná. O estudo de Weber *et al.* (2006), ao analisar seis espécies naturais do ecossistema da Floresta Ombrófila Mista, encontraram valores para casca, folha, fuste, galho morto, galho vivo e serrapilheira que, em termos gerais, apresentaram valores médios entre 39,9 e 42,2%. Balbinot *et al.* (2003), ao avaliar o carbono presente em plantios de *Pinus taeda*, encontraram teores mais elevados nas acículas e menores teores de carbono na casca.

Hoppe (2003) atribui estas diferenças de concentrações de carbono às condições do solo e à capacidade que cada vegetal tem de fixar esse componente por meio do ciclo bioquímico, em função da mobilidade dentro da planta. A capacidade de armazenamento de carbono está ligada à absorção do carbono atmosférico (CO₂) pelas árvores, que, durante seu processo natural de fotossíntese, fixam o carbono em sua estrutura interna, resultando na produção de biomassa e na liberação de oxigênio para o ambiente (Silva *et al.*, 2015).

As espécies com teor de carbono acima de 50% representam um grupo que merece atenção especial devido às suas propriedades distintas, além disso essas espécies podem ter um papel importante na captura e armazenamento de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, oferecendo potencial para diversas aplicações, desde a indústria até iniciativas ambientais. Watzlawick *et al.* (2011) em seu estudo, afirma que em projetos voltados à fixação de carbono empregando as florestas nativas, podem ser baseados nas espécies ou nos grupos que apresentam maiores teores de carbono, seja por meio da média por espécie, seja por meio da seleção por componentes.

O carbono armazenado na madeira desempenha um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, pois ajuda na redução das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera. Em literaturas de estimativa de carbono em florestas é comum utilizar o percentual

de 0,5 da biomassa total, considerando-se que a biomassa seca tanto de folhosas como coníferas apresentam cerca de 50% de carbono (FANG *et al.*, 2001; FUKUDA *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2010; SOARES; OLIVEIRA, 2002;). No entanto, o estudo de Koehler *et al.* (2002), indica que a generalização pode promover graves erros de estimativas de estocagem de carbono.

Clark (2004) constatou que as florestas tropicais apresentam um reservatório de carbono, provavelmente devido ao aumento na concentração de carbono na atmosfera, que aumenta a produtividade da floresta. Literaturas com base em inventários florestais e cálculo de inversão dos transportes atmosféricos de CO₂ mostram que a região Amazônica age como sumidouro de parte do excesso de carbono na atmosfera, com totais entre 0,2 e 0,5 Gt C ano⁻¹, o que significa que a Amazônia como um todo poderia responder por 10 a 20% do sumidouro global de carbono da biota do planeta (NOBRE, 2001).

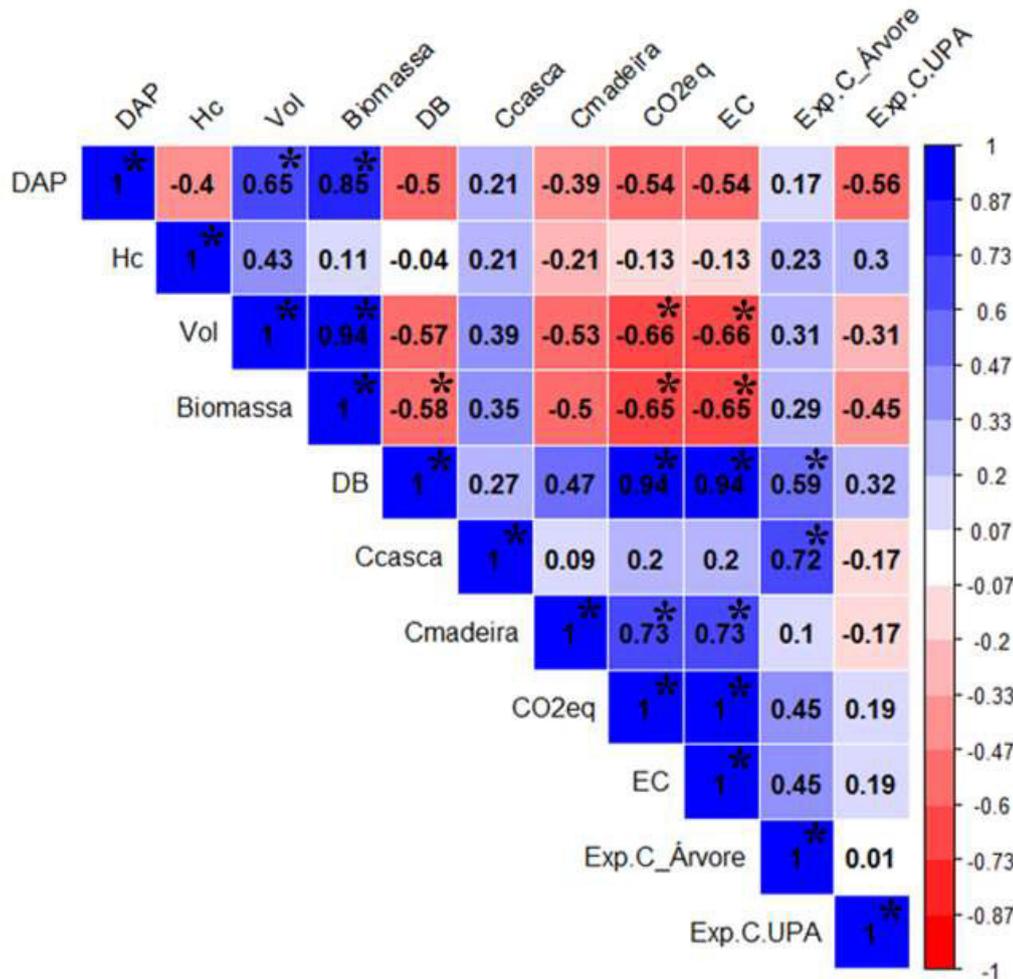
As florestas desempenham um papel importante na luta contra as mudanças climáticas quando são gerenciadas de forma sustentável. Ao absorverem carbono, elas se tornam uma poderosa ferramenta de mitigação. Além disso, ao fortalecer as práticas de gestão florestal, as quais oferecem um eficaz quadro para a redução e adaptação às mudanças climáticas, o manejo florestal não só protege o meio ambiente, mas também impulsiona o desenvolvimento econômico e promove o uso responsável da terra (FAO, 2008).

Higuchi *et al.* (2004), ao avaliar uma floresta primária na região de Manaus (AM), constatou que a floresta sequestra carbono a uma taxa de 1,2 t ha⁻¹.ano⁻¹, devido principalmente ao crescimento individual das árvores armazenadas dentro do sistema, compensando as perdas causadas pela mortalidade natural.

5.3 Efeitos de espécie e das características de crescimento no estoque de carbono

A análise dos coeficientes de correlação de Pearson entre as características dendrométricas e a análise elementar das doze espécies estudadas proporciona uma compreensão ampla das relações dentro do contexto florestal (Figura 14).

Figura 14 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as características dendrométricas e análise elemental para as doze espécies estudadas.



Em que: DAP = diâmetro a altura do peito; Hc = altura comercial; Vol = volume; Biomassa = Biomassa; DB = densidade básica; Cc = Carbono na casca; Cm = Carbono na madeira; CO2eq = Carbono equivalente; EC = estoque de carbono; Exp.C.Árv = Exportação de carbono na árvore; Exp.C.UPA = Exportação de carbono na unidade de produção anual. Fonte: Autora (2024).

A matriz de correlação simples entre as variáveis estudadas (Tabela 6) evidenciou que a variável com maior correlação com o estoque de carbono foi a densidade básica (0,94).

A Hc (Altura Comercial) tem correlação moderada e positiva com volume (0,43), sugerindo que a altura comercial tem uma relação positiva, mas menos forte, com o volume das árvores. Os valores de volume tem forte correlação positiva com Biomassa (0,94).

Dados de Carbono na Casca (Cc) indicaram correlação fraca com outras variáveis, sugerindo que o carbono na casca não está fortemente associado a outras características dendrométricas. Já os valores de CO2eq (Carbono Equivalente) tem correlação forte e positiva

com Db (0,94), Cm (0,74), Biomassa (1,00) e Estoques de Carbono (1,00), evidenciando uma relação próxima entre o carbono equivalente e essas métricas.

Valores determinados para Exportação de Carbono na Árvore (Exp.C.Árv) indicaram correlação moderada com Densidade básica (DB) (0,59) e forte com Carbono na casca (Cc) (0,72), apresentando uma relação positiva. Já as demais relações entre as variáveis não apresentaram correlações fortes. Essas observações fornecem uma visão geral das relações entre as características dendrométricas e análise elementar, sendo essenciais para entender a dinâmica e o impacto das variáveis estudadas na floresta em estudo.

Com a análise foi possível observar as diferenças percentuais comparando os valores reais de carbono com as estimativas baseadas na literatura para cada espécie, indicando se houve subestimativa ou superestimativa em relação aos valores reais (Tabela 7). Para *A. leiocarpa* observou-se superestimativa de 47,9%, enquanto para *A. lecointei* subestimativa de 23,1%. Esses números revelam a magnitude das discrepâncias entre as estimativas e os valores reais de carbono, proporcionando informações precisas das estimativas para cada espécie.

Tabela 7 – Estimativas de carbono exportado em doze espécies florestais, comparando os valores reais de carbono com as estimativas baseadas na literatura.

Espécie	C Exp. UPA (t/ha)	C Est. UPA (t/ha)	D (%)	Sub/Super
<i>A. leiocarpa</i>	709,1	661,2	47,9	6,8
<i>A. lecointei</i>	753,5	776,7	-23,1	-3,1
<i>B. guianensis</i>	1973,4	1883,0	90,4	4,6
<i>C. odorata</i>	157,6	155,5	2,1	1,3
<i>H. courbaril</i>	472,1	468,8	3,4	0,7
<i>H. elatum</i>	75,1	76,2	-1,1	-1,5
<i>M. elata</i>	4397,1	4461,3	-64,2	-1,5
<i>M. itauba</i>	230,3	218,0	12,3	5,3
<i>M. venulosa</i>	1791,4	2037,0	-245,7	-13,7
<i>P. pachycarpa</i>	4054,2	4156,5	-102,2	-2,5
<i>H. impetiginosus</i>	2417,8	2478,8	-61,0	-2,5
<i>H. serratifolius</i>	1389,7	1103,5	286,2	20,6

Em que: C Exp. UPA= Exportação de carbono real na unidade de produção anual em toneladas por hectare; C Est. UPA= Exportação de carbono estimado na unidade de produção anual em toneladas por hectare; D (%)= diferença dada em porcentagem; Sub= superestimativa quando o valor é positivo; Sub=Subestimativa quando o valor é negativo. Fonte: Autora (2024).

Observou-se alguns padrões gerais de sub/superestimação nas estimativas de carbono em relação aos dados reais (Tabela 8). Na madeira de *A. leiocarpa* foi observada uma

significativa superestimativa de 47,9%, destacando um potencial excesso nas estimativas de carbono para essa espécie. Em *A. lecointei* observou-se subestimativa de -23,1%, sugerindo que as estimativas para essa espécie são inferiores aos valores reais. Em *B. guianensis* os dados indicaram expressiva superestimativa de 90,4%, indicando uma tendência de estimar em excesso o carbono para essa espécie.

Para os valores encontrados na madeira de *C. odorata* houve pequena superestimativa de 2,1%, indicando uma razoável precisão nas estimativas de carbono. Em *H. courbaril* observou-se uma modesta superestimativa de 3,4%, indicando que as estimativas estão razoavelmente alinhadas com os valores reais. Enquanto para *H. elatum* uma leve subestimativa de -1,1%, sugerindo que as estimativas para essa espécie são ligeiramente inferiores aos valores reais.

Para *M. elata* observou-se uma subestimativa de -64,2%, indicando uma discrepância significativa nas estimativas de carbono para essa espécie, enquanto para *M. synandra* uma superestimativa de 12,3%, indicando uma tendência de estimar em excesso o carbono para essa espécie.

Em *M. venulosa* foi observada uma notável subestimativa de -245,7%, destacando uma diferença substancial entre as estimativas e os valores reais de carbono. Para *P. pachycarpa* houve expressiva subestimativa de -102,2%, indicando que as estimativas para essa espécie são significativamente inferiores aos valores reais. Para *H. impetiginosus* observou-se subestimativa de -61,0%, sugerindo uma diferença nas estimativas de carbono para essa espécie. Já para *H. serratifolius* uma significativa superestimativa de 286,2%, indicando uma propensão para estimar em excesso o carbono para essa espécie.

Observa-se uma tendência geral de superestimativa na maioria das espécies, com diferenças percentuais positivas. No entanto, *M. elata*, *M. venulosa* e *H. impetiginosus*, destacam-se por subestimativas significativas, indicando que as estimativas foram inferiores aos valores reais.

Os resultados fornecem informações valiosas para ajustes metodológicos visando aprimorar a confiabilidade das estimativas de carbono exportado. Para um estudo futuro, recomenda-se a revisão e ajuste dos fatores de conversão, considerando as características específicas de cada espécie. Além disso, a implementação de métodos mais específicos é sugerida para garantir estimativas mais precisas. Essa análise é importante para embasar decisões relacionadas à gestão florestal e conservação, proporcionando um entendimento mais refinado das dinâmicas de carbono em diferentes espécies florestais.

Os resultados da análise permitiram observar correlação positiva entre as classes de densidade básica na madeira e as métricas relacionadas ao carbono, como o teor de carbono, o carbono real e a massa de dióxido de carbono equivalente (Tabela 9). Observou-se que à medida que a densidade básica aumenta, proporcionalmente observou-se resultados mais elevados nessas variáveis.

Tabela 8 – Médias do teor de carbono nas diferentes classes de densidade básica.

Classe de DB	DB (g.cm ⁻³)	EC (Kg de C.m ⁻³)	C Real	C Real (%)	Massa CO ₂ eq (Kg de CO ₂ eq/m ³)	B (ton)	C_Exp_UPA (t/ha)
Alta	0,815	424,2	0,518	51,8	1555,5	3997,5	2020,9
Média	0,685	349,0	0,510	51,0	1279,5	294,3	152,7
Baixa	0,465	217,2	0,473	47,3	796,4	2192,5	974,5

Em que: DB = densidade básica; EC = estoque de carbono; C real= Carbono real; C real (%)= Carbono real em porcentagem; Massa CO₂eq= Carbono equivalente em quilo grama de dióxido de carbono equivalente por metro cúbico; B: Biomassa do fuste em toneladas; Exp.C.UPA= Exportação de carbono na unidade de produção anual em toneladas por hectare. Fonte: Autora (2024).

A biomassa do fuste e o carbono estocado para a unidade de produção anual (UPA) são menores em espécies com densidade média. Essa tendência pode ser atribuída à menor extração dos indivíduos dessa classe, sendo que há um interesse comercial mais acentuado nas árvores com alta densidade básica.

O valor médio, de densidade básica da madeira, na classe alta é de 0,815 g.cm⁻³. O teor de carbono na classe alta é significativamente alto, atingindo 424,2 Kg de C.m⁻³. Isso sugere uma alta capacidade de armazenamento de carbono nessa classe. O percentual de carbono real na classe alta é de 51,8%, diminuindo uma quantidade de carbono em relação à massa total.

Os resultados apontaram uma relação forte na alta classe de densidade básica, onde a massa de CO₂ equivalente (1555,5 Kg de CO₂ eq/m³), a biomassa do fuste (3997,5 ton) e a exportação de carbono na unidade de produção anual (2020,9) apresentam valores proporcionais. Essa constatação sugere uma associação direta entre a densidade básica mais elevada e diversos indicadores-chave relacionados ao armazenamento e ao fluxo de carbono.

A observação dos valores da classe média de densidade básica (0,685 g.cm⁻³) revelou uma relação positiva com as outras métricas avaliadas. Os valores de estoque de carbono (349,0 Kg de C.cm⁻³), carbono real (51%), massa de CO₂ equivalente (1279,5 Kg de CO₂ eq/m⁻³), biomassa do fuste (294,3 ton) e exportação de carbono na unidade de produção anual (152,7) demonstram uma variação proporcional em relação à classe de densidade.

Essa proporcionalidade sugere que, na classe média de densidade básica, as características relacionadas ao carbono, como estoque, composição real, e emissões equivalentes de CO₂, estão de acordo com a densidade da madeira. Além disso, a biomassa do fuste e a exportação de carbono na unidade de produção anual também seguem padrões proporcionais à densidade básica dessa classe.

Essa consistência nos valores sugere uma relação intrínseca entre a densidade básica da madeira e as propriedades associadas ao carbono e à biomassa, destacando a importância dessa classe específica na gestão florestal e na avaliação do carbono nas florestais.

A análise dos valores na classe de baixa densidade da madeira (0,465 g.cm⁻³) revela uma tendência de valores mais baixos em métricas relacionadas ao carbono, em comparação com classes de densidade mais alta. Os valores de estoque de carbono (217,2 Kg de C.cm³), carbono real (47,3%), massa de CO₂ equivalente (796,4 Kg de CO₂ eq/m³), biomassa do fuste (2192,5 ton) e exportação de carbono na unidade de produção anual (974,5) são inferiores, atribuídos ao fato de que, para as espécies com menor densidade básica, o volume de árvores é maior.

Essa observação é coerente com a relação inversa frequentemente encontrada entre densidade básica e volume de madeira. Espécies com menor densidade básica tendem a ocupar um volume maior para atingir a mesma biomassa que espécies de densidade mais alta. Portanto, mesmo que o estoque total de carbono possa ser substancial, as métricas por unidade de volume podem ser menores devido à menor densidade básica das árvores.

Essa análise destaca a importância de considerar não apenas o estoque total de carbono, mas também a densidade básica, ao avaliar o papel das diferentes classes de densidade na contribuição para o sequestro e armazenamento de carbono em ecossistemas florestais.

Vale ressaltar que a densidade tem influência dos aspectos relacionados à composição química e à estrutura e arranjo anatômicos, como a biometria das fibras, que quanto maior a parede celular, menor o tamanho dos espaços vazios, logo um aumento no volume da madeira, bem como a proporção do volume ocupado por parênquima e elementos de vasos, além da proporção entre cerne e alburno (OLIVEIRA; SILVA, 2003)

Além disso a composição química da madeira é composta principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina. Tanto a celulose quanto a hemiceluloses são polissacarídeos que contêm carbono, e a lignina é um polímero complexo que também contém carbono. Assim, a quantidade total de carbono na madeira está diretamente relacionada à quantidade desses componentes, pois são eles que contribuem para a matéria orgânica presente na madeira e, conseqüentemente, para a quantidade de carbono armazenada (KLOCK, 2013).

Ao monitorar o rendimento florestal, a orientação do manejo para árvores com alta densidade básica pode não apenas otimizar o sequestro de carbono, mas também alinhar-se aos objetivos de mitigação das mudanças climáticas. Estas informações fornecem uma base sólida para a implementação de estratégias mais eficazes de manejo florestal, levando em consideração a interligação entre densidade básica e variáveis relacionadas ao carbono.

6 CONCLUSÃO

Este estudo proporcionou uma análise abrangente da variabilidade interespecífica do teor de carbono em doze espécies arbóreas da Amazônia, destacando as diferenças significativas observadas entre as espécies estudadas. Essa análise ressalta o papel da diversidade florestal no armazenamento de carbono na região amazônica e enfatiza a necessidade de políticas de conservação que reconheçam e protejam essa diversidade.

Ao examinar a variabilidade do teor de carbono entre a madeira e a casca das doze espécies arbóreas, foram observados padrões distintos, demonstrando a importância de considerar diferentes partes da árvore ao avaliar seu potencial de sequestro de carbono. Esses resultados oferecem informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias de manejo florestal que otimizem o sequestro de carbono e promovam a sustentabilidade dos ecossistemas florestais.

Além disso, ao determinar o estoque de carbono considerando a densidade da madeira e o teor de carbono entre diferentes espécies, foram identificadas variações significativas que refletem as características únicas de cada espécie e seus respectivos habitats. Esses resultados são fundamentais para a gestão sustentável dos recursos florestais, fornecendo informações essenciais para a avaliação do potencial de sequestro de carbono e o desenvolvimento de estratégias de conservação.

Em suma, este estudo contribuiu significativamente para o entendimento do papel das espécies arbóreas da Amazônia no ciclo do carbono e destaca a importância de investigar ainda mais sua variabilidade e interações com o ambiente entre as diferentes espécies nativas da Amazônia.

Além disso, com base nos dados fornecidos na tabela de estimativas de carbono das espécies florestais estudadas, foi observada uma variação significativa nos valores de estoque de carbono por hectare (t/ha) entre as diferentes espécies. Por exemplo, espécies como *M. elata* e *P. pachycarpa* apresentam valores relativamente altos de estoque de carbono, enquanto outras como *H. elatum* e *A. lecointei* mostram valores mais baixos. Essa análise destaca a importância de considerar não apenas a diversidade das espécies, mas também as diferenças em sua capacidade de sequestro de carbono ao planejar estratégias de conservação e manejo florestal na região amazônica.

Para garantir uma avaliação abrangente do potencial produtivo da floresta (produtos e serviços), é recomendável ampliar os estudos sobre o estoque de carbono na madeira de árvores que compõem a floresta Amazônica, considerando outros fatores como taxa de crescimento,

disponibilidade de habitat, descrição das funções fisiológicas e ecologia por espécie florestal, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, G. P. **Análise de conflitos do sistema de concessões florestais no Brasil**. 2009. 239 f. Dissertação (mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) - Universidade de Brasília. Brasília, 2009.
- ALMEIDA, E.M.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; FINGER, Z. Determinação do estoque de carbono em teca (*Tectona grandis* L.f.) em diferentes idades. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 559-568, 2010.
- ALVES, R. C. *et al.*, Caracterização Anatômica Macroscópica de Madeiras Folhosas Comercializadas no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v.19, n.3, p. 352 – 361, 2012.
- ANDRADE, A.; JANKOWSKY, I. P. **Pisos de madeira: características de espécies brasileiras**. Piracicaba: Piracicaba Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira, 2015.
- ÂNGELO, H. *et al.* Análise estratégica do manejo florestal na Amazônia brasileira. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 341-348, 2014.
- ARAÚJO, E. C. G. *et al.* Estoque de carbono na madeira de *Eucalyptus*: relação material genético x espaçamento entre árvores. **Rev Agro Amb**, v. 14, n. 2, p. 505-513, 2021.
- ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v.37, n. 3, p. 399-416, 2007.
- ARAÚJO, A. *et al.* Análise das propriedades mecânicas e densidade básica de resíduos florestais de duas espécies madeireiras amazônicas. *In*: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2. 2015, Belo Horizonte - MG. Anais do II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2015. v. . p. -.
- ARAÚJO, E.; BARRETO, P. Estratégias e fontes de recursos para proteger as Unidades de Conservação da Amazônia. Belém, PA: IMAZON, p. 40, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT. 2003.
- ASSOCIAÇÃO DE AVALIAÇÃO ECOSSISTÊMICA DO MILÊNIO – AEM. **Ecosistemas e bem-estar humano**: estrutura para uma avaliação. Washington: Senac, 2005. 379p.
- BARBOSA, J. C.; INO, A.; SHIMBO, I. Indicadores de Sustentabilidade na cadeia produtiva de habitação em madeira de reflorestamento. *In*: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 8, 2000, Porto Alegre. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído **Anais...** Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), 2000. p. 181-188.
- BARBOSA, R. R. N. *et al.* Produção e sequestro de carbono na atmosfera. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v. 9, n. 16, p. 1783-1798, 2013.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2007.
- BATISTA F. G.; MELO, R. R.; CALEGARI L, MEDEIROS, D. T.; LOPES, P. J. G. Resistência natural da madeira de seis espécies à *Nasutitermes corniger* Motsch. em condição de campo. **Madera y Bosques**, v. 26, n. 2, e 2622017, 2020.
- BAKER, T. R. Variation in wood density determines spatial patterns in amazonian forest biomass. **Global Change Biology**, v. 10, n. 1, p. 545-562, 2004.

- BERNER, R. A.; LASAGA, A. C. Modeling the Geochemical Carbon Cycle. **Scientific American**, v. 260, n. 3, p.74-81, 1989.
- BESSA, D. M. **Ciclo do carbono na floresta amazônica: Percepções Ambientais de Moradores da Reserva Extrativista do Baixo Juruá, Amazônia Ocidental, Brasil**. 2019. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.
- BOWYER, J.L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J.G. **Forest products and wood science: an introduction**. 5th ed. Blackwell Publishing: Iowa, 2007, 557p.
- BOTOSSO, P. C. Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 65 p. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-52X; 194).
- BRAGA JÚNIOR, M. M. *et al.* Technological properties of woods used in boat's production in the Southeast of Pará, Brazil. **Rodriguésia**, v.71, e03322018, 2020.
- BRANDO, P. M., B. *et al.* The gathering firestorm in southern Amazonia. **Science Advances**, v. 6, n. 2, p. 1-9, 2020.
- BRANDO, P.M. *et al.* Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. **Annu. Rev. Earth Planet. Sci**, v. 47, n. 540, p. 555-581, 2019.
- BRASIL. Lei Federal nº 11.326/06, de 24 de julho de 2006b. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, p. 1-30, 24 jul. 2006. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br>> Acesso em: 16 jun. 2023.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília, DF, P. 1-280, 2011. 275 p. Assunto: Biodiversidade.
- CALDEIRA, M. V. W. *et al.* M. Determinação de Carbono Orgânico em Povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**. v.1, n. 2, p. 47-54, 2003.
- CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; MENDES, J.C.T. Can intensive management accelerate the restoration of Brazil's Atlantic forests **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1808-1814, 2010.
- CANNELL M.G. R; DEWAR R.C. Carbon allocation in trees: A review of concepts for modelling. **Advances in Ecological Research**, v. 25, n. 12, p. 59-104, 1994.
- CARLUCCI, M. B.; MARCILIO-SILVA, V.; TOREZAN, J. M. The Southern Atlantic Forest: Use, Degradation, and Perspectives for Conservation. *In: The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and opportunities of the mega diverse forest*. Switzerland: Springer, 2021. p. 91-111.
- CARNEIRO, F. S. *et al.* **Densidade da madeira de espécies florestais de quatro áreas experimentais da Amazônia oriental brasileira**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020. 59 p.
- CHAMBERS, J. Q. *et al.* Response of tree biomass and wood litter to disturbance in a Central Amazon forest. **Oecologia**, v. 141, n. 4, p. 596-611, 2004.
- CHAVE, J. *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005.
- CLARK, D. A. *et al.* Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological applications**, v. 11, n. 2, p. 371-384, 2001.

- CLARK, D. A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. **The Royal Society**, v. B, n. 359, p. 477-491, 2004.
- CLEMENTE, C. R.; HIGUCHI, N. A floresta amazônica e o futuro do. Brasil. **Cien e Cult.** v. 58, n. 3, p. 1-6, 2006.
- COHN, A. *et al.* Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emission by sparing land from deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences – PNAS**, v. 111. n. 20. p. 7236-7241. 2014.
- CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A.; PASTORE, T.C.M.; CHRISTO, A.G. 2010. **Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos.** Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/introducao>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- CORASSA, J. de N; CASTELO, P. A. R; STANGERLIN, D. M; MAGISTRALI, I. C. Durabilidade natural da madeira de quatro espécies florestais em ensaios de deterioração em campo. **Ciência da Madeira**, v. 04, n. 01, p. 108-117, 2013.
- CRISOSTOMO, A. C. *et al.* **Terras indígenas na Amazônia brasileira: reservas de carbono e barreiras ao desmatamento.** Brasília, DF: IPAM, 2015. 16 p.
- CUMMINGS, D. L. *et al.* Aboveground biomass and structure of rainforests in the southwestern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1-3, p. 293-307, 2002.
- D'ALMEIDA, M, L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: Celulose e Papel: Tecnologia da Fabricação da Pasta Celulósica. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. 559 p.
- DALLAGNOL F.S. *et al.* Estimativa dos teores de carbono por espectroscopia no infravermelho em *Merostachys skvortzovii* (bambusoidae). **Floresta**, v.43, n. 2; p. 281-288, 2013.
- DILLY, B. Florestas da região Sul auxiliam no estoque de carbono. 2021. Disponível em: <https://www.jornalvs.com.br/noticias/florestas-da-regiao-sul-auxiliam-no-estoque-de-carbono.html>. Acesso em 24 abri. 2021.
- EMBRAPA. **As florestas e os serviços ambientais.** 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br>. Acesso em 14 abr. 2023.
- EMBRAPA. **Cultivos de Pínus.** Sistemas de produção. 2014. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em 13 abri. 2023.
- EMBRAPA. **Manejo Florestal.** 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em 15 jun. 2023.
- FANG, J.; Chen, A.; Peng, C.; Zhao, S.; CI, L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. **Science**, v. 292, n. 5525, p. 2320-2322, 2001.
- FAO. Food and Agriculture Organization. **Global Forest Resources Assessment 2010:** Forestry Paper, 163. Main report. Rome: FAO, 2010. 1-338 p. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acesso em: 17 jun. 2023.
- FERREIRA, L.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O. desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos avançados**, v. 19, n.53, p. 157-166, 2005.
- FISCHER, H. *et al.* Palaeoclimate constraints on the impact of 2 °C anthropogenic warming and beyond. Nature Geoscience. **Springer Nature**, v. 11, n. 7, p. 474-485, 2018.
- FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, v. 2, n. 3, p. 67-74, 1971.

- FOGGIATO, W. S. **Apreensão de carbono em construções de madeira**. 2021. 43 f. Dissertação (mestrado em engenharia florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2021.
- FUKUDA, M.; IEHARA, T.; MATSUMOTO, M. Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. **Forest Ecology and Management**, v. 184, n. 1-3, p. 1-16, 2003.
- GATTO, A. *et al.* Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 895-905, 2011.
- GORGENS, E. B. *et al.*, Metodologia para Monitoramento do Estoque de Carbono: Revisão e Estudo de Caso. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 169-175, 2005.
- GRAÇA, P. M. L. A. **Conteúdo de carbono na biomassa florestal da Amazônia e alterações após a queima**. 1997. 105 f. Dissertação (mestrado em ciências florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1997.
- HARRIS, N. L. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 232, p. 234-240, 2021.
- HERMANN, A.; SCHLEIFER, S.; WRBK, T. The Concept of Ecosystem Services Regarding Landscape Research: A Review. **Living Rev.**, v. 5, n. 1, p. 1-37, 2011.
- HIGUCHI, N. *et al.* Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Revista Floresta**, v. 34 n. 3, p. 295-304, 2004.
- HIGUCHI, N. *et al.* Perspectivas do manejo florestal sustentável para à Amazônia brasileira. **Hiléia**, v. 5, n. 8, p. 78-93. 2007.
- HOPPE, J. M. Biomassa e nutrientes em *Platanus x acerifolia* (Aiton) Wild. estabelecido no município de Dom Feliciano – RS. Orientador: Mauro Valdir Schumacher. 2003. 143f tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. *In*: Emissão x seqüestro de CO₂ – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 38-76.
- HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; E GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **J. Geophys. Res**, v. 114, n. 2, 2009.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Ano Base 2019**. São Paulo. 2020. 80 p.
- INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA - IPAM. **Terras Indígenas na Amazônia Brasileira: reservas de carbono e barreiras ao desmatamento**. 14 p. 2015. Disponível em: <https://imazon.org.br>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA – IMAZON. **Áreas protegidas n Amazônia brasileira: avanços e desafios**. Belém. 2012. 3 p. Disponível em: <https://imazon.org.br>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA – IMAZON. **Polos madeireiros no Estado do Pará**. Belém. 2015. Disponível em: <https://imazon.org.br/polos-madeireiros-do-estado-do-para>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA – IMAZON. **Resumo Executivo do Plano de Manejo da Floresta Estadual do Paru**. Belém: Sema; Belém: Imazon, 2011. Disponível em: <https://imazon.org.br/resumo-executivo-do-plano-de-manejo-da-floresta-estadual-do-paru>. Acesso em maio de 2022.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Land use, land use change, and forestry special report. **Summary for Policymakers. Based on Watson, R. et al.** as Core Writing Team. Montreal. 2000.
- KASSAMBARA A.; MUNDT F. **factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses**. R package version 1.0.7, 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Acesso em 2 jun.2023.
- KEITH, P. *et al.* Estimating carbon carrying capacity in natural forest ecosystems across heterogeneous landscapes: addressing sources of error. **Global Change Biology**, v. 16, n. 11, p. 2971-2989, 2010.
- KELLER, M.; PALACE, M.; HURTT, G. Estimativa de biomassa na Floresta Nacional do Tapajós, Brasil: análise de amostragem e incertezas alométricas. **Ecologia e manejo florestal**, v. 154, n. 3, p. 371-382, 2001.
- KETTERINGS, Q. M. *et al.* Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and management**, v. 146, n. 1-3, p. 199-209, 2001.
- KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETA, C. R. (Ed.). **As florestas e o carbono**, Curitiba: [s.n.], p. 251-264, 2002.
- KUMAR, M. *et al.* Carbon dioxide capture, storage and production of biofuel and biomaterials by bacteria: a review. **Bioresource Technol**, v. 247, n. 960, p. 1059-1068, 2018.
- LEPAGE, E. S. *et al.* **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1986. 708 p.
- LIMA, M. D. R. *et al.* Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1-17, 2020.
- LINDNER, M.; KARJALAINEN, T. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials offorests in Europe: a short review of recent progress. **Europe Journal Forest Research**, v. 126, p. 149-156, 2007.
- LOBÃO M. D. *et al.* Agrupamento de espécies florestais pela similaridade das características físico-anatômicas e usos da madeira. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 97-105, 2010.
- LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point. **Science Advances**, v.4, n.2, 2018.
- LOVERIDGE, R. *et al.* Certified community forests positively impact human wellbeing and conservation effectiveness and improve the performance of nearby national protected areas. **Conservation Letters**, v. 14 n. 6, p. 1-9, 2021.
- MAASS, J. M. *et al.* Ecosystem services of tropical dry forests: Insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. **Ecology and Society**, v.10, n.1, p. 17. 2005.
- MACHADO, S. A.; URBANO, E.; JARSCHER, B.; TEO S. J.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R. Relações quantitativas entre variáveis dendrométricas e teores de carbono para *Mimosa scabrella Benth* da região Metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 12, n. 52, p. 37-60, 2006.
- MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT. p. 418, 1989.

- MALHI, Y. *et al.* The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Global Change Biology**, v.1, n. 12: p. 1107-1138, 2006.
- MALHI, Y.; GARDNER, T. A.; GOLDSMITH, G. R.; SILMAN, M. R.; ZELAZOWSKI, P. Tropical Forests in the Anthropocene. **Annu. Rev. Environ. Resour.**, v. 39, n. 1, p. 125-159, 2014.
- MARCENE, E. *et al.* Variação nos teores e estoques individuais de carbono fixado com o crescimento de *Gmelina arborea* Roxb. na região litorânea do Paraná, Brasil. **Scientia Forestalis**, v.0, n. 71, p. 55-63,
- MARQUES, M. H. B. Agrupamento de 41 espécies de madeira da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas. 125p. Orientador: Varlone Alves Martins. 2008.125f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- MEEHL, G. A. *et al.* **Global climate projections, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, edited by S. Solomon *et al.*, Cambridge Univ. press, Cambridge, U. K., 2007. p. 747-846.
- MELO, J. E.; CORADIN, V. R.; MENDES, J. C. **Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira.** In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, 1990. v. 3. p. 695-705.
- MENDIBURU F. **Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research.** R. package version 1.3-5, 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>. Acesso em 2 jun. 2023.
- MENDOZA, Z. M. S. H; BORGES, P. H. M.; MOREIRA, W.S. Teor de carbono em três espécies arbóreas provenientes de reflorestamento em Mato Grosso. **Multitemas.** v.0, n. 41, p. 35-49, 2012.
- MESQUITA, J. C. **Estratégias de controle social de unidades de conservação: desafios para uma gestão democrática e participativa.** 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Áreas Protegidas na Amazônia) – Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas, Manaus, 2014.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2000. Ferramenta de Avaliação de Unidades de Conservação - FAUC. 2020. Disponível em: <http://Arpa.mma.gov.br/fauc-2/>. Acesso em 17 jun. 2023.
- MIRANDA, D. C. L. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista.** 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- MOGNON, F.; ROCHA, M. R. L.; VASCONCELLOS, G. C. ICMS Ecológico por biodiversidade como incentivo a criação de Unidades de Conservação Municipais. In: AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M. **A preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável.** Ponta Grossa: Atena, 2019. 1-274p.
- MOGNON, F. **Dinâmica do estoque de carbono como serviço ambiental prestado por um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana localizada no Sul do Estado do Paraná.** 142 f. 2011. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- MULLER-LANDAU, H.C. Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. **Biotropica**, v. 36, n.1, p. 20-32, 2004.

- NAHUZ, A. R. **Catálogo de madeiras brasileiras para construção civil**. São Paulo, IPT. 2013.
- NEPSTAD, D. C. *et al.* Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v.398, n.6727, p. 505–508, 1999.
- NIBERT, K.; GROPENGIESSER, H. Understanding the greenhouse effect by embodiment – Analysing and using students' and scientists' conceptual resources. **International Journal of Science Education**, v. 36, n.2, p. 277-303, 2014.
- NOBRE, C.A., "Amazônia: fonte ou sumidouro de carbono?" Em: Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia. Ministério do Meio Ambiente, p.197-224, 2001.
- NOBRE, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.
- NOGUEIRA, E.M.; NELSON, B.W.; FEARNSSIDE, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 208, n. 1, p. 261-286, 2005.
- NOLTE, C. *et al.* Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences – PNAS**, v. 110, n. 13, p. 4956-4961, 2013.
- NOVAIS, T. N. O. Densidade da madeira: variável fundamental na determinação de uso e estimativa de estoque de biomassa Florestal. Orientador: Philip Martin Fearnside e coorientadora Flora Magdaline Benitez Romero; - Manaus. 2022. 53 f. o Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em Ciências de Florestas Tropicais), Instituto Nacional de Pesquisas, INPA, Manaus, 2022.
- OLIVEIRA, G. M. V. *et al.* Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do estado de Minas Gerais. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 345-352, 2012.
- OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **R. Árvore**, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.
- PAN, Y.; R. A. *et al.* The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, n. 1, p. 593–622, 2013.
- PEDRAZZI, C. *et al.* **Química da madeira**. 1. ed. Santa Maria: Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, 2019. 69 p.
- PHILLIPS, O. L.; BRIENEN, R. J. W.; RAINFOR. Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. **Carbon Balance Management**, v. 12, n. 1, p. 1- 9, 2017.
- POORTER, L.; BONGERS, F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 tropical forest species. **Ecology**, v. 87, n. 7, p. 1733-1743, 2006.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 2 jun. 2023.
- REZENDE, C. L. *et al.* From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V.; NARDELLI, A. M. B.; SOUZA, A. L. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da Zona da Mata Mineira. **Revista Árvore**, v. 34, n. 3, p. 495-504, 2010.

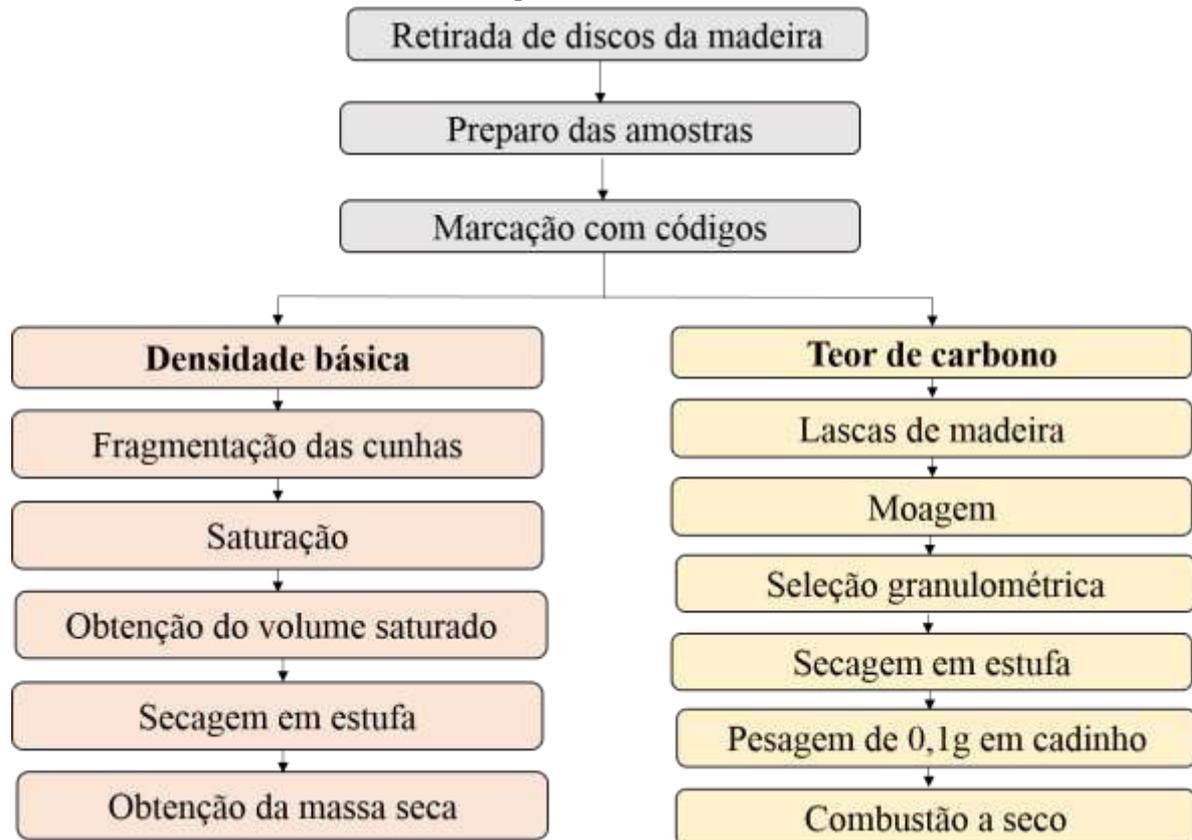
- RODRIGUES, M. I. *et al.* Concessão florestal na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1299-1308, 2020.
- ROMERO, F. M. B. Contribuição do manejo sustentável em floresta do bioma amazônico para minimização de gases de efeito estufa. Orientador: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine. Coorientadores: Sabina Cerruto Ribeiro e Carlos Moreira Miquelino Eleto Torres. 2018. 81f Tese (Doctor Scientiae) Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2018.
- ROMERO, F. M. B. *et al.* Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the Southwestern Amazon: A Case Study. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 874. 2020.
- SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2. ed. New York: Academic Press, 1993. 293 p.
- JANKOWSKY, I.P. *et al.* Madeiras brasileiras. Caxias do Sul: Spectrum, 1990. 172p.
- JULIO CEZAR HOFFMANN DOS SANTOS *et al.* Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies da amazônia. In: Anais congresso brasileiro de ciência e tecnologia da madeira, 2017, **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2017. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbctem/trabalhos/avaliacao-das-propriedades-fisicas-e-mecanicas-da-madeira-de-cinco-especies-da-a?lang=pt-br>> Acesso em: 08 fev. 2024.
- SANTOS, J. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira**. 1996. 121 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.
- SANTOS, J. P. S. **Estoque de carbono como indicador de serviços ecossistêmicos na Mata Atlântica em Sergipe**. Orientdor: Adauto de Souza Ribeiro. 2021 104 f. Dissertação (mestrado em desenvolvimento e meio ambiente) - Universidade Federal de Sergipe. São Cristovão, 2021.
- SANTOS, R. C. *et al.* Estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN. **Pesq. flor. bras.**, v. 36, n. 85, p. 1-7, 2016.
- SANTOS, R. C. *et al.* Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 493-504, 2013.
- SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Densidade básica da madeira de eucalipto. In: SIMPÓSIO CIENTÍFICO DOS PÓS-GRADUANDOS DO CENA, 10, 2017, Piracicaba. Novos tempos na pesquisa: transformação, liderança e inovação: **resumos...** Piracicaba: CENA/USP, 2017.
- SEBASTIEN, L., JOSSE J., HUSSON F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p.1-18, 2008.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF**. Brasília, 2019. Disponível em:< <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/>>. Acesso em: 20 de fev 2023.
- SHVIDENKO, A.; BARBER, C.V.; PERSSON, R. Forest and woodland systems. In.: Ecosystems and human well-being: Current state and trends. Millenium **Ecosystem Assessment Series**, v. 1. Chapter 21, 2005.
- SILVA, J. C. Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira. Orientdor: Sidon Keinert Júnior. 2002. 16f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002.
- SILVA, L; LIMA, H. Mudanças nomenclaturais no gênero Tachigali Aubl. (Leguminosae – caesalpinioideae) no Brasil. **Rodriguésia**, v.2, n.58, p-397-401, 2007.

- SILVA, C. A. *et al.* Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.
- SILVA, FERNANDO da. **Métodos não destrutivos como ferramenta para apoio aos planos de manejo sustentado na Amazônia**. Orientador: Niro Higuchi. 2012. 170f. Dissertação (mestrado em Política e Gestão Ambiental) - INPA. Manaus, 2012.
- SILVA, J. L. **Danos florestais e estimativa da redução no estoque de carbono em áreas de manejo florestal sob concessão pública: Floresta Nacional do Jamari – RO, Brasil**. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas, Manaus, 2014.
- SILVA, K. E. *et al.* Concessões de florestas públicas na Amazônia: desafios para o uso sustentável dos recursos florestais. **Bioikos**, v. 23, n. 2, p. 91-102, 2009.
- SILVA, L. F.; SILVA, M. L. CORDEIRO, S. A. Análise do mercado mundial de madeiras tropicais. **Revista de Política Agrícola**, v. 21, n. 3, p. 48-54, 2012.
- SILVEIRA, L.H.C.; REZENDE, A.V.; VALE, A.T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p.179 – 184, 2013.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. Viçosa: UFV, 2011. 278 p.
- SOARES, A. K. *et al.* Composição química e estabilidade dimensional da madeira de três eucaliptos. **Revista Matéria**, v. 23, n. 4, p. 1- 7, 2018.
- SOARES-FILHO, B.S., *et al.* Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, v. 107, n. 4, p. 10821–10826, 2010.
- SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.
- STEPHENSON, N. L. *et al.* Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. **Nature**, v. 507, n. 7490, p.90–93, 2014.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2013.
- TICKTIN, T. The ecological implications of harvesting non-timber forest products. **Journal of Applied Ecology**, v.41, n.1, p. 11–21, 2004.
- TRUGILHO, P. F. *et al.* Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 16 n.1, p.33-40. 2010.
- KLOCK, U.; ANDRADE, A. L. **Química da madeira**. Curitiba, 2013. 85p. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/Quimica%20da%20Madeira%202013.pdf>. Acesso em: 15 de Fev de 2024.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; MARTINS, I. S. Variação axial da densidade básica da madeira de *Acacia mangium* Willd aos sete anos de idade. **Ciência Florestal**, v. 9, n. 2, p. 85-92, 1999.
- VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; LEÃO, A.L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.
- VALE, A.T.; SARMENTO, T.R.; ALMEIDA, A.N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília - DF. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

- VALÉRIO, A. F. *et al.* Determinação da Densidade Básica da Madeira de Cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), ao longo do fuste. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 1, n. 1, p. 23-28, 2008.
- VITEL, C. S. M. N.; FEARNSTIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A. Análise da inibição do desmatamento pelas áreas protegidas na parte sudoeste do Arco de desmatamento. 1., 2008, Belém. *In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais...* Belém: INPA, 2009. p. 6377–6384.
- WATSON, J. E. M. *et al.* The exceptional value of intact forest ecosystems. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, n. 4, p. 599-610, 2018.
- WATZLAWICK, L. F. *et al.* Variação nos teores de carbono orgânico em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 3, p. 248-258, 2011.
- WEBER, K. S. *et al.* Teores de Carbono Orgânico de Seis Espécies Naturais do Ecossistema da Floresta Ombrófila Mista. **Ambiência Guarapuava**, v.2, n. 2, p. 167-177, 2006
- WHITE, C. **The Story of Carbon**. 2016. Disponível em: <www.awestthatworks.com>. Acesso em: 20 abr 2023.
- WICKHAM H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York. 2016. Disponível em: <https://ggplot2.tidyverse.org>. Acesso em: 2 jun. 2023.
- ZOBEL, B.J.; BUIJTENEN, J.P. van. Wood variation: its causes and control. Berlin, Springer-Verlag. 1989.
- ZWIENER, V. P. *et al.* Tree Diversity in the Brazilian Atlantic Forest: Biases and General Patterns Using Different Sources of Information. In *The Atlantic Forest*. Springer p. 115–131, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_6. Acesso em: 17 jun. 2023.

APÊNDICES

Figura 15 - Diagrama das análises laboratoriais para determinação da densidade básica e teor de carbono na madeira pelo método direto.



Fonte: Autora (2024).